

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральные государственные бюджетные образовательные учреждения  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
ЮРГИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
**«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Т.Ф. Горбачева»**

---

**ПРОИЗВОДСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
РАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
ГОРНЫХ МАШИН**

Монография

Издательство  
Томского политехнического университета  
2013

УДК 622.23.05

ББК 33.21

П80

*Авторы*

А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов,  
П.В. Бурков, С.П. Буркова, П.Д. Крестовоздвиженский

**Производство и эксплуатация разрушающего инструмента  
П80 горных машин:** монография / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев,  
А.М. Цехин и др.; Юргинский технологический институт. – Томск:  
Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 296 с.

ISBN 978-5-4387-0280-1

В монографии рассмотрены конструктивные особенности, материалы, технология изготовления и методики испытания разрушающего инструмента горных машин. Приведены результаты рентгенографических и кристаллохимических исследований влияния технологических процессов порошковой металлургии на структуру, фазовый состав и свойства твердосплавного материала. Рассмотрены механизмы взаимодействия инструмента с горной породой, закономерности его изнашивания и вопросы эксплуатации инструмента на угольных шахтах РФ.

Предназначена для специалистов в области горного дела, а также для широкого круга научных работников, аспирантов и студентов вузов горных специальностей.

**УДК 622.23.05**

**ББК 33.21**

*Рецензенты*

Доктор технических наук заведующий лабораторией  
угольной геотехники ИУ СО РАН

*В.В. Аксенов*

Кандидат технических наук, доцент кафедры строительных  
и дорожных машин ТГАСУ

*Д.Ю. Орлов*

Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой металлорежущих станков и инструментов  
КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева

*А.Н. Коротков*

ISBN 978-5-4387-0280-1

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ Юргинский  
технологический институт (филиал), 2013  
© Авторы, 2013

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная горнодобывающая промышленность остро нуждается в высокопроизводительных, надежных и безотказных машинах, агрегатах и комплексах, характеризующихся большим сроком службы, простотой и легкостью управления, малой продолжительностью ремонта и быстротой восстановления рабочих функций.

Производительность горной машины обуславливается двумя основными параметрами – ее энерговооруженностью и удельными энергозатратами процесса разрушения породы (угля). За последние 30 лет энерговооруженность горных машин существенно возросла. Например, для очистных комбайнов, работающих на мощных и средней мощности пластах, она увеличилась в 15–20 раз. Решив техническую задачу с первым параметром, конструкторы вынуждены были обратить особое внимание на снижение энергозатрат процесса разрушения породы.

Это, естественно, вызвало необходимость разработки новых конструкций режущих инструментов, материалов для их изготовления, обоснования рациональных параметров резцов, позволяющих снизить удельные энергозатраты, повысить их прочность и стойкость. Например, параметр «вылет резца» для радиальных резцов изменялся вслед за ростом энерговооруженности очистных комбайнов вначале с 65 до 80 мм, а в последние годы уже с 80 до 100 мм.

Правильный выбор режущего инструмента, схемы его расстановки и крепления на исполнительном органе позволяет увеличить производительность горной машины, обеспечивает снижение расхода резцов, сокращает время на их замену. Новый режущий инструмент имеет более широкую область применения: резцы очистных комбайнов до  $f=6$ , резцы проходческих комбайнов и бурильных машин  $f \leq 8$ .

При проектировании режущего инструмента в последнее время учтен многолетний опыт эксплуатации этого вида инструмента на горных машинах.

Современные резцы имеют рациональные параметры, что обеспечивает значительное уменьшение удельных энергозатрат процесса разрушения породы (угля).

Материал монографии базируется на отечественных стандартах для горного режущего инструмента и твердосплавных материалов, содержит подробное описание современных конструкций режущего инструмента горных машин. Рассмотрены вопросы взаимодействия инструмента с разрушаемым массивом и модели механического разрушения породы, описывающие этот процесс. Приведены конструктивные, геометрические элементы и параметры современного режущего инструмента, поставляемого на горные предприятия РФ ведущими отечественными и зарубежными заводами, фирмами, концернами.

Рассмотрены механизм, формы износа инструмента, а также технические решения, позволяющие повысить его стойкость. На основе результатов рентгенографических и кристаллохимических исследований установлено влияние технологических процессов порошковой металлургии на структуру, фазовый состав и свойства твердосплавного материала.

Приведены методики испытания горного режущего инструмента на прочность и перспективные технологические процессы его изготовления, позволяющие повысить его надежность. На основе общепринятых методик дана оценка удельного расхода режущего инструмента горных машин и условий его эксплуатации в конкретных горно-геологических условиях.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений технического прогресса в горнодобывающих отраслях промышленности является комплексная механизация очистных и подготовительных работ. В настоящее время на угольных шахтах работают высокопроизводительные горные машины, комплексы нового технического уровня. Техника развивается, появляются новые материалы, новые конструктивные решения породоразрушающего инструмента, исполнительных органов горных машин. Этот прогресс должен находить своевременное отражение в печатных изданиях, которые должны периодически обновляться, переиздаваться.

Современные представления механики разрушения горных пород свидетельствуют о том, что главным действующим звеном на всех этапах развития горнодобывающей техники неизменно остается резец. Производительность очистного или проходческого комбайнов как в прежней, так и в современной высокомеханизированной шахте определяется процессом взаимодействия инструмента и разрушаемого массива.

Основная задача, которую ставили авторы книги при подготовке рукописи состояла в том, чтобы заполнить имеющийся информационный пробел, ознакомить специалистов предприятий, студентов и аспирантов вузов горного профиля с историческими аспектами развития, современным состоянием вопросов исследования, конструирования, производства и испытания разрушающего инструмента горных машин.

# 1. НАЗНАЧЕНИЕ РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Рабочий инструмент непосредственно выполняет ту работу, для которой создана горная машина и ее исполнительный орган – разрушает уголь или горную породу.

От рабочего инструмента в значительной степени зависит производительность горных машин и труда рабочих, износ и долговечность машин, расход энергии, качество и себестоимость добываемой продукции.

Рабочие инструменты горных машин эксплуатируются в тяжелых условиях: переменные по характеру и величине нагрузки, пиковые значения которых в 5–10 раз превышают средние значения; изменчивые свойства разрушаемых углей и пород; повышенные температуры и др. Повышение производительности и энерговооруженности горных машин ведет к увеличению нагрузок на рабочие инструменты, что предъявляет все возрастающие требования к их прочности и стойкости.

Контроль и наблюдение за состоянием рабочих инструментов во время работы, как правило, затруднительны. Поэтому рабочие инструменты горных машин должны удовлетворять следующим требованиям:

- эффективно разрушать уголь и горную породу с наименьшими затратами энергии;
- обладать достаточной прочностью и износостойкостью;
- обеспечивать высокую сортность добываемого полезного ископаемого (угля) и минимальное пылеобразование;
- иметь форму, размеры и геометрические параметры, соответствующие механике разрушения пород, конструкции исполнительного органа и кинематике его работы;
- иметь простое и надежное закрепление на исполнительном органе, исключающее потерю рабочего инструмента и обеспечивающее быструю замену его при износе;
- быть технологичными в изготовлении и восстановлении;
- иметь невысокую стоимость изготовления и эксплуатации.

## 2. УСЛОВИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГОРНОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА

В угольной отрасли при добыче полезных ископаемых основные технологические процессы связаны с разрушением горного массива. В настоящее время одним из основных способов разрушения горного массива является механический способ, который осуществляется посредством породоразрушающих инструментов.

Область его применения с каждым годом расширяется в связи с созданием более совершенных угледобывающих [1, 2, 3] и проходческих машин [4], а также механизированных комплексов [5]. Поэтому правильная оценка эффективности разрушения углей [6, 7, 8] и вмещающих пород [9] рабочими инструментами является необходимым звеном в решении задач горного производства, в частности определения таких параметров, как производительность и нагруженность горных машин.

Разрушение горных пород производится со значительными затратами энергии, которые определяются, прежде всего, прочностью пород. Прочность горных пород, в свою очередь, зависит от их внутреннего строения, состава и физических свойств составляющих их минералов.

Факторы, влияющие на сопротивление угольного пласта разрушению, можно разделить на природно-генетические, характеризующие свойства углей, и горнотехнологические, предопределяющие состояние угля в массиве в момент добывания. К первой группе относят исходный материал угленакопления, степень метаморфизации, трещиноватость, наличие породных прослоек и твердых минеральных включений.

Сочетания этих факторов определяют разнообразие механических свойств и строения пласта. Угольный пласт разбит на отдельности, на нем ясно выражены плоскости напластований, кливажные трещины. Поэтому даже в первом приближении он не может быть представлен схемой однородного изотропного тела.

На нарушение сплошности угольного массива (отжим угля) влияют факторы второй группы, которые делят на факторы, обуславливающие проявление отжима (глубина залегания пласта, свойства и строение боковых пород, мощность и строение пласта, геотектоника участков, газонасыщенность) и технологические факторы, позволяющие управлять интенсивностью отжима (ширина призабойного пространства, тип, плотность и жесткость призабойной крепи, скорость подвигания и время обнажения забоя, направление выемки относительно кливажа кровли и др.).

Отмеченные факторы, совокупно действующие в пространстве и во времени, обуславливают существенное различие сопротивления разрушению массива от сопротивления разрушению образцов отдельных компонентов и значительную изменчивость в пространстве характеристик разрушаемости пласта.

В свете приведенных соображений был сформулирован основной методологический принцип в оценке разрушаемости углей, сводящийся к тому, что сопротивление разрушению не является имманентным свойством углей – оно зависит от природно-генетических и горнотехнологических факторов. В силу существенной неоднородности массива его разрушение следует рассматривать, как случайный процесс и описывать соответствующими статистическими характеристиками.

Горные инструменты работают в тяжелых условиях: переменные по характеру нагрузки с пиками 5–8 и большей кратности относительно средних; изменчивые свойства разрушаемых пород и др.

Повышение производительности и мощности горных машин приводит к увеличению нагрузок, что предъявляет все возрастающие требования к прочности и стойкости инструментов. Наблюдение за состоянием инструмента во время работы нередко затруднительно. Поэтому к горным инструментам предъявляют следующие требования:

- эффективность разрушения горной породы с меньшим расходом энергии и с высокой производительностью;
- прочность и износостойкость, особенно твердосплавной вставки;
- возможность регламентированной замены изношенных комплектов инструментов после выемки заданного объема угля или проведения выработки при безлюдной выемке и работе без постоянного присутствия людей в забое;
- высокая сортность добываемого полезного ископаемого (угля) и минимальное пылеобразование;
- соответствие формы, размеров и геометрических параметров резцов свойствам разрушаемых пород,
- соответствие конструкции исполнительного органа к кинематике его движения;
- простота и надежность закрепления в державках;
- возможность быстрой замены при износе;
- технологичность в изготовлении;
- удобство для осмотра, восстановления, а также невысокая стоимость изготовления и эксплуатации.

В настоящее время в Кузнецком угольном бассейне разрабатываемые пласты распределяются по мощности следующим образом [9]:

- 73 % – средней мощности (1,8–3,5 м);
- 17 % – мощностью 3,51–5,0 м;
- 10 % – мощностью более 5,0 м.

Анализ строения угольных пластов Кузбасса показал, что 38,4 % пластов – это чисто угольные или угольные с присечками аргиллитов, соизмеримых по разрушаемости с углем. Отработка этих пластов не вызывает осложнений при эксплуатации горного инструмента. Около 35 % пластов включают прослойки алевролитов и песчаников. Остальные пласты насыщены твердыми включениями. То есть 61,6 % пластов относятся к трудноразрушаемым. При отработке этих угольных пластов удельный расход резцов (шт./1000 т) в 10–13 раз [10, 11] превышает этот параметр – средний по Кузбассу. Большой удельный расход резцов значительно увеличивает себестоимость 1 тонны угля, снижает производительность горной машины из-за вынужденных простоев по замене инструмента.

По пределу прочности на сжатие углевмещающие породы могут быть разделены на шесть классов (табл. 2.1) [9]. В среднем по Кузбассу коэффициент крепости присекаемых пород составляет  $f=4-7$  (по шкале М.М. Протодьяконова).

Большая часть угольных пластов Кузбасса характеризуется сложным строением, обусловленным наличием прослоек горных пород, которые представлены аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Алевролиты А1, А2 имеют крупнозернистую структуру со слюдистокремнистоглинистым цементом между зернами. А3 – мелкозернистую, а А4 – тонкозернистую структуру с преобладанием глинистого цемента [12]. В табл. 2.2 показана прогнозная характеристика пласта Толмачевского и вмещающих пород.

Установлено, что аргиллиты имеют размер зерен  $d=0,001-0,06$  м, алевролиты –  $d=0,01-0,08$  мм, мелко- и среднезернистый песчаник –  $d=0,01-0,6$  мм, крупнозернистый песчаник –  $d=0,6-1$  мм, а также колчедан –  $d=0,3-3$  мм [13, 14]. То есть увеличение размера зерен приводит к возрастанию прочностных показателей горных пород, а увеличение про-

центного содержания цементного заполнителя, наоборот, уменьшает эти показатели. Средние показатели физико-механических свойств присечек и включений приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.1

*Классификация горных пород Кузнецкого бассейна по пределу прочности при сжатии*

Класс	Характеристика породы по прочности	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	Доля в исследованных массивах, %
I	Весьма прочные	> 150	4
II	Прочные	90–150	10
III	Выше средней прочности	70–90	20
IV	Средней прочности	40–70	41
V	Слабые	20–40	18
VI	Очень слабые	< 20	7

Таблица 2.2

*Характеристика пласта Толмачевского*

Литологическая колонка	№ слоя	Описание пород	Сопротивляемость		Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	Коэффициент	
			сжатию $\sigma_{сж}$ , МПа	растяжению $\sigma_p$ , МПа		разрыхления $K_p$	крепости $f$
	1	Основная кровля: песчаник. $t = 6-8$ м	60	6,9	2,5	2,2	6,0
	2	Непосредственная кровля: алевролит. $t = 2-6$ м	35–40	3,5	2,5	2,0	3,5–4,0
	3	Ложная кровля: алевролит. $t = 0,1$ м	15–20	1,0	1,8	1,8	1,5–2,0
	4, 6	Уголь $t$ : 4 = 1,15 м; 6 = 0,95 м	13	0,9	1,28	1,4	1,3
	5	Прослойка алевролита. $t = 0,30$ м	20–30	3,0	2,3	1,8	3,0
	6	Ложная почва: алевролит. $t = 0,05$ м	15–25	1,0	2,0	1,7	1–1,5
	7	Почва пласта: алевролит. $t = 4-6$ м	35–50	3,7–4	2,5	1,8	3,5–4,0
	8						

Таблица 2.3

*Физико-механические свойства присечек и включений*

Прослойки, включения	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа	Предел прочности на растяжение $\sigma_r$ , МПа
Аргиллиты	20,5–30,1	2,9–3,6
Алевролиты	25,5–46,5	3,9–5,8
Песчаники	53,0–80,6	5,6–8,2
Твердые включения	57,0–70,0	6,0–7,3

В этом плане на кафедре горных машин и комплексов Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ) выполнен цикл научно-исследовательских работ, позволяющих описать механику и установить критерии хрупкого разрушения как присечек, так и твердых включений инструментом горных машин. Без знания механизма взаимодействия инструмента с породой невозможно обоснованно выбирать рациональные геометрические параметры как инструмента, так и исполнительного органа горной машины.

### 3. МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД РАБОЧИМ ИНСТРУМЕНТОМ ГОРНЫХ МАШИН

На кафедре горных машин и комплексов КузГТУ проведен анализ современных теорий разрушения горных пород инструментом очистных, проходческих комбайнов и разработаны новые математические модели процесса взаимодействия рабочего инструмента с разрушенным массивом. Эти модели рассматривают процессы с позиций зарождения и развития трещин под лезвием горных инструментов, приводящих к разрушению породы. При этом порода в моделях представлена структурой, состоящей из зерен, связанных между собой «цементирующим» веществом. Разработанные модели зернистых пород позволили исследовать процессы зарождения, прорастания, слияния микротрещин по границам зерен и установить влияние геометрических параметров горных инструментов на процесс взаимодействия инструмента и породы.

Так как горная порода имеет зернистую структуру, то развитие микротрещин происходит по границам зерен породы. Исследования показали [13], что разрушение горных пород осуществляется по «цементирующему» веществу, связывающему зерна горных пород. Чтобы убедиться в этом, достаточно взглянуть на поверхность разрушения породы. Она имеет шероховатый вид с углублениями и выступами. Это подтверждает тот факт, что разрушение происходит именно по связующему зерна материалу, причем при любом типе инструмента.

Анализ результатов моделирования контактного взаимодействия инструментов различной геометрической формы с горными зернистыми породами показал, что геометрическая форма инструментов, упругие характеристики цемента, скрепляющего зерна, материал и размеры зерен оказывают существенное влияние на формирование микротрещин по границам зерен породы. Чем больше размер зерна, тем больше прочность породы.

#### 3.1. Моделирование методами разрывных смещений и фотоупругости

Раскрытие и развитие микротрещин в горных породах от внешних усилий, создаваемых горными инструментами, моделировалось на основе методов: фиктивных нагрузок и разрывных смещений. Эти методы позволяют определить раскрытие, смещение берегов макротрещины и установить напряжения у вершины трещины в зависимости от воздействия инструментов на горную породу.

Схемы начала процесса трещинообразования [13] при упругопластическом внедрении острого (рис. 3.1, *а, б*) и тупого (рис. 3.1, *в, г*) инструментов показывают, что под их лезвием образуется ядро *1*, зона пластической деформации породы и система микротрещин: конических, осевых *2*, радиальных *4* и боковых *3*.

Инструмент (рис. 3.1, *а, б*) с небольшим углом заострения  $\varphi = 30\text{--}45^\circ$  при нагружении формирует в породе осевую трещину *2* вглубь породы, при этом ее направление совпадает с направлением движения инструмента. При внедрении в породу острого инструмента под режущей кромкой зона пластической деформации (ядро) имеет небольшие размеры *1*, поэтому микротрещина формируется практически, под лезвием инструмента. Увеличение нагрузки приводит к устойчивому росту этой трещины. При снятии нагрузки (рис. 3.1, *б*) осевая трещина закрывается и возникают боковые трещины, которые выходят на поверхность и приводят к сколу породы. При внедрении в породу тупого инструмента ядро *1* имеет большие размеры, поэтому осевая трещина *2* начинает формироваться на границе ядра и ненарушенной зернистой горной породы (рис. 3.1, *в*).

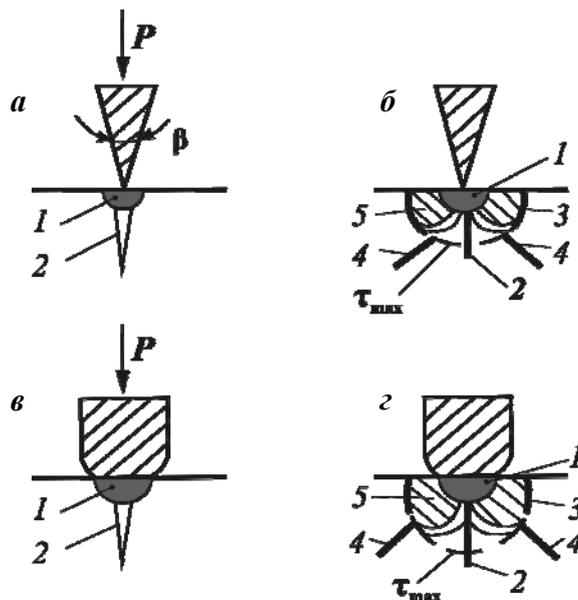


Рис. 3.1. Схемы трещинообразования:  
а, в – при нагружении; б, г – при разгрузке

При снятии нагрузки (рис. 3.1, г) осевая трещина 2 закрывается и образуются боковые 3 и радиальные 4 трещины. Так как под лезвием напряжения в породе достигают большой величины, материал породы дробится, уплотняется. Ядро уплотнения является механическим продолжением горного инструмента. Объем ядра после разрушения больше, чем объем до разрушения. В этой связи материал ядра давит в стороны, образуются боковые трещины и порода в зонах 5 скалывается.

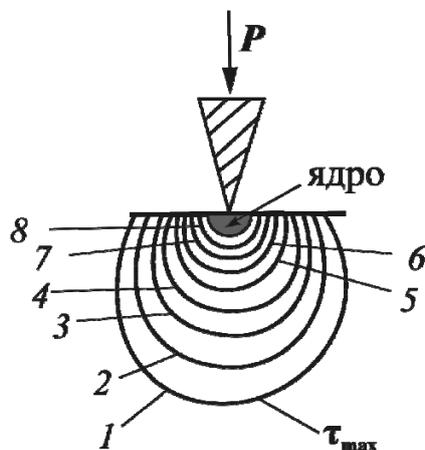


Рис. 3.2. Изохромы максимальных касательных напряжений ( $\tau_{max}$ )

Исследования методом фотоупругости, проведенные на кафедре горных машин и комплексов КузГТУ, показали, что боковые трещины (рис. 3.1) совпадают по траекториям с максимальными касательными напряжениями ( $\tau_{max}$ ). На рис. 3.2 [15, 16, 17] цифры соответствуют порядковому номеру полосы изохромы, который пропорционален  $\tau_{max}$ . Из рисунка видно, что чем ближе изохрома к лезвию инструмента, тем больше  $\tau_{max}$ , и в результате под режущей кромкой инструмента в породе образуется ядро, состоящее из мелкодисперсных фракций. Как показывают результаты исследований, до 95 % пыли, которую необходимо подавлять, формируется именно в ядрах при взаимо-

действии горного инструмента с породой. Поэтому на всех современных горных машинах, разрушающих породу, форсунки для подавления пыли водой устанавливаются как можно ближе к инструменту, к месту зарождения ядра.

Исследования взаимодействия тангенциальных поворотных резцов (ТПР) с породой, выполненные в Кузбассе [17], подтверждают результаты моделирования. Разрушение породы под «конусом» начинается на глубинах гораздо меньших, чем под «эллипсоидом», и соответственно за одно нагружение под «конусом» будут разрушаться меньшие объемы породы. Однако необходимо учитывать, что для разрушения породы «эллипсоидами» требуются большие усилия и затраты энергии (рис. 3.3, 3.4).

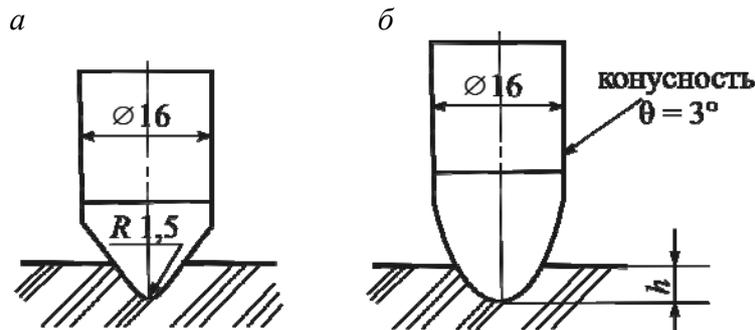


Рис. 3.3. Конусная (а) и эллипсоидная (б) твердосплавные вставки

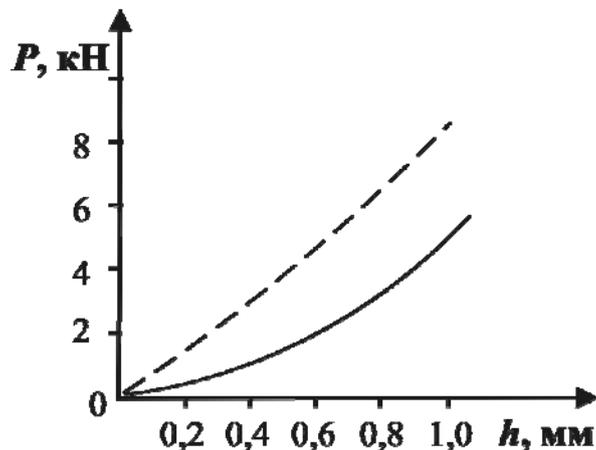


Рис. 3.4. Зависимость усилия внедрения  $P$  от глубины  $h$  для вставок в форме: — конуса; — — эллипсоида

Вместе с этим «эллипсоидные» вставки имеют большую длину дуги контакта с породой, что позволяет «пропустить» через границу вставка – порода значительную энергию. В связи с ростом энерговооруженности современных очистных и проходческих комбайнов конструкторы инструмента изменили свои взгляды на процесс взаимодействия инструмента с породой. В настоящее время предпочтение отдается именно «тупому» инструменту как более прочному и надежному.

Анализ полученных в результате моделирования зависимостей показывает, что:

- чем острее инструмент, то есть чем меньше угол заострения  $\beta$ , тем меньше необходимо приложить усилие для роста устойчивой трещины;
- зависимость  $P=f(\beta)$  имеет параболический характер распределения (рис. 3.5). Возрастание угла заострения инструмента  $\beta$  от  $25^\circ$  до  $45^\circ$  увеличивает нагруженность инструмента  $P$  в 2,18–3,49 раза.

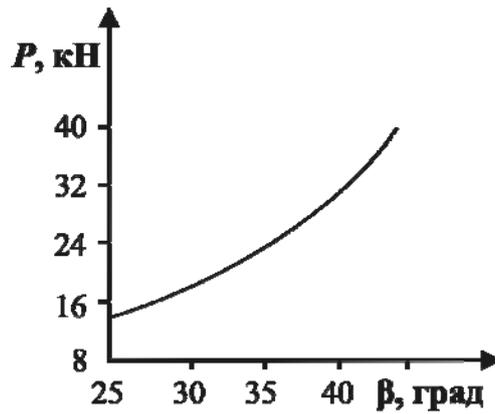


Рис. 3.5. Зависимость усилия внедрения  $P$  от угла заострения инструмента  $\beta$

При разрушении хрупких пород процесс резания начинается с образования, как было отмечено выше, уплотненного ядра (рис. 3.6).

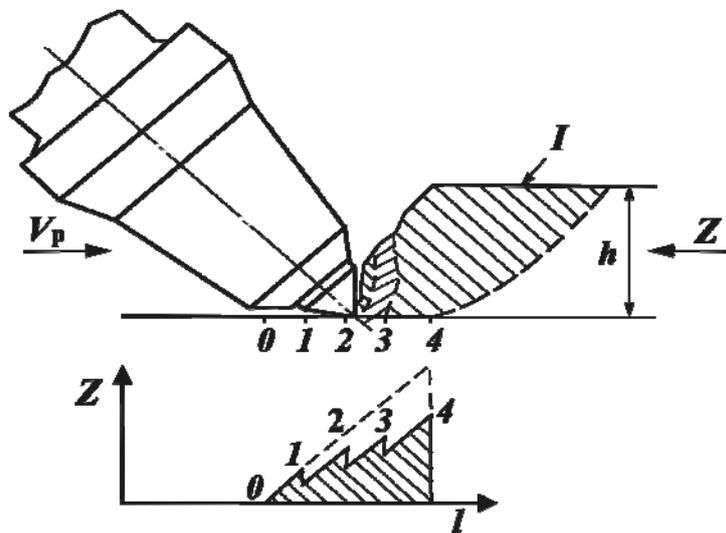


Рис. 3.6. Схема резания породы режущим инструментом:  
 $Z$  – усилие резания;  $h$  – глубина резания;  
 $l$  – расстояние, пройденное резцом за цикл скалывания породы

Далее формируется система микротрещин, что сопровождается скалыванием мелких элементов породы 1, 2, 3. Заканчивается цикл формированием, раскрытием макротрещины и скалыванием крупного элемента породы 4 в направлении свободной поверхности  $I$ . Макро- и микротрещины показаны на рис. 3.6 пунктирными линиями. Заштрихованная часть диаграммы характеризует энергию, затраченную на процесс резания, а незаштрихованная – ту часть энергии, которая израсходована ранее на напряженно-деформированное состояние породы [17].

Описание нагруженности режущего инструмента при разрушении углей и хрупких пород базируется обычно на том, что процесс резания представляет собой непрерывное чередование контактного дробления (с образованием ядра уплотнения) с отрывами мелких и крупных кусков угля.

В процессе продвижения резца часть мелкодробленого ядра с большой скоростью выдавливается вдоль передней грани, а сфера дробления непрерывно расширяется, увеличивая площадь контакта резца с ядром до момента отделения крупного эле-

мента породы. Условия образования уплотненного ядра и его размеры зависят от геометрии инструмента и параметров режима резания.

При дроблении происходит увеличение силы резания, а отрывы небольших элементов стружки сопровождаются выбросом мелкодробленого ядра и некоторым снижением силы резания. После завершения отдельного скола, когда от массива отделяется крупный элемент, сила резания падает до нуля или близкой, к нулю величины.

На основании материала изложенного выше, можно сделать основополагающие выводы:

а) энергия контактного дробления и трения режущего инструмента о породу неизмеримо более высокая по сравнению с энергией образования трещин;

б) процесс разрушения, при котором отношение объема раздробленного материала к объему скальваемого минимально, является с энергетической точки зрения оптимальным;

в) уголь и сопутствующие горные породы целесообразно разрушать стружками достаточно больших сечений при сравнительно небольших скоростях резания.

Если резцы работают совместно, то при оптимальном полублокированном режиме резания (рис. 3.7) после прохода резцов на забое не остается целиков. На основе экспериментальных данных [17] оценен энергетический баланс, например, процесса резания угля:

- 50–78 % – образование ядра;
- 20–46 % – трение резца об уголь;
- 1 % – образование трещин.

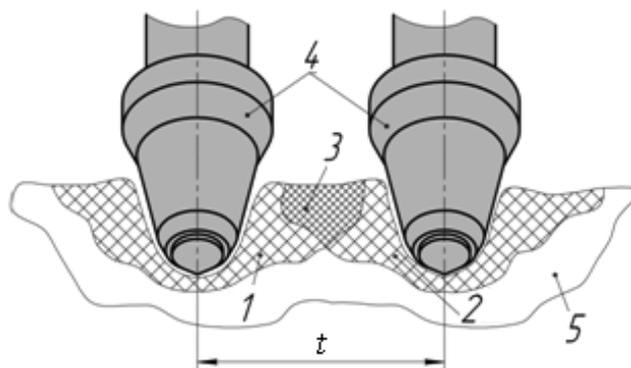


Рис. 3.7. Эффект совместного воздействия резцов

на разрушаемую среду при оптимальном значении шага установки резцов:

- 1, 2 – зоны разрушения при внедрении одиночного резца;  
3 – зона разрушения, вызванная совместным воздействием резцов на забой;  
4 – ТПР; 5 – разрушаемая среда; t – шаг установки резцов

Таким образом, подавляющая часть энергии при резании углей и пород расходуется на образование ядра. Уменьшение размера ядра, естественно, уменьшает затраты энергии и повышает эффективность процесса резания.

Как видно из рис. 3.8, с увеличением угла резания  $\delta$  радиального резца происходит увеличение объемов уплотненных ядер, так как при  $\delta > 90^\circ$  макротрещина направлена вглубь породы, что затрудняет ее выход на свободную поверхность и скальвание породы. Поэтому по ГОСТ Р 51047-97 [18] радиальные резцы РО-40, РО-65, РО-80, РО-100, РПП имеют угол резания  $\delta = 80-90^\circ$  и армируются пластинками твердого сплава с клиновидной формой передней грани.

Опыт эксплуатации резцов с клиновидной передней гранью показал, что этот инструмент разрушает присечки породы с меньшими энергоемкостью и пылеобразованием.

ем, а также обеспечивает большую стойкость и меньший износ инструмента. Эти ощутимые преимущества объясняются отличием в механике разрушения породы резцов, существовавших ранее, с плоской передней гранью, и резцов с клиновидной формой грани. Клиновидная передняя поверхность замещает часть объема ядра, улучшает формирование макротрещины, скалывание породы.

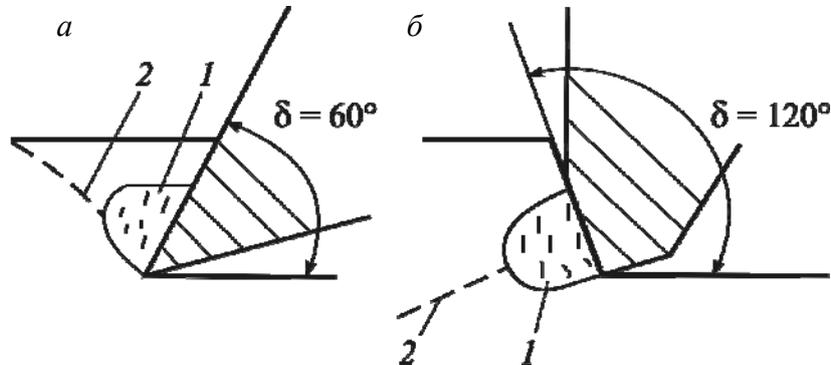


Рис. 3.8. Влияние угла резания на формирование ядра:  
1 – ядро; 2 – макротрещина

Анализ результатов моделирования [14] показал, что перед лезвием инструмента в породе по границам зерен образуется вертикальная сеть микротрещин, расположенных параллельно направлению движения инструмента (рис. 3.9, а, б).

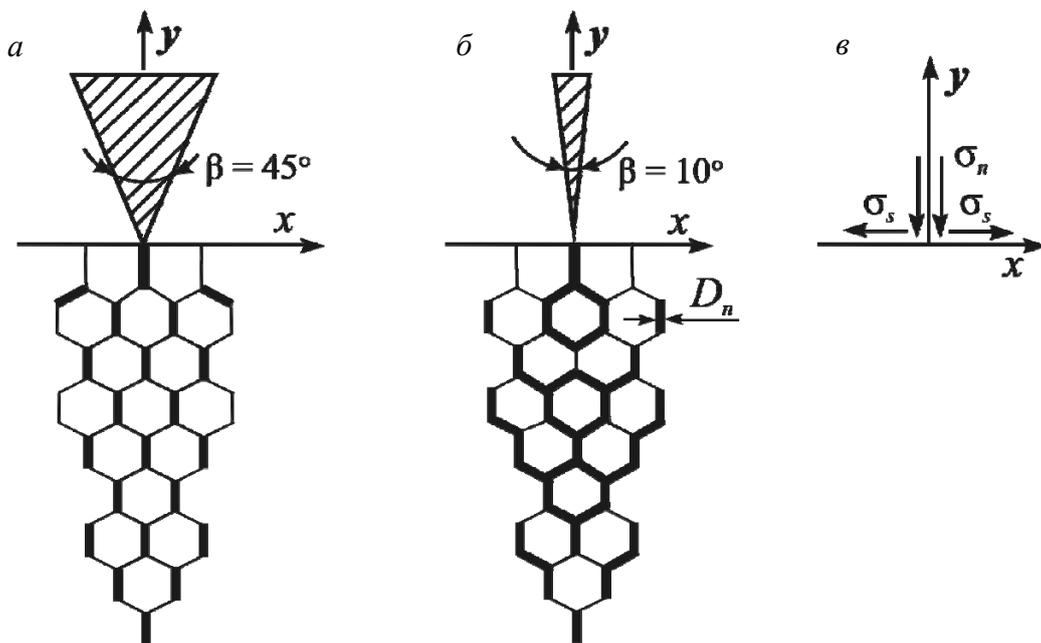


Рис. 3.9. Раскрытие микротрещин по границам зерен породы

Данные микротрещины формируют осевую трещину. Характер и величина раскрытия микротрещин по границам зерен зависят от соотношения нормальных  $\sigma_n$  и касательных  $\sigma_s$  составляющих напряжений на границе контакта инструмента с породой (рис. 3.8, в).

Если  $\sigma_n > \sigma_s$ , то зерна смещаются вглубь породы и раскрытие микротрещин по границам зерен происходит на некотором расстоянии от свободной поверхности ( $x$ ). Если  $\sigma_n < \sigma_s$ , то раскрытие микротрещин осуществляется непосредственно от свобод-

ной поверхности. При  $\sigma_n = 0$ , а  $\sigma_s > 0$  происходит полное раскрытие микротрещин по границам зерен. Как показали результаты расчетов, при размере зерен  $d = 1$  мм, ширине цемента между зернами  $h = 0,1d$  и при углах заострения инструментов  $\beta = 5-45^\circ$  раскрытие микротрещин по нормали  $D_n$  было в диапазоне от  $3,5448 \cdot 10^{-3}$  до  $4,0247 \cdot 10^{-9}$  см.

Величина раскрытия микротрещин по границам зерен зависит от упругих свойств цементного заполнителя и размера зерна. Увеличение размера зерен увеличивает раскрытие микротрещин (рис. 3.9). Зависимость усилия  $P$  на лезвии инструмента от размера зерна  $d$  и угла  $\beta$  заострения инструмента представлена на рис. 3.10.

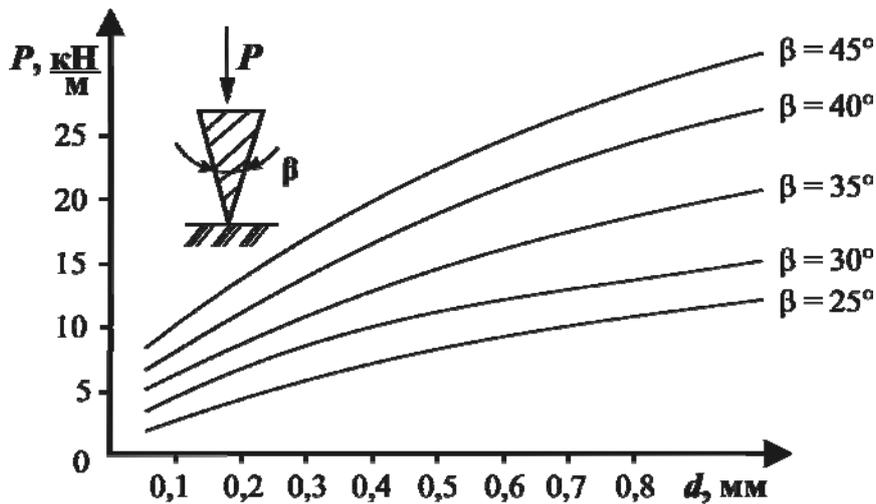


Рис. 3.10. Зависимость усилия на лезвии инструмента от размера зерна  $d$  и угла  $\beta$  заострения инструмента

Моделирование показало, что чем меньше угол заострения инструмента, тем больше длина осевой трещины. При внедрении в породу тупого инструмента (рис. 3.9, а)  $\sigma_n > \sigma_s$ , микротрещины образуются только слева и справа от зерен и смещаются вглубь породы, что сопровождается образованием ядер больших размеров. Если инструмент острый то, как видно из рис. 3.9, б, происходит полное раскрытие микротрещин по всему периметру зерна. При этом длина осевой трещины (при  $\beta = 5-10^\circ$ ) достигает максимальных значений  $l = (7-9) d$ . Естественно, что использование инструментов с углами заострения  $\beta = 5-20^\circ$  чревато поломкой лезвия инструмента. Поэтому на практике для разрушения породы используются инструменты с углом  $\beta > 30^\circ$ .

Схема взаимодействия лезвия инструмента с породой, изображенная на рис. 3.9, а, имеет следующие недостатки:

- имеется только одна свободная поверхность ( $x$ ), куда можно скалывать породу, поэтому происходит только поверхностное разрушение;
- процесс разрушения породы сопровождается образованием больших по объемам ядер, что вызывает повышенное пылеобразование;
- с увеличением угла заострения  $\beta$  возрастает энергоемкость процесса  $H_w$  и усилие  $P$ , требуемое для внедрения инструмента в породу (рис. 3.10), а также уменьшается длина микротрещин ( $l = 2,5 d$  при  $\beta = 30^\circ$  и  $l = 0,6 d$  при  $\beta = 45^\circ$ ) [13, 14].

Моделирование разрушения горных пород рабочим инструментом горных машин показало, что для устранения этих недостатков необходимо, чтобы сеть микротрещин, формируемая перед лезвием инструмента, «имела выход» на вторую, дополнительную, свободную поверхность. Это позволяет интенсифицировать процесс раскрытия микротрещин по границам зерен породы.

### 3.2. Моделирование методом теории упругости

Для расчета траекторий развития макротрещин под лезвием инструмента использовался метод фиктивных нагрузок граничных интегральных уравнений теории упругости [13, 14]. Для хрупких материалов, находящихся в сложном напряженном состоянии с разными пределами прочности на растяжение и сжатие, наилучшее описание разрушения осуществляется с применением обобщенного критерия прочности  $\chi\sigma_1 + (1 - \chi)\sigma_1 \leq \sigma_p$  (Писаренко – Лебедева), где  $\chi = \sigma_p / \sigma_{сж}$  – показатель хрупкости;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_1$  – главные напряжения;  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  – пределы прочности породы на одноосное растяжение и сжатие. Этот критерий позволяет описывать такие механизмы разрушения, как: отрыв, сдвиг, сочетание отрыва и сдвига.

На кафедре горных машин и комплексов КузГТУ разработаны модели, позволяющие подробно описать картину формирования напряженного состояния разрушаемой породы под лезвием инструмента горных машин, выявить при этом зоны главных напряжений в породе и закономерности развития системы микротрещин в макротрещину, которая, в конечном итоге, приводит к разрушению породы.

На рис. 3.11, а, б показаны распределения интенсивности  $\sigma_i$  напряжений в породе при воздействии на ее поверхность лезвия инструмента, без его проникновения в породу. Анализ напряженного состояния породы показывает, что:

- под лезвием расположено ядро сжатия ( $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0, \sigma_3 < 0$ );
- зона чистого растяжения ( $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0, \sigma_3 > 0$ ) под лезвием отсутствует;
- порода под лезвием разрушается в первую очередь в зонах, сочетающих растяжение ( $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$ ) и сжатие ( $\sigma_3 < 0$ );
- макротрещина формируется при условии  $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$ .

На рис. 3.11, а, б приведены траектории прорастания макротрещин в сторону свободных поверхностей (I и II), штриховой линией показано направление роста трещины, а разрушенная часть породы представлена заштрихованной областью [13, 14].

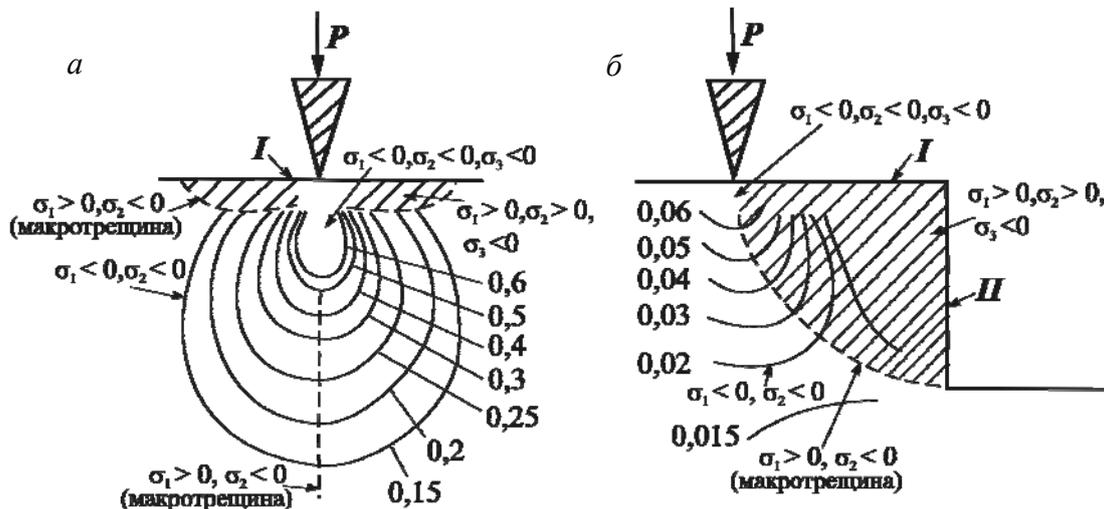


Рис. 3.11. Направление роста макротрещин:

а – с одной свободной поверхностью (I); б – с двумя свободными поверхностями (I и II)

Как видно из рис. 3.11, а, при наличии только одной свободной поверхности скалывается лишь небольшой объем породы, ограниченный макротрещиной и открытой свободной поверхностью (I). При этом процесс дробления породы явно преобладает над скалыванием, что сопровождается большой энергоемкостью  $H_w$ , интенсив-

ным пылеобразованием  $\omega_{-1}$  и требует более высоких усилий ( $P$ ) на внедрение инструмента в породу.

Как видно из рис. 3.11, б, при наличии второй свободной поверхности (II) изоляции  $\sigma_i$  «разворачиваются» в ее направлении, макротрещина выходит на ее поверхность. При этом объем разрушенной породы существенно возрастает. Заштрихованная разрушаемая область ограничена с одной стороны макротрещиной, а с другой – свободными поверхностями I и II.

Таким образом, наличие второй свободной поверхности ускоряет процесс развития системы микротрещин в макротрещину, который сопровождается меньшими энергоемкостью  $H_w$ , усилием  $P$  и пылеобразованием  $\omega_{-1}$ .

## 4. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

### 4.1. Определения, обозначения по конструкциям резцов

Согласно ГОСТ Р 51047-97 [18] применяют следующие термины с соответствующими определениями и обозначениями:

Резец – рабочий инструмент очистных и проходческих комбайнов, состоящий из державки и закрепленной в ней (на ней) армирующей вставки или пластины (твердосплавных изделий).

Твердосплавные вставки – изделия, изготовленные из твердых сплавов различных марок по специальной технологии.

Радиальный резец (обозначение типа – Р) – резец, державка которого установлена перпендикулярно к поверхности резания (перпендикулярно к плоскости, проходящей через вектор скорости резания). Типовые признаки описаны ниже.

Тангенциальный резец (обозначение типа – Т) – резец, державка которого установлена наклонно к поверхности резания (наклонно к плоскости, проходящей через вектор скорости резания). Типовые признаки описаны ниже.

Тангенциальный неповоротный резец (обозначение исполнения – ТН) – резец, в процессе работы неподвижный относительно продольной оси державки.

Тангенциальный поворотный резец (обозначение исполнения – ТП) – резец, в процессе работы подвижный относительно продольной оси державки (продольной оси гнезда резцедержателя).

Конструктивный вылет резца  $l$  – расстояние от опорной поверхности или места заделки резца в резцедержатель до перпендикуляра к продольной оси резца, проведенного через вершину режущей кромки.

Тангенциальный вылет резца  $m$  – расстояние от вершины режущей кромки до продольной оси державки.

Длина хвостовика  $l_1$  – длина части резца, закрепленной в гнезде резцедержателя.

Прямоугольный хвостовик – хвостовик, имеющий прямоугольное сечение шириной  $H$  и толщиной  $B$ .

Круглый хвостовик – хвостовик, имеющий круглое сечение, определяемое диаметром  $D$ .

Угол заострения резца  $\beta$  – угол между передней и задней поверхностями режущей части резца в продольной плоскости его симметрии.

Задний конструктивный угол  $\alpha$  – угол между задней поверхностью режущей части резца и перпендикуляром к продольной оси резца в продольной плоскости его симметрии.

Режущая способность резца  $H_w$  – удельная энергия резания эталонной породы или эталонного искусственного материала в регламентированном режиме. Параметры регламентированного режима резания – толщина  $h$  и ширина  $t$  стружки после прохода резца.

Прочность соединения армирующей вставки с державкой – сила сдвига (отрыва), установленная при разрушении соединения.

Прочность резца – сила разрушения хотя бы одного элемента резца, установленная при нагружении резца нагрузкой, указанной в технических условиях (ТУ).

Относительная взрывобезопасность резца – длина пути резания испытываемым резцом эталонной породы в заданном режиме до взрыва эталонной метановоздушной среды.

## 4.2. Классификация, основные параметры и размеры резцов

Резцы в соответствии с их конструктивными признаками (табл. 4.1) изготавливают следующих типов ГОСТ Р 51047-97 [18]:

Р – радиальные (рис. 4.1, а); Т – тангенциальные.

Таблица 4.1

Конструктивные признаки типа резца

Тип резца	Задний конструктивный угол	Отношение $m/l$
Радиальный	Не более 20	Не менее 0,4
Тангенциальный	Не менее 45	Не более 0,2

Тангенциальные резцы изготавливают двух исполнений:

ТН – неповоротные (рис. 4.1, б); ТП – поворотные (рис. 4.1, в).

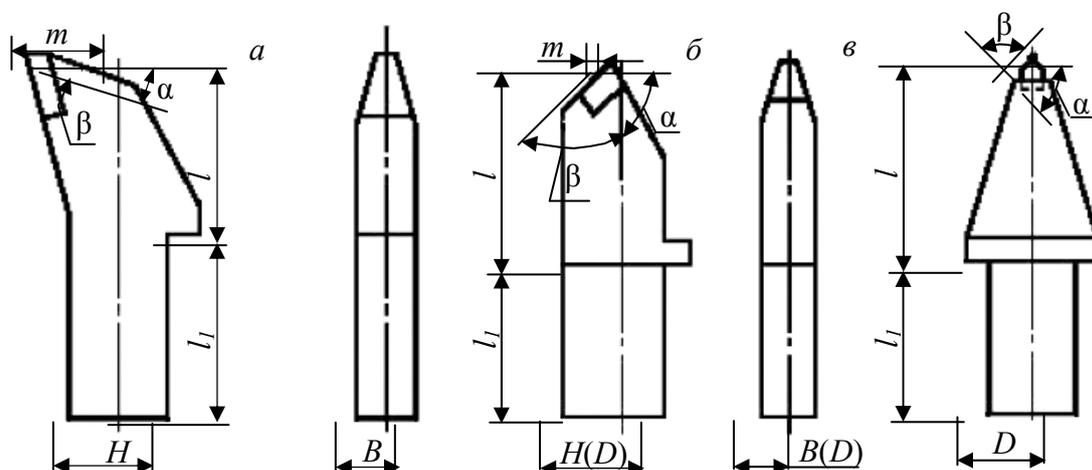


Рис. 4.2. Резцы: а – типа Р; б – исполнения ТН; в – исполнения ТП

Радиальные резцы изготавливают следующих типоразмеров: Р40, Р65, Р80, Р100. Основные параметры и размеры для типоразмеров радиальных резцов – по ОСТ 12.44.165–80 [19] в соответствии с данными, приведенными в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Основные параметры и размеры радиальных резцов

Наименование параметра	Значения для типоразмеров			
	Р40	Р65	Р80	Р100
Конструктивный вылет резца $l$ , мм	40	65	80	100
Отношение длины хвостовика к конструктивному вылету резца $l_1/l$	1,3–1,4	0,8–1,0	0,8–1,0	0,8–1,0
Размеры сечения прямоугольного хвостовика $B \times H$ , мм	13×26	22×38	22×38; 25×41	25×41; 30×50

Тангенциальные неповоротные резцы изготавливают следующих типоразмеров: ТН100, ТН125, ТН160. Основные параметры и размеры для типоразмеров тангенциаль-

ных неповоротных резцов по ОСТ 12.44.165–80 [19] в соответствии с данными, приведенными в табл. 4.3.

Таблица 4.3

*Основные параметры и размеры тангенциальных неповоротных резцов*

Наименование параметра	Значения для типоразмеров		
	ТН100	ТН125	ТН160
Конструктивный вылет резца $l$ , мм	100	125	160
Отношение длины хвостовика к конструктивному вылету резца $l_1/l$	0,75–1,0	0,75–1,0	0,8–1,0
Размеры сечения прямоугольного хвостовика $B \times H$ , мм	–	25×41	30×50
Диаметр хвостовика $D$ , мм	34; 38	38	38; 42

Тангенциальные поворотные резцы изготавливают следующих типоразмеров: ТП25, ТП32, ТП38. Основные параметры и размеры для типоразмеров тангенциальных поворотных резцов – в соответствии с данными, приведенными в табл. 4.4.

Таблица 4.4

*Основные параметры и размеры тангенциальных поворотных резцов*

Наименование параметра	Значения для типоразмеров		
	ТП25	ТП32	ТП38
Диаметр хвостовика $D$ , мм	25	32	38
Конструктивный вылет резца $l$ , мм	60–90	60–90	60–90
Длина хвостовика к конструктивному вылету резца $l_1$ , мм	65–75	65–75	65–75

Допускается изготавливать резцы с хвостовиками диаметром 30 мм и ступенчатый хвостовик диаметром 38/30 мм для использования в исполнительных органах импортных очистных и проходческих комбайнов.

### 4.3. Элементы и параметры резцов

Режущие инструменты отличаются многообразием, обусловленным как различием горных машин и исполнительных органов, для которых они предназначены, так и разным конструктивным их исполнением.

Режущие инструменты горных машин подразделяют на радиальные, тангенциальные, радиально-торцевые (рис. 4.2) и буровые резцы (рис. 4.3) [20–23]. Ось державки радиальных и радиально-торцевых резцов перпендикулярна к линии резания, а ось державки тангенциальных составляет острый угол  $\theta$  с линией резания. Несмотря на разнообразие резцов, все они имеют следующие основные элементы: хвостовик 1 и корпус 2, армированный твердосплавной вставкой 3.

Различают три вида параметров резцов: конструктивные, установочные и рабочие (кинематические). Конструктивные параметры – это линейные и угловые размеры резца, в соответствии с которыми он изготовлен. В качестве главного параметра принят конструктивный вылет  $l_p$  – расстояние от опорной поверхности или места заделки резца в резцедержатель до перпендикуляра к продольной оси резца, проведенного через вер-

шину режущей кромки. К основным конструктивным параметрам относят: задний конструктивный угол  $\alpha_k$ , угол заострения  $\beta$ , передний угол  $\gamma$ , угол резания  $\delta$ , боковой задний угол  $\alpha_b$  и угол наклона боковых граней  $\psi$ . Некоторые параметры связаны между собой зависимостями:  $\delta = \alpha_k + \beta$  и  $\gamma = 90^\circ - \delta$  (см. рис. 4.2).

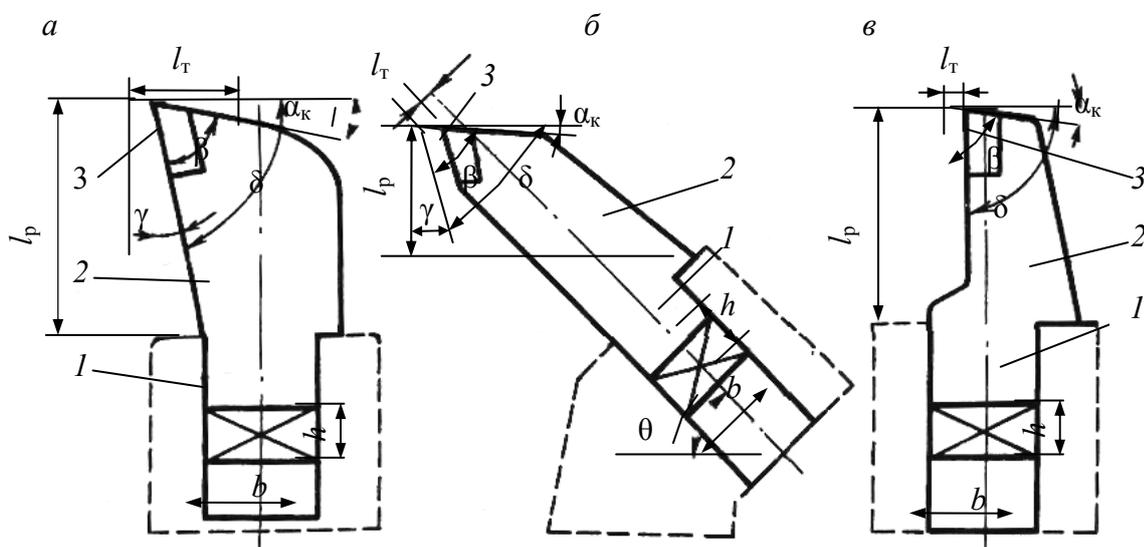


Рис. 4.3. Параметры резцов:  
а – радиальный; б – тангенциальный; в – радиально-торцевой

Установочные параметры – это параметры, характеризующие резец, установленный на исполнительном органе. Главным установочным параметром является радиальный вылет резца  $l_p = l$ . Для тангенциальных резцов, которые устанавливаются к поверхности резания под углом  $\theta$ ,  $l_p = l \sin \theta$ .

Параметр  $l_p$  имеет важное значение, так как определяет максимально возможную толщину среза, допустимые скорость перемещения и производительность машины.  $l_T$  – расстояние от режущей кромки пластинки твердого сплава до оси симметрии хвостовика резца.

Буровые резцы для вращательного бурения предназначены для бурения шпуров в углях любой крепости и породах с коэффициентом крепости  $f = 6-10$  по шкале проф. М.М. Протодяконова при использовании электрических, пневматических и гидравлических бурильных установок. По назначению резцы подразделяют на: угольные, углепородные и породные.

Резец (рис. 4.3) [23] состоит из перьев 1 с режущими кромками, корпуса 2 и хвостовика 3 для крепления резца в головке буровой штанги. Имеется передняя грань 4 и задняя 5, пересечение которых образует главную режущую кромку 6 и кромку 7 рассечки.

Геометрические параметры резца см. на рис. 4.3. Углы заточки резца определяются положениями плоскости резания «сс», которая является касательной к поверхности резания и проходит через главную режущую кромку, и основной плоскости «dd», которая перпендикулярна к плоскости резания.

Задний угол  $\alpha$  – это угол, образуемый плоскостью резания и задней гранью резца. Наличие угла  $\alpha$  предотвращает трение задней грани резца о плоскость забоя. Задний угол обычно принимают в пределах  $10-30^\circ$ .

Угол заострения  $\beta$  – это угол, образованный пересечением передней и задней граней резца. В результате этого образуется режущая кромка. С уменьшением угла

заострения улучшается внедрение резца в уголь или породу, но прочность резца при этом уменьшается.

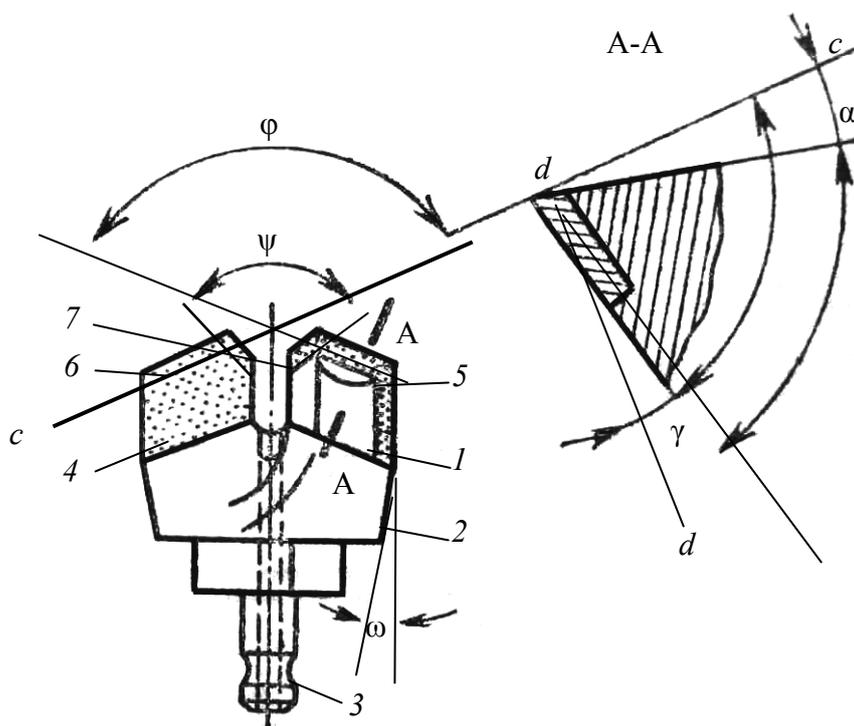


Рис. 4.3. Параметры бурового резца

Угол резания  $\delta = \alpha + \beta$  – это угол между передней гранью и плоскостью резания.

Передний угол  $\gamma$  образуется между передней гранью и основной плоскостью « $dd$ ». Передний угол  $\gamma$  может быть положительным, равным нулю или отрицательным (при бурении по крепким породам). В последнем случае угол заострения  $\beta$  принимается  $\geq 90^\circ$ , в результате чего передний угол становится отрицательным. Соотношение  $\alpha + \beta + (\pm\gamma) = 90^\circ$ .

Угол конусности  $\omega$  придается резцу для уменьшения трения о стенки шпура. Обычно угол конусности принимается равным  $1-2^\circ$ .

В результате рассечки пера резца образуются вспомогательные углы:

- внутренний угол рассечки  $\psi$  – пересечением вспомогательных режущих кромок резца;
- внешний угол  $\phi$  при вершине резца – пересечением главных режущих кромок резца.

При работе по уголю резцы характеризуются большим углом рассечки (до  $100^\circ$ ) и положительными или нулевыми передними углами; при работе по породе – меньшими углами рассечки, более короткими перьями и обычно нулевыми или отрицательными передними углами.

*Резцы угольные (РУ)* предназначены для ручных сверл при работе по уголю любой крепости и породам с коэффициентом крепости до  $f=3$  по шкале проф. М.М. Протодьяконова.

*Резцы углепородные (РУП)* – для ручных и колонковых сверл при работе по уголю любой крепости и породе с коэффициентом крепости  $f=2-6$ .

*Резцы породные (РП)* – для колонковых сверл и бурильных установок при бурении пород с коэффициентом крепости  $f=6-10$ .

Резцы типа РП предназначены для использования в комплекте с шестигранными штангами типа ШБ.

#### 4.4. Основные типы и конструктивные особенности резцов

В настоящее время на основе разработанного ИГД им. А.А. Скочинского параметрического ряда резцов утвержден и действует отраслевой стандарт ОСТ 12.44.165-80 [19] на параметры резцов (табл. 4.5) [20]. Из таблицы видно, что *радиальные резцы* (типа Р) имеют два исполнения: однолезвийные (РО) и двухлезвийные (РД).

В табл. 4.5 представлены следующие пояснения: \*1 – в новых конструкциях машин не применяется; \*2 – диаметр штыря; \*3 – при угле установки резца 45°; \*4 – при угле установки резца 53°; \*5 – резцы, не включенные в ОСТ 12.44.165–80 [19].

Тангенциальные резцы (типа Т) в зависимости от формы сечения хвостовика имеют также два исполнения: ТП – прямоугольной формы и ТК – круглой формы. Радиально-торцевые резцы (типа РТ) также в зависимости от формы сечения хвостовика имеют три исполнения: РТП – прямоугольной формы, РТК – круглой формы и РТО – овальной формы. На рис. 4.2 приведены конструкции основных резцов. По принципу действия резцы подразделяются на неповоротные и поворотные. Поворотные резцы при работе вращаются в резцедержателе относительно продольной оси державки. Режущая часть их, представляющая собой тело вращения (конус, цилиндр или их сочетание), равномерно притупляется, площадка затупления не образуется, резец как бы самозатачивается.

При одинаковом радиальном вылете радиальные резцы имеют меньшую длину режущей части, что обеспечивает большую продольную жесткость и меньшее плечо изгибающего момента от боковых сил.

К достоинствам тангенциальных резцов относится то, что у тангенциальных резцов направление суммарного усилия близко к направлению оси резца, что снижает величину изгибающего момента от сил резания, подачи и улучшает условия работы твердосплавной армировки. Применение тангенциальных резцов в значительной степени снижает передрабывание отбитого угля корпусом резцедержателя.

По конструктивному исполнению резцы бывают цельными или составными. Радиальные резцы и тангенциальные меньших типоразмеров изготавливаются обычно цельными. Тангенциальные резцы больших типоразмеров целесообразно изготавливать составными, что помимо экономии металла позволяет иметь вставки с различными параметрами режущей части.

Выпускаемые и применяемые в настоящее время резцы отличаются и по конструкции режущей части. Так, режущая кромка их бывает трапециевидной, овальной, прямоугольной, треугольной, а форма передней грани – плоской, овальной, клиновидной. Выбор формы режущей кромки и передней грани обуславливается эффективностью процесса резания, прочностью и формоустойчивостью режущей части и прочностью пластинки твердого сплава.

Кроме того, конструкции резцов отличаются по форме твердосплавных вставок: призматические, пирамидальные, цилиндрические, конические; по расположению паза под вставки в режущей части: открытый, полузакрытый, шлицевой, отверстие под керн; по способу крепления вставки: паяное соединение, запрессовка, механическое крепление.

В настоящее время существует большое количество отечественных и зарубежных заводов-изготовителей, фирм, которые производят и поставляют широкий спектр режущего инструмента на горнодобывающие предприятия России. В связи с этим в данной монографии приводится информация по конструкциям, параметрам и типоразмерным рядам режущих инструментов [24–28].

Таблица 4.5

## Параметры резцов

Тип резца по ГОСТ 12.44.165-80 [19]	Исполнение	Тип-размер	Конструктивный вылет $l_p$ , см	Длина хвостовика $l_{хв}$ , см	Обозначение резцов, выпускаемых по техническим условиям	Характеристика режущей части				Макс. толщина твердого сплава по задней границе резцов, мм		
						Ширина конструктивная $b_k$ , см	Форма режущей кромки	Форма передней поверхности	Углы $^{\circ}$ <sup>3</sup> (конструктивные), град			
									резания $\delta$		задний $\alpha$	
Р	РО	РО40	4	5,5	ЗНЗ	0,9	Овальная	Плоская	85	5	5	
		РО65	6,5*1	5,5	И90МБ*1	1,1			80	5	7	
		РО80	6,5	6,5	РО65	1,4	Треугольная	Клиновидная	83	8	9	
			8	6,5	ЗР2.80	2,5			83	15	13	
			8	6,5	ЗР4.80	1,4			83	8	9,5	
			10	—	—	—			—	—	—	
		РД	РД45	4,5	4,5	УМК90	1,1	Овальная	Плоская	85	10	7
			РД65	6,5	7,5	МК-1-4-14А	1,1			85	10	7
			ТП	ТП100	10	9,5	—	—	Плоскоклинотвидная	—	—	—
				ТП125	12,5	9,5	ИГ-125	2,0		69	15	9,5
ТП160*5	16			—	—	—	—	—		—		
ТК65	6,5			6,5	РКС-1	0,9*2	90	0		9		
ТК	ТК80	8	7,0	РКС-2	1,2*2	98*4	8*4	—				
	РТ80	8*1	8,0	И79Б*1	1,1	Треугольная	Овальная	90	0	12		
РТ	РТО65	6,3*1	5,4	КБ01*1	1,1			98*4	8*4	—		
	РТК34	3,3	6,3	ШБМ2С- -1-1-04	0,8	Овальная	Плоская	85	10	7		
	—	—	—	—	—	Трапецие- видная		90	10	7		

## 5. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ

В этой главе приводятся сведения по конструктивным особенностям радиальных резцов (см. рис. 5.1, 5.2) [20, 21].

До 70-х годов прошлого столетия, шнеки очистных комбайнов, в основной массе, вооружались радиальными резцами.

На рис. 5.1 представлен радиальный резец ЗР4-80, устанавливаемый на комбайнах 1ГШ68, КШ1КГУ, 1К101, РКУ10, К103М.

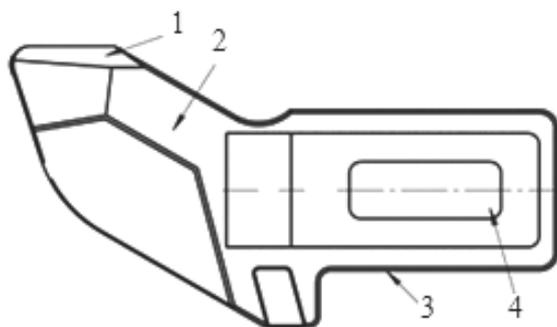


Рис. 5.1. Радиальный резец ЗР 4-80:

1 – твердосплавная вставка; 2 – корпус; 3 – хвостовик; 4 – замковое устройство

Резцы РО65 (рис. 5.2, а), выпускаемые взамен резцов И90МБ и И90В, предназначены для оснащения шнековых и барабанных исполнительных органов комбайнов типоразмеров ПУ5-ПУ10 при работе на пластах любой категории разрушаемости, содержащих породные прослойки мощностью более 0,15 м и крупные породные включения при суммарной их мощности до 5 % от мощности пласта. Особенностью резцов РО65 в сравнении с резцами И-90МБ и И90В является клиновидная форма передней грани, большие значения угла резания и заднего угла, большие значения толщины пластинки твердого сплава. Крепление резца безболтовое.

Резцы ЗР2.80 (РО80) (рис. 5.2, б) предназначены для очистных комбайнов, имеющих в качестве исполнительного органа барабаны с вертикальной осью вращения, на которых установлены поворотные резцедержатели. Установка двух направленных в разные стороны резцов ЗР2.80 в резцедержателе и поворот его самого обеспечивают возможность реверсирования направления вращения барабана. Резцы ЗР2.80 применяются для выемки углей любой абразивности и сопротивляемостью резанию до 300 Н/мм, содержащих породные прослойки и включения крепостью  $f \leq 3$ . Вставки твердого сплава имеют клиновидные переднюю и заднюю грани, а ее боковые режущие кромки сужаются в сторону меньшего основания. Крепление резца – безболтовое. В настоящее время эти резцы применяются в конвейеростругах агрегатов типа АНЩ и на барабанах комбайнов «Поиск-2».

Резцы ЗР4.80 (РО80) (рис. 5.2, в) являются наиболее распространенным режущим инструментом и применяются практически на всех выпускаемых в настоящее время шнековых очистных комбайнах (2ГШ-68Б, РКУ-16, 1КШЭ и др.). Предназначаются резцы ЗР4.80 для выемки углей любой абразивности с сопротивляемостью резанию до 300 Н/мм, крепостью возможных породных включений  $f \leq 6$  и их суммарной

мощностью не более 10 % от вынимаемой мощности пласта. Резец армируется вставкой твердого сплава с клиновидной формой передней поверхности. Со стороны задней поверхности хвостовика резец имеет упор, предназначенный для установки всех резцов на шнеке с одинаковым вылетом и уменьшения изгибающего момента от усилий резания и подачи в опасном сечении хвостовика. На боковых поверхностях упора имеются углубления для извлечения резца из резцедержателя. Крепление резца в кулаке безболтовое.

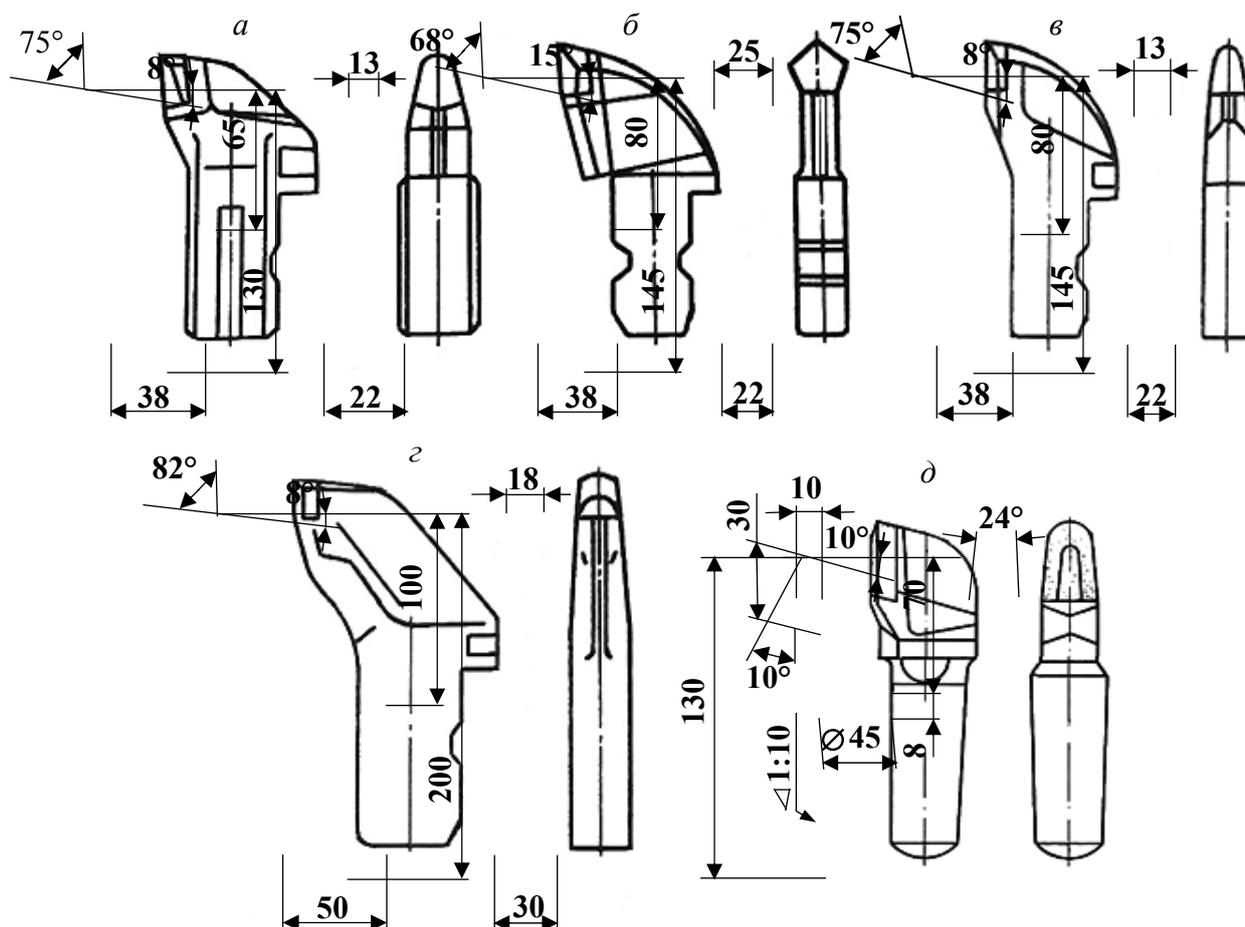


Рис. 5.2. Конструкция радиальных резцов

Резцы РО100 (рис. 5.2, *г*) предназначены для оснащения шнековых исполнительных органов новых шнековых очистных комбайнов типоразмеров ПУ16–ПУ35, обеспечивающих разрушение угольных пластов с толщиной стружки 7–8 см. Режущая часть резца оснащена вставкой твердого сплава, имеющей овально-плоскую переднюю поверхность, чем обеспечивается высокая прочность главной режущей кромки и режущей части резца в целом. Резцы применяются на пластах любой категории разрушаемости. Крепление резца безболтовое.

Радиальный резец РПП (рис. 5.2, *д*) [21] предназначен для исполнительных органов комбайнов 4ПП2 и 4ПП5 при проведении выработок по смешанным и породным забоям с коэффициентом крепости  $f < 6$ . Режущая часть образована вставкой твердого сплава, имеющей увеличенную площадь пайки, что повышает прочность резца.

Компания «Sandvik Mining and Construction» (Швеция) выпускает радиальные резцы серий RIBA, RIVA, RIRP (рис. 5.3 и 5.4) [24]. Все резцы армируются вставкой

твердого сплава с клиновидной передней гранью. Основным параметром радиального инструмента – вылет резцов – составляет: 58,8 мм (RIBA); 73,6 мм (RIVA); 110 мм (RIRP). Для фиксации резцов в резцедержателях используются резиново-стальные штифты. Для повышения прочности корпуса резцов имеется большая опорная (на резцедержателе) поверхность и нет острых граней.

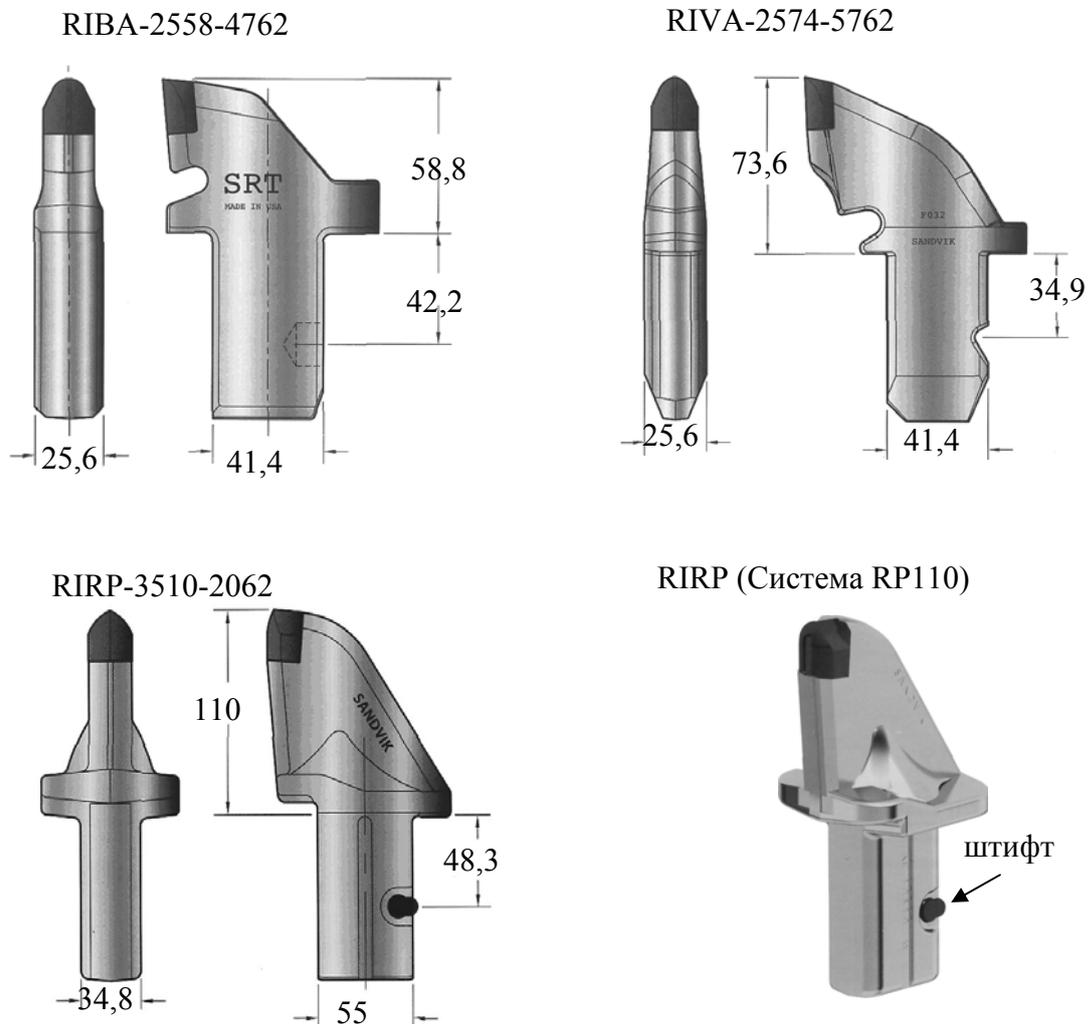


Рис. 5.3. Радиальные резцы компании «Sandvik Mining and Construction» (Швеция)

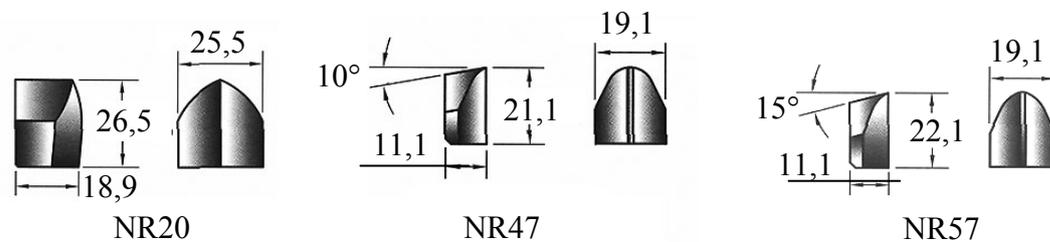
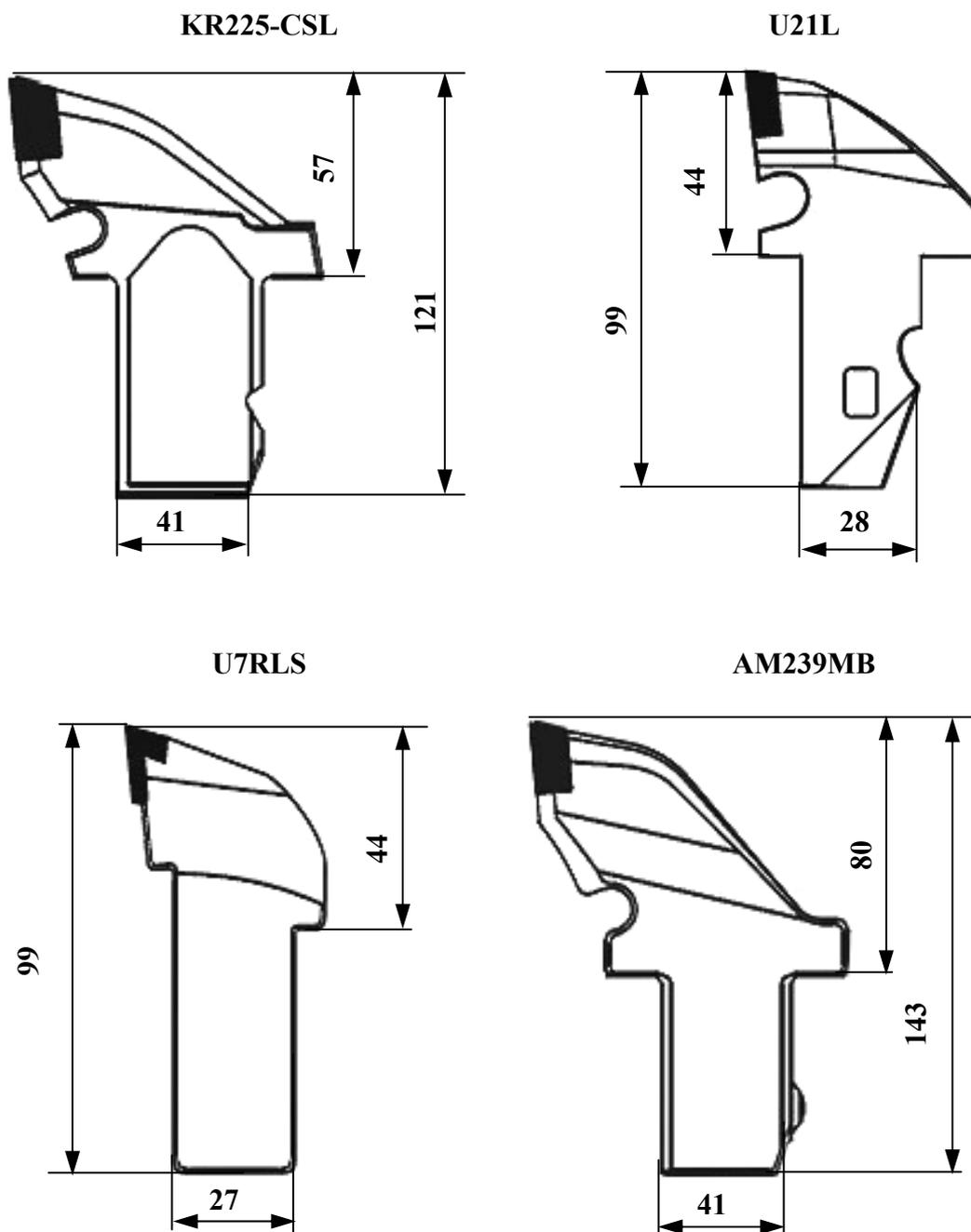


Рис. 5.4. Твердосплавные пластины радиальных резцов

На рис. 5.5 представлены радиальные резцы компании «Kennametal» [28].



*Рис. 5.5. Радиальные резцы компании «Kennametal»*

## 6. РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ СТРУГОВЫХ СТАНОВКОВ

Инструментом струговых установок является комплект резцов и вставок, конструкции и расчет сил на которых определяются их положением на исполнительном органе из условия обеспечения наиболее эффективного разрушения угольного пласта [2, 3, 20, 22, 29].

Главные конструктивные углы (рис. 6.1) режущего инструмента, устанавливаемые относительно плоскости резания, следующие:

*Угол заострения*  $\beta$  – угол между передней и задней гранями резца. Чем меньше этот угол, тем острее режущие кромки, но меньше прочность резца. Этот угол принимают в пределах  $65\text{--}90^\circ$ .

*Задний угол*  $\alpha$  – угол между плоскостью резания и задней гранью резца. Его величина находится в пределах  $5\text{--}15^\circ$ .

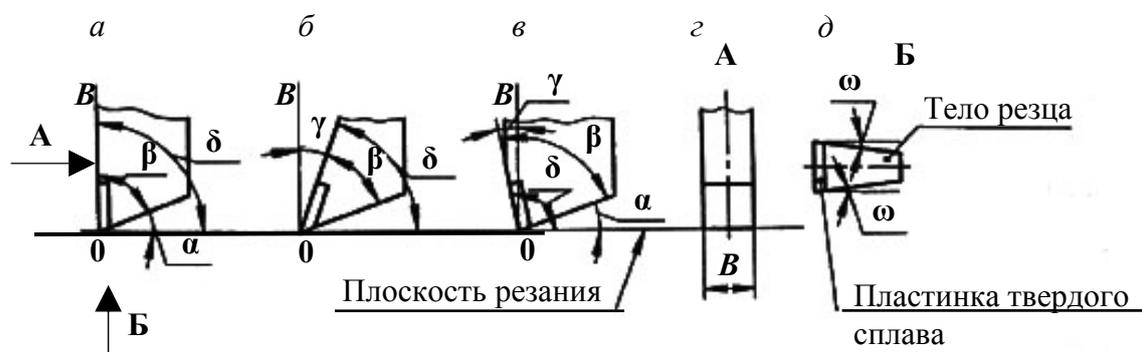


Рис. 6.1. Конструктивные углы режущего инструмента

*Угол резания*  $\delta$  – угол между плоскостью резания и передней гранью резца. Он равен сумме углов заострения  $\beta$  и заднего  $\alpha$ . С увеличением этого угла усилие резания и энергозатраты увеличиваются, но резцы можно применять и при более значительном сопротивлении угля резанию.

*Передний угол*  $\gamma$  – угол между передней гранью резца и плоскостью, проходящей через режущую кромку перпендикулярно к плоскости резания. Передний угол может быть равен нулю (рис. 6.1, а), иметь положительное (рис. 6.1, б) или отрицательное значение (рис. 6.1, в). Резцы струговых установок обычно имеют положительное значение переднего угла  $\gamma$  (от 0 до  $10^\circ$ ).

Кроме этих главных углов резец характеризуется боковыми задними углами  $\omega$  (рис. 6.1, д). Боковой задний угол  $\omega$  избежание трения боковых граней резца об уголь принимают  $4\text{--}12^\circ$ . Резец характеризуется также (рис. 6.1, з) шириной главной режущей кромки  $B$  и вылетом  $l_p$  (рис. 6.2, в, з), т. е. расстоянием от режущей кромки до опорной поверхности резцедержателя. Вылет определяет максимально возможную толщину среза.

Режущие инструменты струговых установок бывают линейные и почвенные. Конструкции и технические характеристики струговых резцов представлены на рис. 6.2–6.4 и в табл. 6.1, 6.2.

*Резцы линейные* производят отделение угля в одной плоскости от угольного забоя.

*Резцы почвенные* производят отделение угля в двух плоскостях – от угольного забоя и почвы, работают в наиболее тяжелых условиях. Поэтому резцы почвенные выполнены с твердосплавной армировкой и режущими кромками, ориентированными относительно забоя и почвы.

Для изготовления корпусов режущего инструмента применяются стали 35ХГСА, 30ХГСА, которые обладают высокой прочностью и достаточной вязкостью; высокой износостойкостью; высокой теплопроводностью и минимальным коэффициентом теплового линейного расширения; широким интервалом ковки, хорошей закаляемостью; хорошей смачиваемостью припоями.

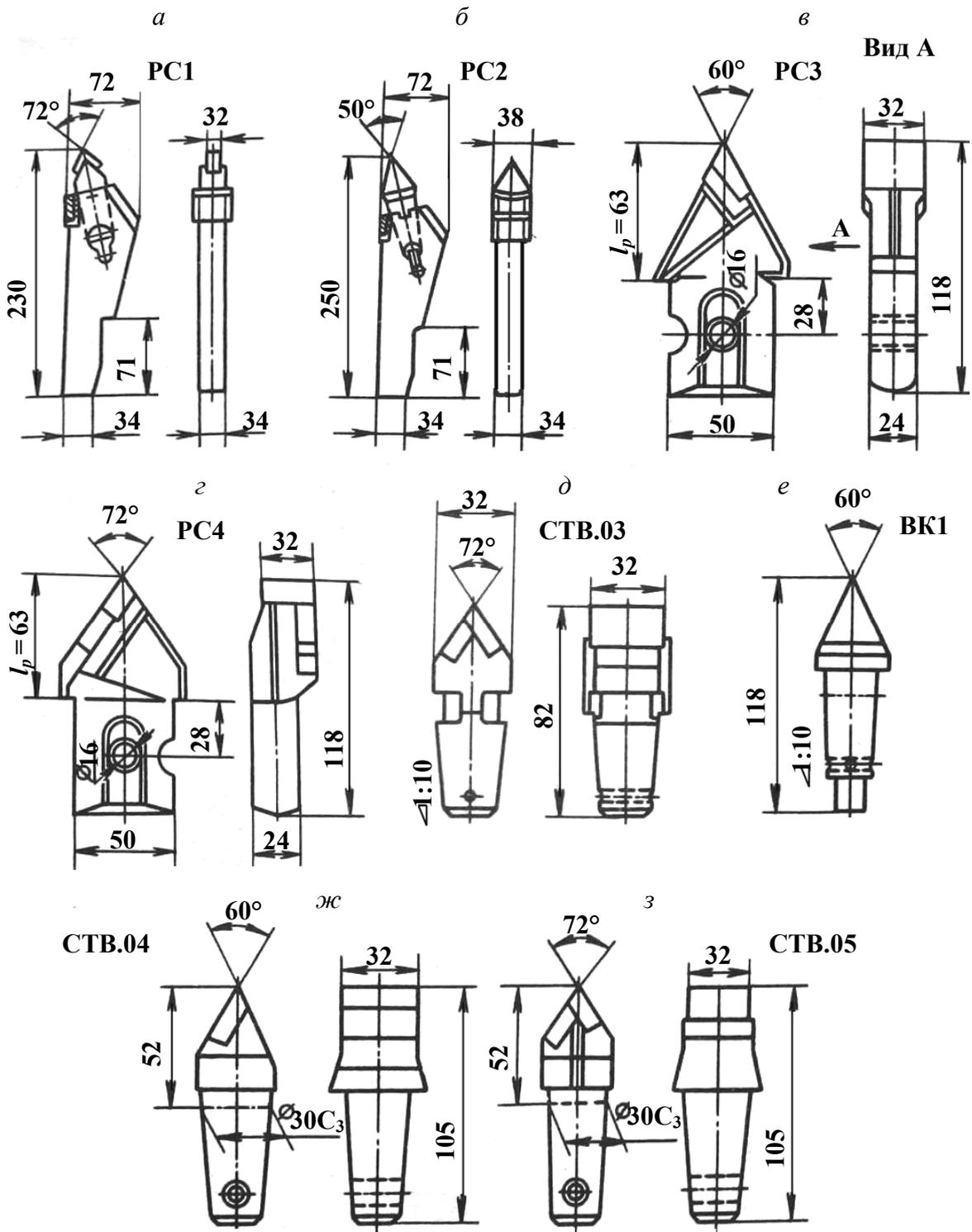


Рис. 6.2. Конструкции резцов и вставок строгальных установок

Таблица 6.1

Техническая характеристика резцов типа РС и их вставок

Параметры	Резец средний		Вставка	
	РС1	РС2	СТВ.04	СТВ.05
Длина, мм	230	250	105	105
Вылет, мм	60 (отн. корпуса струга)		52	52
Тип вставки	СТВ.03		ВК1	–
Ширина режущей части, мм	32	50	32	32
Угол заострения, град	72	60	60	72
Форма передней поверхности	Плоская	Овальная	–	–
Масса пластинок тверд. сплава, г	100	100	86	152
Масса резца, кг	3,5	3,5	0,7	0,7
Марка твердого сплава	–	–	ВК15	

Таблица 6.2

Техническая характеристика резцов типа РС и РЛ

Параметры	Тип резца									
	РС3	РС4	РС6	РС7	РС8	РС9	РС10	РС11	РЛ110	РЛ155
Длина резца, мм	118	118	150	150	120	155	180	152	150	175
Ширина режущей кромки, мм	32	32	22	13	32	13	13	58	22	22
Форма сечения хвостовика	плоская со скругленными меньшими сторонами					прямоугольная				
Угол заострения, град	60	72	72	70	80	75	75	80	72	72
Форма передней поверхности	плоская		плоско-клинов- вая	гребен- чатая	плоскоклин- вая	гребен- чатая	плоская			
Масса пластинок тв. сплава, г	86	116	32	36	155	36	36	155	32	32
Марка тверд. сплава	ВК15			ВК11ВК	ВК15	ВК11ВК	ВК15			
Марка стали державки	35ХГСА									
Масса, кг	1,0	1,1	1,15	1,15	1,14	1,7	2,65	3,27	1,5	2,5

С целью повышения износостойкости резцов струговых установок их рабочую часть армируют твердыми сплавами, в основном применяют металлокерамические твердые сплавы группы ВК (карбид вольфрама и кобальта).

Резцы РС1 (рис. 6.2, а) и РС2 (рис. 6.2, б) предназначены для стругов типа УСТ при выемке углей с сопротивляемостью резанию в неотжатой зоне до 230 кН/м и состоят из стального корпуса и сменной режущей части, что позволяет многократно использовать корпуса резцов. Корпуса изготавливаются из стали марки Ст. 45 с последующей термообработкой. Поверхности корпусов, подвергаемые в процессе эксплуатации абразивному износу, наплавляются электродами Т-590. В качестве режущей части используются: в резцах РС1 – вставки СТВ.03 (рис. 6.2, д), в резцах РС2 – вставки ВК1 (рис. 6.2, е).

Корпуса вставок изготавливаются из стали марки 35ХГСА и после напайки пластинок твердого сплава высокопрочным припоем АНМЦ06-04-2 подвергаются закалке. Режущая часть вставок СТВ.03 армируется двумя пластинками твердого сплава: рабочей (ВК15), защитной (ВК8). Режущая часть вставки ВК1 армируется твердым сплавом в виде конуса с углом заострения  $60^\circ$ .

Струговые резцы РС3 (рис. 6.2, в) и РС4 (рис. 6.2, г) предназначены для струговых установок СН75 при выемке углей с сопротивляемостью резанию до 300 кН/м. Резцы РС4 изготавливаются двух исполнений: правого и левого и служат в качестве почвенных резцов, резцы РС3 устанавливаются в линейной части струга.

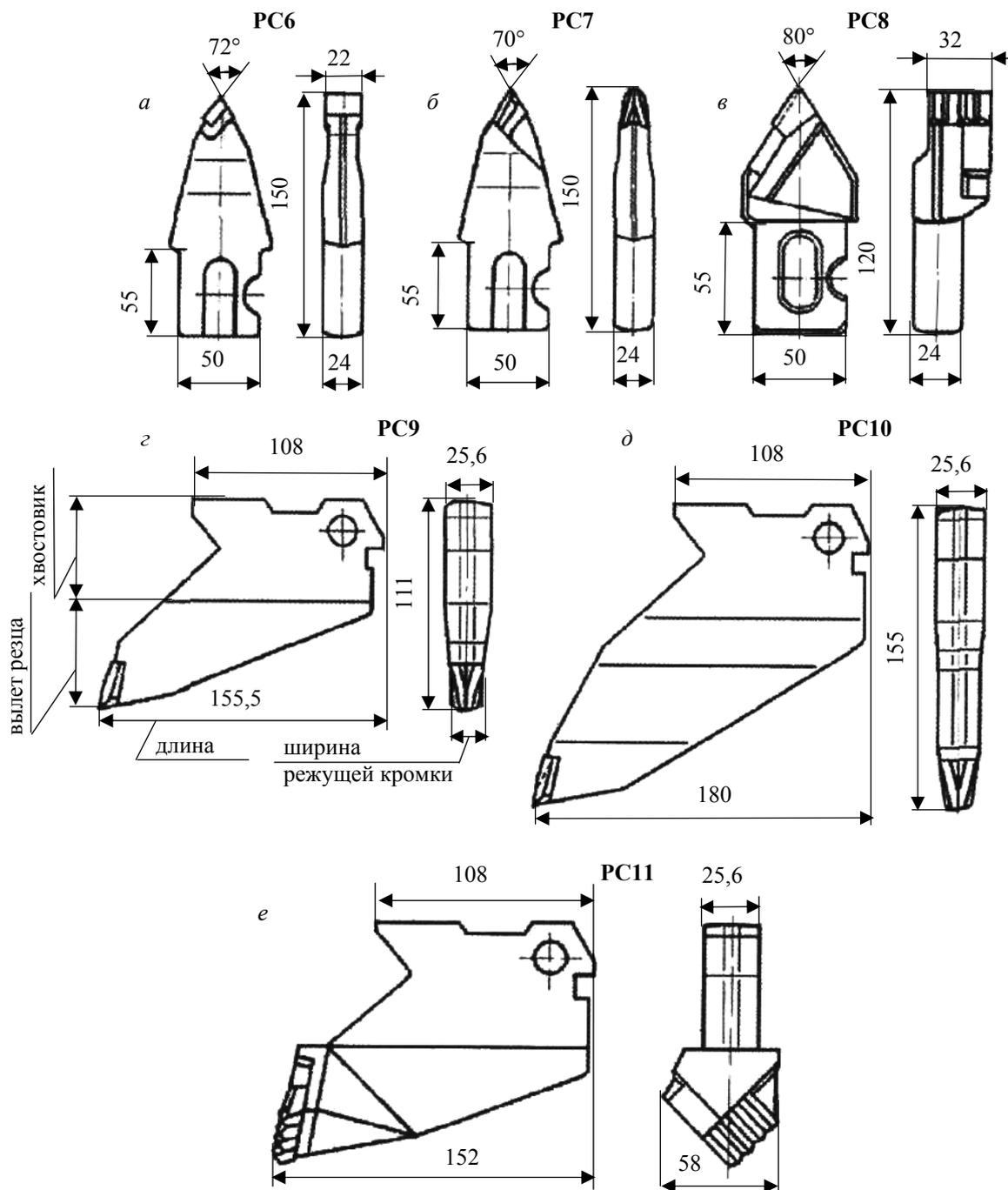


Рис. 6.3. Конструкции резцов струговых установок

Сечение хвостовиков резцов РС3 и РС4 прямоугольное со скругленными меньшими сторонами. Крепление резцов в резцедержателях на корпусе струга осуществляется шариком, для чего на одной из боковых сторон хвостовика имеется углубление.

Вставки СТВ.04 (рис. 6.2, ж) и СТВ.05 (рис. 6.2, з) предназначены для стругов СН75 и С075. Корпуса этих вставок выполнены из стали марки 35ХГСА и после напайки пластинок твердого сплава подвергаются закалке. Хвостовики вставок выполнены с конусностью 1:10, что обеспечивает их прочное соединение с корпусами резцов.

Линейные резцы РС3, РС6, РС9 и РС10 входят в состав линейной (средней) группы резцов. Почвенные резцы РС4, РС8, РС11 входят в состав кровельной (верхней) и почвенной (нижней) групп резцов, работающих в наиболее тяжелых условиях.

Для отечественных струговых установок УСТ, С075, СН75, С090, СН96 были созданы и освоено серийное производство резцов РС3, РС4, РС6 и РС7, предназначенных для работы по углям сопротивляемостью резанию до 300 кН/м (рис. 6.2 и 6.3), а для импортных струговых установок фирмы DBT – резцы РЛ110 и РЛ155 (рис. 6.4), которые не уступают импортным резцам по эксплуатационным показателям.



Рис. 6.4. Резцы для струговых установок фирмы DBT

Применяемые на отечественных струговых установках резцы РС3, РС4, РС6, РС7 и РС8 (рис. 6.3) имеют одинаковую конструкцию хвостовиков. Такая унификация хвостовиков позволяет использовать разную комбинацию набора резцов на струге в зависимости от структуры пласта и крепости угля.

Отличие резцов РС9, РС10 и РС11 (рис. 6.3) от серийно выпускаемых РС3, РС4, РС6 заключается в усовершенствовании конструкции хвостовиков и элементов их крепления.

На современных стругах применяются модернизированные струговые резцедержатели С075.11.00.033, предназначенные для крепления унифицированных струговых резцов без центрального отверстия.

К резцам предъявляются следующие требования:

- эффективное резание угля с меньшим расходом электроэнергии;
- прочность и износостойкость;
- соответствие формы, размеров и геометрических параметров свойствам обрабатываемого угля, конструкции струга и кинематике его работы;
- простое, надежное и жесткое закрепление в державках;
- возможность быстрой замены при износе;
- минимальное число типов в комплекте;
- невысокая стоимость изготовления и эксплуатации.

Особенности работы режущего инструмента стругов заключаются в следующем:

- разрушение угольного массива осуществляется с поверхности, где он в большинстве случаев подвержен интенсивному отжиму;
- удельный путь трения (отношение фактического пути трения резца с массивом к общей длине прохода струга) зависит от состояния массива;

- непрерывное резание (когда пласт не отжат) происходит с циклом, равным длине лавы;
- контактирование отдельных резцов с массивом происходит по определенным слоям, характеристики разрушаемости которых могут существенно отличаться;
- разделение резцов в зависимости от положения на струге на почвенные, средние и верхние определяют разные условия их работы.

## 7. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ

### 7.1. История развития тангенциального инструмента

Автором первого тангенциального поворотного резца стал А. Снайп, (заявка от 1962 г., патент выдан на территории США в 1966 г.). Резец представлял собой конструкцию, состоящую из головной части с твердосплавной вставкой и хвостовой части с канавкой под стопор (рис. 7.1).

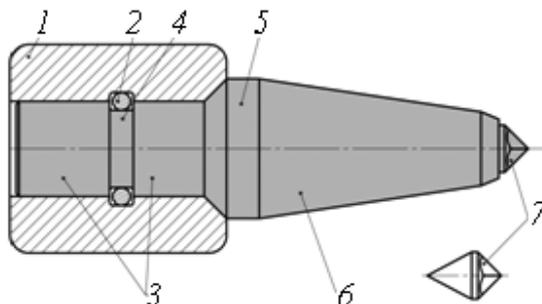


Рис. 7.1. Тангенциальный поворотный резец:

1 – резцедержатель; 2 – стопор; 3 – хвостовая часть; 4 – канавка под стопор;  
5 – опорная часть резца; 6 – головная часть; 7 – твердосплавная вставка

На момент создания и в первое десятилетие после, был запатентован ряд конструкций резцов, которые значительно отличались от производимых в настоящее время. В частности альтернативная конструкция резца, разработанная К. Крекелером, представляет собой резец, головная часть которой является составной, что, по мнению автора должно обеспечивать быструю замену режущего элемента (вставки) при выходе его из строя. В качестве опорной поверхности выступал торец корпуса резца, более сложным являлся механизм фиксации в резцедержателе. Тангенциальный поворотный резец (ТПР) запатентован в 1967 г. в США («Clode Krekeler») по поданной заявке в 1965 г. (рис. 7.2).

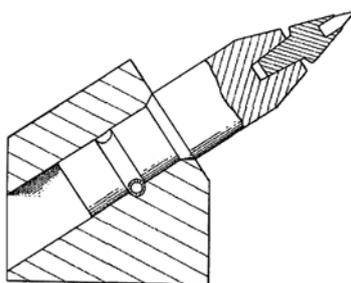


Рис. 7.2. Тангенциальный поворотный резец

На момент создания конструкция резцов значительно отличалась от производимых в настоящее время.

Исследования, выполненные в 70-х в ИГД им. А.А. Скочинского и КузПИ, показали, что применение тангенциальных резцов является более эффективным с точки зрения энергоемкости разрушения и надежности по сравнению с радиальными.

ИГД им. А.А. Скочинского, ЦНИИподземмашем совместно с заводами угольного машиностроения был разработан типоразмерный ряд тангенциальных резцов. В 1976 г.

на Копейском и Красноручском машиностроительных заводах освоено производство первых моделей резцов такого типа: РКС-1 и РКС-2, выполненных в виде цилиндров, что обеспечивало возможность вращения инструмента в процессе резания и получение эффекта его «самозатачивания» о разрушаемую породу.

История проектирования тангенциальных резцов [17, 20–23] состоит из трех этапов: первый этап – рис. 7.3; второй этап – рис. 7.4; третий этап – резец ТПР.

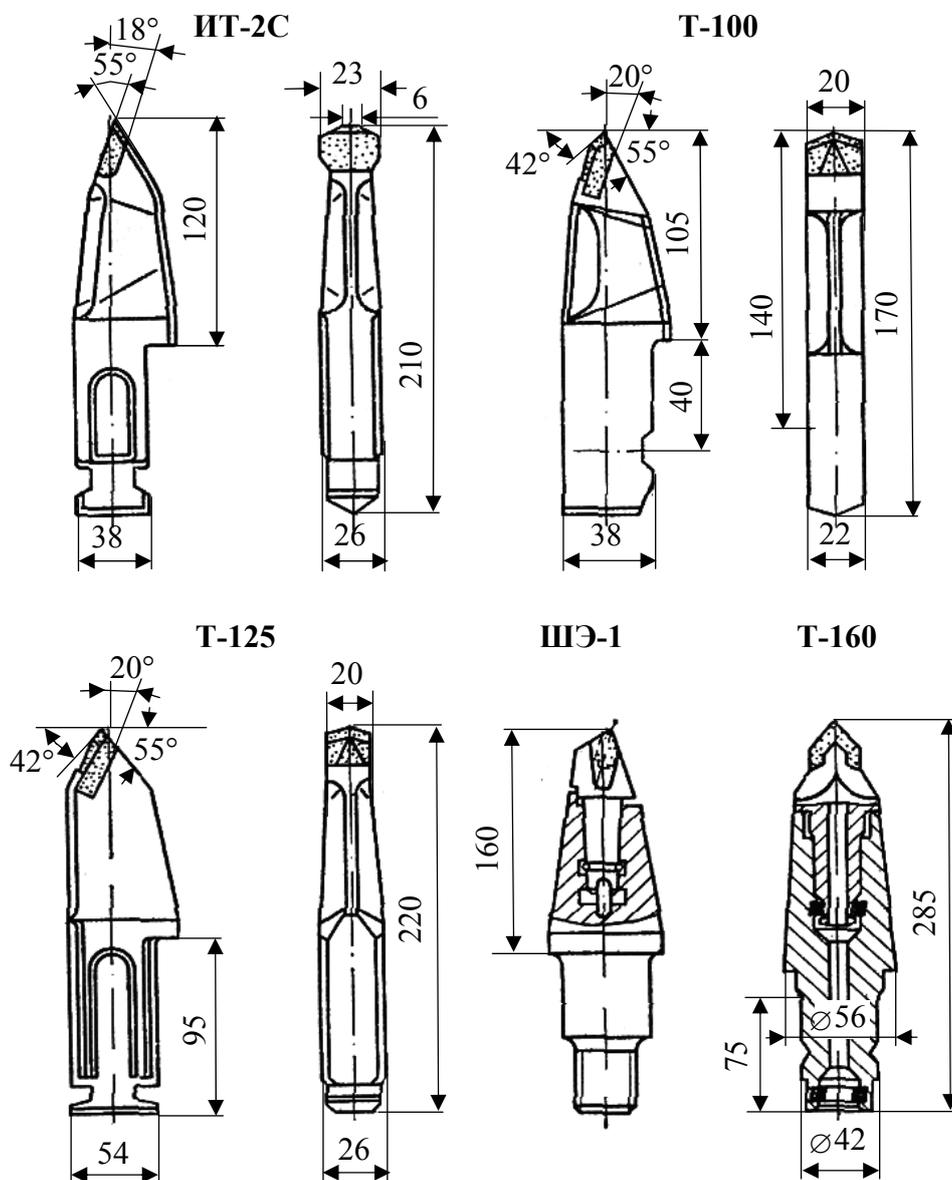


Рис. 7.3. Тангенциальные резцы для шнековых органов угольных комбайнов

Первый этап. Тангенциальный резец ИТ-2С (рис. 7.3) использовался на шнековых исполнительных органах комбайнов 2К-52, 1К-101 и 1ГШ-68 при работе по чистым углям с сопротивляемостью резанию до 150 Н/мм, легко отделяющимся от кровли и почвы. Благодаря увеличенному до 30° переднему углу и до 80 мм шагу резания такие резцы обеспечивали снижение выхода мелких классов угля. Резцы комплектовались эластичной рамкой для безболтового крепления.

Тангенциальные резцы Т-100 (рис. 7.3) были разработаны ВНИИПТуглемашем и ИГД им. А.А. Скочинского. Резцы армировались вставкой из твердого сплава ВК8В специальной формы, предложенной кафедрой горных машин НПИ, ВНИИТС и Краснолучским машиностроительным заводом. Форма вставки (трехгранная передняя поверхность, наличие фаски и вершины на режущей кромке), выявленная в результате научных исследований, обеспечивала высокую прочность армировки. Резцы прошли успешные испытания на крепких и вязких углях с крупными включениями колчедана.

Тангенциальные резцы Т-125, разработанные Гипроуглемашем, предназначались для углей любой абразивности с сопротивляемостью резанию до 200 Н/мм. Они армировались вставкой от резца Т-100 и имели в сравнении с последним увеличенный вылет.

Составные тангенциальные резцы Т-160 и ШЭ-1 были рассчитаны на работу по углям с сопротивляемостью резанию до 240 Н/мм и предельной толщиной стружки до 100 мм. В процессе эксплуатации у них заменялась относительно легкая и недорогая головка, а державка использовалась многократно. Резцы ШЭ-1 успешно прошли производственные испытания.

Второй этап. Тангенциальные резцы Т100 (ТП100) (рис. 7.4, а) и ИТ-125С (ТП125) (рис. 7.4, б), имеющие прямоугольное сечение хвостовика, предназначены для шнековых исполнительных органов угольных и сланцедобывающих комбайнов (при выемке сланцев сопротивляемостью резанию до 360 Н/мм, угля – до 300 Н/мм при наличии в угольном пласте породных включений с  $f \leq 3$ ). Эти резцы имеют большую конструктивную ширину режущей части, устанавливаются на шнеке с большим шагом и позволяют улучшить сортовой состав добываемых сланцев и углей, уменьшить энергозатраты на выемку и снизить пылеобразование. Крепление резцов Т100 в резцедержателе – безболтовое. Резцы ИТ-125С в резцедержателях закрепляются специальным резиновым кольцом, помещаемым в двух углублениях со стороны торца хвостовика. При работе комбайна резиновое кольцо препятствует перемещению резцов в резцедержателе в направлении продольной оси, что исключает потери резцов и повышает срок службы резцедержателей.

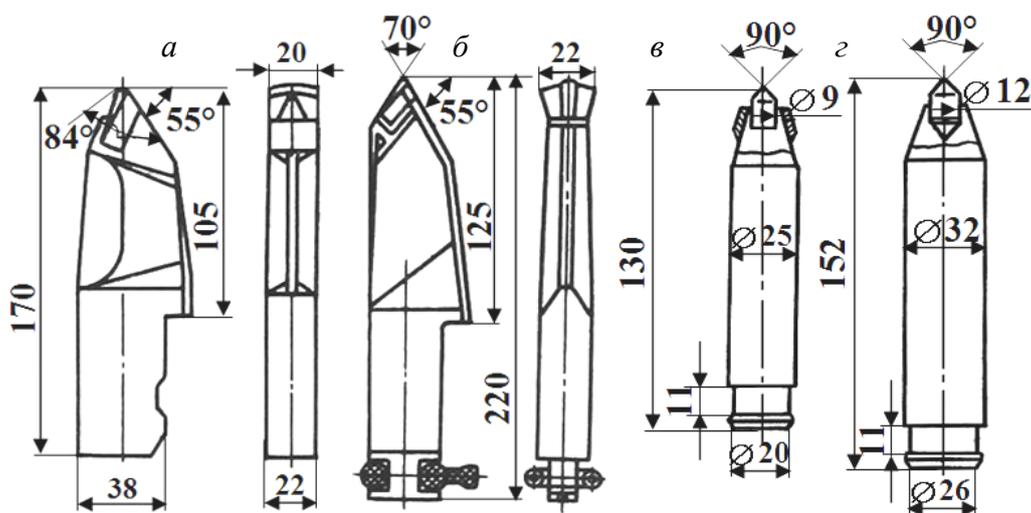


Рис. 7.4. Тангенциальные резцы

Тангенциальные поворотные резцы РКС1 (ТК65) (рис. 7.4, в) и РКС2 (ТК80) (рис. 7.4, г) имеют аналогичную конструкцию и отличаются только размерами. Создавались эти резцы для рабочих органов проходческих комбайнов избирательного дейст-

вия. Однако благодаря высоким эксплуатационным свойствам они широко применяются и на шнековых исполнительных органах очистных комбайнов. Основные их достоинства следующие: простота конструкции самого резца, простота и надежность крепления в резцедержателе, простота конструкции твердосплавной вставки в виде цилиндрического штыря и надежное закрепление его в цилиндрическом отверстии.

Резцы являются изделиями массового производства, поэтому, несмотря на многообразие их конструкций, основные параметры стандартизируются, а конструкции элементов крепления унифицируются.

Во времена Советского Союза разработкой режущего инструмента для горных комбайнов занимался ряд заводов и научных объединений: резцы типов РКС, РКС-1И, РКС-2 и РКС-3 созданы на основании типоразмерного ряда для поворотных резцов, разработанного ИГД им. А.А. Скочинского и институтом «ЦНИИподземмаш» совместно с заводами угольного машиностроения [17, 20–23, 30].

Особенность конструкции резцов типа РКС (рис. 7.5), заключается в том, что они выполняются в виде тел вращения 2, благодаря чему при контакте с углеродным массивом обеспечивается их самозатачивание. При работе такой резец опирается на торцевую поверхность 4, что, как показала практика, не обеспечивает ему требуемой прочности.

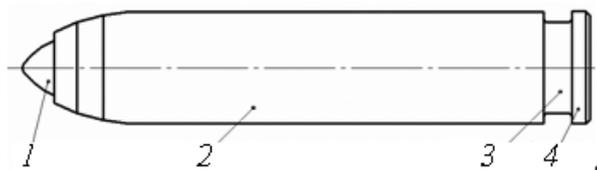


Рис. 7.5. Тангенциальный поворотный резец РКС-1:  
1 – твердосплавная вставка, 2 – корпус, 3 – замковое устройство,  
4 – опорная поверхность резца

Резцы являются изделиями массового производства, поэтому, несмотря на многообразие их конструкций, основные параметры стандартизируются, а конструкции элементов крепления унифицируются.

Впервые разработка параметрического ряда резцов для очистных комбайнов выполнена в ИГД им. А.А. Скочинского. В качестве главного параметра резца принят конструктивный вылет. К основным параметрам отнесены параметры резцов, характеризующие эффективность разрушения (угол заострения, задний конструктивный угол, ширина режущей части) и несущую способность державки, – размеры сечения хвостовика и отнесение его длины к конструктивному вылету.

Резцы РКС-1И разработаны и изготовлены в двух исполнениях: РКС-1И01 – основание под наплавку выполнено в форме вогнутой криволинейной поверхности (конструкция резца разработана Копейским машзаводом); РКС-1И02 – основание под наплавку выполнено в форме усеченного конуса – конструкция разработана Краснолучским машзаводом.

Особенность конструкции резцов типа РКС заключается в том, что они выполняются в виде тел вращения, благодаря чему при контакте с углеродным массивом обеспечивается их самозатачивание [17, 31]. При работе такой резец опирается на торцевую поверхность, что, как показала практика, не обеспечивает ему требуемой прочности.

Третий этап. Создание резцов для горных комбайнов в последние годы ведется в соответствии с параметрическими типоразмерными рядами, а также в соответствии с нормативной документацией [20].

В последние годы в РФ и в Кузбассе, в частности, был принят к использованию типоразмерный ряд тангенциальных поворотных резцов (ТПР) применительно к основным типам проходческих и очистных комбайнов [17, 32–39].

В качестве главного параметра (рис. 7.6) принят осевой вылет  $l$  (длина головной части) резца – расстояние от вершины твердосплавной вставки до опорной поверхности или места заделки. Радиальный вылет определяет максимально возможную толщину стружки. Главным установочным параметром является радиальный вылет  $l_p$ .

$$l_p = l \sin \theta \quad (7.1)$$

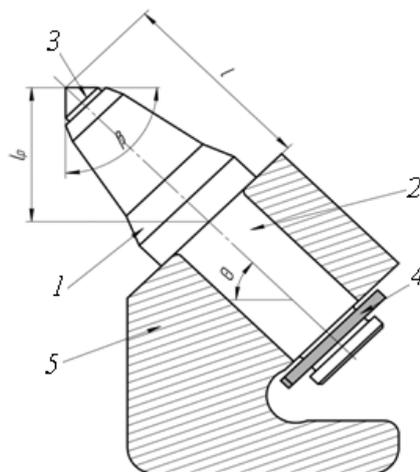


Рис. 7.6. Закрепление ТПР в резцедержателе:

$1$  – головная часть резца;  $2$  – хвостовая часть;  $3$  – вставка;  $4$  – замковое устройство;  
 $l_p$  – радиальный вылет,  $l$  – конструктивный вылет,  $\theta$  – угол установки резца,  
 $\beta$  – угол конусности вставки

На рис. 7.6 показано закрепление тангенциального поворотного резца  $1$  в резцедержателе  $5$ . Резец, состоит из корпуса, включающего головную  $1$  и хвостовую  $2$  части, твердосплавную вставку  $3$  и замковое устройство  $4$ .

Фирма JOY угол установки тангенциальных резцов на шнек применяет в интервале значений  $45$ – $50^\circ$ .

Для применения при легких и средних условиях наряду с рядовыми используются конструкции резцов, в которых головная часть выполнена с ребрами жесткости (рис. 7.7).

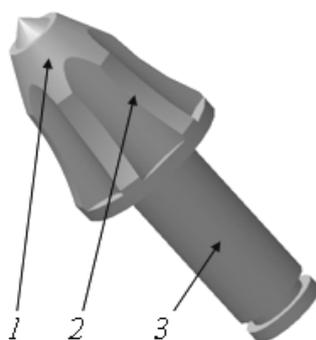


Рис. 7.7. Конструкция ТПР с ребрами жесткости:

$1$  – головная часть ТПР,  $2$  – ребра жесткости,  $3$  – хвостовая часть ТПР

При отбойке угольного массива с вмещающим пластом угля малой крепости, либо угля, значительно ослабленного отжимом, толщина стружки при резании тангенциальным поворотным резцом может составлять до  $2/3$  конструктивного вылета, при этом корпус резца подвержен в значительной степени абразивному износу и заштыбовке в резцедержателе.

Фиксация резца от поворота в кулаке (резцедержателе) приводит к одностороннему износу корпуса с последующим «выламыванием» твердосплавной вставки и соответственно к преждевременному выходу резца из строя.

Применение ребер жесткости обеспечивает резцу лучшее проникновение в массив (за счет уменьшения поперечного сечения) и благодаря наличию кромок (ребер), к более интенсивному вращению в резцедержателе, за счет работы сил трения и внецентренности нагружения.

Таким образом, несмотря на наличие ГОСТов на конструкции резцов и достаточно большого опыта их эксплуатации (более 30 лет), нет оснований утверждать, что возможности их исчерпаны. Напротив, именно в совершенствовании конструктивных элементов резцов заложены серьезные резервы увеличения их стойкости, и как следствие, производительности очистного комбайна.

Проведенные испытания ТПР позволили определить удельный расход резцов на ряде угледобывающих предприятий, выработать рекомендации по их применению в конкретных горно-геологических условиях и сформулировать два направления по их совершенствованию: конструктивное и технологическое [34].

Первое направление включает в себя создание ТПР с наилучшими показателями прочности (прочность корпуса, вставки, закрепления вставки в корпусе), износостойкости (как вставки, так и корпуса резца), работоспособности (вращение в резцедержателе, закрепление в резцедержателе) и надежности [40]. Это направление отражено, например, в патентах РФ: № 2212535 и № 44744 [41, 42].

Второе направление заключается в исследовании и использовании новых материалов для корпуса и режущей вставки ТПР и методов их обработки. Например, патент РФ № 54628 [43].

Учитывая особенности эксплуатации горных машин и их значительный рост по энерговооруженности [1, 4, 34], необходимо также принимать во внимание параметры их исполнительных органов и схем набора режущего инструмента [1, 3, 44–48].

В качестве примера следует отметить, что опыт эксплуатации ТПР в условиях ОАО «СУЭК-Кузбасс» показывает, что схемы расстановки резцов на исполнительных органах комбайнов не учитывают структуру угольного пласта. При работе комбайна исполнительные органы (шнеки или коронки) оснащаются, как правило, резцами одной серии, что приводит к интенсивному износу режущего инструмента, контактирующего с прослойком породы. Шаг расстановки резцов на исполнительных органах, как известно, при разрушении угля должен быть больше, чем при разрушении прослойков алевролита или песчаника. На практике схема расстановки резцов на шнеках очистного комбайна рассчитана на резание угля, а на коронках проходческого комбайна – на разрушение породы.

На предприятиях Кузбасса проектируются и разрабатываются исполнительные органы, конструкция которых позволяет устанавливать на них ТПР разных серий.

Для примера, ОАО «Завод Гидромаш», г. Новокузнецк (<http://gidromash.ru>), спроектировал коронку КППГ 58.000 для комбайна 1ГПКС (рис. 7.8, а) и коронку КППГ 72.000 для комбайна КСП-32 (рис. 7.8, б). Эти коронки оснащены резцедержателями РШ 501.01 (диаметр хвостовика резца 32 мм) и РШ 481.000 (диаметр хвостовика резца 32 мм). В одном резцедержателе можно устанавливать два резца. Также был спроектирован

шнек (рис. 7.8, в), для очистного комбайна оснащенный резцедержателями для установки двух резцов.

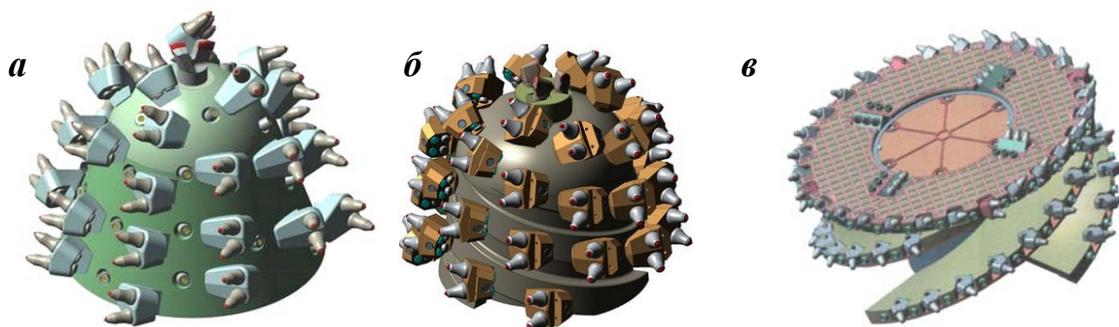


Рис. 7.8. Рабочие органы комбайнов

Тангенциальные поворотные резцы (ТПР) различаются в зависимости от конструктивных параметров, которые в свою очередь зависят от разрушаемой среды:

1. легкие – уголь ( $f=0,8-2$ ), применение резцов с твердосплавными вставками диаметром 8–16 мм цилиндрической, грибовидной формы с вогнутой поверхностью и конструктивным вылетом до 110 мм;

2. средние – уголь с прослойками породы ( $f=2-5$ ), применение резцов с твердосплавными вставками диаметром 16–25 мм грибовидной и цилиндрической формы диаметром 12–16 мм и конструктивным вылетом до 102 мм;

3. тяжелые – уголь с прослойками породы ( $f=2-5$ ) и твердыми включениями ( $f=5-8$ ), применение резцов с твердосплавными вставками диаметром 16–22 мм цилиндрической формы и конструктивным вылетом до 92 мм;

4. сверхтяжелые – уголь с прослойками породы ( $f=2-7$ ) и твердыми включениями ( $f=7-10$ ) большой протяженности, применение резцов с твердосплавными вставками диаметром 22–35 мм цилиндрической формы и конструктивным вылетом до 70 мм.

Зарубежные производители, например «Kennametal», распределяют горно-геологические условия аналогичным образом, т. е. на light (легкие), medium (средние), heavy (тяжелые), severe (сверхтяжелые) [29].

Схемы расположения резцов в линиях резания комбайнов SL300 и K500 представлены на рис. 7.9 и 7.10. В качестве примера в табл. 7.1, 7.2 приведены параметры резцов типа РШ и зарубежных резцов, их использование на различных горных комбайнах [17].

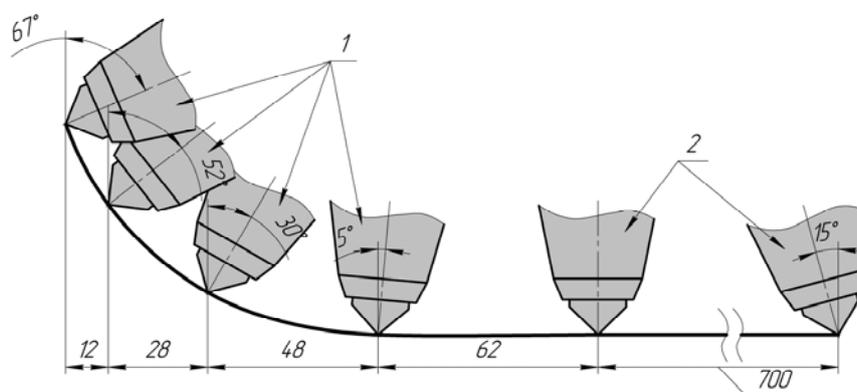


Рис. 7.9. Схема расположения резцов в линиях резания (SL300):  
1 – кутковые резцы, 2 – линейные резцы

Широко применяемый в практике комбайн SL300 имеет четырехзаходный шнек и восемь линий резания в линейной части шнека и четыре в кутковой. Очистной комбайн SL500 также имеет четырехзаходный шнек, количество линий резания с линейно установленными резцедержателями в нем равняется одиннадцати.

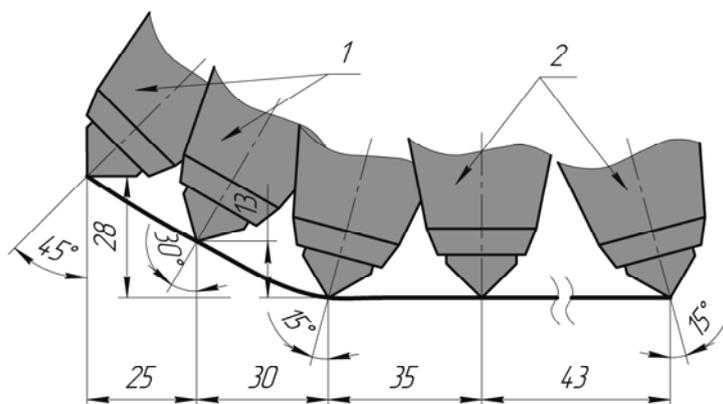


Рис. 7.10. Схема расположения резцов в линиях резания (K500):  
1 – кутковые резцы, 2 – линейные резцы

Таблица 7.1

Основные размеры ТПР и их применимость к определенным типам комбайнов

пп/ п	Тип резца	Диаметр хвостовой части, мм	Длина хвостовой асти, мм	Длина головной части, мм	Диаметр вставки, мм	Тип комбайна
1	РШ 25-65/12	25	65	58	12	1ГПКС, 12СМ18, 14СМ15, КШЗМ
2	РШ 25-65/16 SK	25	65	63	16	
3	РШ 25-65L68/16SK	25	65	68	16	
4	РШ 30-72L80/16SK	30	72	80	16	АВМ-20, ЕL3000, 4LS20
5	РШ 30-72L90/17.5	30	72	90	16	
6	РШ 130-75L90/16SK	30	75	90	16	S-200, КСW- 460,475,500,620 SM-130
7	РШ 30-75/16	30	75	70	16	
8	РШ 30-75/17.5	30	75	90	17.5	
9	РШ 30-75/25	30	75	70	25	
10	РШ 30-78/16 SK	30	78	75	16	12СМ15
11	РШ 30-80/16	30	80	75	16	ЕТ-120(210)
12	РШ 32-70/16SK	32	70	75	16	КП-21,К-500, 2ГШ68,1КШЭ, КШЗМ, МВ12, КСW-500
13	РШ 32-70/16	32	70	75	16	
14	РШ 32-70L90/16SK	32	70	90	16	4LS5,МВ12, KGS, 4ПП2М, LH-1300
15	РШ 32-75/16	32	75	80	16	
16	РШ 32-78/16	32	78	80	16	KGS,КСW-460
17	РШ 32-78L90/16SK	32	78	90	16	
18	РШ 32-80L90/16SK	32	80	90	16	
19	РШ 32-80/16	32	80	85	16	

пп/ п	Тип резца	Диаметр хвостовой части, мм	Длина хвостовой асти, мм	Длина головной части, мм	Диаметр вставки, мм	Тип комбайна
20	РШ 32-85L90/16SK	32	85	90	16	П-110,220
21	РШ 33-85/16	33	85	70	16	КСП-32
22	РШ 35-95/16	35	95	102	16	6LS5
23	РШ 38-110/16	38	110	92	16	SL300(500)

*Примечание:* SK – обозначение соответствует «грибковой» форме твердосплавной вставки.

Таблица 7.2

*Параметры зарубежных резцов*

Тип резца	Диаметр хвостовой части, мм	Длина хвостовой части, мм	Длина головной части, мм	Диаметр вставки, мм	Тип комбайна
U765K 2.5.63	25	65	64	16	1ГПКС, 12СМ18, 14СМ15, КШЗМ
U85AUS I6NB	30	72	85	16	АВМ-20, EL3000, 4LS20
AM510FG	30	75	75	16	S-200, КСW-460,475,500,620; SM-130
U94KHD	35	94	89	19	6LS5

Отечественный очистной комбайн, используемый на шахтах Кузбасса, К-500 оснащен трехзаходным шнеком и обеспечивает последовательную схему резания с количеством резцов в линии резания равным трем.

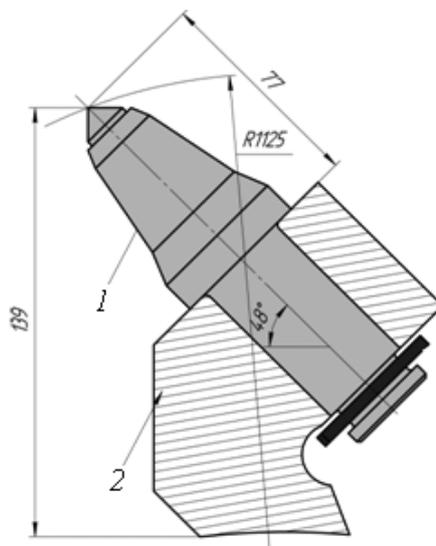


Рис. 7.11. Схема установки резцедержателя на шнеке комбайна SL300:  
1 – тангенциальный поворотный резец; 2 – резцедержатель

Угол установки резцедержателей (рис. 7.11, 7.12) отечественного и импортного производства изменяется в интервале значений  $45\text{--}55^\circ$ , что согласно исследованиям, проведенным в ИГД им. А.А. Скочинского является оптимальным интервалом значений угла установки резцов.

Гамма изменяемых параметров резца включает возможность изменения формы и состава режущей вставки, способа закрепления в корпусе резца, геометрии головной части, применения составного резца и закрепляющего устройства иной конструкции.

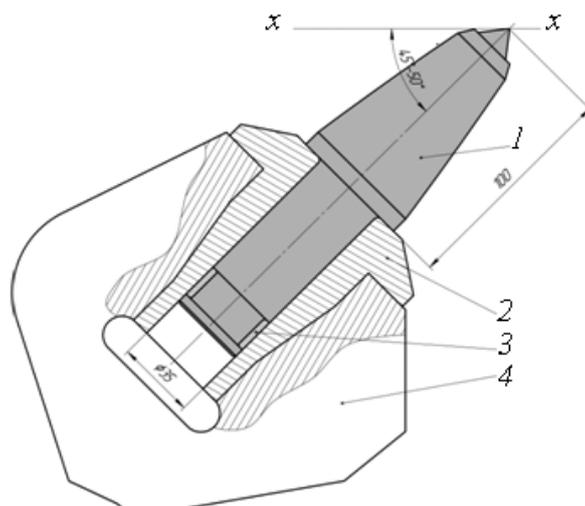


Рис. 7.12. Схема установки резцедержателя на шнеке комбайна 4LS20:  
1 – резец РШ 35-95/18SK; 2 – втулка резцедержателя; 3 – крепежный элемент;  
4 – резцедержатель; XX – линия резания

Для армирования тангенциальных поворотных резцов главным образом применяют твердосплавные вставки: цилиндрической и грибковой форм. Цилиндрический (рис. 7.13, а) твердый сплав используют при прочных породах и небольшом заглублении резца. Грибковый (рис. 7.13, б) твердый сплав применяется при достаточно непрочных породах, в связи с тем, что благодаря зауженной посадочной части твердосплавной вставки более широкая ее часть защищает паяную поверхность, тем самым предотвращая вылом вставки при абразивном износе корпуса резца вокруг нее.

Также используют в качестве формы поверхности режущей вставки – тела вращения, не содержащие концентраторов напряжений в вершине.

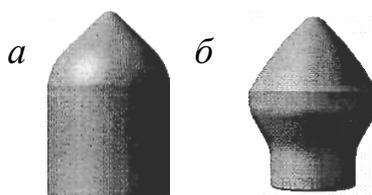


Рис. 7.13. Твердосплавные вставки:  
а – цилиндрической формы; б – грибковой формы

Таким образом, несмотря на наличие ГОСТов на конструкции резцов и огромный опыт их эксплуатации (несколько десятков лет), нет оснований утверждать, что возможности их исчерпаны. Напротив, именно в совершенствовании конструктивных элементов резцов заложены серьезные резервы увеличения их стойкости и, как следствие, производительности комбайнов.

В настоящее время тангенциальные поворотные резцы (ТПР) для очистных и проходческих комбайнов выпускают: ООО «Горный инструмент» (серия РШ), ООО «Кузнецкий машиностроительный завод» (серия РКС, РС, РП, РУ), ОАО «Гидромаш» (серия РГ, РП), ОАО «Копейский машзавод» (серия РС, РКС, ПС), ЗАО «Белтехнология и М» (серия РКС, ПС, UZ), ЗАО СП «Пигма-Кеннаметал» (серия РГ и G), фирма «РУМ-Сервис» (серия RG), ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (серий D, G, J, K, M, N, P, Q, R, Z, Y, X), фирма «Kennametal» (серия U и AM и др.), компания «Sandvik Mining and Construction» Швеция (серии P, Q, W, T).

Фирма «Kennametal» (США) выпускает тангенциальные поворотные резцы (ТПР) для легких (light), средних (medium), тяжелых (heavy) и сверхтяжелых (severe) условий эксплуатации серий AM, K, KSM, MR, C, TS, U, YB, UC. Анализ геометрических параметров резцов показывает, что для легких и средних условий их головные части имеют вогнутую или коническую, а для тяжелых и сверхтяжелых, как правило, выпуклую поверхности. Твердосплавные вставки для Light и Medium имеют цилиндрическую форму и диаметр 12; 16; 17,5; 18; 19 мм. Для условий Heavy и Severe используются вставки цилиндрической и грибовой форм диаметром 19,5; 22 и 25 мм. ТПР фирмы «Kennametal» имеют хвостовики диаметром 25; 29; 30; 31; 32; 33; 35; 38; 51; 52; 76 мм, а также двухступенчатые хвостовики диаметрами 30×38 мм; 31×33 мм и конические 40×52 мм. Для легких и средних условий эксплуатации фирма выпускает резцы с головной частью, имеющей ребра жесткости (например, резец AM511PFGK357), а для тяжелых условий поверхность головной части резцов имеет упрочняющее покрытие (U200HF2.217,5; U200TSHF32.74; AM962HF).

Компания «Sandvik Mining and Construction» (Швеция) [24] серийно выпускает тангенциальные поворотные резцы серий P, Q, W, T. Примеры конструкций этих резцов, резцедержателя, переходной втулки и твердосплавных вставок приведены на рис. 7.14, 7.15.

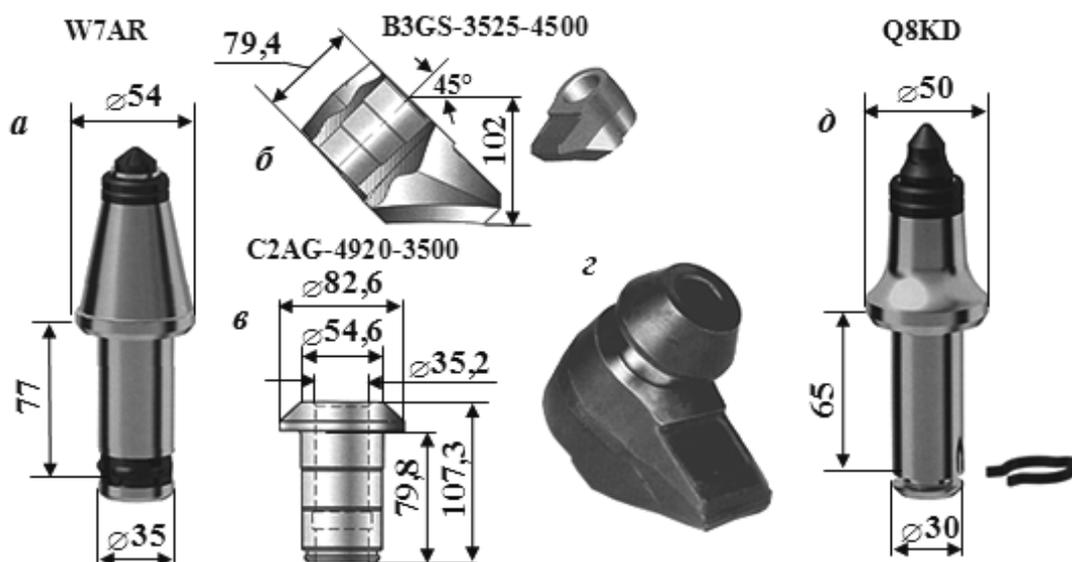


Рис. 7.14. Конструкции резцов, резцедержателя, переходной втулки

Для повышения стойкости резцедержателей хвостовики ТПР вставляются в них посредством переходной втулки, защищающей резцедержатель и исполнительный орган горной машины от износа. Резцедержатели «Sandvik» поставляются с вращающимися, невращающимися и запрессованными втулками, которые изготавливаются из вы-

сокопрочных сплавов, прошедших термообработку и высокочастотную закалку. Для улучшения вращения резцов внутри втулки их головная часть выполняется ребристой (Q7MF, Q8KF, Q8AF, T8AF). Резцы компании «Sandvik» выполняются с хвостовиками диаметрами 25, 30, 35, 38, 38×30, 43×35 и 50 мм. Для защиты головной части резцов от износа за твердосплавной вставкой устанавливаются карбидные кольца (W3AR, W3XA, W3XD, W6JX, W7AR, W7AX, T8AF, W8KD) – рис. 7.14, а. Карбидные кольца «Trispec TM» устойчивы к искрению, что особенно важно при работе на шахтах, опасных по газу и пыли. Для повышения прочности резцов их головные части имеют большую опорную поверхность диаметрами 35, 40, 41, 46, 48, 50, 51, 52, 54, 55, 58, 60, 62, 65, 67 мм. Этой поверхностью резец опирается на переходную втулку, а последняя – на резцедержатель. На рис. 7.14, б показан резцедержатель серии B3GC и переходная втулка C2AG – на рис. 7.14, в (серий C2AG, C2LG, C3BB, C4AS, C4BB, C4PA, C3PH, C4BU), а на рис. 7.14, г представлен резцедержатель в сборе. Компания «Sandvik» выпускает резцы как с наружными – рис. 7.14, д (K60, K76, K37, K30, K86, K104, K102, M8C-0033), так и с внутренними – рис. 7.14, а (K35, K36, K47SLV, K93, K80, K96, K90, M8C, K66) фиксаторами.

Твердосплавные вставки компании «Sandvik» выпускаются коническо-цилиндрической рис. 7.15, а и грибовидной форм рис. 7.15, б и 7.15, в. При этом вставки коническо-цилиндрической формы (рис. 7.15, а) рекомендуются для крепких, а грибовидной формы (рис. 7.15, б и 7.15, в) для мягких и средней крепости пород. Твердосплавные вставки имеют омедненную посадочную поверхность, которая увеличивает прочность их соединения с головной частью резца.

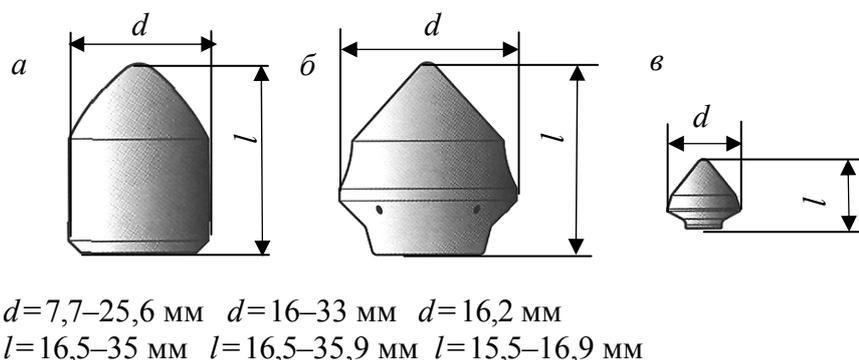


Рис. 7.15. Конструкции твердосплавных вставок

В качестве примера можно отметить горный инструмент повышенной стойкости – поворотные ступенчатые резцы РГ401-12, РГ401-12С, РГ501-16, РГ501-16С производства ОАО «Завод Гидромаш» (рис. 7.16) [35]. Резцы предназначены для оснащения исполнительных органов проходческих и очистных комбайнов.

Твердосплавные вставки ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (для ТПР серий D, G, J, K, M, N, P, Q, R, Z, Y, X) [27] представлены на рис. 7.17.

При разрушении горных пород с пределом прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} \leq 50$  МПа и показателем абразивности  $a \leq 10-18$  мг рабочими органами проходческих комбайнов 1ГПКС стойкость резцов РГ401 (рис. 7.16) в 6–8 раз превышает стойкость резцов РКС1.

При разрушении горных пород с пределом прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} \leq 70$  МПа и показателем абразивности  $a \leq 12-18$  мг рабочими органами проходческих комбайнов 4ПП-2М, 1ГПКС и очистных комбайнов К500 стойкость резцов РГ501 (рис. 7.16) в 6–8 раз превышает стойкость РКС2.

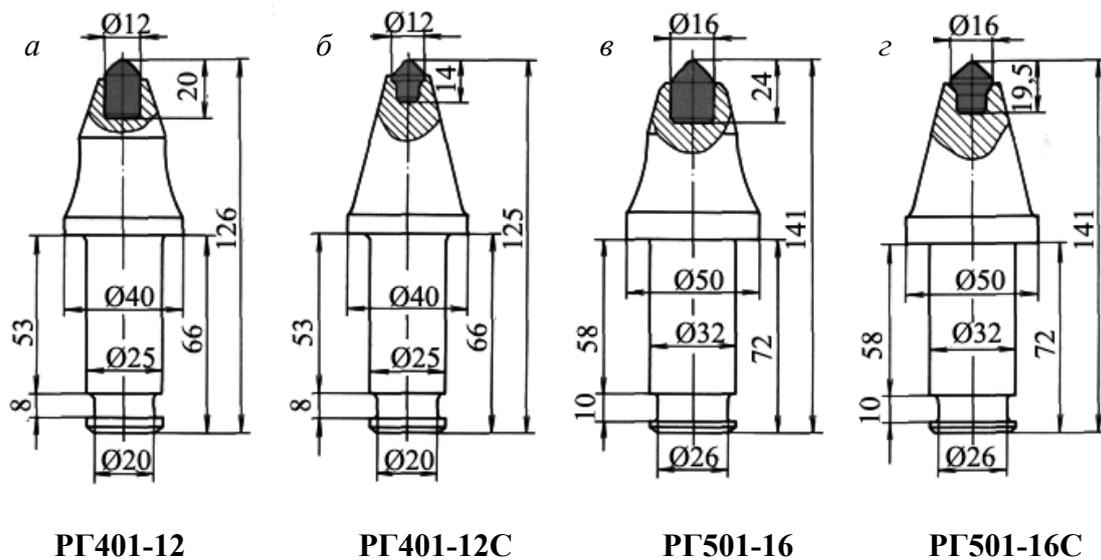


Рис. 7.16. Резцы серии РГ

Преимущества резцов типа РГ:

- высокая механическая прочность державки резца за счет применения высокопрочных сталей с последующей термообработкой и надежное закрепление твердого сплава в державке методом пайки;
- низкая вероятность заклинивания резца в кулаке, что обеспечивает его самозатачивание и снижает динамику работы комбайна;
- повышенный срок службы за счет увеличения диаметра выступающей части резца и переноса его опоры на кольцевую часть в средней части резца;
- снижение удельного расхода резцов в 6–8 раз по сравнению с серийными РКС1, РКС2 и ЗР4.80;
- повышение производительности комбайна на 10–15 %.

Расшифровка обозначений резцов типа РШ, РС представлена на рис. 7.18 и 7.19.

Тангенциальные резцы типа РШ разрабатываются специалистами завода ООО «Горный инструмент» под конкретные горно-геологические условия (табл. 7.3, приложение 1) [25].

Таблица 7.3

Условия работы резцов РШ ООО «Горный инструмент»

Наименование условий	Легкие	Средние	Тяжелые	Сверхтяжелые
Обозначение условий	Л	С	Т	СТ
Характеристика массивов	Уголь ( $f=0,8-2$ )	Уголь с прослойками породы ( $f=2-5$ )	Уголь с прослойками породы ( $f=2-5$ ) и твердыми включениями ( $f=5-8$ )	Уголь с прослойками породы ( $f=2-7$ ) и твердыми включениями ( $f=7-10$ ) большой протяженности

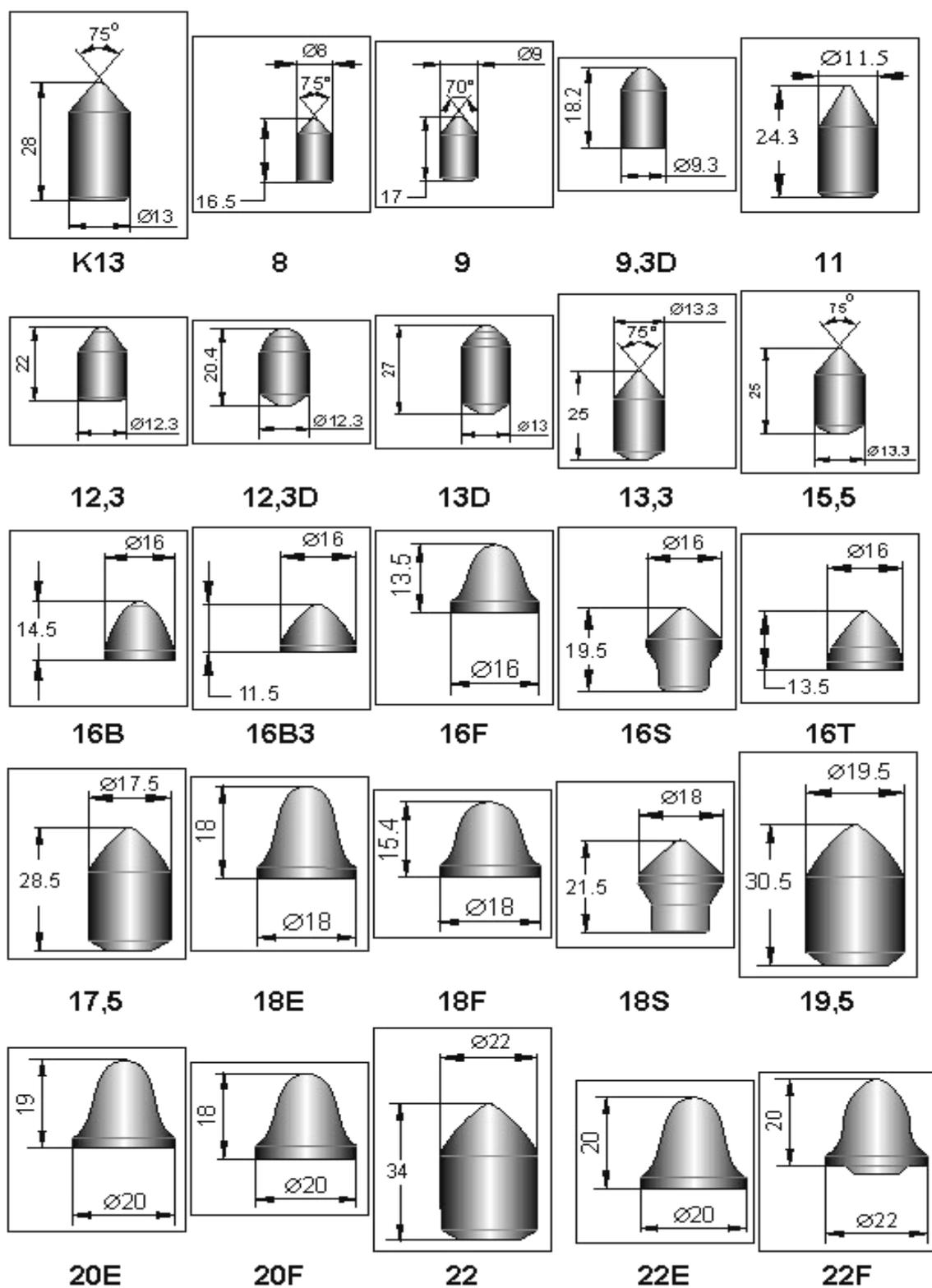


Рис. 7.17. Твердосплавные вставки  
ОАО «Кировградский завод твердых сплавов»

Для правильного подбора резцов типа РШ, в зависимости от горно-геологических условий и типа оборудования, рекомендуется придерживаться следующих данных ООО «Горный инструмент» (табл. 7.4).

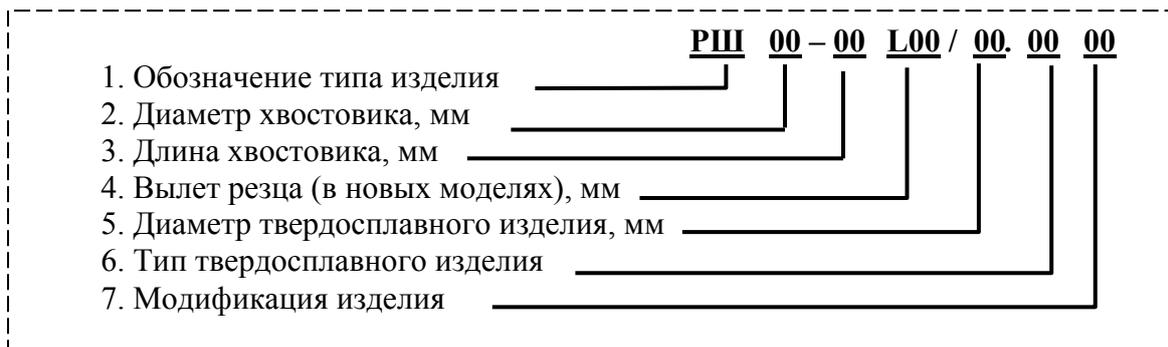


Рис. 7.18. Расшифровка обозначения резцов типа PSH

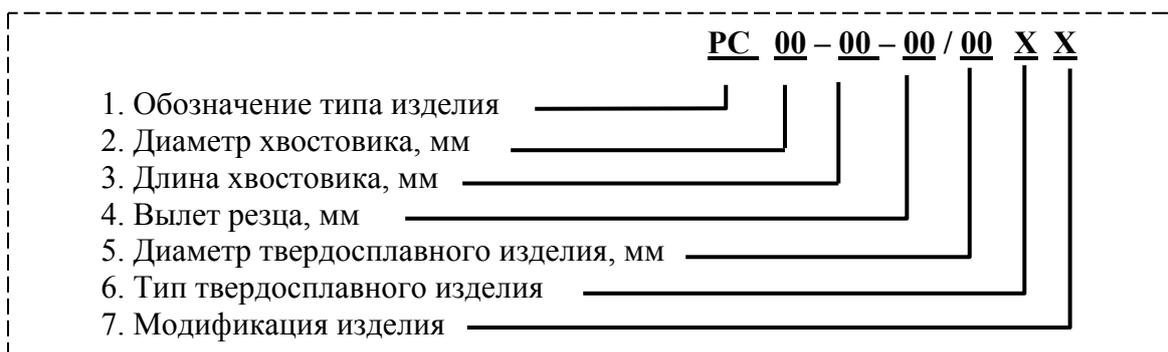


Рис. 7.19. Расшифровка обозначения резцов типа PC

Таблица 7.4

Применяемость резцов типа PSH ООО «Горный инструмент»

Диаметр хвостовика, мм	Тип резца	Применяемость	Горно-геологические условия			
			легкие	средние	тяжелые	сверх-тяжелые
25	PШ 25-65/12	1ГПКС, 12СМ18, 14СМ15, КШЗМ	+			
	PШ С-25-65L70/13		+			
	PШ С-25-65L72/16SK			+		
	PШ 25-65/16SK				+	
	PШ С-25-65L68/16SK				+	
30	PШ 30-72L85/16SK	АВМ-20, ЕL3000, 4LS20	+			
	PШ 30-72L80/16SK			+		
	PШ 30-72L90/17,5				+	
	PШ С-30-75L90/16SK	S-200, КСW-460 (475, 500, 620), SM-130	+			
	PШ 30-75/16			+		
	PШ 30-75/17,5				+	
	PШ 30-75/25					+
	PШ С-30-78L90/16SK	12СМ15	+			
	PШ 30-78/16SK			+		
	PШ 30-80L85/16SK	ЕТ-120 (210)	+			
PШ 30-80/16			+			

Диаметр хвостовика, мм	Тип резца	Применяемость	Горно-геологические условия			
			легкие	средние	тяжелые	сверхтяжелые
32	РШ 32-70-L90/16SK	КП-21, К-500, 2ГШ68, КШЭ, KSW-500, MB12, КШЗМ	+			
	РШ С-32-70-L90/16SK		+			
	РШ 32-70/16SK			+		
	РШ 32-70/16.M1	4LS5, MB-12, KGS, 4ПП2М, LH-1300			+	
	РШ 32-75-L90/16SK		+			
	РШ С-32-75-L90/16SK	KGS, 4ПП2М, LH-1300	+			
	РШ 32-75/16			+		
	РШ С-32-78L90/16SK	KGS, KSW-460	+			
	РШ 32-78/16			+		
	РШ 32-80-L90/16SK	KSW-460	+			
	РШ С-32-80-L90/16SK		+			
	РШ 32-80/16			+		
32	РШ 32-85-L90/12SK	П110, П220, KGS	+			
	РШ 32-85-L90/16SK		+			
	РШ С-32-85-L90/16SK		+			
	РШ 32-85/16			+		
	РШ 32-85/18SK				+	
	РШ С-32-85-L80/18SK				+	
	РШ 32-85/17,5					+
РШ 32-85/18SK.M2				+		
33	РШ 33-85/16	КСП 32 (42,22)		+		
	РШ С-33-85-L90/18SK			+		
	РШ С-33-85-L80/18SK				+	
	РШ 33-85/17,5					+
35	РШ 35-95/16	6LS5	+			
38	РШ 38-75/12,5	AM-65(75), МК-2В	+			
	РШ С-38-75-L102/16SK		+			
	РШ 38-75/17,5.M1			+		
	РШ 38-75/17,5				+	
	РШ 38-75/19.M2				+	
	РШ 38-75/19.M1				+	
	РШ 38-75/19				+	
	РШ 38-75/22					+
	РШ 38-120/22					+
	РШ 38-80/18SK	KSW-1140	+			
	РШ 38-80/17,5			+		
РШ 38-110/16	SL-300(500)		+			

Тангенциальные поворотные резцы типа РШ для очистных и проходческих комбайнов производства ООО «Горный инструмент» имеют двухступенчатую конструкцию, что позволяет перенести упор в резцедержателе с торцевой части хвостовика на

кольцевую часть головки. Данное обстоятельство улучшает вращение резца, обеспечивает более равномерный износ цилиндроконических твердосплавных вставок и увеличивает эксплуатационную стойкость резцов в несколько раз по сравнению с резцами типа РКС-1 и РКС-2. Корпуса резцов типа РШ изготавливаются из высоколегированной стали и после термической обработки полностью обеспечивают требуемое сопротивление их стержней изгибу и срезу.

## 7.2. Конструктивные особенности гидромеханических тангенциальных резцов, область их применения, параметры

В настоящее время для расширения области применения горных машин в различных научных школах и НИИ проводятся исследования по созданию новых видов инструментов, которые совмещают в себе комбинацию различных существующих способов разрушения углей и пород (например, механический, электрофизический, гидравлический и другие).

За последние 30 лет на кафедре горных машин и комплексов ТулГУ сложилось научное направление, связанное с разработкой и совершенствованием гидроструйных технологий, в том числе и для горной промышленности (очистные и проходческие комбайны, струговые установки и др.) [48–51].

Комбинированный гидромеханический инструмент является базой для создания гидромеханических органов горных машин. Гидромеханический способ по сравнению с механическим обеспечивает следующие преимущества [48]:

- уменьшается нагрузка;
- охлаждается инструмент и снижается его износ;
- уменьшается пылеобразование;
- подавляется искрообразование при разрушении абразивных пород.

В частности, в работах [49, 50] предложено оснащать струги комбинированным гидромеханическим инструментом, выполненным по схеме «струя через резец», который реализует одновременное воздействие на массив высоконапорных струй воды и механических резцов.

Гидромеханический резец 1 (рис. 7.20) [49] имеет форму тела вращения. На рабочей головке резца закреплена твердосплавная вставка 2 с отверстием 7. Струеформирующее устройство выполнено в виде расположенной коаксиально с зазором в продольном канале 5 резца трубки 6 со струеформирующей насадкой 3. Один конец трубки жестко соединен с подводным коллектором 4. На свободном конце трубки закреплена соосно с соплом насадка 3 с выходным отверстием. Скорость резания составляла 2 м/с.

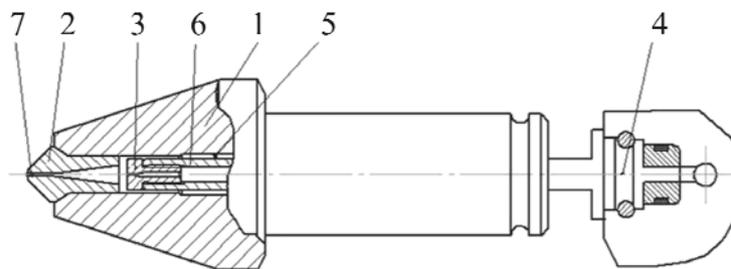


Рис. 7.20. Гидромеханический резец

При испытании этих резцов установлено, что изменение давления воды от 30 до 70 МПа приводит к снижению нагрузки на гидромеханических резцах до 47 % по сравнению с механическим инструментом.

Выявлено, что увеличение диаметра отверстия струеформирующей насадки существенно влияет на снижение нагрузки на гидромеханических резцах. Так, увеличение диаметра выходного отверстия насадки струеформирующего устройства от 0,4 до 0,8 мм приводит к уменьшению усилия резания в 1,9 раза.

Установлено рациональное отношение диаметра отверстия струеформирующей насадки к диаметру канала резца:  $d_o/d_k=0,75$ , при котором обеспечиваются минимальная энергоёмкость процесса разрушения массива и максимальная интенсивность снижения нагрузки на резцах на единицу подводимой гидравлической мощности.

Использование гидромеханических тангенциальных резцов позволяет повысить производительность исполнительных органов горных машин, расширить область их применения без увеличения их габаритов.

С учетом достоинств и недостатков, выявленных при испытаниях гидромеханических исполнительных органов проходческих комбайнов КП-25 и 4ПП-2М, был создан и испытан в стендовых и промышленных условиях гидромеханический исполнительный орган ГМРО с встроенным в коронку источником воды высокого давления для проходческого комбайна 1ГПКС.

Полученные результаты исследований (рис. 7.21) позволяют утверждать, что при использовании струй воды давлением 70–100 МПа и при наличии двигателя исполнительного органа мощностью 55 кВт (комбайн 1ГПКС) область применения гидромеханического комбайна может быть расширена на смешанные забои с присечкой пород с пределом прочности  $\sigma_{сж}$  до 70–80 МПа.

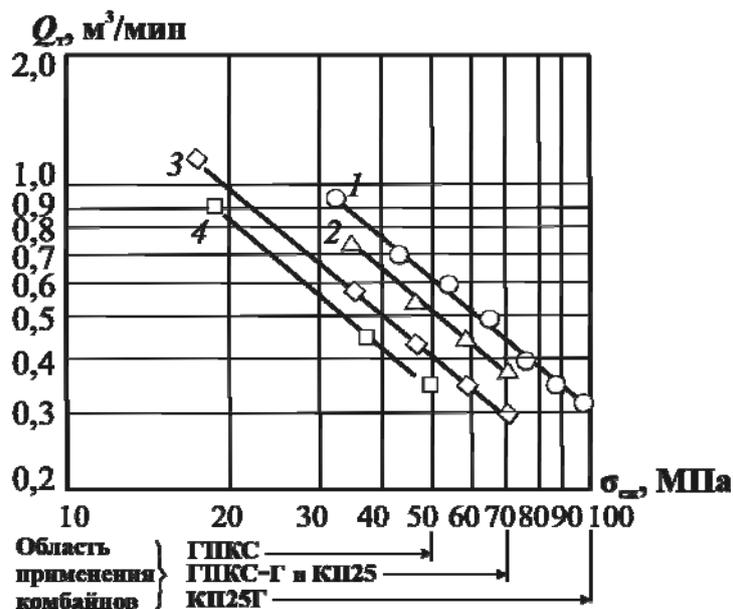


Рис. 7.21. Область применения и техническая производительность проходческих комбайнов в зависимости от прочности присекаемых пород:

- 1 – КП-25Г с гидромеханическим исполнительным органом;
- 2 – КП-25 с механическим исполнительным органом;
- 3 – ГПКС-Г с гидромеханическим исполнительным органом;
- 4 – ГПКС с механическим исполнительным органом

Режущая коронка оснащалась 20 механическими резцами РГ401-16 и 20 струеформирующими устройствами с насадками диаметром 0,4 и 0,6 мм, расположенными в одной линии резания. Встроенный преобразователь обеспечивал давление воды у насадок диаметром 0,4 мм до 180 МПа с суммарным расходом воды 33 л/мин.

Зонная система подачи высоконапорной воды обеспечивала одновременную работу 10 насадок [52].

При двигателе исполнительного органа мощностью 140 кВт (комбайн КП-25) область применения комбайнов может быть распространена на забои с  $\sigma_{сж} = 100\text{--}110$  МПа. Таким образом, целесообразными являются следующие области применения гидромеханических исполнительных органов комбайнов:

- породные и смешанные забои с присечкой пород прочностью до 100–110 МПа, где комбайновый способ проходки может заменить БВР;
- смешанные забои с присечкой пород прочностью до 70–80 МПа, где легкие комбайны типа ГПКС с гидромеханическим исполнительным органом могут конкурировать с комбайнами КП-25, значительно более мощными и дорогостоящими.

### 7.3. Формы и параметры головных частей тангенциальных поворотных резцов

Анализ всего многообразия используемых в настоящее время резцов [17] показал, что корпус ТПР условно подразделяется на ряд более простых геометрических элементов, выполняющих ту или иную определенную роль в разрушении угля и обеспечении работоспособности резца (рис. 7.22).

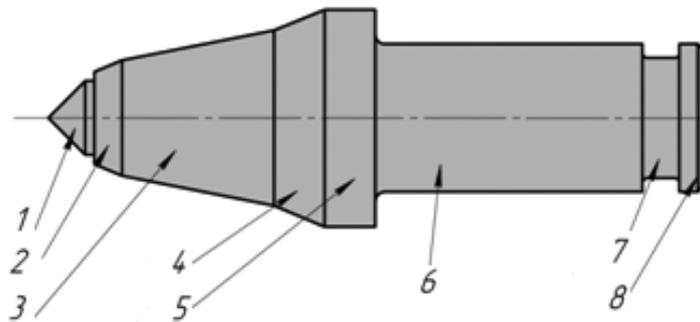


Рис. 7.22. Геометрические элементы ТПР

Корпус ТПР (рис. 7.22) условно подразделяется на ряд более простых геометрических элементов: 1 – твердосплавная вставка – основной режущий элемент ТПР; 2 – конусообразная ступень I, обеспечивающая прочность закрепления твердосплавной вставки в корпусе резца; 3 – конусообразная (вогнутая, выпуклая) ступень II, обеспечивающая требуемый конструктивный вылет ТПР; 4 – конусообразная (вогнутая, выпуклая) ступень III, обеспечивающая переход от цилиндрической части к конусообразной части II; 5 – цилиндрическая часть, обеспечивающая распределение осевой сжимающей нагрузки на корпус ТПР при разрушении угля; 6 – цилиндрическая (посадочная) часть; 7 – цилиндрическая часть для установки замкового устройства; 8 – бурт (цилиндрическая часть) для обеспечения прочного закрепления в резцедержателе.

Опорная часть 5 обеспечивает равномерную опору ТПР на корпус резцедержателя, тем самым, уменьшая напряжения в корпусе резца сжимающей и изгибающей силы.

Для ряда проходческих и очистных комбайнов посадочная часть резца выполняется двухступенчатой (рис. 7.23). Ступень 2 выполнена большей с целью уменьшения напряжений действующих в сечениях хвостовой части в зоне равной длине ступени.

Головная часть ТПР (рис. 7.24) может быть, одно, двух и трехступенчатой, а поверхность головной части выполняется в виде поверхности вращения, выпуклой, линейной или вогнутой поверхности вращения. Для всех этих поверхностей переменными вдоль оси X являются кривые с радиусами соответственно R5, R6 и R7. Цифрами 5, 6

и 7 обозначены контуры головной части резца. Цифрами 8, 9 и 10 обозначены линии, являющиеся первыми производными изменения радиусов поверхностей соответственно выпуклой, линейчатой и вогнутой по оси X. Производные  $dr/dx$  отображают собой интенсивность нарастания радиусов  $r$ , а значит и площадей сечения, так как площадь сечения тел вращения есть  $\pi r^2$ .

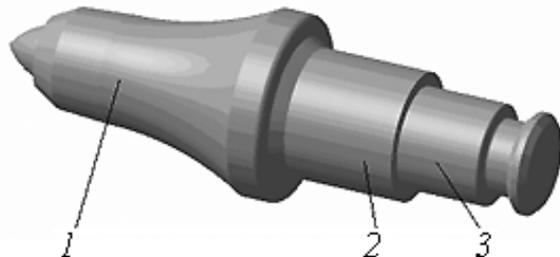


Рис. 7.23. Двухступенчатая посадочная часть ТПР:  
1 – головная часть ТПР, 2 – ступень I хвостовой части ТПР, 3 – ступень II хвостовой части

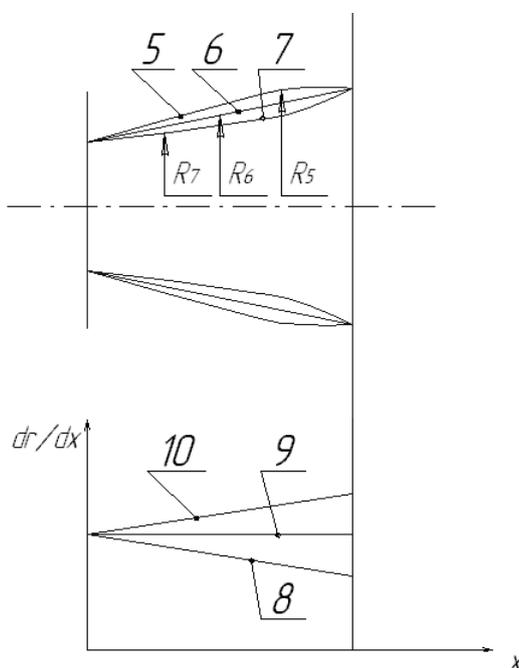


Рис. 7.24. Возможные формы поверхности головной части ТПР:  
5, 6, 7 – контуры головной части резца, выполненные соответственно в виде выпуклой, линейной и вогнутой поверхностей вращения;  
8, 9, 10 – первые производные изменения радиусов поверхностей соответственно выпуклой, линейной и вогнутой

Эти интенсивности изменяются в зависимости от  $x$  по-разному. При выпуклой поверхности интенсивность падает (кривая 8), при линейной поверхности интенсивность остается постоянной (прямая 9) и при вогнутой поверхности интенсивность возрастает.

Наиболее эффективными является случаи, когда интенсивность нарастания площадей увеличивается именно по представленным выше кривым. Целесообразно обеспечивать нарастание интенсивности площади, то есть квазилинейное возрастание (квази буквально означает примерно или почти линейное).

Создание поворотных резцов с соотношением длин головной и хвостовой частей в диапазоне  $l_{\Gamma} / l_{\text{X}} = 0,8 - 1,2$  (рис. 7.25) обеспечивает изменение площади сечения головной части по закону квазилинейного возрастания ее интенсивности, что является техническим решением, позволяющим использовать поворотные резцы с высокой прочностью.

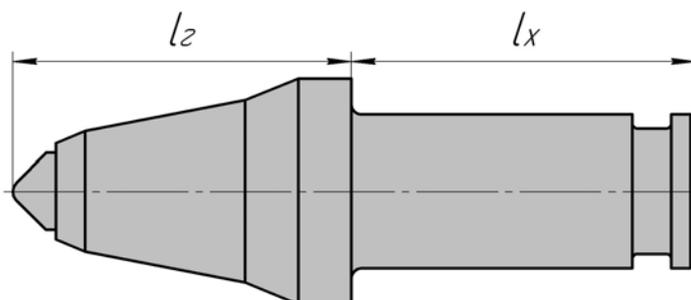


Рис. 7.25. Унифицированный тангенциальный поворотный резец (Пат. № 44744)

Конструкции резцов, выпускаемые как отечественными, так зарубежными производителями, можно условно подразделить на содержащие линейную (R6), выпуклую (R5) или вогнутую образующую (R7) головной части корпуса резцов (рис. 7.26).

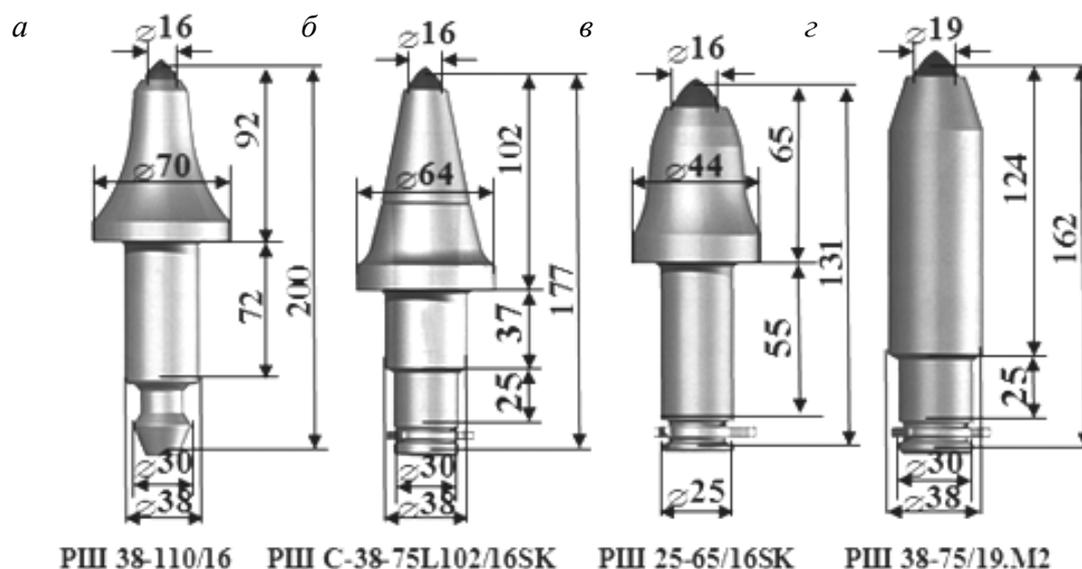


Рис. 7.26. Формы поверхностей головных частей ТПР:  
а – вогнутая; б – линейная; в – выпуклая; г – линейная

Линейная головная часть может быть выполнена в виде конуса или цилиндра. Классификация головных частей тангенциальных поворотных резцов (ТПР) приведена на рис. 7.27.

Вогнутая образующая корпуса в основном, применяется в резцах, используемых при отбойке легких углей. Вогнутость корпуса способствует уменьшению переизмельчения угля.

Линейная образующая корпуса резца, как правило, применяется в конструкциях резцов, работающих как по углю с присечкой породы, так и по породе. Для резцов работающих по прочным углям и породам, следует применять выпуклую поверхность головной части резца.

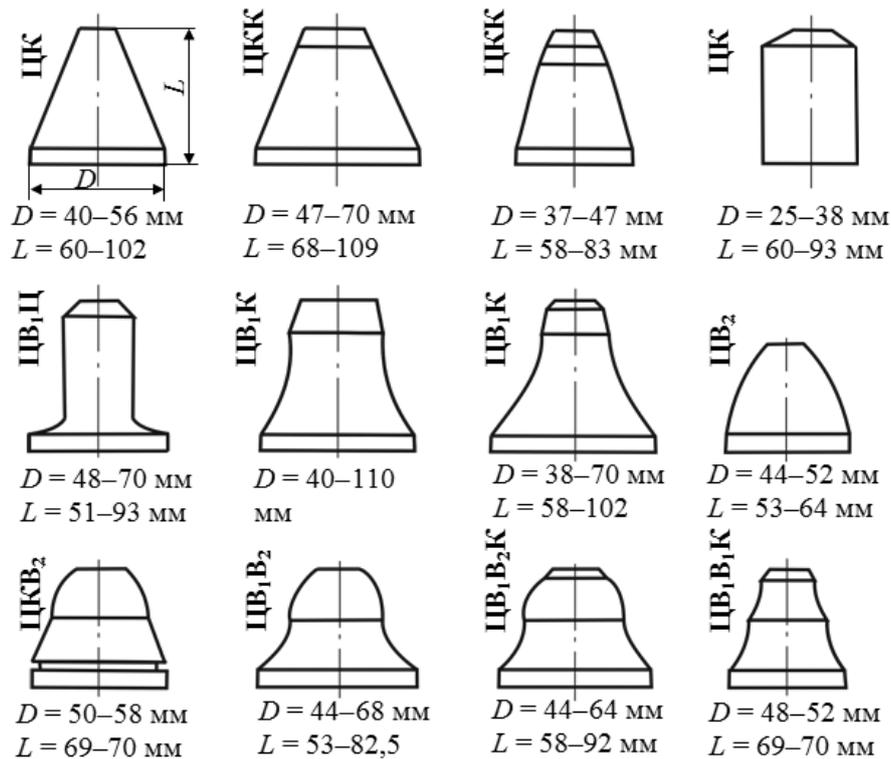


Рис. 7.27. Классификация головной части поворотных резцов:  
 Ц – цилиндрическая; К – коническая; В<sub>1</sub> – вогнутая; В<sub>2</sub> – выпуклая поверхности;  
 D – диаметр цилиндрической части; L – длина головной части

Как видно из рис. 7.27, головная часть ТПР может быть цилиндрической, вогнутой, конической или выпуклой. Цилиндрическая и вогнутая применяется в резцах, используемых при разрушении углей  $f=0,8-2$ . Вогнутая поверхность головной части имеет, по сравнению с конической и выпуклой, наименьшее поперечное сечение. Это обеспечивает минимальное сопротивление резанию и пылеобразованию, минимальную энергоёмкость процесса резания.

Коническая головная часть применяется, как правило, у резцов, разрушающих уголь с прослойками породы  $f=2-5$ .

В качестве примера и анализа головных частей поворотных резцов можно принять во внимание информацию ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» ([www.kzts.ru](http://www.kzts.ru)) [27].

#### 7.4. Формы и параметры твердосплавных вставок тангенциальных поворотных резцов

На основе анализа конструкций более двухсот твердосплавных вставок производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов», фирмы «Boart», ЗАО «Пигма-Кеннаметал», компании «Sandvik», фирмы «Kennametal» и др. выбраны лучшие, получившие наибольшее применение в ТПР (рис. 7.28).

Например, обозначение и размеры твердосплавных вставок производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (КЗТС) разделены по группам В, К, D, E, F, L, S ([www.kzts.ru](http://www.kzts.ru)) [27]. Каждая группа имеет несколько индексов, каждый индекс охватывает в себе конкретные размеры для вставок.

Важной характеристикой, влияющей на оптимальное разрушение среды, является заостренность индентора (твердосплавной вставки). Показателем остроты является ве-

личина обратная скорости изменения контактной площадки по мере внедрения индентора: медленное изменение размера площадки свидетельствует об остроте индентора.

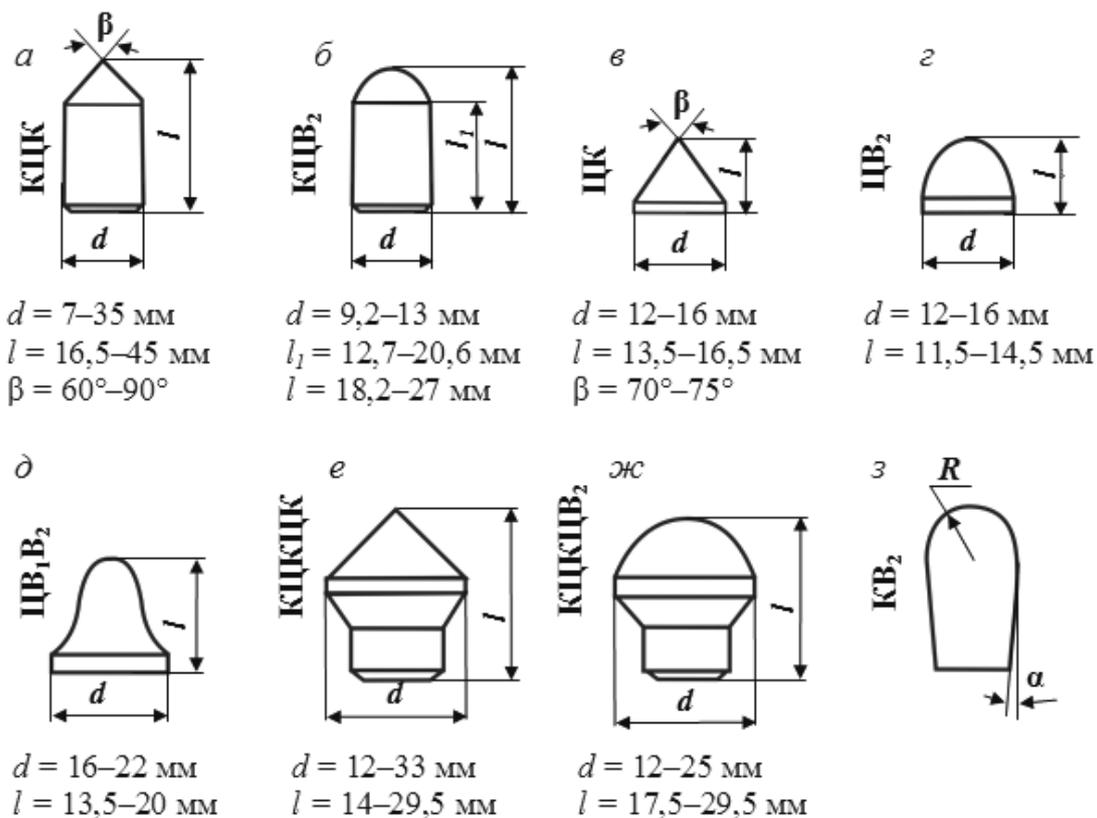


Рис. 7.28. Формы твердосплавных вставок ТПР:  
 Ц – цилиндрическая; К – коническая;  $B_1$  – вогнутая;  
 $B_2$  – выпуклая поверхности;  $d$  – диаметр вставки;  
 $l$  – длина вставки;  $\beta$  – угол заострения вставки

Как отмечалось выше основными видами твердосплавных вставок из карбида вольфрама, выпускаемых, как отечественными (ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов»), так и импортными («Boart», «Sandvik») производителями твердосплавных вставок, являются вставки цилиндрической и грибовой формы.

Размеры твердосплавных вставок ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» [27] представлены в табл. 7.5.

Таблица 7.5  
 Основные размеры цилиндрических твердосплавных вставок завода «КЗТС»

Номер изделия	Размеры, мм		
	d	h	$R_1$
Г6701	7	15	3.5
Г6702	9	17	4.5
Г6703	12	20	6.0
Г6704	16	24	8.0

Режущая часть твердосплавной вставки (рис. 7.29) представляет собой конус, являющийся концентратором напряжений. Конус с углом заострения  $90^\circ$  можно описать уравнением  $y = x$ .

Предлагаемый индентор – эллипсоид представляет собой вставку с рабочей частью (рис. 7.30), выполненной в форме эллипсоида вращения с посадочной ступенью в виде усеченного конуса, с углом конусности  $0-3^\circ$  (патент на изобретение № 2212535) [17].

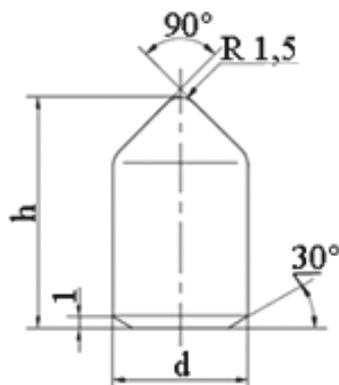


Рис. 7.29. Индентор (твердосплавная вставка), основные параметры:  
 $h$  – высота вставки,  $d$  – диаметр вставки

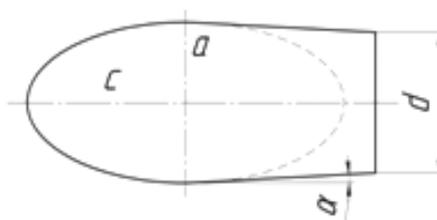


Рис. 7.30. Тангенциальный поворотный резец с твердосплавной вставкой, режущая часть, которой выполнена в форме эллипсоида вращения:  
 $a$ ,  $c$  – полуоси эллипсоида;  $d$  – диаметр посадочной части;  
 $\alpha$  – угол конусности посадочной части

В общем случае взаимодействие индентора и среды внедрения можно рассматривать как краевую задачу математики.

Для любой математической модели принадлежащей классу краевых задач характерно наличие некоторой ограниченной области, на которой известно необходимое количество условий. В нашем случае такими известными условиями являются смещения, вызванные внедрением штампа в упругую поверхность.

Для сравнительно простых форм штампов аналитические решения задачи о неизвестных параметрах внутри области, т. е. напряжениях и смещениях в среде, были найдены. Более сложные формы требуют использования численных методов.

В настоящее время наиболее известными численными методами являются метод конечных элементов и метод граничных элементов [17].

Метод конечных элементов предусматривает разделение всей изучаемой области сеткой элементов (рис. 7.31), каждый из которых рассматривается как стержень, подчиняющийся закону Гука.

Совместное действие элементов-стержней математически представляет собой систему линейных уравнений, которая решается одним из известных методов, напри-

мер методом Гаусса. Результатом решения являются значения напряжений или смещений в узлах сетки.

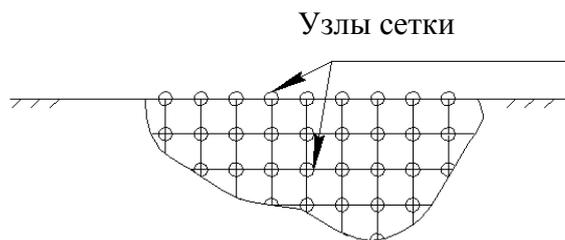


Рис. 7.31. Разбиение массива индентора сеткой конечных элементов

Метод граничных элементов во многом повторяет метод конечных элементов, но использование применительно к контактным задачам более специализированных, чем закон Гука аналитических зависимостей, позволяет подвергнуть разбиению на элементы только наружную область. Это приводит к существенному сокращению числа элементов (рис. 7.32), системы линейных уравнений и времени решения задач.



Рис. 7.32. Разбиение массива индентора сеткой граничных элементов

Сравним инденторы – конусы и инденторы – эллипсоиды (рис. 7.33), по их воздействию на углеродный массив ( $E = 5000$  МПа,  $\mu = 0,3$ ).

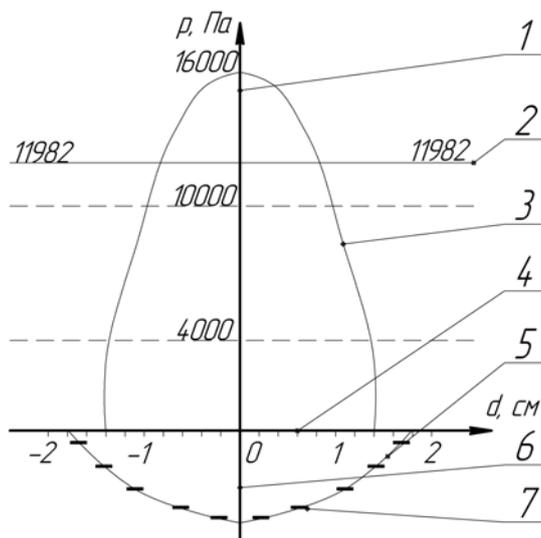


Рис. 7.33. Пример расчета взаимодействия индентора с разрушаемой средой:  
 1 – шкала давлений, 2 – среднее давление,  
 3 – график распределения давления под индентором, 4 – шкала площадки контакта,  
 5 – форма внедрившейся части индентора, 6 – шкала глубины внедрения,  
 7 – граничный элемент

Расчеты взаимодействия инденторов со средой производились с использованием программы *Contact v.3.0*, в которой реализуется метод граничных элементов.

Зададим условно глубину внедрения 10 мм, а число граничных элементов – 10.

Модуль Юнга для твердого сплава ВК10 составляет  $E = 5,98 \cdot 10^5$  МПа [17].

Таким образом, совершенно очевидно, что модуль упругости индентора в сотни раз превышает модуль упругости углеродного массива, поэтому вполне допустимо рассматривать индентор как абсолютно жесткое тело (штамп).

Инденторы будем сравнивать по давлению под ними, усилию внедрения, объему разрушения (рис. 7.34).

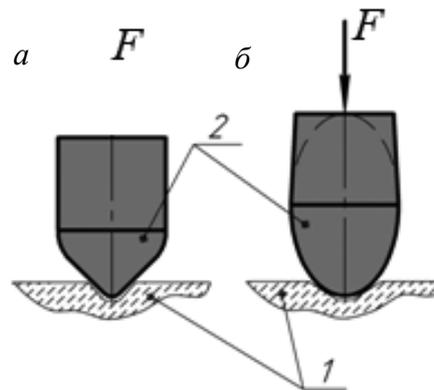


Рис. 7.34. Схема воздействия на массив инденторами конусом и эллипсоидом:

$P$  – усилие внедрение,

1 – разрушаемая среда, 2 – инденторы конус (а) и эллипсоид (б)

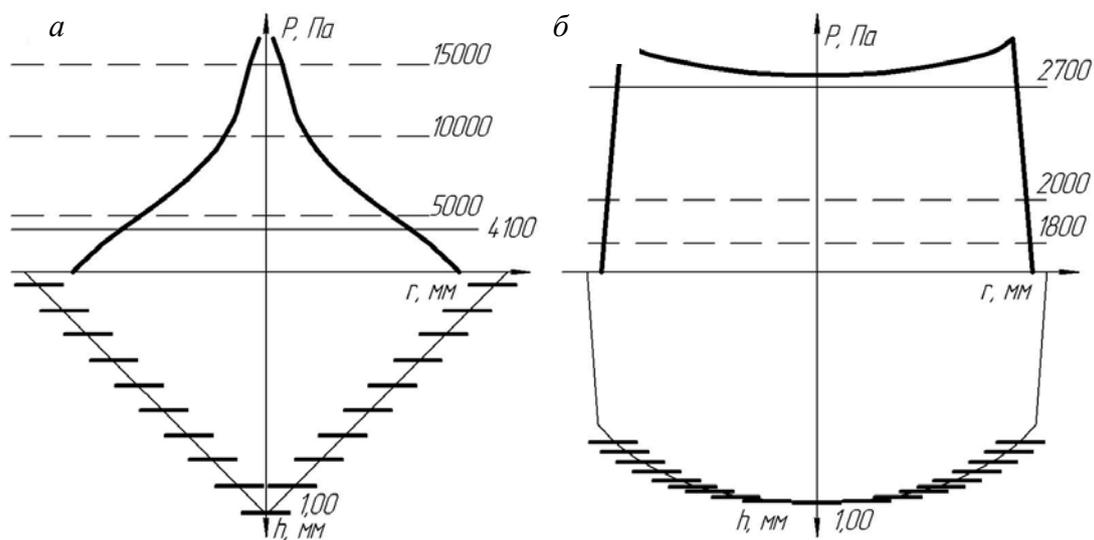


Рис. 7.35. Распределение давления под инденторами:

а – конус; б – эллипсоид

Графики распределения давлений (рис. 7.35) показывают, что для прочности индентора, несомненно, более выгодной является эллипсоидная форма: распределение давлений под индентором-эллипсоидом близко к идеальной равномерности и максимальное давление в десятки раз меньше максимального давления под индентором-конусом. Это также говорит о том, что разрушение породы под «конусом» начнется на глубинах гораздо меньших, чем под «эллипсоидом» и соответственно, за одно воздействие под «конусом» будут разрушаться меньшие объемы породы.

Однако необходимо учитывать, что для разрушения породы «эллипсоидами» требуются большие усилия и затраты энергии. Усилие внедрения находится посредством интегрирования давлений под штампом (рис. 7.35).

Вставка в форме эллипсоида вращения с определенным отношением полуосей, потребовала проведения трех стадий расчетов (табл. 7.6) для определения зависимостей усилия внедрения и максимальных касательных напряжений от формы эллипсоида при различной глубине внедрения (от 0,1 до 1 мм).

Таблица 7.6

*Зависимость силы внедрения  $F$  от глубины внедрения  $h$*

Конус										
$h$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F$ , кН	0,05	0,19	0,43	0,76	1,18	1,70	2,32	3,00	3,84	4,74
Эллипсоид										
При $c/a = 1/0,45 = 2,2$										
$h$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F$ , кН	0,48	1,33	2,38	3,44	4,14	4,76	5,39	6,45	7,54	8,62
При $c/a = 1/0,5 = 2$										
$h$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F$ , кН	0,45	1,27	2,29	3,38	4,25	4,88	5,50	6,21	7,30	8,37
При $c/a = 1/0,55 = 1,8$										
$h$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F$ , кН	0,43	1,21	2,20	3,28	4,30	4,98	5,61	6,24	7,10	8,13

Построенные кривые (рис. 7.36) по полученным результатам, ввиду близости значений, аппроксимировались к кривой, полученной при отношении полуосей эллипсоида  $c/a=2$ . Связь между глубиной внедрения и силой приведена в табл. 7.6. Как видно из таблицы, для внедрения индентора-конуса на глубину 1 мм – требуется усилие 4,7 кН. Для внедрения эллипсоида на ту же глубину требуется усилие 8,4 кН. То есть расчетное усилие внедрения вставки-эллипсоида на 75 % выше усилия внедрения вставки-конуса при одинаковых значениях диаметра вставок.

Однако, несмотря на очевидное увеличение потребления энергии при внедрении в разрушаемую среду таких резцов, энергоемкость разрушения в целом будет снижаться ввиду того, что объем разрушаемой среды возрастет.

Таким образом, в зависимости от формы инденторов воздействующих на угольный массив, могут быть созданы существенно различные напряженные состояния в среде. Выявление связи между усилиями и напряжениями с учетом форм инденторов, требует выполнения условия наименее энергоемкого разрушения угольного массива.

Идея использования тупых твердосплавных вставок появилась в середине 1980-х годов. Безлезвийный инструмент имеет то важное преимущество перед лезвийным, что через него на разрушение забоя могут передаваться значительно большие мощности, что отвечает возросшей энерговооруженности приводов очистных комбайнов. Уже первые аналитические исследования взаимодействия «тупых» инденторов с упруго-хрупкой средой показали, что поиск новых форм тел инденторов, геометрии их рабочих

участков может давать существенные положительные результаты. При непосредственном взаимодействии на массив, инденторы при одинаковых приложенных усилиях способны проникать в забой на разные глубины.

На рис. 7.37. представлен тангенциальный поворотный резец с твердосплавной вставкой, режущая часть которой выполнена в форме эллипсоида вращения.

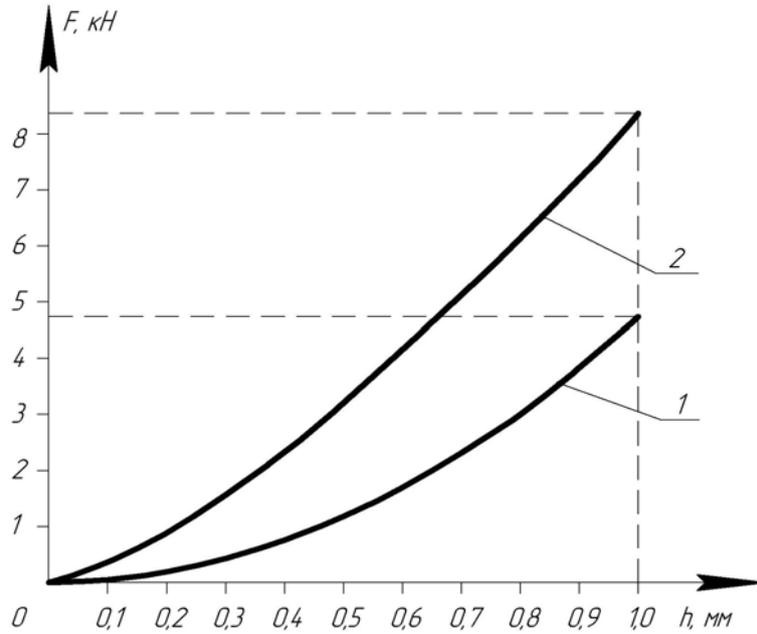


Рис. 7.36. График зависимости усилия внедрения  $F$  от глубины  $h$  внедрения инденторов в форме конуса (1) и эллипсоида (2)

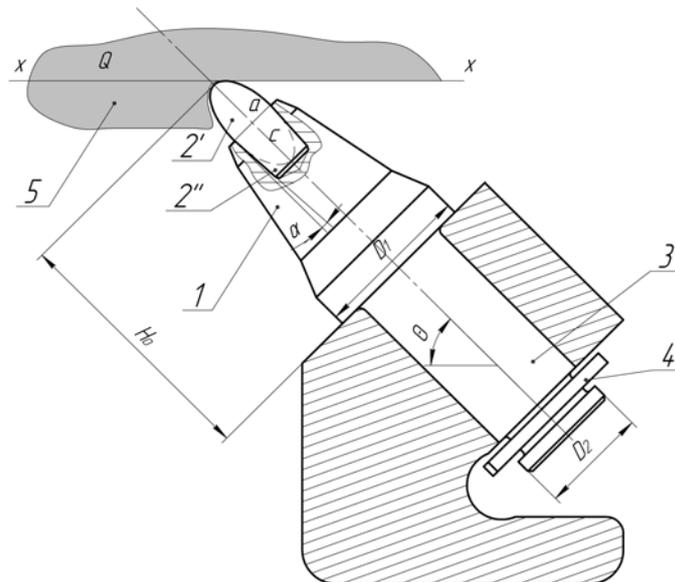


Рис. 7.37. Тангенциальный поворотный резец с твердосплавной вставкой, режущая часть которой выполнена в форме эллипсоида вращения:

- $\alpha$  – угол конусности посадочной части вставки,
- $D_1$  – диаметр опорной части ТПР,  $\theta$  – угол установки ТПР,  $H_0$  – конструктивный вылет,
- $H_0$  – конструктивный вылет,  $D_2$  – диаметр хвостовой части ТПР,
- 1 – головная часть ТПР, 2 – твердосплавная вставка, 3 – хвостовая часть,
- 4 – стопор, 5 – разрушаемая среда,  $xx$  – линия резания

Рабочая ступень вставки выполняется как физическое тело вращения с гладкой поверхностью, не имеющей так называемых конических точек, причем эта рабочая ступень имеет форму вытянутого полуэллипсоида вращения с полуосями «а» и «с». В связи с тем, что рабочая поверхность вставки выполняется гладкой, т. е. не содержит конических точек, она не подвержена разрушению.

Таким образом, использование в качестве формы твердосплавных вставок тел вращения, позволяет исключить с поверхности вставки концентраторы напряжений, приводящие к ее разрушению.

## 8. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БУРОВЫХ РЕЗЦОВ

Инструмент сверла состоит из штанги и съемного резца, армированного твердым сплавом. Штанги изготавливают из витой, шестигранной или круглой пустотелой буровой стали. Круглые и шестигранные штанги применяют при бурении с интенсивной промывкой, требующей значительного расхода жидкости.

При бурении с увлажнением применяют штанги из пустотелой витой стали. Буровая мелочь выдается шнеком штанги.

Буровой инструмент для сверл конструктивно выполнен одинаково. Буровая штанга состоит из хвостовика, тела штанги, головки с отверстием, в которое вставляется хвостовик резца, закрепляемый шплинтом. Резцы для сверл изготавливают из легированной стали и перья их армируют пластинками твердого сплава ВК-6, ВК-8 или ВК-8П. Для работы с промывкой резцы имеют осевой канал для подачи воды в шпур.

### 8.1. Определения, обозначения по конструкции буровых резцов

Различают резцы угольные, углепородные и породные (табл. 8.1 и 8.2). Как угольный, так и породный резцы состоят из перьев с режущими кромками корпуса и хвостовика для крепления резца в головке буровой штанги. Резец имеет переднюю и заднюю грани, пересечения которых образует главную режущую кромку и кромку рассечки.

*Резцы угольные (РУ)* предназначены для ручных сверл при работе по углю любой крепости и породам с коэффициентом крепости до  $f=3$  по шкале проф. М.М. Протоdjаконова (аргиллиты).

*Резцы углепородные (РУП)* – для ручных и колонковых сверл при работе по углю любой крепости и породе с коэффициентом крепости  $f=3-6$  (алевролиты).

*Резцы породные (РП)* – для колонковых сверл и бурильных установок при бурении пород с коэффициентом крепости  $f=6-10$  (песчаники). Резцы типа РП предназначены для использования в комплекте с шестигранными штангами типа ШБ.

Резцы породные типа предназначены для бурения шпуров под анкерную крепь ручными и колонковыми сверлами, установками «Rambo», «Wombat» с промывкой, продувкой по углю любой крепости и по породам с коэффициентом крепости до  $f=10$  по шкале проф. М.М. Протоdjаконова. Соединение со штангой резьбовое.

Расшифровка обозначений буровых резцов типа РП, например: РП 30-14А представлена на рис. 8.1.

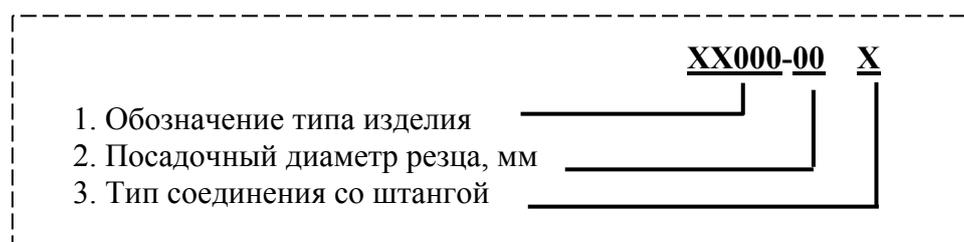


Рис. 8.1. Расшифровка обозначения буровых резцов

Буровые резцы ООО «Кузнецкий машиностроительный завод» (приложение 2) предназначены для бурения шпуров бурильными машинами с промывкой, продувкой по породам крепостью до  $f=10$  по шкале проф. М.М. Протоdjяконова.

Буровые резцы ООО «Горный инструмент» (приложение 3) предназначены для бурения шпуров бурильными машинами до  $f=10$  по шкале проф. М.М. Протоdjяконова. Расшифровка обозначений буровых резцов типа РП производства ООО «Горный инструмент», например: РП 30/14М, представлена на рис. 8.2.



Рис. 8.2. Расшифровка обозначения буровых резцов

Резцы угольные РУ диаметром 42, 43, 44, 50 мм имеют большие размеры рассечки и положительные или нулевые передние углы. Это способствует снижению усилия подачи, что особенно важно для ручных сверл. Угольные резцы (например, РУ-43) имеют *V*-образную рассечку. Углеродные резцы РУП имеют диаметр 42, 43, 44 мм, симметрично расположенные перья (например, РУ-6; УР-13) и *U*-образную рассечку.

Породные резцы РП имеют диаметр 25, 27, 28, 30, 43, 46, 50 мм. При этом для хрупких пород рассечка имеет *V*-образную, а для вязких – *U*-образную форму. В корпусе породных резцов для промывки предусмотрены 1–2 отверстия, так как выдача продуктов разрушения из шпура производится путем его промывки водой.

Резцы РП диаметром 25 мм применяются на пневматических бурильных установках типа «Rambor», «Wombat» и др.

Резцы РП отечественного и импортного производства диаметром 27–43 мм устанавливаются на штангах машин для возведения анкерной крепи МАП-1, БУА-3 (РФ), МР600, Р650 фирмы «Тамрок» (Финляндия), 1ТВ, 1ТТ фирмы «Гарднер-Денвер» (США), «Атлас-Копко» (Швеция) и др. Эти же резцы нашли применение в навесном бурильном оборудовании комбайнов типа ПК (РФ), 12СМ30 (США), АБМ-20 (Австрия), бурильных машинах ЭРП-18Д (РФ), типа «Turmag», «Rambor», «Wombat» и др.

Коронки КДС ООО «Горный инструмент» (приложение 3) предназначены для бурения скважин диаметрами 76, 100 и 130 мм, по углю с присечкой породы крепостью до  $f=5$  по шкале проф. М.М. Протоdjяконова в пластах, склонных к внезапным выбросам угля и газа.

Бурение производится с помощью буровых установок БЖ-45, ЭБГП-1М, СБУ-200.

При бурении станками БЖ-45 соединение со штангой станка обеспечивается с помощью двухзаходной трапецидальной резьбы Тг22×10(Р5).

При бурении электробуром ЭБГП-1М соединение со штангой обеспечивается с помощью специальной прямоугольной резьбы (наружный  $D=28$  мм, внутренний  $d=25$  мм, шаг  $t=6$  мм).

При бурении установкой СБУ-200 соединение со штангой обеспечивается с помощью специальной прямоугольной резьбы (наружный  $D=33$  мм, внутренний

$d=29,5$  мм, шаг  $t=6$  мм). По требованию заказчика возможно изготовление других видов резьб.

Внутренний канал на коронке и штанге обеспечивает промывку водой. Для разбуривания скважины при обратном ходе (в случае ее усадки) предусмотрен расширитель обратного хода для каждого типоразмера коронок.

Создание новых буровых резцов и коронок должно идти по пути: повышения стойкости и прочности в связи с возросшими энергетическими и силовыми параметрами бурильных машин; повышения термостойкости резцов для крепких пород с целью увеличения частоты их вращения и соответственно производительности; применения новых материалов (включая алмазы и безвольфрамовые сплавы); унификации и улучшения качества изготовления.

## 8.2. Твердосплавные вставки для армирования резцов вращательного бурения

Ведущими производителями твердых сплавов для горного инструмента в России полного производственного цикла являются компании ОАО «Твердосплав» ([www.tverdosplav.ru](http://www.tverdosplav.ru)) и ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» ([www.kzts.ru](http://www.kzts.ru)). В качестве примера можно отметить твердосплавные вставки ОАО «Твердосплав» форм Г32, Г33, Г34, Г34а, Г36, Г37, Г38, Г40, Г63 по ГОСТ 880-75 [52], применяемые для армирования буровых резцов (рис. 8.3–8.6).

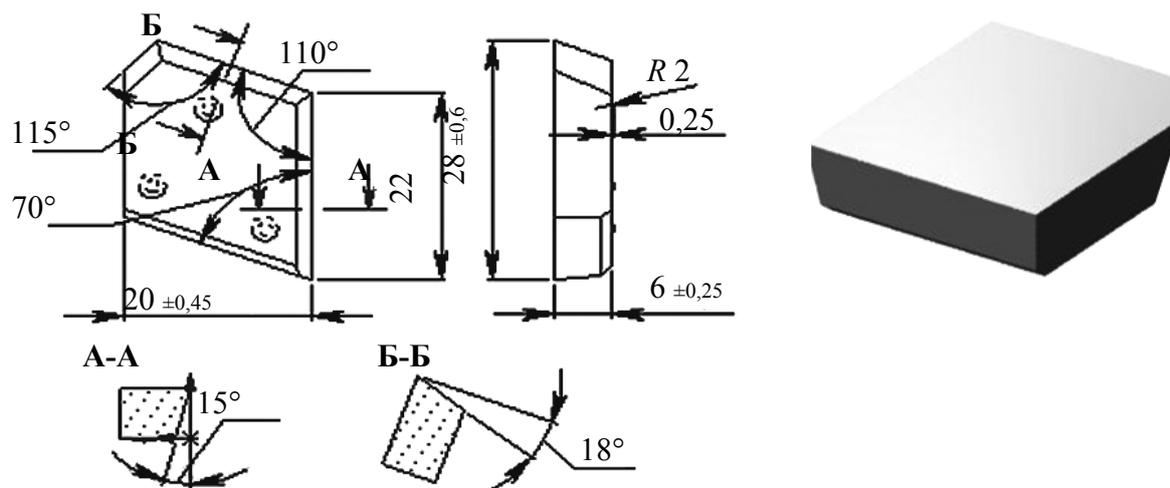


Рис. 8.3. Форма Г32 для армирования резцов вращательного бурения

Выпускаемые твердые сплавы – это изделия, которые, в зависимости от назначения имеют разные формы, а каждая форма имеет конкретные геометрические параметры.

Как видно из рисунков, они имеют клиновидную форму с углом заострения при вершине 97–115°. Вставки с такой геометрической формой обеспечивают эффективное вращательное бурение шпуров по углю и мягким породам и минимальный износ наиболее подверженной этому периферийной части бурового резца.

Представленные на рис. 8.6 формы изделий предназначены:

Г34а – для армирования резцов вращательного бурения по углю и мягким породам;

Г36 – для армирования резцов вращательного бурения по углю;

Г37 – для армирования резцов вращательного бурения по углю и мягким породам;

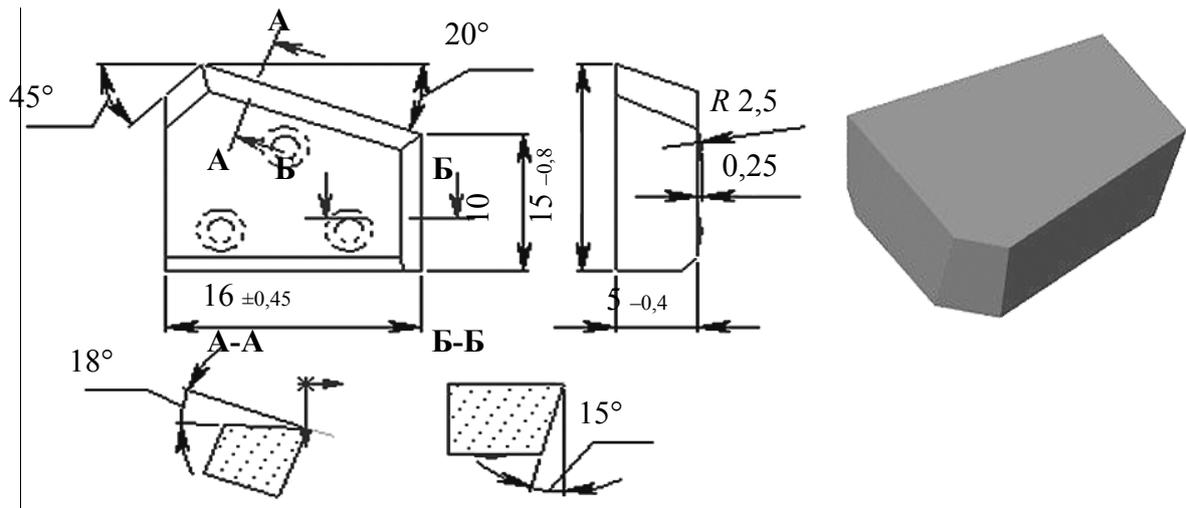


Рис. 8.4. Форма Г33 для армирования резцов вращательного бурения

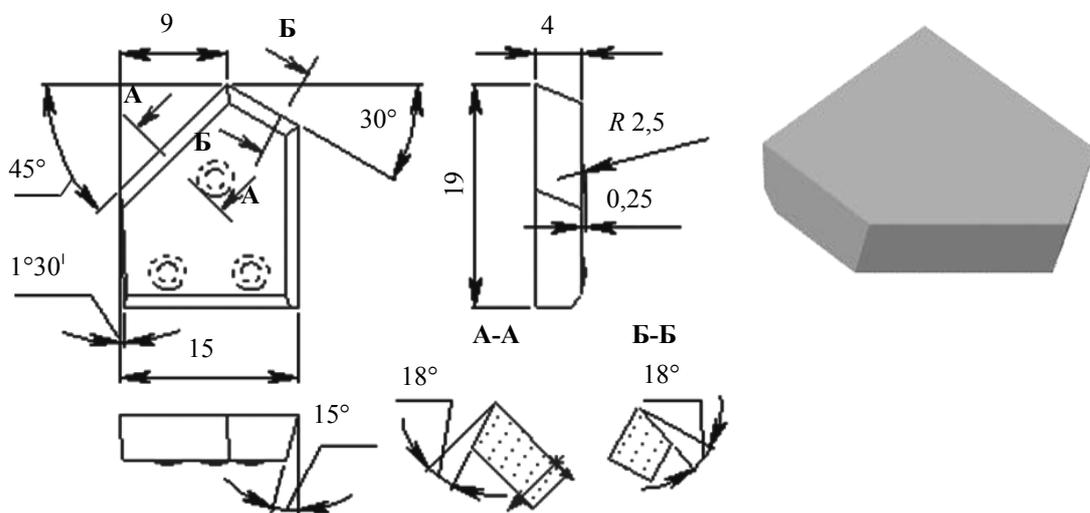


Рис. 8.5. Форма Г34 для армирования резцов вращательного бурения по углю и мягким породам

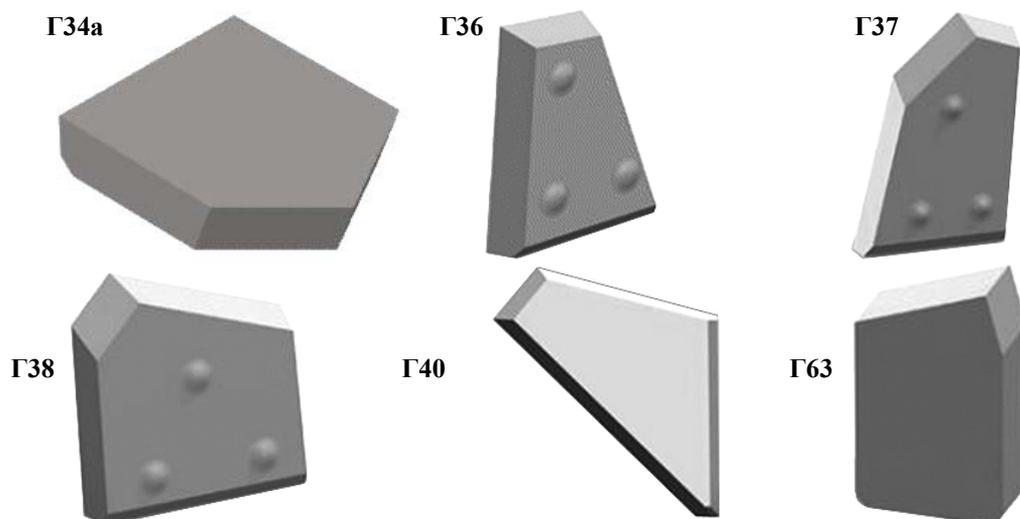


Рис. 8.6. Формы изделий для армирования буровых резцов

- Г38 – для армирования резцов вращательного бурения;
- Г40 – для армирования резцов вращательного бурения шпуров по вязким горючим сланцам и породам в сланцевых шахтах;
- Г63 – для армирования резцов вращательного бурения по породам средней крепости и крепким.

## 9. ИЗНОС РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

### 9.1. Терминология и критерии износа

Изнашивание горных инструментов является многоплановым физическим процессом, который по своей сложности и значению можно поставить в один ряд с процессами изнашивания машин и металлообрабатывающего инструмента. Специфичность процессов разрушения горных пород придает этому явлению свои присущие только ему особенности, что позволяет считать закономерности изнашивания горных инструментов и связанные с ними вопросы крупной научной проблемой.

На износ режущих инструментов влияет большое число факторов, которые можно разделить на четыре основные группы: свойства горных пород как изнашиваемой среды; свойства материала и геометрические параметры инструмента как изнашиваемого объекта; параметры режима работы инструмента; свойства твердых сред [53].

Целесообразно, чтобы терминология по возможности отражала сущность физических процессов, сопровождающих износ, и, наряду с этим, соответствовала потребностям горного производства.

Ниже приведены основные, наиболее распространенные и обоснованные термины и понятия [22, 23].

*Изнашиванием* называется процесс изменения размеров и геометрии инструмента, происходящий в результате уменьшения его объема под влиянием сил трения при разрушении горных пород.

*Износ* – результат изнашивания, измеряемый потерей объема или массы инструмента или оцениваемый по изменению размеров и формы инструмента либо других косвенных признаков.

*Износостойкостью* (или, для краткости, *стойкостью*) называется путь трения (резания), пройденный инструментом до его износа.

Различают *стойкость за один период работы инструмента* – до его снятия на переточку, которую в дальнейшем будем называть просто *стойкостью*, и *стойкость до полной амортизации инструмента*, которую будем называть *полной стойкостью*.

Применительно к конкретной машине или технологическому процессу *стойкость* может измеряться объемом или массой разрушенной горной породы, длиной пробуренных шпуров или скважин и т. д.

Однако наиболее обоснованным физически критерием *стойкости* является путь разрушения.

Наряду с перечисленными, на практике широко применяют удельные показатели:

- *удельный износ* – износ, приходящийся на единицу пути разрушения;
- *удельный расход инструмента* в штуках на единицу добытой горной породы.

Для характеристики *стойкости* принимают в расчет как полностью затупленный инструмент, так и приведенный износ сломанного инструмента, поскольку последний до поломки частично изнашивается.

Изменение формы и размеров инструмента в процессе изнашивания протекает различно в различных условиях. Поверхности износа нередко имеют сложные очертания. Показатели износа служат не только для характеристики *стойкости* инструментов, но и для подсчета нагрузки на них. Поэтому для характеристики износа требуется несколько показателей, представленных на рис. 9.1.

Показатели (рис. 9.1):  $l$  – высота истертого слоя или износ по высоте, измеренный по линии действия усилия подачи (осевого усилия), мм;  $\Delta$  – линейный износ по задней грани,

мм;  $\theta_{\text{п}}$  – угол профиля, град;  $r_c$  – радиус скругления лезвия, мм;  $F_3$  – проекция площадки износа по задней грани на плоскость резания, мм<sup>2</sup>;  $V$  – объем изношенной части, мм<sup>3</sup>.

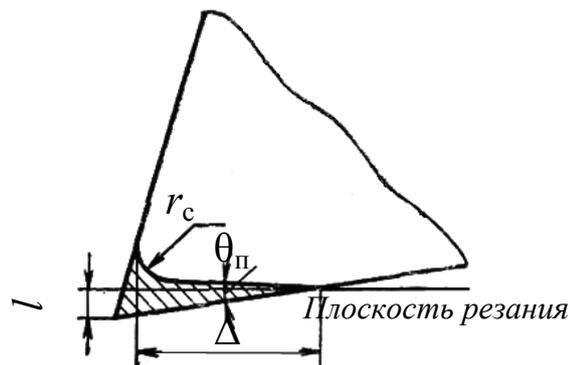


Рис. 9.1. Характеристики износа режущих инструментов

Эти показатели связаны между собой определенными соотношениями. Однако каждый из них имеет и самостоятельное значение, например, износ по высоте может быть использован для сравнительной характеристики износостойкости инструментальных материалов различных конструкций резцов; проекция площадки износа – для подсчета нагрузок на инструмент. Известны и другие показатели износа, применяемые при специальных исследованиях.

Для оценки износа буровых резцов определяется износ по диаметру.

Стойкость режущего инструмента измеряется в метрах (или километрах) пути резания –  $L_c$ . Полная стойкость инструмента обозначается через  $L_{\text{п.с}}$ .

## 9.2. Механизм изнашивания режущих твердосплавных инструментов

Анализ условий разрушения углей шнековыми исполнительными органами установил, что их инструменты при работе комбайна описывают сложные кривые, состоящие из поступательного движения комбайна и вращательного движения шнека относительно его геометрической оси со скоростью  $\omega$ , задаваемые параметрическими уравнениями:

$$\begin{cases} x = a\phi - r \sin \phi \\ y = -r \cos \phi \end{cases} \quad (9.1)$$

где  $r$  – радиус вращения точки, взятый на инструменте, мм;  $\phi$  – угол поворота вала разрушающего органа;  $a$  – ордината подвижной центриды мгновенных центров скоростей, мм.

Ордината вершины резца определится

$$a = \frac{1000V}{2\pi n}. \quad (9.2)$$

где  $V$  – поступательная скорость перемещения, разрушающего органа (скорость подачи), м/мин;  $n$  – число оборотов вала разрушающего органа, об./мин.

Общим критерием вида траектории движения инструмента [65] является показатель

$$\lambda = \frac{\pi r n}{500V}. \quad (9.3)$$

Исходя из известных значений применяемых радиусов шнеков очистных комбайнов, формула 9.3 примет вид

$$\lambda = \gamma \frac{n}{V}. \quad (9.4)$$

где  $\gamma = \frac{\pi \cdot r}{500} = \langle r = 900 - 1200 \text{ мм} \rangle = (5 \div 7.5) \cdot 10^{-3}$  – коэффициент, учитывающий изменение радиуса шнекового исполнительного органа.

На рис. 9.2 и 9.3 представлены схемы движения резца в пространстве забоя и траектория движения вершины ТПР при переменных значениях скорости подачи.

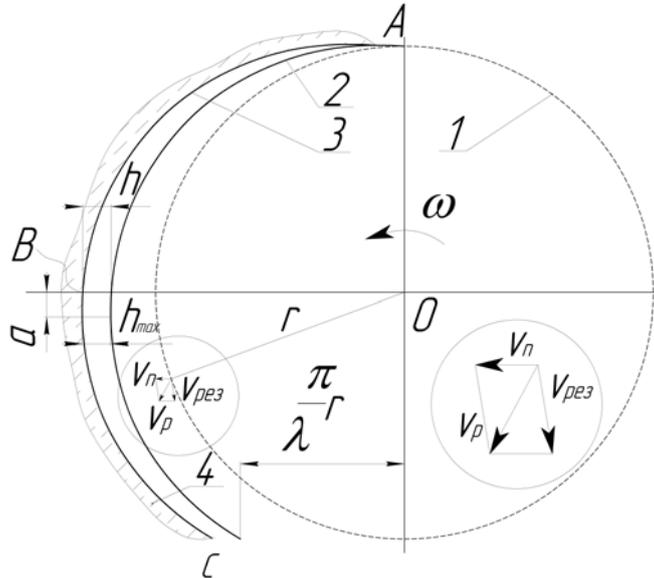


Рис. 9.2. Схема движения резца в пространстве забоя:  
 1 – траектория движения резцов при  $V_n = 0$ ;  
 2, 3 – траектории движения вершин резцов; 4 – угольный массив;  
 $h$  – толщина стружки;  $V_n$  – скорость подачи;  $V_{рез}$  – скорость резания;  
 $V_p$  – результирующая скорость;  $\omega$  – угловая скорость;  
 $a$  – ордината точки с наибольшей толщиной стружки;  $r$  – радиус шнека

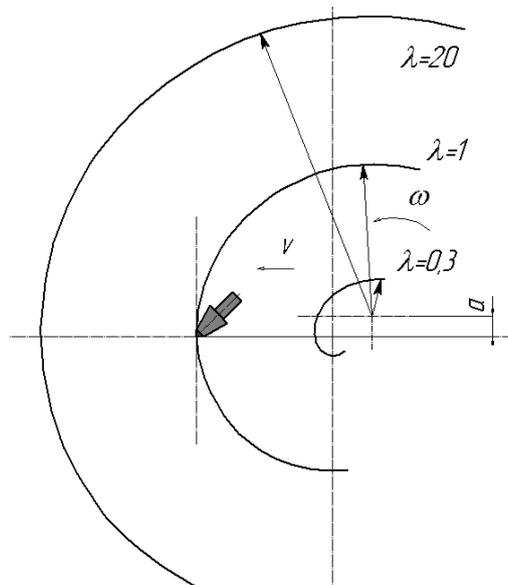


Рис. 9.3. Траектория движения вершины ТПР при переменных значениях скорости подачи:  
 $v$  – скорость подачи,  $\omega$  – угловая скорость,  
 $a$  – ордината точки с наибольшей толщиной стружки

Рассмотрим изменение траектории движения резцов при  $1 < \lambda < \infty$ ,  $\lambda = 1$ ,  $0 < \lambda < 1$ .

Работа разрушающего органа при соотношениях  $1 < \lambda < \infty$  приводит к переменному характеру изменения параметров, определяющих эффект разрушения, причем они при резании находятся в постоянной сложной взаимосвязи. К ним относятся скорость, глубина, удельная длина пути резания, угловые и некоторые другие параметры. От соотношения величин этих показателей в каждый момент работы комбайна получает свои значения производительность разрушения, величина и направление силы резания, удельные затраты энергии на разрушения, удельный расход инструмента, сортность продуктов разрушения, количество пыли выработки и т. д. Очевидно, что их значения также непрерывно изменяются.

Когда  $\lambda = 1$  инструмент описывает обыкновенную циклоиду; если  $0 < \lambda < 1$  – удлиненную циклоиду; а при  $\lambda = \infty$  – окружность ( $V = 0$ ).

Как видно из рис. 9.3, при величинах показателя  $\lambda$ , меньше 20, циклоидная траектория движения инструмента существенно отличается от круговой. Причем отличие тем больше, чем меньше  $\lambda$ .

В связи с общей тенденцией увеличения скоростей перемещения угольных комбайнов критерий  $\lambda$  будет уменьшаться по своей величине, что приведет к увеличению степени влияния вида траектории движения инструмента на условия работы инструмента.

Наибольшее влияние на изменение значения критерия  $\lambda$  оказывает число оборотов исполнительного органа и скорость подачи комбайна, причем уменьшению критерия способствует меньшие значения числа оборотов и большее значение скорости подачи.

В практике размеры исполнительных органов очистных комбайнов определяют частоту вращения и число заходов шнека.

Согласно техническим данным большинства очистных комбайнов линейная скорость перемещения комбайна (скорость подачи) при разрушении массива изменяется от 0 до 14 м/мин (0–0.23 м/с), а ввиду отсутствия на шахтах Кузбасса комбайнов с двухзаходными шнеками, количество оборотов шнека составляет интервал значений 19–54 об/мин.

Скорость резания составляет

$$v = \omega \cdot r = (5,4) \cdot (0,28 \div 1,4) = 1,5 \div 7,5 \text{ м / с.} \quad (9.5)$$

Найденные значения позволяют определить толщину стружки, т. к. толщина стружки представляет собой расстояние между последовательными траекториями движения резцов в направлении, нормальном к плоскости резания.

При движении инструмента по циклоидальной кривой глубина реза  $h$  изменяется от нуля до наибольшего значения и затем снова до нуля (серповидная форма стружки). Наибольшего значения она достигает не на линии перемещения оси шнека, а на линии подвижной centroиды мгновенных центров скоростей:

$$h_{\text{макс}} = \frac{2\pi r}{m\lambda}, \quad (9.6)$$

где  $m$  – количество инструментов установленных на одной линии резания, шт.

Для оценки условий резания важно также знать соотношения времени пребывания инструмента в контакте с забоем ко всему времени его работы.

Как видно из рис. 9.3, форма сечения стружки несимметрична относительно линии перемещения оси шнека.

Со стороны входа инструмента в рез (от точки входа до линии перемещения оси шнека) длина пути резания при  $\lambda < 1$  больше на 15–20 %, чем со стороны выхода. Так как площади этих частей срезов равны, средняя глубина реза, наоборот, на первом участке меньше, чем на втором.

При движении инструмента по циклоидальной траектории [69], при малых скоростях перемещения комбайна ( $v = 2-3$  м/мин) образуются длинные серповидные срезы с менее выгодными соотношениями их элементов.

Таким образом, в результате рассмотрения кинематики движения тангенциальных резцов, становится очевидным, что траектория движения вершин резцов зависит от угловой скорости вращения шнека и скорости подачи, варьирование данных параметров позволяет определить наиболее оптимальные параметры разрушения.

Рассматривая горные породы как изнашивающую среду, схематически можно представить себе два существенно различных случая работы инструмента [21, 22] (рис. 9.4).

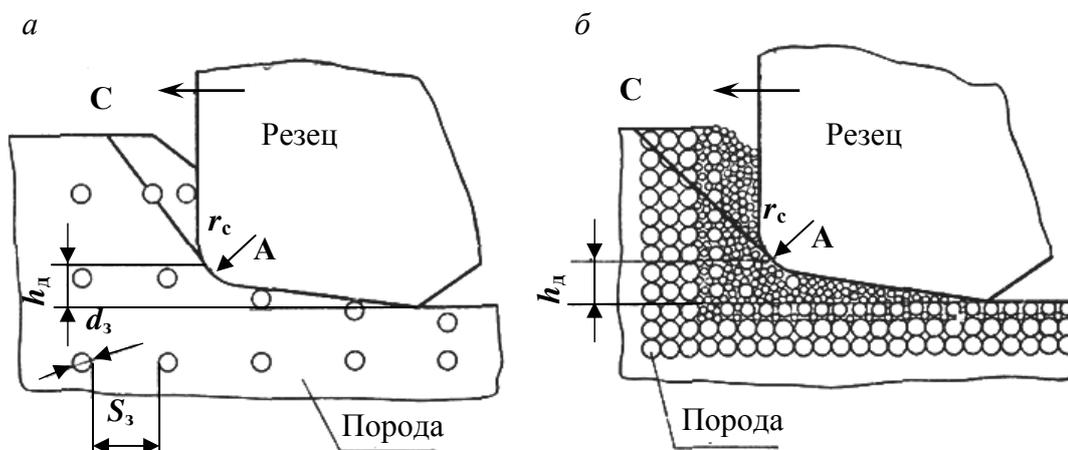


Рис. 9.4. Схемы взаимодействия резца с породой при его изнашивании

1. Порода состоит из твердых зерен, имеющих средний диаметр  $d_3$  (рис. 9.4, а), связанных между собой более мягким цементом и расположенных друг от друга на среднем расстоянии  $S_3 \geq h_d$ . К таким породам можно отнести некоторые песчаники с базальным цементом, каменные угли и т. д.

2. Порода состоит из зерен, вплотную расположенных друг к другу и связанных цементом (рис. 9.4, б). Такими являются песчаники с регенерационным цементом. В первом случае разрушение происходит главным образом за счет цемента, который при этом разрушается и уплотняется в подрезцовой зоне. Самые твердые зерна, как правило, не разрушаются. Следовательно, величина контактных давлений определяется сопротивлением цемента разрушению, которое в свою очередь зависит от прочности цемента и характера напряженного состояния.

В этом случае именно по цементу происходит образование макротрещин и скалывание породы в сторону обнаженной поверхности.

Во втором случае разрушение происходит также по цементу с образованием макротрещины, но из-за того, что зерна располагаются очень плотно, плоская передняя грань резца дробит крупные зерна породы.

Экспериментально доказано, что при разрушении крупнозернистого песчаника из зерен размером до 2,2 мм образуется большое количество мелких зерен размером 0,3–0,8 мм. Именно этим можно объяснить то, что на смену резцам И-90МБ, И-79Б с твердосплавными пластинками с плоской передней гранью пришли радиальные резцы с клиновидной гранью ЗР1-80, ЗР2-80 (рис. 9.5).

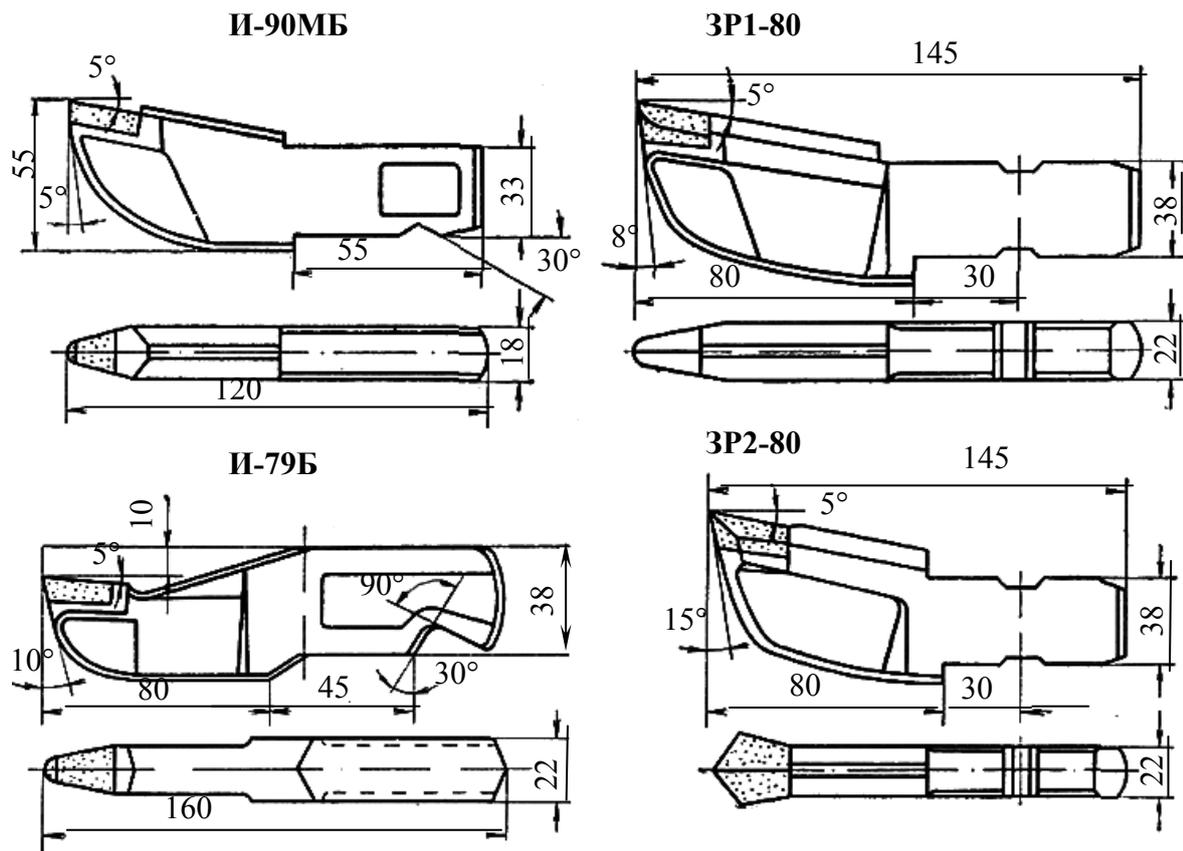


Рис. 9.5. Радиальные резцы для шнековых и барабанных органов угольных комбайнов

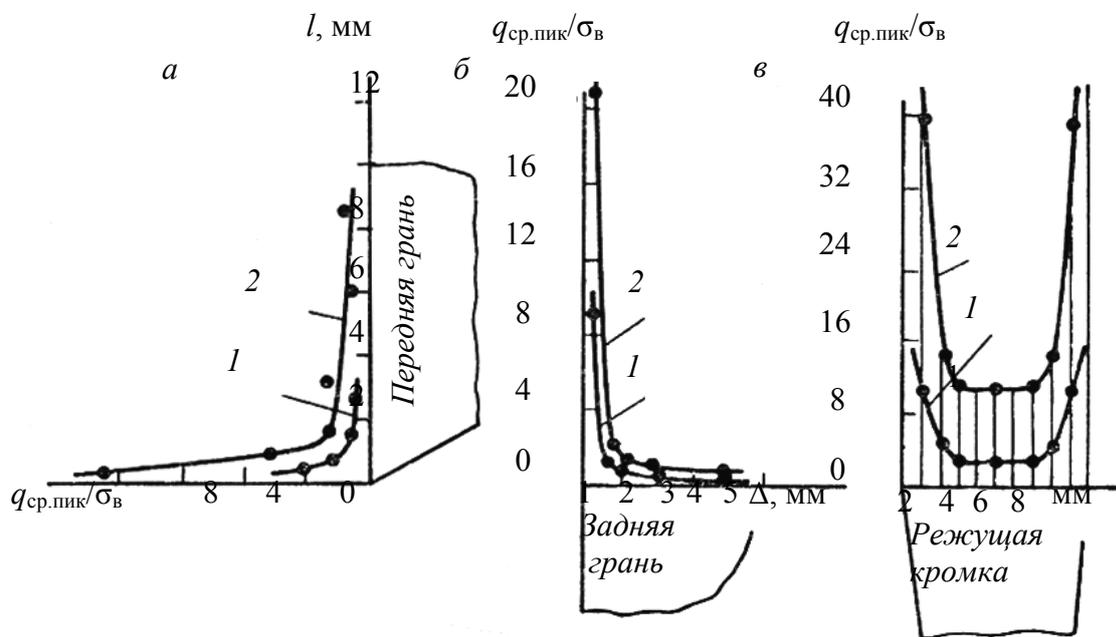


Рис. 9.6. Распределение относительных величин контактных давлений по рабочим площадкам радиального резца:  
 а, б, в – соответственно по передней и задней граням и по ширине режущей кромки и толщине стружки:  
 1 – 0,5 см; 2 – 1,5 см

Испытания этих резцов показали, что существенно уменьшается дробление зерен, пылеобразование и интенсифицируется процесс трещинообразования. Кроме этого, результаты производственных испытаний подтвердили высокую прочность резцов с клиновидной передней гранью. Следовательно, величина контактных давлений обусловлена прочностью твердых зерен и характером напряженного состояния при их разрушении.

Из опытов (рис. 9.6) следует, что у острого лезвия как на передней, так и на задней грани сосредоточены большие контактные давления, достигающие величин в 10–40 раз больших временного сопротивления одноосному сжатию  $\sigma_{сж}$ . Особенно велики они у краев режущей кромки в месте сопряжения ее с боковой гранью. По мере удаления от режущей кромки контактные давления быстро снижаются и становятся меньше сопротивления одноосному сжатию  $\sigma_{сж}$ .

Замена твердосплавных пластин с плоской передней гранью на клиновидную существенно изменяет картину распределения контактных давлений по рабочим площадкам резца.

### 9.2.1. Влияние формы передней грани радиальных резцов на износ

В результате анализа отечественных и зарубежных конструкций было разработано [21, 22], изготовлено и исследовано восемь типов экспериментальных резцов, схемы режущей части которых представлены на рис. 9.7.

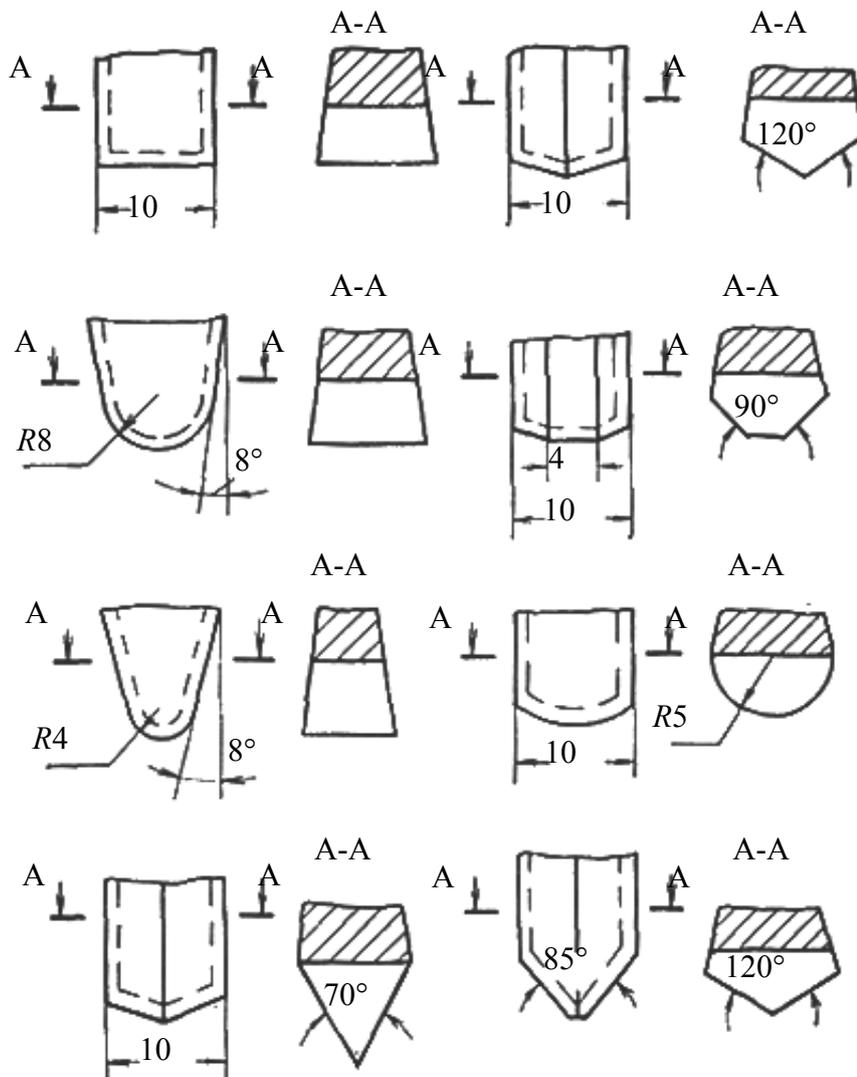


Рис. 9.7. Схемы режущих частей экспериментальных радиальных резцов, применявшихся при исследованиях износа

Геометрические параметры их были одинаковыми: передний угол  $\gamma=0^\circ$ , задний угол  $\alpha=6^\circ$ , угол заострения  $\beta=84^\circ$ , угол резания  $\delta=90^\circ$ , боковые углы  $\omega=6^\circ$ . Ширина передней поверхности, где это возможно, принималась 10 мм.

Геометрия резца выдерживалась с точностью до  $0,5^\circ$  с последующей алмазной доводкой рабочих граней на станке 3А-64. Твердость вставок сплава ВК8В измеряли по прибору ТП-2, она составляла по Роквеллу  $87,4\pm 0,3$ .

Исследования проводили на однородном среднезернистом песчанике средней крепости с  $\sigma_{сж}=1100$  кгс/см<sup>2</sup>,  $p_k=125$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $a=28$  мг. Среднее квадратическое отклонение опытных данных относительно полученных зависимостей находилось в пределах 5,2–13,3%. Опыты выполняли по шахматной схеме (толщина стружки 6 мм, шаг 12,5 мм) по установившемуся забою.

На рис. 9.8 приведены формы площадок износа и динамика их роста, из которых видно, что у резцов с плоской передней поверхностью и прямолинейным лезвием максимальный износ наблюдается на краях лезвия. С точки зрения расхода твердого сплава при переточках эта форма неэкономична, так как непроизводительно теряется большое количество твердого сплава.

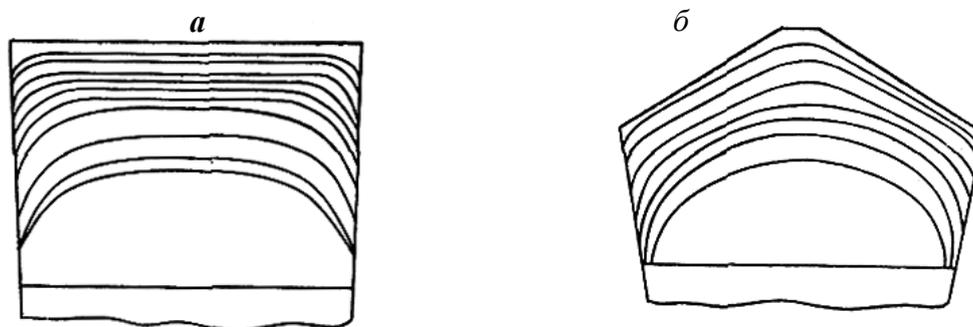


Рис. 9.8. Динамика износа резцов с различными формами режущей части

Как видно из рис. 9.8, более равномерно протекает износ у резцов с клиновидной поверхностью с твердосплавной пластинкой с углом заострения  $90-120^\circ$  (форма на рис. 9.8, б).

Однако при выборе формы недостаточно пользоваться только показателями износа. Необходимо учитывать совместное влияние формы резца на износ от пути резания.

Согласно этому, наилучшим является резец, который на данном пути затрачивает на резание наименьшую работу. Расчеты показали, что по работе резания наилучшие результаты имеют резцы также с клиновидной передней гранью.

### 9.2.2. Влияние пути резания на износ радиальных резцов

*Влияние пути резания.* Зависимость износа резцов от пути резания в общем случае имеет три зоны [21, 22] (рис. 9.9).

I – зона интенсивного изнашивания (рис. 9.9). В этот период лезвия интенсивно микровыкрашиваются и скругляются. Интенсивность истирания также высокая, что обусловлено формой площадки износа. К концу зоны формируется рабочая геометрия резца, контактные давления на поверхности износа выравниваются.

II – зона установившегося изнашивания. При отсутствии колебаний резца интенсивность изнашивания постоянная, а зависимость износа от пути – линейная. Поверхность износа увеличивается, но ее геометрия остается в среднем практически неизменной. Изнашивание происходит главным образом в результате истирания. Контактные давления на площадке износа постоянны или медленно снижаются, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению.

III – зона усталостного или температурного изнашивания. Как видно из рис. 9.9, интенсивность изнашивания в этой зоне резко возрастает. При длительном резании мягких малоабразивных пород на поверхности износа образуется сетка трещин. При резании абразивных пород появляется искрообразование.

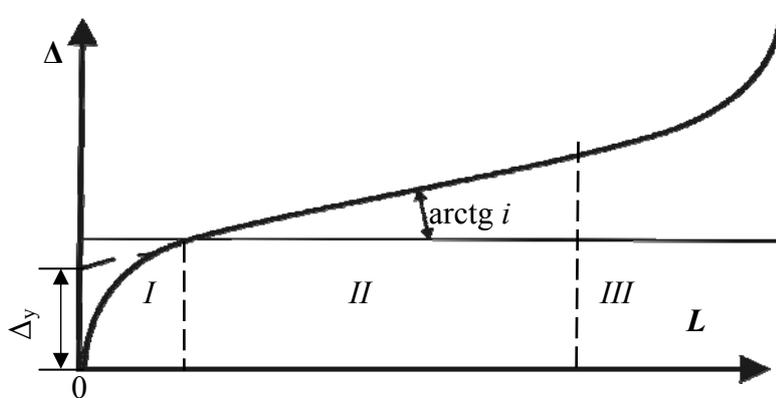


Рис. 9.9. Зависимость износа от пути резания  $L$

Протяженность зоны I в сравнении с зоной II для горных пород составляет не более 10%. Зону III не следует допускать, выбирая соответствующие режимы резания и своевременно подменяя резцы.

### 9.2.3. Влияние структуры твердого сплава на износ радиальных резцов

Характер износа зависит от сочетания свойств пары зерна твердого сплава – зерна породы. Как видно из рис. 9.10, чем больше твердость по Виккерсу твердосплавного материала, тем меньше интенсивность изнашивания (рис. 9.10, а). Обратная зависимость по содержанию кобальта в твердом сплаве (рис. 9.10, б). Чем больше кобальта, тем выше интенсивность изнашивания. Вместе с этим, как видно из графиков, для крупнозернистого песчаника зависимости носят более ярко выраженный характер [21].

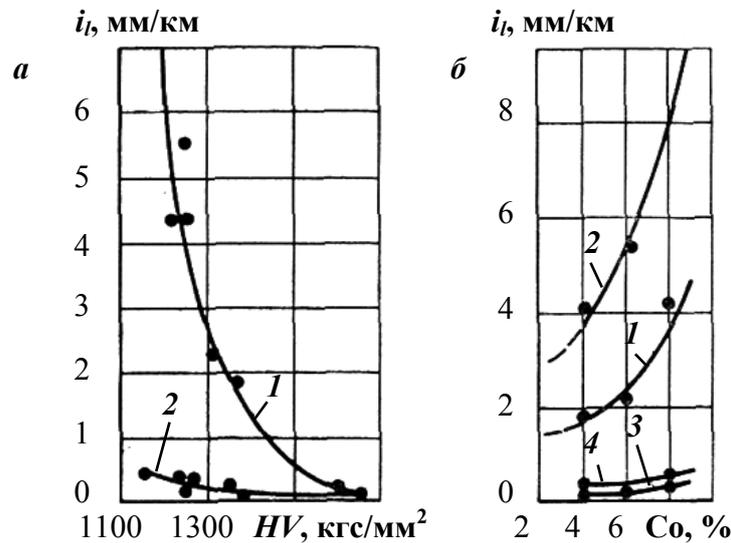


Рис. 9.10. Зависимости интенсивности изнашивания сплавов:  
 а – от твердости по Виккерсу при работе на крупнозернистом (1)  
 и мелкозернистом (2) песчаниках; б – от содержания кобальта:  
 1, 2 – при работе на крупнозернистом песчанике соответственно сплавами ВК и ВКВ;  
 3, 4 – то же на мелкозернистом песчанике

Зависимости получены для твердого сплава ВК1-ВК15 и песчаников: крупнозернистого (контактная прочность  $p_k = 121 \text{ кгс/мм}^2$ ; абразивность  $a = 28 \text{ мг}$  и временное сопротивление одноосному сжатию  $\sigma_b = 1100 \text{ кгс/см}^2$ ); мелкозернистого песчаника ( $p_k = 42 \text{ кгс/мм}^2$ ;  $a = 11 \text{ мг}$ ;  $\sigma_b = 415 \text{ кгс/см}^2$ ). Эксперименты показали, что максимальная интенсивность изнашивания твердого сплава по высоте для крупнозернистого песчаника составила  $i_l = 4,34\text{--}5,45 \text{ мм/км}$ , а для мелкозернистого  $i_l = 0,32\text{--}0,52 \text{ мм/км}$ .

#### 9.2.4. Влияние контактных температур на износ радиальных резцов

Интенсивность изнашивания твердосплавных пластинок радиальных резцов зависит также от контактных температур и скорости резания [21] (рис. 9.11, 9.12).

На рис. 9.11 приведены полученные зависимости интенсивности изнашивания от контактной температуры, а также нанесены опытные точки.

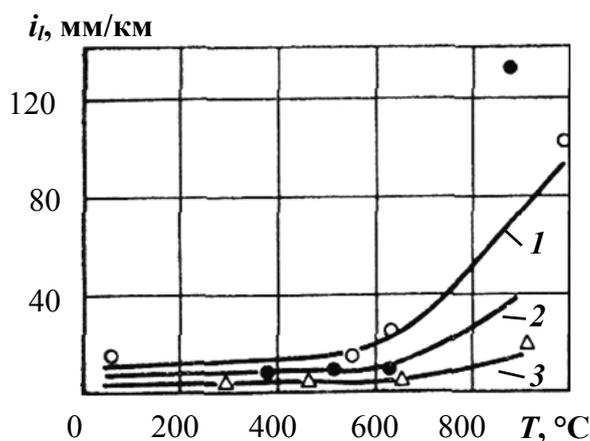


Рис. 9.11. Зависимости интенсивности изнашивания специальных резцов (сплав ВК6В) от контактных температур при резании песчаников:  
 1 –  $p_k = 240 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $a = 29 \text{ мг}$ ; 2 –  $p_k = 123 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $a = 30,5 \text{ мг}$ ; 3 –  $p_k = 60 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $a = 20,5 \text{ мг}$

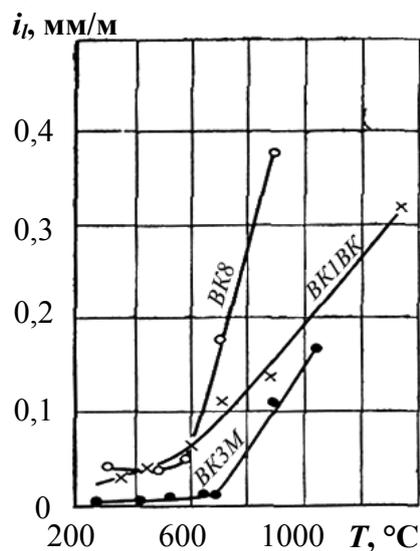


Рис. 9.12. Зависимости интенсивности изнашивания от контактных температур для различных марок вольфрамкобальтовых твердых сплавов

Из полученных данных следует, что перегиб кривых интенсивности изнашивания происходил при температуре, равной примерно  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 9.2.5. Влияние скорости резания на износ радиальных резцов

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить влияние скорости резания на механизм износа твердосплавного инструмента (рис. 9.13).

На докритических скоростях агрегатная твердость сплава значительно выше твердости зерен породы. С увеличением скорости повышаются контактные температуры; на околокритических скоростях они уже настолько велики, что возникает искрообразование. Материал искр представляет собой обломки раскаленных породных зерен с температурой 500–700 °С. Однако установившиеся температуры на площадке износа не превышают критического значения и интенсивность изнашивания еще не растет.

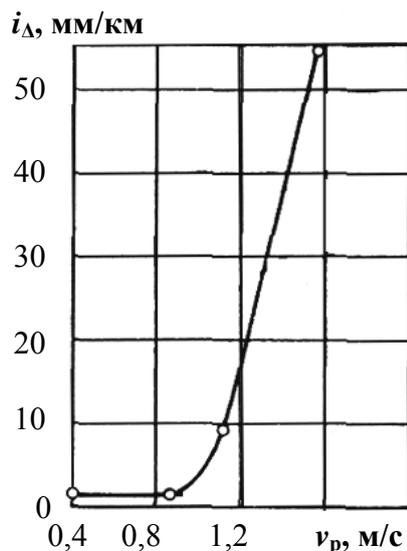


Рис. 9.13. Зависимости интенсивности линейного износа от скорости резания  $p_k = 77 \text{ кгс/мм}^2$  и  $a = 23 \text{ мг}$

На критической и выше критической скоростях температура искр достигает 700–1400 °С, увеличивается искровой поток. Однако интенсивность изнашивания резко возрастает только тогда, когда средняя температура на площадке износа превышает критическое значение, которое для вольфрамокобальтовых сплавов составляет 500–700 °С. При этом площадка износа покрывается хорошо различимыми царапинами и следами оплавления. В материале искр появляются частички карбида вольфрама. Кобальтовая фаза начинает сгорать и «намазывается» на породу, оставляя темные пятна на следе резца; происходит пластическое деформирование твердого сплава.

Помимо износа рабочих поверхностей радиальных резцов имеют место поломки этого типа инструмента.

### 9.2.6. Виды поломок радиальных резцов

В соответствии с общим определением прочности твердых тел под прочностью горных инструментов понимается их способность сопротивляться разрушению (разделению на части) или необратимому изменению формы (пластической деформации) под влиянием внешней нагрузки.

Поскольку терминология в области прочности горного инструмента еще не установилась, ниже приведены общепринятые основные термины и понятия [22, 23].

Статическая прочность – сопротивление разрушению при статическом приложении внешней нагрузки. Процесс статического разрушения сопровождается появлением и развитием пластических деформаций или трещин.

Ударная прочность – сопротивление разрушению при ударном приложении внешней нагрузки. Она характеризует сопротивляемость инструмента динамическим нагрузкам и его склонность к хрупкому разрушению.

Усталостная долговечность – сопротивляемость разрушению при многократном приложении повторно-переменной циклической внешней нагрузки.

Под усталостью понимается процесс накопления повреждений в инструменте и разрушение его при большом числе повторно-переменных нагружений.

Характерной чертой усталостного разрушения является отсутствие деформаций в зоне разрушения.

Критериями прочности режущей части приняты: статической – величина разрушающей нагрузки (Н); ударной – работа разрушения (Н·м) единичного удара, производимая грузом определенного веса, сбрасываемого с высоты 0,5 м; усталостной долговечности – число циклов нагружения до поломки при заданном или рассчитанном в зависимости от условий эксплуатации резцов эквивалентном (приведенном) уровне нагрузки.

Для оценки рациональности конструкции пластинки твердого сплава с точки зрения ее прочности введены удельные показатели статической и ударной прочности, определяемые как отношение статической и ударной прочности к весу армирующей пластинки (Н/г, Н·м/г).

Прочность армированного инструмента определяется прочностью его элементов; державки, паяного соединения и пластинки твердого сплава.

Изучение видов поломок резцов в производственных условиях позволяет судить о величине и характере действующих на инструмент разрушающих нагрузок. По виду поломок можно оценивать качество инструментального материала, а по частоте поломок – определять наиболее слабые элементы конструкции.

Анализ многочисленных наблюдений и шахтных испытаний резцов узкозахватных комбайнов со шнековыми исполнительными органами показал, что основными видами поломок резцов являются:

- поломки и изгибы державок. Чаще всего они происходят или на головке, у торца вставки твердого сплава, или у места крепления в кулаке (переход к хвостовику);
- поломка режущей кромки вставки или самой вставки;
- разрыв паяного соединения.

В зависимости от размеров отделенной части вставки твердого сплава различают:

- мелкий скол или выкрашивание режущей кромки, когда твердый сплав отделяется не на полную толщину вставки по передней или задней грани. При такой поломке резец сохраняет в основном свою геометрию и его замену не производят;
- поломка вставки, когда твердый сплав ломается на всю толщину вставки в сечении, где вставка опирается на державку резца;
- отрыв вставки, когда твердый сплав отделяется от державки резца по поверхности паяного шва. При поломке или отрыве пластинки резец выходит из строя и должен быть заменен.

Прочность при каждом виде поломок определяется качественно различными факторами: при мелком сколе – качеством твердого сплава и геометрией режущей части; при поломке вставки к факторам, влияющим на прочность при мелком сколе, следует добавить жесткость опорной части державки, толщину и прочность паяного шва; при отрыве вставки – прочностью паяного соединения, геометрией передней поверхности и жесткостью опорной части державки.

Структура расхода резцов зависит от условий их применения. При выемке средней крепости и крепких углей в общем удельном расходе резцов различные виды поломок составляют: поломки державок 2–5 %, отрыв вставок 25–45 %, поломки вставок 30–40 %. Только 15–20 % резцов выходит из строя по причине абразивного износа. Следовательно, поломки и отрыв вставок составляют в общем 55–85 % удельного расхода.

### 9.3. Износ тангенциального режущего инструмента

Для оснащения угольных и проходческих комбайнов в отечественной практике долгое время применяли инструмент, оснащенный вставками из твердых сплавов ВК8 и ВК8-В. В дальнейшем с учетом динамического характера нагруженности инструмента горных машин и результатов экспериментальных исследований, выполненных в ИГД им. А.А. Скочинского и ВНИИТС, перешли на применение твердых сплавов ВК8-КС, ВК-11ВК, ВК10-КС, ВК12-КС для оснащения инструмента угольных и проходческих комбайнов.

Разработка и внедрение в серийное производство нового ассортимента сплавов типа ВК-КС позволили на 30–70 % повысить эксплуатационную стойкость горного инструмента и практически вдвое уменьшить выход его из строя из-за разрушения твердого сплава.

Поэтому применение новых технологий (спекание в вакууме, под давлением инертного газа, горячее изостатическое прессование) в сочетании с легированием позволит получать сплавы с улучшенными физико-механическими свойствами, в частности с прочностью 3500–4000 Н/мм<sup>2</sup>.

Для улучшения технологии резания проходческими комбайнами избирательного действия путем применения альтернативных материалов делалась попытка по изучению и внедрению керамических и поликристаллических алмазных материалов, предназначенных для резания горных пород при механизированной проходке.

На основании результатов экспериментов с отдельными резцами и с группами резцов можно констатировать, что:

- одна из причин снижения твердости поверхности резца состоит в том, что при пайке вставки к резцу в зонах головки, имеющих форму конуса, происходят необратимые процессы, что приводит к нарушению кристаллической решетки. Кроме того, воздействие периодических нагрузок в области, расположенной за конусной частью, также приводит к существенному снижению поверхностной твердости, а это в свою очередь оказывает значительное влияние на износостойкость резца;
- степень износа твердосплавных резцов возрастает с увеличением скорости резания, причем крупнозернистые твердые сплавы имеют меньший износ, чем нормально зернистые;
- имеющиеся в настоящее время керамические материалы не пригодны для современного качественного разрушения горных пород резанием при их использовании в резцах проходческих комбайнов избирательного действия, что объясняется недостаточной прочностью керамики на изгиб;
- режущие вставки из поликристаллических алмазов могут применяться, однако различные исследованные формы резцов недостаточно отвечают предъявляемым к ним требованиям.

Повышенный износ резцов происходит также в том случае, когда выбраны неблагоприятные углы наклона и поворота резцедержателей. Последнее может привести к тому, что резцы с круглой державкой не будут поворачиваться и преждевременно выйдут из строя из-за почти точечной нагрузки по износу.

### 9.3.1. Формы износа тангенциальных поворотных резцов

В результате анализа [54] отработанных поворотных резцов разных типоразмеров, оснащенных цилиндрическими твердосплавными вставками, были установлены четыре основные формы их износа, представленные на рис. 9.14.

В результате эксплуатации исполнительных органов горных комбайнов с резцами ТПР разных типоразмеров на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» были установлены три основные формы их износа, которые подтвердили результаты, ранее полученные в работе [54].

Характерная особенность *первой формы* из них (рис. 9.14) заключается в том, что в процессе разрушения пород практически изнашивается только головка корпуса, в результате обнажается твердосплавная вставка и после достижения определенной высоты обнажения происходит ее поломка. Такая форма износа наиболее характерна при разрушении пород прочностью  $\sigma_{сж} \leq 30\text{--}40$  МПа и абразивностью  $a \leq 5\text{--}6$  мг. *Вторая форма* износа отличается тем, что одновременно изнашиваются и головка корпуса, и вставка, но интенсивность изнашивания головки корпуса выше. Такая форма износа характерна для пород по прочности  $\sigma_{сж} < 30\text{--}90$  МПа и абразивности  $a < 6\text{--}20$  мг. Особенность *третьей формы* износа заключается в примерно одинаковой интенсивности изнашивания и головки и вставки. Эта форма износа наиболее часто встречается при разрушении пород повышенной прочности  $\sigma_{сж} > 90$  МПа и абразивности  $a > 20$  мг.

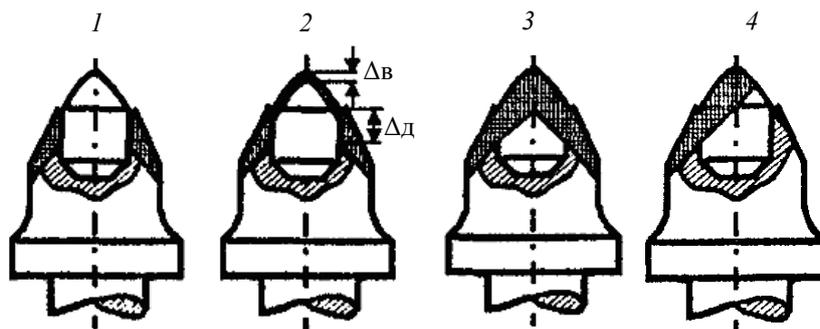


Рис. 9.14. Формы износа поворотных резцов

В практике встречается и четвертая форма износа – односторонняя, обусловленная заклиниванием хвостовика резца в отверстии резцедержателя из-за попадания породной мелочи в зазор между стенками отверстия в резцедержателе и хвостовиком или из-за несоблюдения допусков при изготовлении изделий. В результате происходит аварийный выход резца из строя.

Критериями износа являются в первую очередь: высота износа головки резца вдоль образующей твердосплавной вставки  $\Delta д$  и высота износа твердосплавной вставки по ее оси  $\Delta в$ . Используя соотношение критериев  $\Delta д$  и  $\Delta в$ , можно дать ориентировочную количественную оценку граничных условий разных форм износа поворотных резцов: при первой форме –  $\Delta в/\Delta д < 0,05$ , при второй –  $0,05 < \Delta в/\Delta д < 0,95$ , при третьей –  $\Delta в/\Delta д > 0,95$ .

Анализ первых двух форм износа (рис. 9.14) свидетельствует о недопустимо большой разнице между твердостью вставки и твердостью головной части поворотных резцов. При большой глубине резания, а это неизбежно при разрушении пород небольшой прочности и абразивности, интенсивно изнашивается материал именно головной части резцов. В этом отношении объяснимо стремление конструкторов «защитить» ее от износа.

Иллюстрация сколов головной части ТПП приведена на рис. 9.15. Последствия таких сколов, как правило, – отрыв твердо-сплавной вставки (шахта им. Ленина, 2006 г.) [17].



Рис. 9.15. Износ первой формы головной части ТПП

В качестве примера приведем данные [17] о причинах выхода из строя резцов РКС – 1. Поворотные резцы типа РКС при применении на очистных комбайнах выходят из строя вследствие поломки вставки, оголенной при износе головной части резца, с последующим вымыванием остатка твердосплавной вставки и дальнейшим односторонним или равномерным износом головной части резца (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Удельный вес (%) видов отказов резцов РКС1

Причина	Удельный вес отказов резцов РКС 1, %
Поломка хвостовика	0,5
Поломка вставки	24,0
Отрыв вставки	0,5
Износ вставки	5,5
Износ головной части равномерный	30,5
Износ головной части односторонний	39,5

В структуре отказов этих резцов износ головной части и поломка вставок составляют 94 процента, что обусловлено наличием в угольном пласте твердых включений, утонением и пережимами пласта, режимами работы.

Существует типоразмерный ряд резцов [17, 28], в которых головная часть выполнена с ребрами жесткости (рис. 9.16).

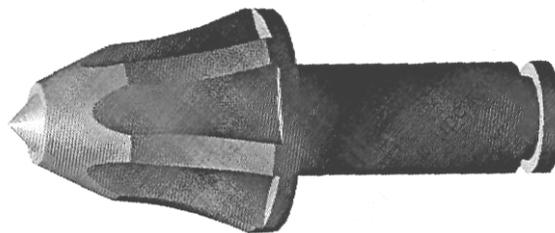


Рис. 9.16. Конструкция ТПП с ребрами жесткости

При отбойке угольного массива с прослойками малой крепости, либо угля, значительно ослабленного отжимом, толщина стружки при резании тангенциальным поворотным резцом может составлять до 2/3 конструктивного вылета, при этом головная часть резца подвержена в значительной степени абразивному износу и заштыбовке в резцедержателе.

Применение ребер жесткости обеспечивает резцу лучшее проникновение в массив (за счет уменьшения поперечного сечения) и благодаря наличию ребер способствует более интенсивному его вращению в резцедержателе за счет работы сил трения, что снижает односторонний износ головной части резца.

Для защиты головной части ТПР в настоящее время уже нашли применение следующие технические решения: твердосплавные вставки грибковой формы [17], упрочняющее покрытие головной части резца, защитные карбидные кольца (например, резцы серий W3AR, W3XA, W3XD, W6JX, W7AR, W7AX, T8AF, W8KD, W7AR компании «Sandvik Mining and Construction», Швеция) [25], ребра жесткости на головной части резца [17, 24], метод клиновой прокатки корпуса резца (например, резцы серий UZ-1, UZ-2 и РКС ЗАО «Белтехнология и М») [55].

Из существующих в настоящее время твердосплавные вставки ТПР грибковой формы ОАО «Твердосплав» имеют более широкую переднюю поверхность (рис. 9.17, табл. 9.2).

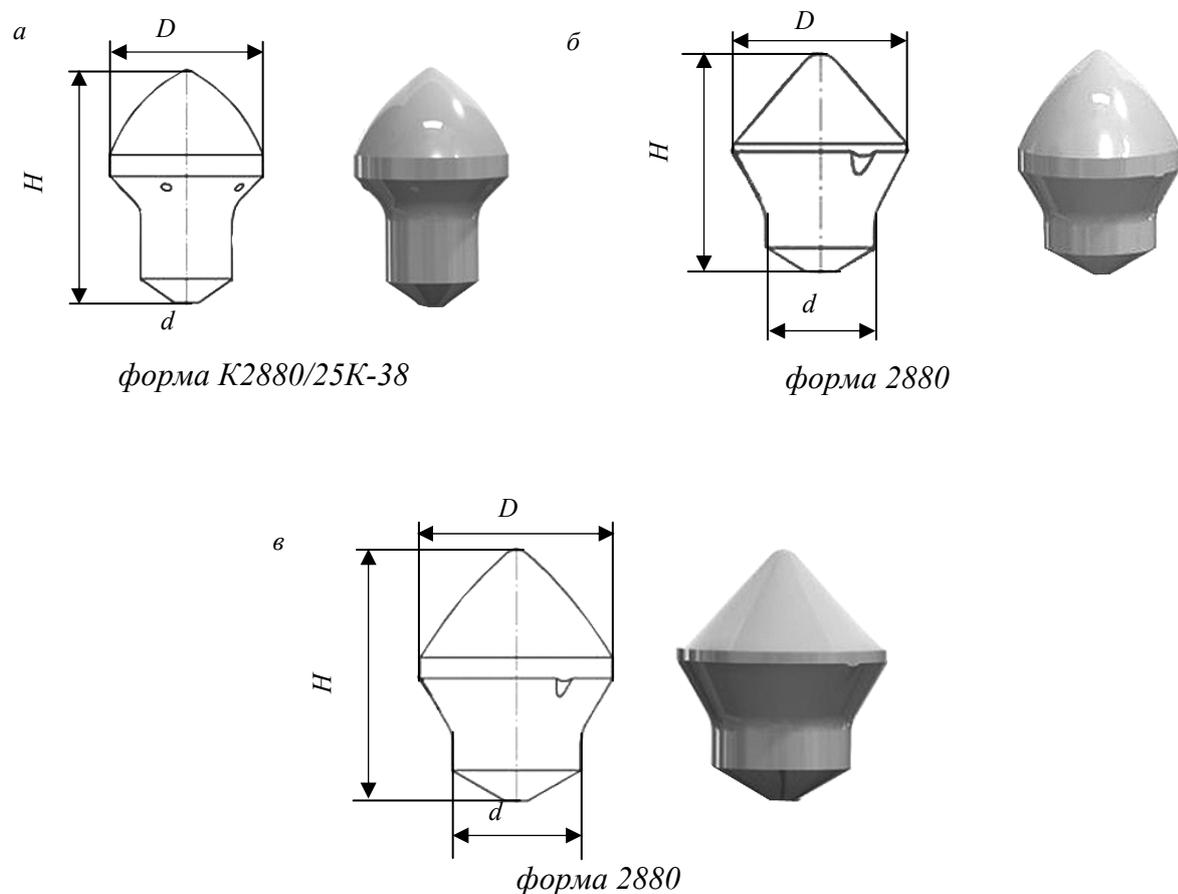


Рис. 9.17. Твердосплавные вставки ТПР грибковой формы

Именно эта расширенная часть вставки, так называемая шляпка, защищает как паяную поверхность, так и головную часть резца. Даже при первой форме износа (см. рис. 9.14) вероятность вылома такой вставки при абразивном износе материала головной части существенно уменьшается. Вставки грибковой формы уменьшают износ, но не всегда обеспечивают достижение главной цели – эффекта равномерного самозатачивания ТПР.

Поиск путей повышения эффективности резцов привел к выводу о том, что требуется сменная головная часть ТПР. В связи с этим в ООО НПП «Сибирские горнопромышленники» г. Кемерово разработаны и прошли испытания резцы серии РГП много-

разового использования. После износа головной части резца его подвергают «лечению», то есть заменяют ее новой сменной головной частью. При этом корпус резца сохраняется, практически не изнашивается и может многократно использоваться. Поэтому эксплуатация резцов такого типа повышает эффективность использования инструмента за счет уменьшения расхода металла [56].

Таблица 9.2

Обозначения и размеры

Наименование	Диаметр		Высота
	$D$ , мм	$d$ , мм	$H$ , мм
2880-2к	$16 \pm 0,3$	11,0	$22,0 \pm 0,6$
2880-3к	$18 \pm 0,3$	12,0	$21,5 \pm 0,6$
2880-5к	$25 \pm 0,3$	18,0	$29,5 \pm 0,6$
2804-1у	$12 \pm 0,3$	7,5	$14,0 \pm 0,6$
2804-2у	$16 \pm 0,3$	10,0	$19,5 \pm 0,6$
2804-3у	$18 \pm 0,3$	12,0	$21,5 \pm 0,6$

#### 9.4. Износ буровых резцов

Различают следующие виды износа резцов [57]:

- *фронтальный износ*, возникающий при бурении большинства горных пород. Он проявляется в виде постоянно расширяющейся, почти горизонтальной поверхности лезвия с небольшим скруглением углов. Износ по диаметру резцов при этом невелик, и вставка сохраняет после затупления лезвия свою первоначальную форму. При заточке таких резцов обычно снимают только центральную часть твердого сплава;
- *износ по диаметру* имеет место при бурении высокоабразивных пород, содержащих большое количество кварца. При бурении таких пород необходимо следить за износом резцов и не допускать потери диаметра;
- *износ корпуса* резца наблюдается в случае, когда скважина или шпур плохо очищается от продуктов разрушения.

Своевременная и правильная заточка резцов оказывает большое влияние на срок службы бурового инструмента.

Характер затупления лезвий буровых резцов РУ и РП имеет некоторые отличия от радиальных и тангенциальных резцов. Как видно из рис. 9.18, у рассечки на участке длиной 1–1,5 мм (а) и особенно на периферийных участках лезвия (в) затупление резко возрастает, образуя так называемые «пятачки». Это объясняется тем, что у рассечки и особенно по периферии резца участки (I) пластинки твердосплавного материала работают по блокированно-угловой форме резания (рис. 9.19).

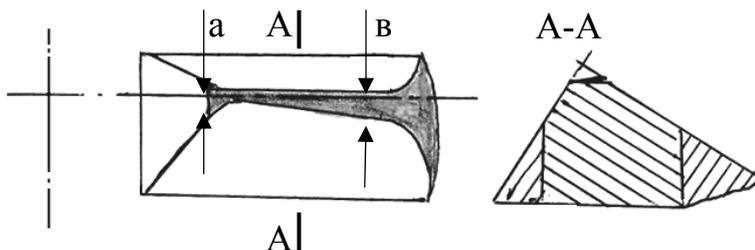
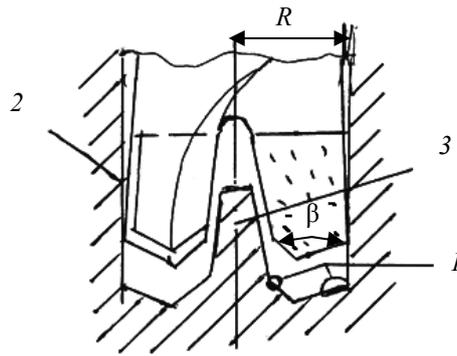


Рис. 9.18. Схема затупления лезвия бурового резца



*Рис. 9.19. Схема разрушения породы буровым резцом:  
1 – участки блокировано-угловой формы резания; 2 – стенка шпура; 3 – челичок*

Этот режим резания сопровождается большой энергоемкостью процесса резания породы и интенсивным износом инструмента. Как видно из рис. 9.19, чем ближе к стенке шпура, тем больше износ твердосплавной вставки (в). Причиной этого является то, что с увеличением радиуса резца ( $R$ ) возрастает скорость резания и работа трения. При вращательном способе бурения профиль торцового затупления плоский (сечение А-А). В настоящее время закономерности износа резцов РУ и РП изучены достаточно глубоко и учитываются при проектировании и выборе их геометрических параметров. При вершине резцов пластинки твердого сплава имеют форму клина. Поэтому при осевом перемещении резца в породу внедряется клин с углами заострения  $\beta = 95\text{--}105^\circ$  (резцы РУ) и  $\beta = 110\text{--}130^\circ$  (резцы РП).

## 10. КОНСТРУКЦИИ КРЕПЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

### 10.1. Способы крепления радиальных резцов

Надежность крепления резцов и быстрота их замены оказывают большое влияние на производительность комбайнов. Потери резцов при ранее применяемом болтовом способе крепления на исполнительном органе комбайна достигали 25 % от общего расхода резцов, а продолжительность замены 10–12 резцов составляла 50–60 мин.

В настоящее время разработано большое число разнообразных конструкций безболтовых (бесстопорных) быстродействующих креплений резцов. В отечественном машиностроении были спроектированы и применялись следующие конструкции креплений (рис. 10.1) [20].

Быстродействующим креплением БКР (рис. 10.1, а) крепятся резцы, имеющие скос на конце хвостовика и паз для фиксатора (ЗР1.80, ЗР2.80). Крепление резца осуществляется вставленным в отверстие резцедержателя 2 стопорным стержнем 8 с конусной головкой. Он входит в паз хвостовика 1 резца и прижимается двумя упругими полиуретановыми амортизаторами 7, надетыми на стопор-стержень. Резец 4 в резцедержателе 2 устанавливается легким ударом по специальной насадке 3, защищающей вставку твердого сплава от повреждений. Снимается резец съемником 5 с упором в цилиндрические боковые выступы 6 резца.

Для резцов ЗР1.80 применялось крепление КР1 (рис. 10.1, б). Резец 1 в резцедержателе 2 закрепляется металлическим валиком 4, завулканизированным в резиновом буфере 3. Валик под действием сил упругости деформированного буфера входит в паз 6 на хвостовике 5 резца. Резец легко устанавливается в гнезде благодаря скосу на его хвостовике, извлекается он рычагом, упирающимся в уступ 7 корпуса. Это крепление обеспечивает быструю замену резцов, обладает высокой надежностью в начальный период эксплуатации новых шнеков. Однако по мере разбивания гнезд резцедержателей надежность крепления снижается, потери резцов увеличиваются.

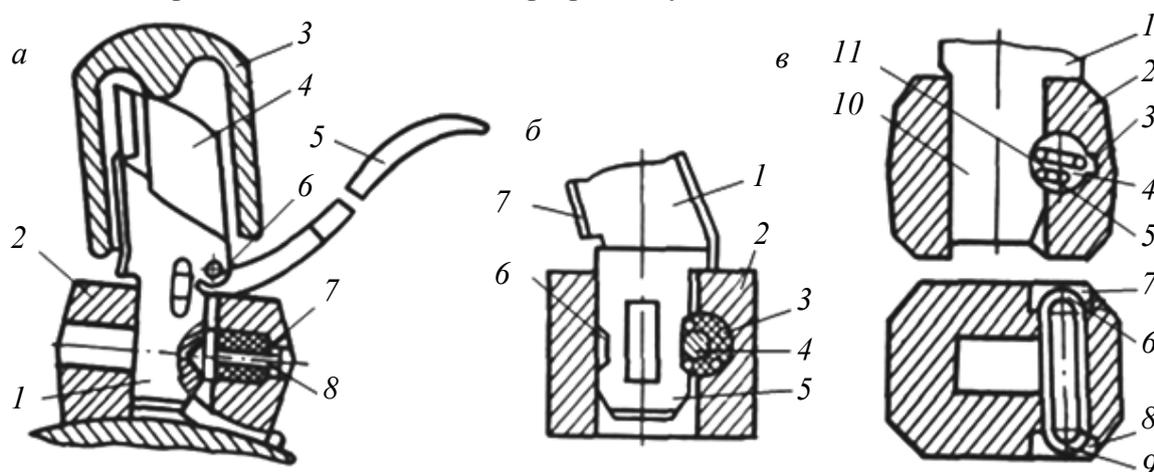


Рис. 10.1. Конструкции креплений радиальных резцов

Для закрепления резцов ЗР2.80, ЗР4.80, РО-65 применяется крепление ПБК (рис. 10.1, в). Оно представляет собой трехвитковую пружину 5, изготовленную из проволоки и подвергнутую термообработке. Пружина удерживается в отверстии 4 и пазу 3 резцедержателя 2 за счет ее упругих сил и за счет установки ее концов 6 и 9 в расточ-

ках 7 и 8. Вторая сторона пружины входит в специальное углубление 11, выполненное на задней стороне хвостовика 10 резца 1. Крепление ПБК обеспечивает надежное крепление и удержание резца в резцедержателе с минимальной потерей резцов, удобную и быструю замену резца, возможность установки в гнезде для безболтового крепления КР без изменения диаметра отверстия гнезда. Недостаток этого крепления – невозможность обеспечения плотного соединения резца с резцедержателем, что приводит к разбиванию гнезд резцедержателей при работе комбайна.

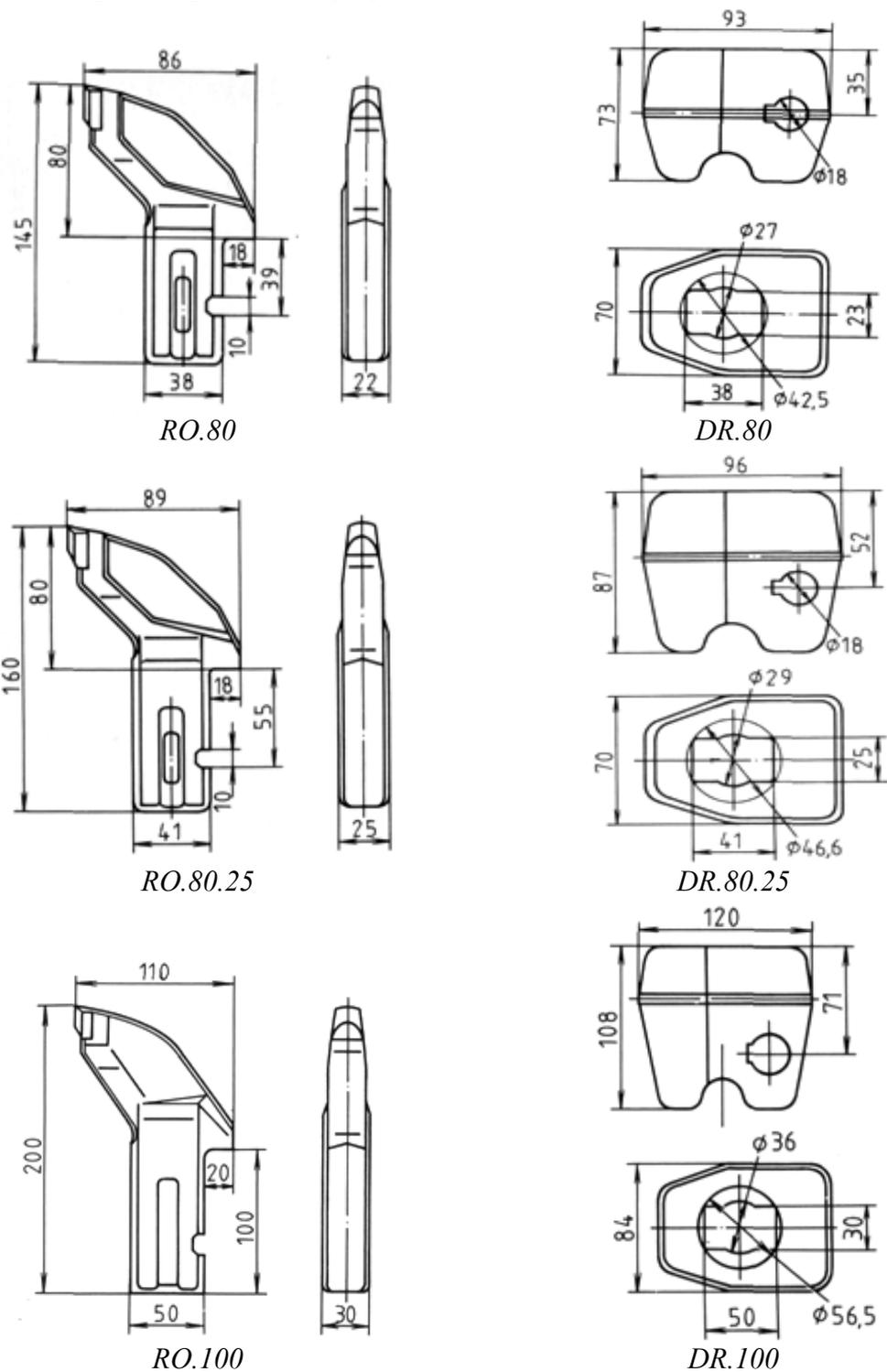


Рис. 10.2. Конструкции резцедержателей фирмы «Рум-Сервис»

При креплении радиальных резцов РО-40, РО65, РО-80, РО-100 (рис. 5.2) в резцедержателях имеются прямоугольные отверстия с поперечным сечением (табл. 4.2).

Резец типа РПП (рис. 5.2) крепится в коническом отверстии резцедержателя с конусностью  $\Delta 1:10$ , что обеспечивает его надежное закрепление. Приведенные размеры поперечных сечений хвостовиков радиальных резцов обеспечивают их достаточную прочность. Корпус резцов изготавливают по ГОСТ 4543 [58] из прочных сталей марок 30ХГСА, 35ХГСА, 40ХН. Качество поверхностей штампованных поковок корпусов резцов должно соответствовать ГОСТ 8479-70 [59], а точность изготовления должна быть не ниже 2-го класса по ГОСТ 7505-89 [60]. Резцы с целью повышения их прочности подвергаются термообработке (закалке в горячей среде), чем достигаются твердость державки 35–45 HRC.

На рис. 10.2 представлены радиальные резцы и их резцедержатели фирмы «Рум-Сервис» (вылет резцов 80, 100 мм)

Для крепления на исполнительном органе горной машины резцы фирмы «Рум-Сервис» серий R0.80, RO.100 имеют хвостовики, которые по своим параметрам соответствуют размерам отверстий резцедержателей серий DR.80, DR.100.

## 10.2. Способы крепления тангенциальных резцов

Основные параметры и размеры хвостовиков для типоразмеров тангенциальных неповоротных (ТН100, ТН125, ТН160) и поворотных (ТП25, ТП32, ТП38) резцов приведены в табл. 4.3, 4.4.

Тангенциальные поворотные резцы (ТПР) имеют хвостовики цилиндрической формы. Это позволяет в процессе резания породы поворачиваться в резцедержателе, что обеспечивает равномерный износ инструмента, исключается заклинивание и аварийный выход резца из строя. Например, конструкции хвостовиков ТПР производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» разделены по группам С, D, G, R, H, P, S, T ([www.kzts.ru](http://www.kzts.ru)) [27]. Каждая группа имеет несколько индексов, каждый индекс охватывает в себе конкретные геометрические параметры хвостовика ТПР.

Например, крепление резцов ТН может осуществляться с помощью прорезиненной рамки 1 (рис. 10.3) [20], которую закрепляют на специальной шейке хвостовика 2 резца.

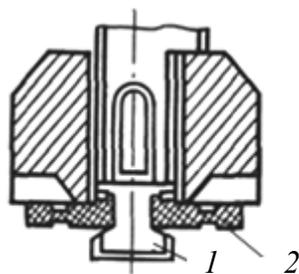


Рис. 10.3. Конструкция крепления ТН

Резцы в резцедержателе могут быть закреплены с помощью механических стопоров, которые создают упругое и свободное соединение хвостовика резца с гнездом резцедержателя.

Можно отметить два способа закрепления резцов на исполнительных органах горных комбайнов [17]: внешнее – металлический и неметаллический стопора и внутреннее.

Крепежный элемент (стопор) конструктивно может быть выполнен как в форме пластины, так и разрезного кольца различного сечения. В качестве материала крепежного элемента используют резину и сталь.

В связи с тем, что ТПР удерживается в резцедержателе только посредством крепежного элемента, особое значение приобретает его прочность.

Таким образом, проблема прочности крепежного элемента стоит достаточно остро. В результате износа резцедержателей шнека осевой зазор при установке резца может достигать 3–9 мм, в данной ситуации особенно наблюдается недостаточная прочность существующих конструкций крепежных элементов.

Конструкции крепежных элементов и резцедержателей для тангенциальных поворотных резцов ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» серий VP, LRP, BT, FHN, BCN, КПН, СЗWP представлены на рис. 10.4.

Конструкции резцедержателей ТПР «Рум-Сервис» и ЗАО СП «Пигма-Кеннаметал» представлены на рис. 10.5 и 10.6.

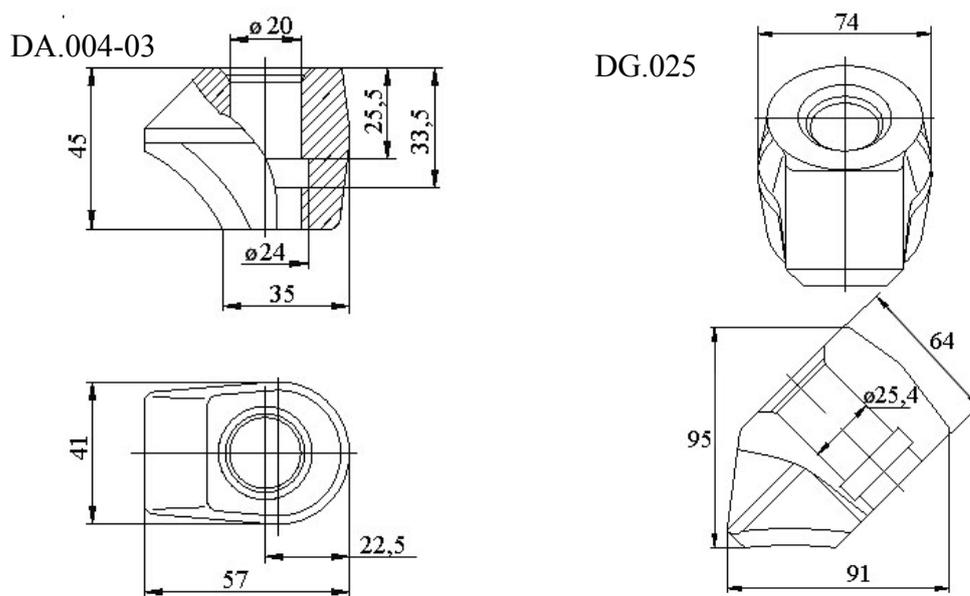
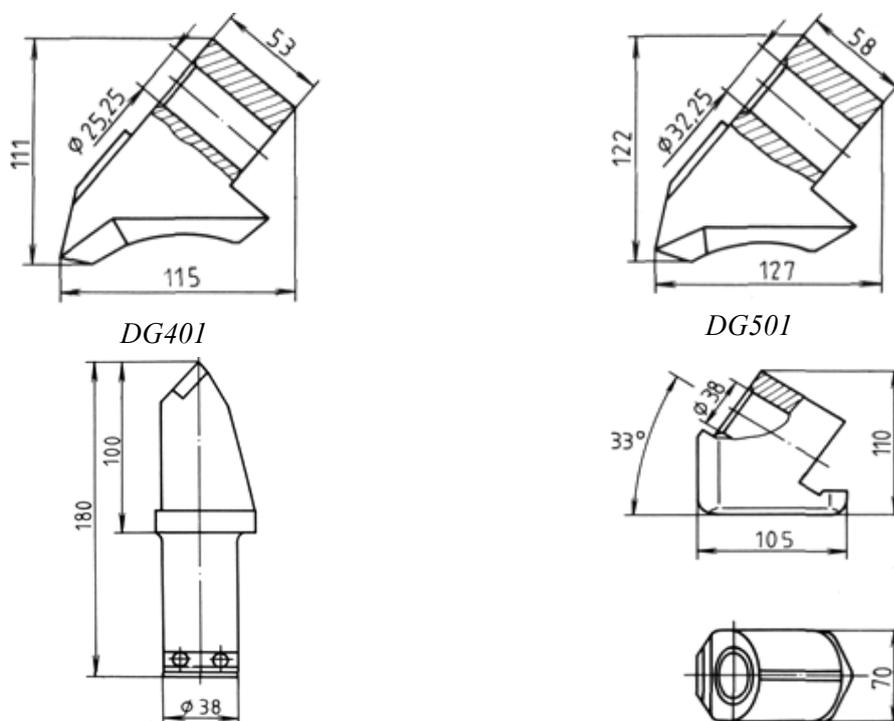


Рис. 10.4. Конструкции резцедержателей ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов»



T.100 (тангенциальный неповоротный резец)

DT.100

Рис. 10.5. Конструкции резцедержателей ТПР «Рум-Сервис»

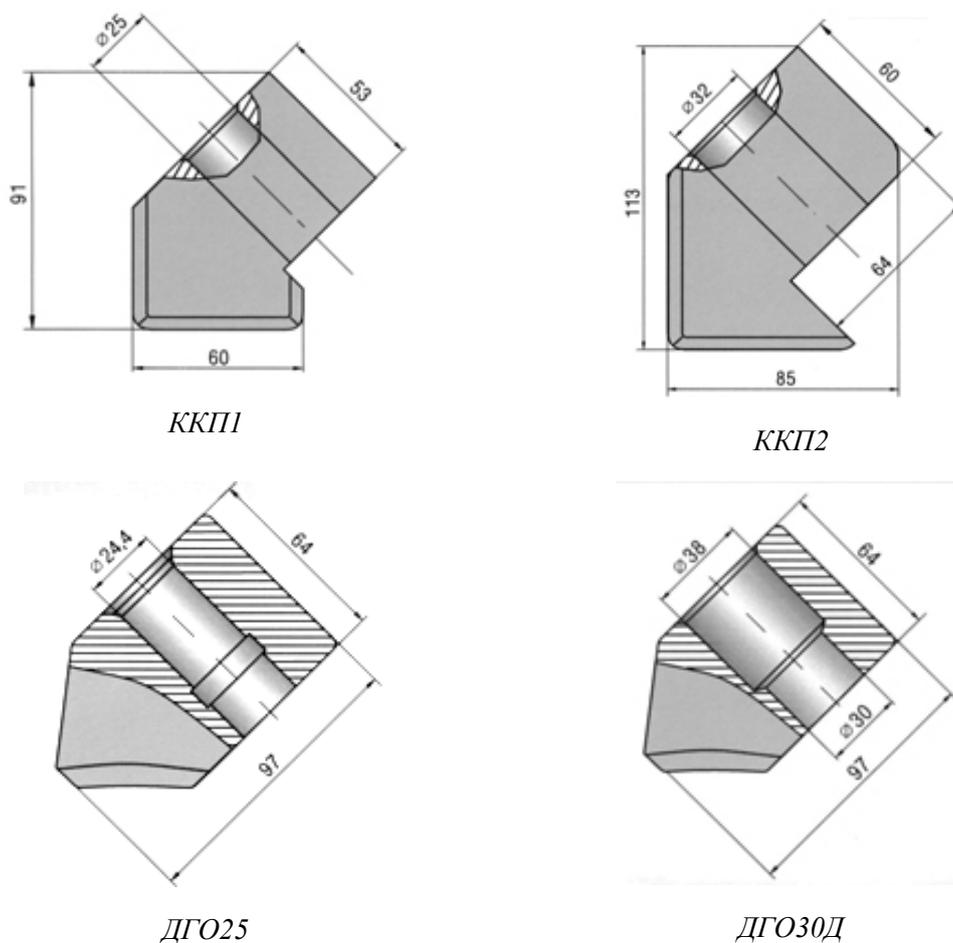


Рис. 10.6. Конструкции резцедержателей ТПР ЗАО СП «Пигма-Кеннаметал»

Фирма «Krummenauer» (<http://anlagenbau.krummenauer.de>) предлагает системы резцедержателей для проходческих и очистных комбайнов с максимальной взрывозащитой в сочетании с уменьшенным потреблением воды и активным пылесвязыванием (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Резцедержатели комбайнов фирмы «Krummenauer»

Резцедержатель	Диаметр стержня реза	Крепление втулки	Орошение
R11.30 UN	30 мм	с усадкой	без орошения
R11.30/38 UN	ступенчатый стержень 30/38 мм		
R12.30 UN	30 мм		
R12.30/38 UN	ступенчатый стержень 30/38 мм		
R12.38 UN	38 мм		эжекторное
R19.38 EB	38 мм		
R65.30 EB	30 мм		
R65.32 EB	32 мм		
R65.30/38 EB	ступенчатый стержень 30/38 мм		

Основная часть резцедержателя выполнена у всех моделей из высокостабильного и легко поддающегося сварке материала. Высокопрочная сменная либо усеченная втулка обеспечивает на распространенных системах резцов долгий срок службы. Многие системы резцедержателей позволяют минимизировать время простоя из-за замены резцов. Для крепления резцов также существуют различные системы. Предлагаются резцедержатели с орошением и без орошения.

### 10.3. Анализ напряженного состояния крепежных устройств тангенциальных поворотных резцов

Как отмечалось выше [17], резцы в резцедержателе закреплены с помощью механических стопоров, которые создают упругое и свободное соединение хвостовика резца с гнездом резцедержателя.

На сегодняшний день [17] существуют два способа закрепления резцов на исполнительных органах очистного и проходческого комбайнов: внешнее – металлический (рис. 10.7) и неметаллический стопора и внутреннее (рис. 10.8).

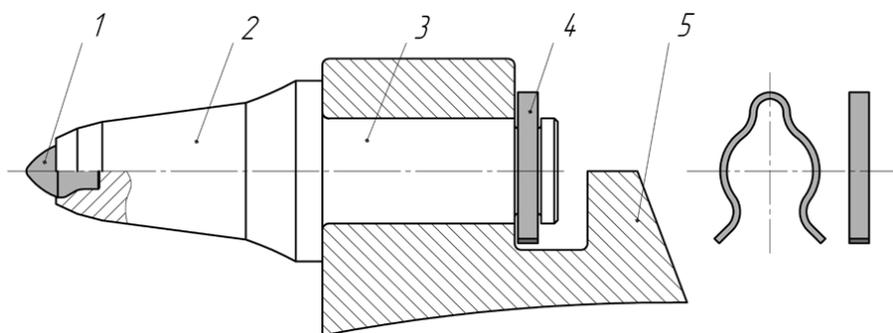


Рис. 10.7. Внешнее закрепление ТПР в резцедержателе:  
1 – твердосплавная вставка; 2 – головная часть ТПР;  
3 – хвостовая часть ТПР; 4 – стопор; 5 – резцедержатель

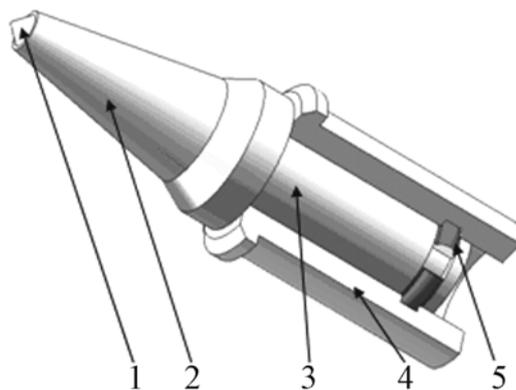


Рис. 10.8. Внутреннее закрепление ТПР в резцедержателе:  
1 – твердосплавная вставка, 2 – головная часть ТПР,  
3 – хвостовая часть ТПР, 4 – резцедержатель, 5 – стопор

Крепежный элемент (стопор), конструктивно может быть выполнен как в форме формованной пластины, так и разрезного кольца различного сечения. В качестве материала крепежного элемента используют резину и сталь.

В связи с тем, что ТПР удерживается в резцедержателе только посредством крепежного элемента, особое значение приобретает его прочность.

Согласно актам испытаний (проведенных заводом ООО «Горный инструмент») на шахтах Кузбасса и Хакасии, удельная доля потерь ТПР из-за недостаточной прочности крепежного элемента может достигать 20–25 % установленных на шнек резцов за смену.

Таким образом, проблема прочности крепежного элемента стоит достаточно остро. В результате износа резцедержателей шнека осевой зазор при установке резца, может достигать 3–9 мм, в данной ситуации особенно наблюдается недостаточная прочность существующих конструкций крепежных элементов.

На рис. 10.9 и 10.10 представлено напряженно-деформированное состояние замков.

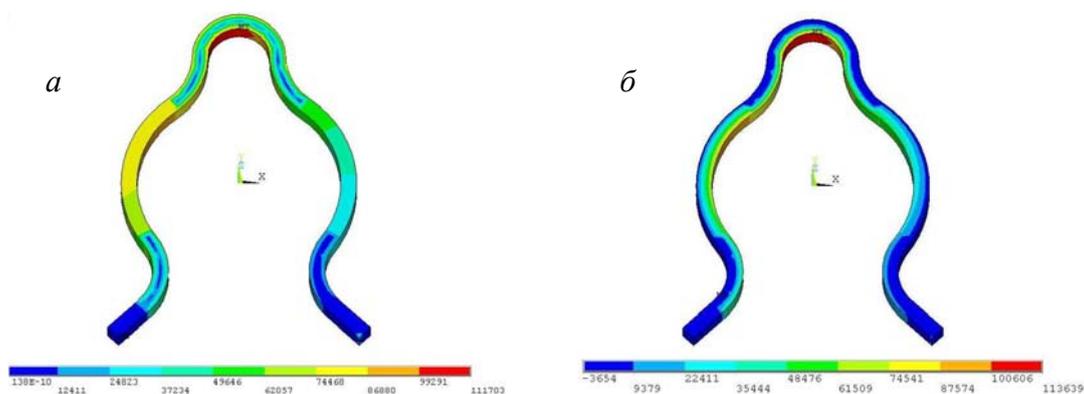


Рис. 10.9. Напряженно-деформированное состояние замка:  
а – эквивалентные напряжения; б – напряжения на главных площадках: *SI*

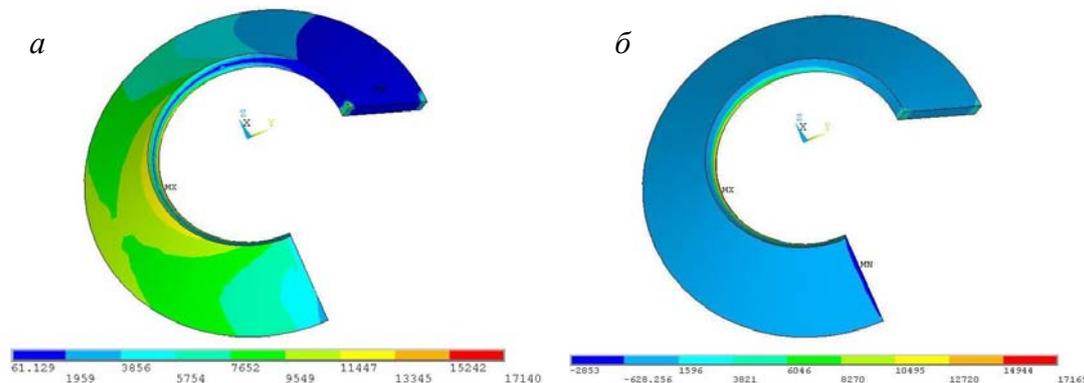


Рис. 10.10. Напряженно-деформированное состояние замка новой конструкции:  
а – эквивалентные напряжения; б – напряжения на главных площадках: *SI*

На рис. 10.9 представлена схема нагружения и закрепления замка выполненного из листового проката. Особенность конструкции замка предполагают поломку в наиболее нагруженном его месте – в вершине, через которую проходит ось симметрии замка. Поэтому сравнение максимальных напряжений возникающих в замках различной конструкции, производится по напряжениям возникающих в данном сечении. Данное напряженно-деформированное состояние представлено для крепежного элемента, применяемого при закреплении резцов на шахтах в настоящее время. В качестве нагрузки использована разжимающая сила (1000 Н). Максимальное напряжение в вершине замка составило  $112 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ .

Принимая во внимание статистику потерь резцов из-за недостаточной прочности замков, было предложено применить новый тип замкового устройства (рис. 10.10) – пружину Бельвиля [17], прочность которого будет выше существующих аналогов и за

счет особой конструкции, будет уменьшено влияние осевого зазора при изношенных резцедержателях. Максимальное напряжение составило  $17 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ .

Очевидно, что при равной приложенной нагрузке, более напряженным состоянием обладает серийная модель замка, следовательно, запас прочности замка новой конструкции выше и применение его для закрепления резцов в резцедержателях является приоритетным. Поэтому применение в качестве нового элемента закрепления резца в резцедержателе, так называемой *пружины Бельвиля*, позволит снизить количество потерь резцов при разрушении угля резцами.

# 11. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЦОВ

## 11.1. Материалы корпусов резцов

Тангенциальный поворотный резец, как известно, состоит из трех основных частей: хвостовика, головной части и твердосплавной вставки, которая закрепляется в корпусе резца с помощью припоя.

В отечественной практике корпуса изготавливают, за небольшим исключением, из легированных сталей: хромоникелевых, хромоникельмолибденованадиевых, хромокремнемарганцевых, хромоникелевольфрамовых. Применение этих сталей в сочетании с соответствующими технологическими операциями способствует снижению напряжений в твердом сплаве, которыми армируют корпуса, и повышению прочностных показателей. Наиболее широко применяемые марки сталей 30ХГСА, 35ХГСА.

Для снижения напряжений в паяном соединении, без резкого охлаждения, рекомендуется применять стали мартенситного класса 38ХНЗМФА и 45ХНЗМФА, закаливающиеся на воздухе. При температуре 200–300 °С, когда припой теряет пластичность, в сталях этого класса происходят мартенситные превращения, размеры пазов увеличиваются и тем самым снижаются или совсем устраняются термические напряжения. Аналогичный эффект получается у сталей перлитного класса 30ХГСА и 35ХГСА при изотермической закалке в селитровых ваннах после пайки [17].

Способность упрочняться на ту или иную глубину при одинаковом содержании углерода определяется влиянием легирующих элементов, но при небольших сечениях изделий это влияние менее заметно, а в деталях крупного размера у углеродистых и менее легированных сталей механические свойства значительно ниже.

Поэтому выбор марки стали зависит как от уровня требуемых свойств, так и от толщины изделия, для толщины 50–75 мм – 40ХН, 30ХГСА.

Наиболее широко применяемые марки сталей для различных видов инструмента следующие (табл. 11.1) [22]:

Таблица 11.1

*Марки сталей корпусов резцов*

Вид инструмента	Марки сталей
1. Резцы для очистных и проходческих машин	30ХГСА, 35ХГСА
2. Резцы для вращательного бурения	У7, 45Г2, 35ХГСА

## 11.2. Материалы для твердосплавных вставок резцов

В целях повышения износостойкости горных инструментов их режущую часть оснащают металлокерамическими, наплавочными твердыми сплавами, поликристаллическими алмазными вставками (PKD). Соединение сплава с корпусом породоразрушающего инструмента должно быть достаточно прочным, так как большая разница в значениях коэффициентов термического расширения (в 2–4 раза) твердого сплава и стали корпуса приводит к возникновению при пайке (нагреве) термических напряжений, после охлаждения часто превосходящих предел прочности твердого сплава.

### 11.2.1. Вольфрамокобальтовые твердые сплавы

Для армирования породоразрушающего инструмента используют спеченные вольфрамокобальтовые сплавы марки ВК (табл. 11.2) [61].

## Характеристика твердых сплавов

Марка сплава	Содержание основных компонентов, %		Физико-механические свойства		
	карбид вольфрама	кобальт	предел прочности при изгибе, МПа, не менее	плотность, г/см <sup>3</sup>	твердость HRC, не менее
ВК3	97	3	1100	15,0–15,3	89,5
ВК3-М	97	3	1100	15,0–15,3	91,0
ВК4	96	4	1400	14,9–15,2	89,5
ВК4-В	96	4	1400	14,9–15,2	88,0
ВК6	94	6	1500	14,6–15,0	88,5
ВК6-М	94	6	1350	14,8–15,1	90,0
ВК6-ОМ*	92	6	1200	14,7–15,0	90,5
ВК6-В	91	6	1550	14,6–15,0	87,5
ВК8	92	8	1600	14,4–14,8	87,5
ВК8-В	92	8	1750	14,4–14,8	86,5
ВК8-ВК	92	8	1750	14,5–14,8	87,5
ВК10	90	10	1650	14,2–14,6	87,0
ВК10-М	90	10	1500	14,3–14,6	88,0
ВК10-ОМ*	88	10	1400	14,3–14,6	88,5
ВК10-КС	90	10	1750	14,2–14,6	85,0
ВК11-В	89	11	1800	14,1–14,4	86,0
ВК11-ВК	89	11	1800	14,1–14,4	87,0

Примечание: \* содержит 2 % карбида тантала ([www.drillings.ru/tverdsplav](http://www.drillings.ru/tverdsplav)).

Преимущества твердых сплавов ВК:

- большая твердость (до 91 HRC),
- высокое сопротивление износу при нагреве до 1000 °С,
- неподверженность заметной пластической деформации,
- большая прочность на сжатие,
- отсутствие упругой деформации.

Недостатки твердых сплавов ВК:

- малый предел прочности на изгиб и растяжение,
- небольшая ударная вязкость.

Сплав изготавливают в специальных графитовых пресс-формах путем спекания при температуре ниже температуры плавления карбидов в соответствии с требованиями ГОСТ 3882-74 [62]. Цифры в марке сплава соответствуют процентному содержанию кобальта. Сплавы получают спеканием смеси порошков монокарбида вольфрама и кобальта при температуре 1320–1480 °С. Монокарбид вольфрама – соединение твердостью 1730 МПа с температурой разложения 2600 °С – представлен в сплавах в виде зерен размером 1–5 мкм (основная масса). Кобальт в сплаве – цементирующая составляющая. Твердость кобальта в 4–5 раз ниже, чем карбида вольфрама, температура плавления 1350 °С. Кобальт хорошо смачивает карбид вольфрама, в сплаве он

находится не в чистом виде, а содержит твердые растворы вольфрама и углерода (от 1 до 8–10 % по массе) [20, 22].

По структуре промышленность РФ выпускает сплавы: мелкозернистые (размер зерен до 1 мкм), среднезернистые (размер зерен 1–2 мкм) и крупнозернистые (размер зерен 2–5 мкм). Мелкозернистые сплавы при одинаковом химическом составе имеют большие твердость и износостойкость, но меньшую прочность, чем крупнозернистые. Последние имеют повышенные прочность и ударную вязкость, но более низкую износостойкость. В этой связи в горной промышленности широко применяются средние и крупнозернистые сплавы.

### 11.2.2. Физические свойства твердых сплавов

**Плотность.** Плотность сплавов зависит от химического состава сплавов (с увеличением содержания Со и титана уменьшается). Плотность снижается при наличии в конкретном сплаве остаточной пористости, свободного графита.

**Теплопроводность.** Твердые сплавы работают в условиях трения. В результате образуется тепло, которое при хорошей теплопроводности должно отводиться от места контакта резец – порода.

Если твердый сплав имеет низкую теплопроводность, то выделяющееся тепло сосредоточивается на режущей кромке резца и он интенсивно изнашивается. Поэтому теплопроводность должна быть оптимальной, обеспечивать наилучшие режущие свойства твердого сплава. В пределах одной группы сплавов теплопроводность зависит от количества карбидной фазы и пористости. С уменьшением карбидной фазы и пористости теплопроводность возрастает. Вольфрамокобальтовые сплавы более теплопроводны, чем титановольфрамокобальтовые.

Коэффициент термического расширения твердых сплавов изменяется от  $3,9 \cdot 10^{-6}$  (BK2) до  $6,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (BK30). Он в 2–4 раза меньше, чем у сталей, где составляет  $(11–17) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Такое различие коэффициентов приводит к возникновению после охлаждения в спаянных соединениях температурных напряжений. Теплопроводность сплавов группы BK в 2–3 раза выше, чем быстрорежущей стали. Определенная по методу Кольрауша, она для сплавов с 4 % Со равна 50,24 Вт/(м·К) и с 15 % Со – 66,99 Вт/(м·К). С повышением температуры теплопроводность снижается. Высокая теплопроводность способствует быстрому отводу тепла от режущих кромок инструмента и уменьшению их износа.

Коэффициент линейного расширения твердых сплавов характеризует удлинение тела при нагреве, зависит от химического состава сплава и с увеличением содержания кобальта возрастает.

Коэффициент линейного расширения титановольфрамовых сплавов примерно в 2 раза ниже, чем для малоуглеродистой стали. Это различие отражается на качестве инструмента с напаянными пластинами. Из-за дополнительных напряжений, возникающих в результате различия в коэффициентах линейного расширения, пластины могут отслаиваться от корпуса резца или иметь трещины.

Термические свойства твердых сплавов играют большую роль при изготовлении и эксплуатации инструмента. Твердые сплавы чувствительны к условиям нагрева и охлаждения, а они всегда имеют место при пайке пластин твердого сплава к инструменту, при шлифовании и заточке изделий. Во избежание образования трещин в изделиях из твердых сплавов следует применять медленное нагревание и охлаждение при пайке, оптимальные режимы при шлифовании и обильное охлаждение.

**Красностойкость** – свойство твердого сплава сохранять твердость, износостойкость и другие качества, необходимые для резания. Она проявляется в интервале тем-

ператур 900–1000 °С. Красностойкость титановольфрамовых сплавов выше, чем вольфрамокобальтовых, благодаря присутствию карбида титана.

### 11.2.3. Механические свойства твердых сплавов

*Твердость* – свойство твердого тела сопротивляться проникновению в него другого тела. Твердость – одно из главных свойств твердых сплавов, т. к. от нее зависит их износостойкость. Главное влияние на нее оказывает количество карбидной фазы и размер зерна этой фазы. С увеличением количества карбидной фазы или уменьшением размера зерна твердость возрастает.

Твердость сплавов в несколько раз выше твердости сталей и составляет от 84–86 до 90–91 HRA. При нагреве сплава твердость его снижается, но остается в 2–3 раза выше, чем у быстрорежущей стали. Титановольфрамовые сплавы отличаются более высокой твердостью, чем вольфрамовые, т. к. карбид титана тверже, чем карбид вольфрама.

Предел прочности при изгибе.

Прочность – свойство твердого тела сопротивляться воздействию внешних сил. Прочность сплавов на изгиб с повышением содержания кобальта возрастает от 1000 (сплав BK2) до 1800–2000 МПа (сплав BK15) и снижается при повышении температуры. С увеличением крупности зерен карбида вольфрама прочность на изгиб повышается.

Ударная вязкость твердых сплавов весьма низка и находится в пределах 2–7 Дж/см<sup>2</sup>, тогда как, например, у стали 40X она во много раз выше (120–170 Дж/см<sup>2</sup>). С повышением содержания кобальта ударная вязкость растет от 1,0 (BK2) до 6,5 Дж/см<sup>2</sup> (BK30). У крупнозернистых сплавов она на 20–30 % выше, чем у мелкозернистых.

Модуль упругости сплавов в среднем в 3 раза выше, чем у легированных сталей и составляет 6·10<sup>5</sup> МПа. С увеличением содержания кобальта модуль упругости несколько снижается. Большое различие в модулях упругости двух материалов (стали и твердого сплава), из которых изготавливают и которыми армируют инструмент, приводит к значительной перегрузке твердого сплава. Поэтому место соединения твердого сплава со сталью должно быть жестким.

Прочность характеризуется величиной разрушающих нагрузок при сжатии, изгибе, растяжении и находится в обратной зависимости от твердости. Она зависит от размера зерен карбидной фазы и возрастает с увеличением содержания кобальта, достигая максимума при Co 15–20 %. Титановольфрамовые сплавы менее прочные, т. к. карбид титана имеет меньшую прочность. Прочность твердых сплавов при сжатии имеет весьма большое значение и характеризует в некоторой степени их пластические свойства. С увеличением размера зерна карбидных зерен, а также содержания кобальта предел прочности твердых сплавов при сжатии  $\sigma_{сж}$  монотонно уменьшается (табл. 11.3) [17].

Таблица 11.3

*Зарубежные аналоги вольфрамокобальтовых твердых сплавов*

Наименование	Содержание Co, %	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	Российский аналог
H3F	3,0	7800	BK3B
H6F	6,0	6900	BK6
H8M	7,0	6200	BK7
H8N	8,5	5200	BK8
H10N	9,5	5200	BK10KC

Для увеличения прочности твердосплавных вставок применяют алмазное шлифование, которое не создает поверхностных дефектов и повышает на 20–25 % предел прочности при изгибе и ударную вязкость. Алмазное шлифование всей поверхности твердосплавной вставки увеличивает срок службы инструмента и стабильность его работы при эксплуатации.

#### 11.2.4. Твердые сплавы для резцов очистных и проходческих комбайнов

Для оснащения угольных и проходческих комбайнов в отечественной практике долгое время применяли инструмент со вставками из твердых сплавов ВК8 и ВК8В. В дальнейшем в результате экспериментальных исследований, выполненных в ИГД им. А.А. Скочинского и ВНИИТС, для применения в различных горнотехнических условиях были рекомендованы четыре марки сплавов группы ВК-КС: ВК6-КС, ВК8-КС, ВК10-КС и ВК12-КС (табл. 11.4) [62].

Таблица 11.4

*Характеристики отечественных сплавов группы ВК-КС и зарубежных аналогов*

Фирма	Марка сплава	Со, %	$d_{ср}$ (WC), мкм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{изг}$ , Н/мм <sup>2</sup>
ГП ВНИИТС	ВК6-КС	6	3–4,5	14,8–15	2156
	ВК8-КС	8	3–4,5	14,6–14,8	2254
	ВК10-КС	10	3–4,5	14,35–14,6	2350
	ВК12-КС	12	3–4,5	14,2–14,4	2450
Карболой	44А	6	$\triangleright 4$	15	2200
	231	10	$\triangleright 4$	14,4–14,6	2410
Boart	B15	7,5	$\triangleright 4$	14,75	1800
	B20	8	10	14,7	2200
	B25	9,5	8	14,55	2400
	B30	11,0	6	14,4	2400
	B35	13,0	10	14,2	2500
	G10	6	10	14,9	1500
	G15	7	2,5	14,7	1700
	G20	10	2,5	14,5	2000
				4	
Sandvik	CG30	6	1–3	14,9	1900
	CB17	6	2,5	14,9	2300
	CG45	9	2–4	14,5	2254
Тохо Кинзоку	RB3	8,5	4–5	14,7	2058
	RB4	10	4–5	14,55	2300
	RB5	12	4–5	14,35	2352

Применяемая технология («высокотемпературный» карбид вольфрама в сочетании с непродолжительным размолом смесей) обеспечивает получение сплавов с однородной структурой и стабильными механическими и эксплуатационными свойствами, не требуя специального оборудования. По сравнению с другими марками твердых сплавов, применяемых в настоящее время для оснащения горного инструмента, сплавы ВК-КС характеризуются повышенной (в 1,2–2,0 раза) износостойкостью наряду с довольно высокой

прочностью. Повышенная пластичность сплавов ВК-КС обуславливает высокую сопротивляемость их ударным нагрузкам, возникающим при разрушении горных пород.

Сущность нового способа получения «высокотемпературного» карбида вольфрама состоит в том, что порошки промежуточного окисла вольфрама, вольфрама и карбида вольфрама получают при весьма высоких температурах, а именно: температура восстановления вольфрамового ангидрида до двуокиси вольфрама составляет 900 °С, температура восстановления двуокиси вольфрама до вольфрама – 1200 °С. Карбид вольфрама получают при температуре 2200 °С.

Разработка и внедрение в серийное производство нового ассортимента сплавов типа ВК-КС (табл. 11.4) позволили на 30–70 % повысить эксплуатационную стойкость горного инструмента и практически вдвое уменьшить выход его из строя из-за разрушения твердого сплава. Освоением сплавов ВК-КС практически исчерпаны резервы повышения технического уровня отечественных сплавов WC-Co на существующем оборудовании.

Вместе с тем, данные каталогов и проспектов зарубежных фирм, а также результаты исследования импортных резцов указывают на дальнейшее совершенствование ассортимента зарубежных сплавов для оснащения породоразрушающего инструмента горных машин.

Применение новых технологий (спекание в вакууме под давлением инертного газа, горячее изостатическое прессование) в сочетании с легированием позволяет получать сплавы с улучшенными физико-механическими свойствами.

#### **11.2.5. Влияние размера карбидной составляющей WC на прочность твердосплавных вставок и пластин**

В конце 80-х годов для разрушения горных пород за рубежом стали применять особо крупнозернистые вольфрамокобальтовые (WC-Co) твердые сплавы. В настоящее время все ведущие промышленные фирмы-производители США, Германии, Швеции, Австрии, Англии и других стран включили их в ассортимент выпускаемых марок твердых сплавов для горного инструмента [63].

Сплавы с нормальной зернистостью содержат зерна WC размером до 20 мкм, причем средний размер зерен карбидной составляющей ( $d_{wc}$ ) равен 6 мкм, а крупнозернистые сплавы содержат зерна WC размером до 50 мкм при среднем размере зерен карбидной составляющей 30 мкм. Благодаря новой технологии изготовления твердых сплавов, удалось повысить их прочность на сжатие и изгиб на 30–50 %, что позволило при использовании крупнозернистого твердого сплава добиться снижения интенсивности изнашивания и увеличения срока службы резцов. Также подтверждено снижение интенсивности изнашивания резцов при применении вставок из крупнозернистого твердого сплава.

В табл. 11.5 приведены данные о зернистости твердых сплавов, используемых фирмой «Kennametal» при создании резцов для очистных и проходческих комбайнов.

Весьма характерно, что при изготовлении резцов для проходческих комбайнов используются крупнозернистые твердые сплавы, имеющие средний размер зерен карбидной фазы почти в 3 раза больше, чем сплавы, используемые для резцов очистных машин.

Для оснащения горного инструмента очистных и проходческих комбайнов применяются твердые сплавы ВК8-КС, ВК11-ВК, ВК10-КС и ВК12-КС для оснащения инструмента угольных и проходческих комбайнов. Для оснащения бурового инструмента, применительно к различным горнотехническим условиям, были рекомендованы четыре марки сплавов группы ВК-КС: ВК6-КС, ВК8-КС, ВК10-КС и ВК12-КС. Средний размер WC-фазы в этих сплавах составляет 3–4,5 мкм (табл. 11.4).

Данные о зернистости твердых сплавов

Резцы для проходческих комбайнов		Резцы для очистных комбайнов	
Размер зерен, мкм	Распределение зерен по крупности, %	Размер зерен, мкм	Распределение зерен по крупности, %
< 20	< 40	< 10	90
20–40	> 40	10–20	9
> 40	10	> 20	1

Пристального внимания заслуживает тот факт, что в отличие от зарубежной практики создания горного инструмента, для оснащения которого уже более 10 лет успешно используются особо-крупнозернистые твердые сплавы со средним размером зерен карбидной составляющей до 30 мкм, в отечественной практике продолжают применять твердые сплавы со средним размером зерен карбидной фазы, не превышающим 5 мкм. По всей видимости, это объясняется тем, что разрабатывали отечественные твердые сплавы для оснащения горного инструмента, опираясь в первую очередь на производство бурового инструмента. Действительно, исследование образцов импортных буровых коронок, изучение данных каталогов и проспектов зарубежных фирм («Sandvik», «Kennametal», «Boart» и др.) указывают на тот факт, что для производства бурового инструмента за рубежом применяют сплавы со средним размером зерен от 2 до 5 мкм.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

- необходимая прочность при сжатии и изгибе для сплавов должна определяться на основании расчета параметров резания для конкретного типа используемой техники с учетом свойств массива горных пород разрабатываемого месторождения;
- для того чтобы без разрушения воспринимать неравномерные нагрузки высокой интенсивности, стохастически возникающие в процессе разрушения горных пород, сплавы для оснащения режущего инструмента горных машин наряду с необходимой прочностью при сжатии и изгибе должны иметь большую пластичность, достаточно высокую износостойкость и пониженную склонность к накоплению деформационных дефектов. Наиболее полно перечисленным условиям удовлетворяют особокрупнозернистые сплавы WC-Co, изготовленные из высокотемпературного карбида вольфрама, поэтому использование именно его в дальнейших исследованиях и представляется в высшей степени целесообразным.

Эффективность применения породоразрушающего инструмента горных машин в значительной степени обусловлена свойствами и качеством материала, из которого изготовлена режущая вставка. В настоящее время для этой цели применяют вольфрамокобальтовые (WC-Co) твердые сплавы – композиционные материалы, состоящие из тугоплавкой фазы (карбида вольфрама WC) и пластичного связующего (твердого раствора на основе кобальта) при объемной доле тугоплавкой фазы не менее 50 %, полученные спеканием в присутствии жидкой фазы [64].

Экспериментальные исследования по применению сплавов WC-TiC-Co и WC-TiC-TaC-Co, а также безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС), различных алмазных комбинаций и т. д., проведенные в последнее десятилетие, позволяют утверждать, что вольфрамокобальтовые твердые сплавы на достаточно длительный период

останутся главным средством армирования инструмента для горных машин. Поэтому насущной задачей является совершенствование этих сплавов и главное – обеспечение их стабильного качества.

Согласно современным представлениям, основной причиной механического износа твердосплавной вставки реза является усталостное разрушение в результате ее многократного деформирования. При взаимодействии твердосплавной вставки с горной породой зерна породообразующих минералов воздействуют на кобальтовые прослойки, окружающие зерна карбида вольфрама. Обнаженные в результате этого зерна WC в дальнейшем могут скалываться, вырываться целиком или разрушаться под действием многократной циклической нагрузки. Резкое увеличение интенсивности изнашивания при превышении критической скорости резания объясняется развитием в зоне контакта твердосплавной вставки с породой довольно высоких температур (в основном в результате трения), которые оказывают существенное влияние на износостойкость твердого сплава и практически не влияют на микротвердость и прочностные свойства зерен породообразующих минералов. Необходимо отметить, что высокие температуры развиваются как в поверхностном слое твердосплавной вставки (на глубине не более 1 мм) в непосредственной близости от пятна контакта, так и в слоях материала, прилегающих к поверхностям скольжения. С ростом температуры происходит значительное снижение твердости и прочности сплава, при достижении некоторой температуры (по данным разных исследований от 400 до 700 °С) твердость сплава становится ниже твердости зерен породообразующих минералов. При высоких контактных температурах зерна породообразующих минералов пропахивают поверхность сплава и интенсивность изнашивания приобретает катастрофический характер.

В настоящее время большинство исследователей придерживаются мнения, что легирование сплавов WC-Co небольшими количествами карбида тантала приводит к повышению прочности и твердости сплава при повышенных температурах. По всей видимости, этим и объясняется тот факт, что большинство ведущих зарубежных производителей горного инструмента используют сплавы, содержащие карбид тантала.

Сопротивление усталостному разрушению особокрупнозернистых сплавов WC-Co, обладающих более высокой пластичностью, выше, чем у сплавов с нормальной зернистостью, применяемых в настоящее время для оснащения породоразрушающего инструмента горных машин. За счет более высокой пластичности увеличивается сопротивление разрушению сплава.

Необходимо отметить влияние величины зерна карбидной составляющей на физико-механические свойства сплавов WC-Co с массовой долей кобальта 8 и 10 %, наиболее часто используемых для оснащения инструмента горных машин. Спекание образцов проводили в две стадии: предварительное нормализующее спекание в атмосфере водорода при температуре 1150 °С в графитовой засыпке с добавлением сажи и окончательное спекание при температуре 1420 °С в вакуумной печи «Sintervac» в автоматическом режиме по заданной программе при вакууме 1,3–13,3 Па. Исследования подтвердили, что с увеличением размера зерна пластичность и циклическая долговечность сплавов повышается.

Как известно, при разрушении вольфрамкобальтовых твердых сплавов разрушающая трещина зарождается в кобальтовой фазе и распространяется по ней, огибая зерна карбида вольфрама. Прочностные характеристики особокрупнозернистых сплавов при поперечном изгибе и сжатии несколько ниже, чем у сплавов с нормальной зернистостью, применение их для оснащения породоразрушающего инструмента все же предпочтительней, так как они отличаются более высокими значениями работы пластической деформации, что и определяет их более высокую сопротивляемость усталостному раз-

рушению. Таким образом, рост пластичности сплава в тяжело нагруженном инструменте оказывает большее влияние на его работоспособность, чем снижение прочности.

### **11.2.6. Алмазы и сверхтвердые материалы для армирования режущих инструментов**

В настоящее время для армирования горных инструментов используют природные и синтетические алмазы.

Природный алмаз – минерал, обладающий самой высокой твердостью среди известных в природе материалов. Его микротвердость по Виккерсу равна 100 000 МПа, модуль упругости – 900 000 МПа, а прочность на сжатие – всего 2000 МПа. Алмаз стойк против кислот, на него не действует даже царская водка. Термостойкость алмаза высокая – графитизироваться он начинает при температуре 800–1000 °С [22].

Наряду с высокой твердостью алмазы характеризуются повышенной хрупкостью, что следует учитывать при изготовлении и эксплуатации алмазного инструмента. Алмаз обладает самым большим модулем упругости по сравнению с другими известными высокотвердыми материалами, что одна из причин высоких режущих свойств алмазных инструментов.

Основные разновидности природных алмазов, применяемых в горном деле – борт, карбонадо и баллас. Борт представляет собой главным образом обломки и сростки кристаллов неправильной формы, не имеющих определенных плоскостей спайности. Алмазы этого вида имеют преимущественно стальной цвет с желтоватым и голубоватым оттенками, обычно трещиноватые. Карбонадо – агрегаты поликристаллического строения, имеющие тонкозернистую структуру. Они овальной формы, плотные, состоят из массы микроскопических кристаллов, главным образом черного, серого или зеленоватого цвета. Карбонадо менее хрупки, чем борт, и часто применяются в буровых инструментах. Балласы – алмазы шаровидной формы, поликристаллического строения с радиально-лучистой структурой. Оболочка кристаллов более твердая, чем ядро.

Природные технические алмазы чаще всего имеют массу от сотых долей до 1–2 каратов (один карат равен 0,2 г).

Синтетические алмазы по физическим и химическим свойствам практически не отличаются от природных. Имеются некоторые различия по форме, размеру, термической стойкости.

Промышленный синтез алмазов осуществляется из графита в специальных камерах при давлении  $(50–120) \cdot 10^2$  МПа и температуре до 3000 °С в присутствии металлорастворителя (никеля, марганца, железа и др.). В настоящее время отечественная промышленность изготавливает алмазы, рекомендуемые для армирования буровых инструментов, с различными свойствами и различного назначения (ГОСТ 9206-80): моно (марки АС32, АС50) и поликристаллические (марки АРВ16, АРК4 и АРС3).

Наиболее широкое распространение нашли поликристаллические алмазы АРС3 (СВСП). На их основе промышленностью выпускаются геологоразведочные коронки, долота и буровые головки для бурения нефтяных и газовых скважин. Прочность алмазов СВСП составляет 3000–4000 МПа, термостойкость – 1100–1200 °С. Получают их в виде штабиков размером 4×4×3 мм спеканием алмазных порошков при давлении 12000 МПа и температуре выше 3000 °С без присутствия металла-растворителя.

Так как размеры зерен алмазов малы, то современный алмазный инструмент работает по принципу микрорезания. Поэтому скорость бурения алмазных инструментов без учета времени на замену в сравнении с твердосплавными невысока. С целью увеличения скорости бурения, а также повышения стойкости бурового инструмента в последние годы созданы слоистые алмазно-твердосплавные материалы

типов СВБН, АТП (РФ), стратапакс (США), синбит (ЮАР) и их разновидности. Указанные материалы представляют собой твердосплавные пластины толщиной 2–2,5 мм, на которые нанесен слой поликристаллических алмазов, равный 0,5–0,7 мм. Форма пластин может быть различной: круглой, прямоугольной, трехгранной и т. д. в зависимости от назначения.

Имеются сведения об их использовании для армирования резцов вращательного бурения шпуров и скважин. По литературным данным при работе инструментом, оснащенным слоистыми алмазно-твердосплавными пластинами, до 2 раз повышается механическая скорость бурения и в десятки раз увеличивается стойкость. Однако буровой инструмент имеет высокую стоимость, более жесткие требования к условиям эксплуатации. В этой связи инструменты пока не находят массового применения. Тем не менее перспективность применения алмазно-твердосплавных материалов в горном деле очевидна.

В последние годы ВИИИТСом разработана технология получения сверхтвердых композиционных материалов типа СВПК, обладающих свойствами синтетических поликристаллических алмазов, позволяющая изготавливать заготовки режущих элементов различных форм и размеров. Опыт эксплуатации бурового инструмента, оснащенного этим материалом, показывает высокую эффективность при работе в тяжелых условиях абразивного изнашивания.

Известный интерес для изготовления горных инструментов имеет кубический нитрид бора, который представляет собой кубическую модификацию химического соединения бора и азота. Получают его, как и алмаз, в специальных камерах при высоких давлениях и температурах. Параметры решетки и минимальное межатомное расстояние у кубического нитрида бора несколько большие, чем у алмаза. Его твердость 80000 МПа, термостойкость выше, чем у алмаза (он не теряет своих свойств даже при температуре 1400 °С), модуль упругости – 720 000 МПа, предел прочности на сжатие – 500 МПа. При изготовлении кубического нитрида бора можно в широких пределах изменять физико-механические свойства, поэтому в зависимости от технологии изготовления различные организации выпускают существенно разные модификации его под названиями: эльбор, кубонит, боразон, гексанит.

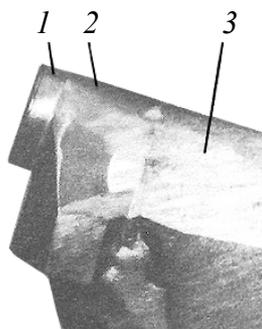
Славутич – сверхтвердый материал, разработанный специально для оснащения буровых инструментов, не уступает природным алмазам по износостойкости, но превосходит их по прочности. Из этого материала могут изготавливаться изделия практически любой формы. Долота для бурения нефтяных и газовых скважин, армированные славутичем, в 1,5–2,0 раза дешевле долот, оснащенных крупными природными алмазами.

#### **11.2.7. Применение сверхтвердых материалов для изготовления радиальных и тангенциальных резцов**

В Германии были проведены производственные испытания 300 радиальных резцов в исполнении, показанном на рис. 11.1. Стойкость этих резцов оказалась в 3–4 раза выше, чем стандартных. [65].

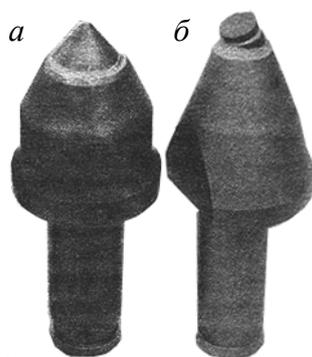
Экспериментальные исследования альтернативных материалов для армирования тангенциальных поворотных резцов были проведены также в Германии [66]. На рис. 11.2 представлены экспериментальные резцы с тремя типами вставок: твердый сплав, керамика (рис. 11.2, а) и поликристаллические алмазы (резец марки PKD, рис. 11.2, б). Вставки закреплялись в головной части резцов методом горячей запрессовки. Керамические твердосплавные вставки в форме конуса имели диаметры 20, 25 мм. Тангенциальные резцы PKD1, PKD2 оснащались поликристаллическими круг-

лыми вставками диаметром 13,3 мм, а резцы PKD3 и PKD4 – сегментными вставками с углом 180° и 120° соответственно, изготовленными из дисков диаметром 19 мм.



*Рис. 11.1. Радиальный резец с покрытием режущей кромки поликристаллическими спеченными алмазами:*

*1 – поликристаллический диск;  
2 – твердосплавная вставка; 3 – корпус резца*



*Рис. 11.2. Экспериментальные резцы*

Поликристаллические алмазные вставки (PKD) могут быть выполнены только в виде дисков. Для получения других форм, например конической, требуется дополнительная электроискровая обработка дисков. Вставки из керамических материалов не имели, как твердосплавные, характерного абразивного износа и выходили из строя в основном по двум причинам: излом основания вставки; излом по лезвию вставки. Основная причина поломки вставок состоит в недостаточной прочности керамики на изгиб. Лучшие результаты показали керамические вставки из кремниевого нитрида ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) диаметром 25 мм. Однако даже при их испытании абразивного износа не было обнаружено (рис. 11.3). На основании результатов исследований был сделан вывод о неприемлемости керамических материалов для армировки режущего инструмента.

Резцы PKD1 и PKD2 (рис. 11.4), оснащенные поликристаллическими алмазными вставками, имели одинаковый с керамическими характер износа – абразивного износа не обнаружено. Это объясняется высокой износостойкостью этих материалов. При испытаниях резцов имели место изломы вставок. Авторы исследований объясняют их следующим образом:

- резкие колебания нагрузки на поверхности PKD вставок как по величине, так и по распределению по контактной поверхности вставка – порода, которые сопровождаются повышенной вибрацией;
- недостаточная толщина вставки и несущей твердосплавной основы;

- на переходе от пластины РКД к корпусу головной части резца имеет место скачкообразное изменение жесткости материалов. Из-за меньшей жесткости корпуса резца в процессе резания породы вставки подвергаются нагрузке на изгиб.

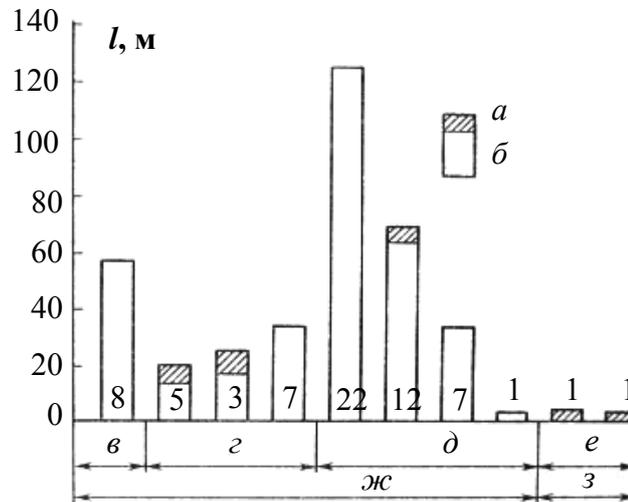


Рис. 11.3. Показатели износа вставок из кремниевого нитрида ( $Si_3N_4$  – HIP):  
*l* – длина резца; *a* – износ с разрушением; *б* – отсутствие износа; *в* – глинистый сланец;  
*г* – песчанистый сланец с включениями кремния; *д* – песчанистый сланец;  
*е* – песчаник; *ж* – имитация породы; *з* – порода

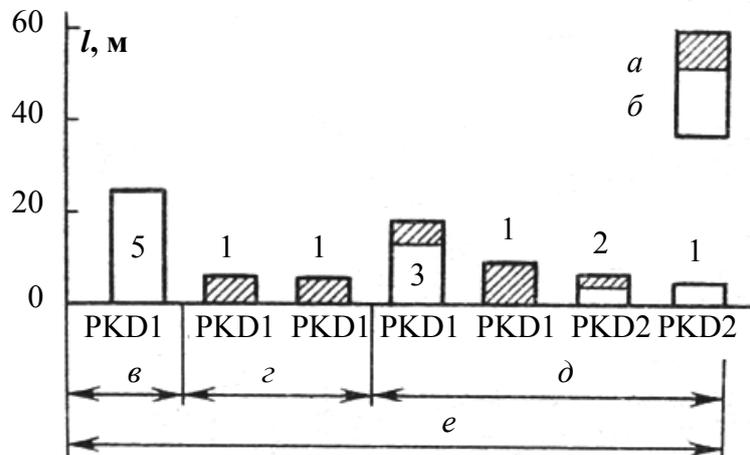


Рис. 11.4. Показатели износа резцов PKD1 и PKD2:  
*l*, *a*, *б*, *в*, *г*, *д*, *е* (см. поз. рис. 11.3)

На резцах PKD3 и PKD4 с целью устранения отмеченных выше недостатков толщина твердосплавной подложки была увеличена с 2,5 мм до 7 мм, а толщина слоя РКД с 0,5 мм до 1 мм. Для устранения вибрации резцы были закреплены в резцедержателях более прочным фиксатором.

Эти меры дали положительный результат – изломы были исключены и появился явно выраженный абразивный износ поликристаллических алмазных вставок (PKD).

Немецкая фирма «Де Бирс индастриел дайемонд дивижн» (Германия) провела испытания тангенциальных резцов типа Синпик (рис. 11.5) [67].

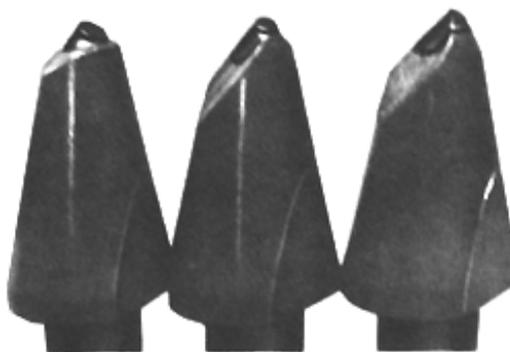


Рис. 11.5. Резцы Синтик с вставками из искусственных поликристаллических алмазов (PKD)

Резцы имели для защиты головной части резца высокоизносные поликристаллические алмазы (PKD), которые были размещены в специальных твердосплавных вставках. Испытания показали наличие их абразивного износа и подтвердили преимущества этих вставок (PKD) по сравнению с твердосплавными:

- десятикратное увеличение срока службы;
- сокращение времени, затрачиваемого на замену резцов;
- меньшие усилия резания при разрушении породы;
- снижение пылеобразования.

В резцах эти результаты были получены благодаря применению двухслойных систем в головной части резцов: поликристаллические алмазы – твердосплавная вставка.

В качестве примера аналогичного технического решения можно привести также тангенциальный резец со вставками из поликристаллического композиционного алмазного материала ПКА, прошедший испытания в Германии (рис. 11.6) [68]. В резцах применена трехслойная система для защиты головной части резцов: поликристаллические алмазы – композит – твердосплавная вставка.

Резцы со вставками ПКА прошли успешные производственные испытания в горной промышленности ЮАР.

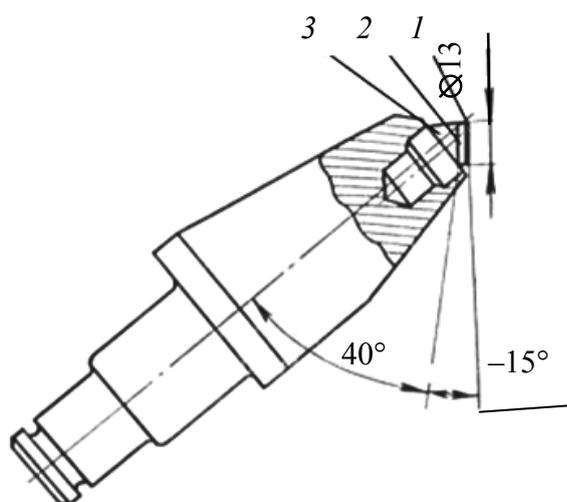


Рис. 11.6. Резец с режущими вставками из ПКА:  
1 – слой ПКА толщиной 0,5 мм;  
2 – композит; 3 – несущий твердый сплав

Для нового материала характерна очень высокая твердость, обусловленная спеканием алмазных частиц крупностью от 2 до 75 мкм при экстремально высоком давлении до 6 ГПа и температуре до 1500 °С. В рассмотренном примере материал ПКА непосредственно наносился на твердосплавную подложку – композит в процессе изготовления вставки. Для соединения с подложкой алмазного слоя, толщина которого колебалась от 0,5 до 0,7 мм, по технологическим соображениям, в связи с необходимостью прочного закрепления алмазных зерен, необходимо присутствие в спекаемой массе металлических компонентов. Подобные режущие вставки можно закреплять на режущем инструменте с применением твердого припоя.

### **11.2.8. Вставки буровых резцов из сверхтвердых материалов**

Ниже приведена информация по материалам синдит, синдрил, синдакс-3 и «Де Бирс» – товарное обозначение компании «Де Бирс индастриел дайемнд дивижн».

#### *11.2.8.1. Режущие вставки синдит – твердый сплав*

Сверхвысокая твердость алмазов послужила причиной их все более широкого применения в качестве материала для армирования бурового режущего инструмента. Однако из-за ограниченных возможностей технического применения природных и синтетических монокристаллических алмазов (в связи с их нехваткой и высокой стоимостью) специалисты стремились найти новые решения проблемы армирования режущего инструмента алмазами. Такие материалы были получены в виде поликристаллических алмазных материалов, сокращенно обозначенных ПКА, которые получают при высоком давлении и высокой температуре. Для изготовления ПКА тщательно отобранные зерна алмазов соответствующей формы и размеров (в присутствии, например, металлической фазы) спекают при высокой температуре (около 1500 °С) и высоком давлении (около 6 ГПа) [69].

Материал ПКА можно применять для армирования резцов вращательного бурения. Внедрение ПКА в практику вращательного бурения в виде режущих вставок синдит – твердый сплав способствовало заметному прогрессу в развитии буровой техники. В связи с необходимостью снижения расходов на бурение, а также повышенными требованиями к скорости бурения и сроку службы инструмента режущие вставки из ПКА уже завоевали широкое признание благодаря значительным преимуществам в сравнении с обычными твердосплавными режущими вставками. В то же время применение ПКА пока еще ограничивается рядом причин, в том числе:

- пониженным сопротивлением при ударных нагрузках, возникающих при бурении по трещиноватым породам, что сужает область применения буровых резцов;
- термической чувствительностью материала ПКА при температуре выше 700 °С.

Хотя пониженное сопротивление ПКА ударным нагрузкам в определенной мере удалось компенсировать установкой более мелких режущих вставок, но это, в свою очередь, усложнило технологию изготовления режущего инструмента, особенно с учетом необходимой термостойкости. Таким образом, возникла настоятельная необходимость в разработке достаточно вязкого и износостойкого материала ПКА с высокой термической стабильностью, который был бы пригоден для бурения прежде всего крепких пород и, кроме того, допускал применение стандартной технологии спекания при изготовлении инструмента. Для того чтобы выполнить все требования к ПКА, разработаны поликристаллические материалы синдрил и синдакс-3, отличающиеся высокой термостойкостью при температуре до 1200 °С.

Все материалы ПКА для вставок бурового инструмента изготавливаются в присутствии кобальта, в качестве растворителя-катализатора. Хотя благодаря этому

улучшаются определенные физические свойства ПКА, в то же время остающаяся в конечном продукте кобальтовая промежуточная фаза повышает температурную чувствительность, что при температуре более 700 °С приводит к постепенно возрастающему разрушению структуры ПКА. Такое отрицательное влияние кобальта имеет две причины.

Прежде всего большое средство с углеродом при высокой температуре, которое в условиях пониженного давления способствует преобразованию алмаза в графит, затрудняет структурную интеграцию при срастании зерен и, следовательно, уменьшает его прочность.

Вторая причина заключается в том, что коэффициенты теплового расширения кобальта и алмаза значительно различаются, а это приводит к увеличению тепловых напряжений с ростом температуры и в конце концов к образованию микротрещин внутри материала, а при дополнительной механической нагрузке – к его разрушению.

#### 11.2.8.2. Режущие вставки синдрил – твердый сплав

Вставки синдрил – твердый сплав отвечают требованиям изготовителей бурового инструмента и условиям эксплуатации буровой техники. Режущие элементы в виде круглых дисков помещаются с помощью подложки из твердого сплава. Диски выпускаются диаметром от 13,3 до 50,8 мм, что значительно расширяет типоразмерный ряд бурового инструмента. Все режущие вставки имеют поликристаллический алмазный слой толщиной 0,7 или 1,0 мм, который непосредственно закреплен на твердом сплаве. Свойства слоя ПКА во всех вставках одинаковы, так как его получают при одних и тех же условиях – высоком давлении и температуре [69].

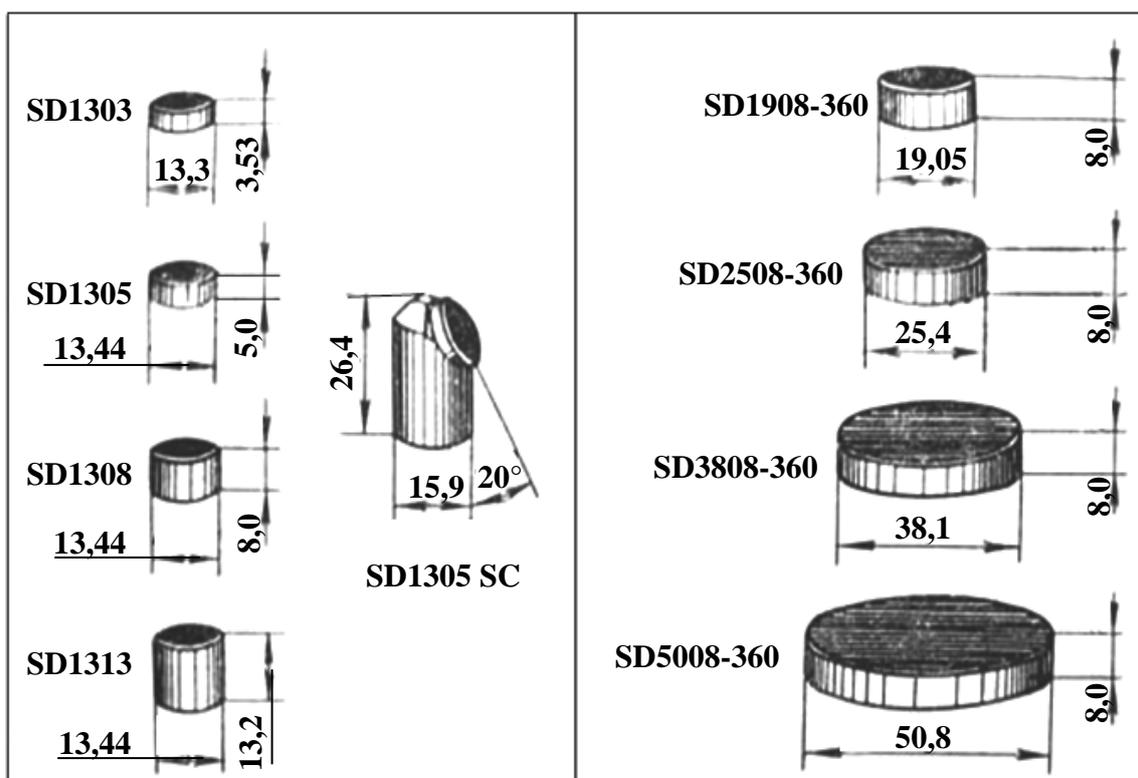
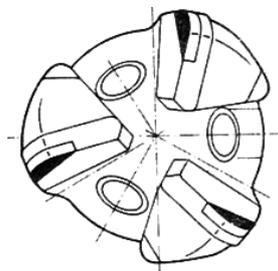


Рис. 11.7. Размеры стандартных режущих вставок с толщиной слоя синдрила 0,7 мм (слева) и 1 мм (справа)

Применение синдрила в твердосплавных вставках буровых резцов показало очень хорошие результаты в горной промышленности благодаря следующим трем положительным свойствам материала:

- режущие вставки из синдрила обладают свойствами самозатачиваемости при постепенном износе, не затупляясь из-за сильного скругления или уплощения кромок, как это происходит в менее стойком к абразивному износу твердом сплаве;
- основа вставки, выполненная из твердого сплава, служит для довольно хрупкого синдрила в качестве амортизирующей опоры и придает ему повышенное сопротивление по отношению к ударным нагрузкам;
- основа из твердого сплава обеспечивает надежное крепление вставки в корпусе бурового инструмента.

Стандартные формы и размеры режущих вставок из синдрила представлены на рис. 11.7. Цилиндрические вставки диаметром от 13,3 до 13,44 мм пригодны для непосредственной установки на корпусе буровых резцов (рис. 11.8).



*Рис. 11.8. Буровой резец с режущими вставками  
синдрил – твердый сплав  
для бурения дегазационных скважин*

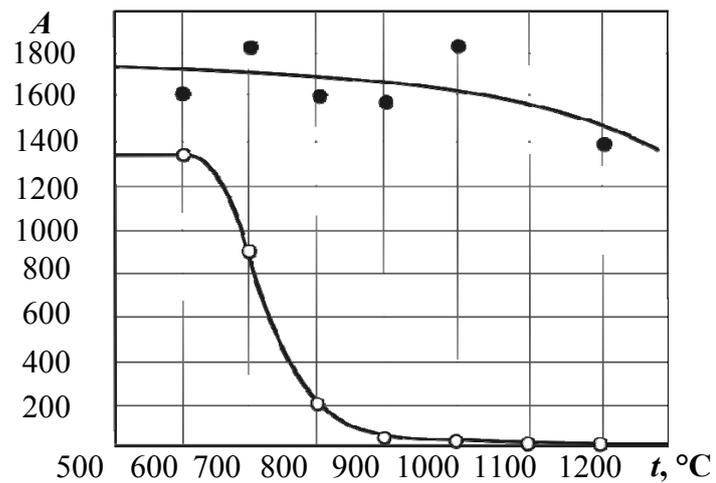
Дисковые элементы диаметром 19,05–50,8 мм (рис. 11.7, справа) не предназначены для непосредственного использования на режущих вставках. Их следует скорее рассматривать как составляющий элемент, позволяющий в зависимости от потребности и назначения инструмента изготавливать режущие вставки синдрил – твердый сплав любой формы и размеров.

#### *11.2.8.3. Режущие вставки синдакс-3 – твердый сплав*

Синдакс-3 получают по той же технологии, при высоких давлении и температуре, что и другие синтетические алмазы и ПКА. Плотные уложенные зерна алмазов спекают в присутствии порошкообразного кремния. В процессе синтеза большая часть кремния преобразуется в твердый износостойкий и химически устойчивый карбид кремния  $\beta$ -модификации. Полированные микрошлифы из материала синдакс-3 сравнимы с микрошлифами синдрила, имеющего кобальтовую промежуточную фазу, что свидетельствует о высокой степени прочности и этого термостойкого материала.

На рис. 11.9. показаны кривые, по которым можно сравнить изнашиваемость режущих вставок синдакс-3 – твердый сплав и синдрил – твердый сплав при бурении породы [69].

Характер кривых на рис. 11.9 четко показывает более высокую, по сравнению с синдрилом, термостойкость синдакса-3; при переходе через температурную нагрузку в 700 °С износ синдрила резко увеличивается.



*Рис. 11.9. График зависимости износостойкости буровых резцов от температуры нагрева вставок при резании породы:  
 А – отношение объема буровой мелочи к объему изношенной части бурового инструмента  
 (со вставками с синдрилом – нижняя кривая и с синдаксом-3 – верхняя кривая)*

## **12. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ТВЕРДОСПЛАВНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА**

Анализ возможных путей развития горного машиностроения [70] показывает, что большинство исследователей и практиков представляют конструкционную прочность структурных элементов горных машин с учетом технологической и эксплуатационной наследственности твердосплавного инструмента [71]. Производство твердосплавного инструмента с заданными параметрами прочности, точности размеров и формы связано с большими технологическими трудностями и значительными затратами ресурсов [72, 73]. Так как твердосплавной инструмент производится методом порошковой металлургии, то основным показателем, характеризующим особенности протекания процесса производства, является усадка спрессованного образца при спекании, свидетельствующая о его уплотнении при нагреве. Экспериментальные данные по усадке твердых сплавов при спекании позволили сделать ряд выводов относительно влияния различных факторов на процессы спекания, рост зерен фазовых составляющих твердых сплавов, формирование микроструктуры и характер взаимодействия между фазами в процессе спекания.

### **12.1. Рентгенографические исследования внутризеренной структуры порошков твердосплавного производства и влияния на нее технологических параметров изготовления порошков**

#### **12.1.1. Влияние состава и структуры исходных компонентов и условий восстановления и карбидизации на структуру вольфрама, карбида вольфрама и WC-фазы в сплавах**

В настоящее время можно считать установленным тот факт, что свойства спеченных твердых сплавов определяются не только их составом (соотношением и составом карбидной и связующей фазы, наличием избыточных фаз) и микроструктурой (размером зерна фазовых составляющих и стереологическими характеристиками), но и особенностями внутризеренной структуры компонентов твердых сплавов (субмикроструктурой). При этом свойства спеченных сплавов в значительной степени определяются характеристиками исходного сырья и промежуточных продуктов твердосплавного производства, которые изменяются в зависимости от различных технологических параметров.

Известно большое количество исследований, посвященных выяснению влияния характеристик исходных порошков и последующих технологических операций на дисперсность полуфабрикатов и структуру и свойства твердых сплавов [73, 74]. В частности, установлено влияние зернистости исходных вольфрамовых соединений (паравольфрамата аммония, вольфрамовой кислоты и вольфрамового ангидрида) на размер зерна и морфологию промежуточных оксидов и порошков вольфрама; влияние температур прокаливания исходных соединений, восстановления, карбидизации и спекания на рост зерна вольфрама, карбида вольфрама и карбидной фазы в сплаве; влияние размера на измельчение порошков карбида вольфрама и на формирование структуры

сплавов. Выявлены соотношения между размером зерна вольфрама, карбида вольфрама и карбидной фазы в сплаве; изучено влияние примесей на зернистость порошков и сплавов. Знание основных закономерностей формирования особенностей порошков на стадиях технологического процесса позволяет регулировать процесс с целью получения конечных продуктов заданной дисперсности.

Однако связь между свойствами сплавов и технологическими режимами их изготовления не всегда однозначна и часто имеет достаточно сложный характер, который не может быть объяснен только изменением зернистости и морфологии промежуточных продуктов. Уже в [75] установлено возрастание эксплуатационной прочности крупнозернистых буровых сплавов при повышении температуры восстановления исходного вольфрамового ангидрида, т. е. в зависимости от дисперсности порошка вольфрама, несмотря на существенное выравнивание размеров частиц карбида вольфрама при карбидизации и размоле. Авторами [75] сделано предположение о возможности непосредственного влияния на свойства сплавов субмикроскопической структуры частиц порошков карбида вольфрама, которая, очевидно, зависит от способа образования частиц в процессе карбидизации и, в конечном счете, от степени дисперсности (и субмикроструктуры) исходных порошков вольфрама. По данным [76, 77, 78] температура получения вольфрама оказывает значительное влияние на предел прочности при изгибе и твердость. Повышение температур восстановления и карбидизации приводит к возрастанию пластических свойств сплавов *WC-Co*.

Вопросы наследственности внутризеренной структуры в компонентах твердых сплавов на разных стадиях технологического процесса изучены значительно меньше. Однако имеющиеся к настоящему времени экспериментальные результаты позволяют на данном этапе сделать некоторые выводы.

Первые работы по исследованию влияния технологических режимов на внутризеренную структуру порошков и компонентов твердых сплавов относятся к 1950–1959 гг. [79, 80]. Однако использование в этих работах методики расчета величины блоков мозаики и микродеформаций решетки по изменению интенсивности и «структурной» ширины рентгеновских линий выполнены с использованием ряда допущений, поэтому полученные результаты носят исключительно качественный характер и требуют критического подхода.

Наиболее достоверными результатами этих работ являются следующее. Совершенство кристаллической структуры порошков вольфрама и карбида вольфрама существенно зависит от технологических режимов их получения. Повышение температур восстановления и карбидизации способствует получению более крупноблочных порошков вольфрама и карбида вольфрама. При одной и той же температуре карбидизации наблюдается зависимость между величиной блоков карбида вольфрама и исходного вольфрама. В процессе размола более интенсивно дробятся блоки порошков, изготовленных при высокой температуре. Наблюдается зависимость между интенсивностью размола смесей и величиной блоков в спеченном сплаве. Два сплава с одинаковой величиной зерна могут быть в зависимости от предыстории их изготовления совершенно различными по субмикроструктуре и отсюда, возможно, и по свойствам.

Одним из наиболее интересных и малоизученных является вопрос о влиянии состава и структуры исходных соединений вольфрама и технологических режимов их восстановления на внутризеренную структуру порошков вольфрама и карбида вольфрама. Исследование связи между искажениями решетки  $WO_3$  и характеристиками порошка вольфрама после восстановления проведено японскими учеными [81]. В качестве характеристики совершенства кристаллической решетки  $WO_3$  использовали полуширину и степень разделения пиков (111) и  $(11\bar{1})$  порошков  $WO_3$  (рис. 12.1). При

получении дифракционной картины от порошков с дефектной структурой эти пики не разделяются. При возрастании степени совершенства кристаллической решетки полуширина пика начинает возрастать, и затем, он разделяется на два. Порошки  $WO_3$  с различной степенью искажения кристаллической структуры получали при термическом разложении паравольфрамата аммония (ПВА) в различных условиях. Связь между термическими условиями разложения ПВА и искажениями решетки  $WO_3$  показана на рис. 12.1. Для исследования использовали две серии порошков  $WO_3$  – без добавок и с добавками  $K_2SiO_3$ .

На рис. 12.2 показано соотношение между степенью дефектности порошков  $WO_3$  и полученных из них порошков вольфрама. Эта зависимость имеет различный характер в порошках с добавками и без них. В работе [81] к сожалению, не проведен более глубокий анализ тонкой структуры порошков вольфрама по ширине рентгеновских линий, поэтому выводы следует относить не к изменению размеров кристаллитов, как делают авторы, а к общей дефектности кристаллической структуры вольфрама.

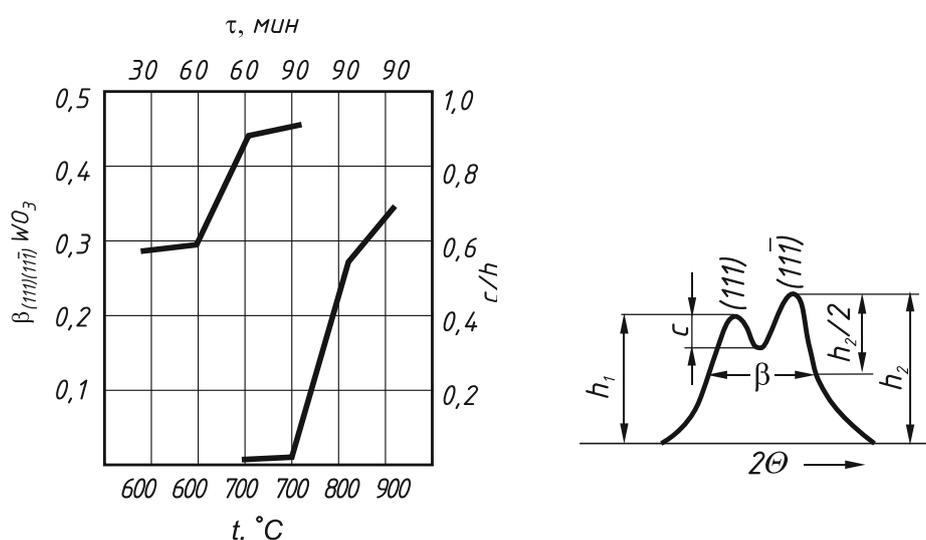


Рис. 12.1. Зависимость полуширины  $\beta$  (1) и степени разделения  $c/h_1$  дифракционных пиков (111) и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  порошков  $WO_3$  от термических условий разложения паравольфрамата аммония

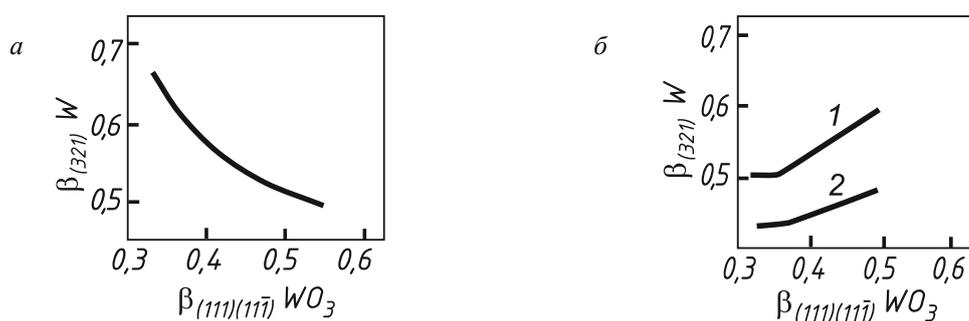


Рис. 12.2. Зависимость полуширины  $\beta$  линии (321) порошков вольфрама от степени искаженности кристаллической решетки порошков  $WO_3$ :  
 а –  $WO_3$  без добавок; б –  $WO_3$  с добавками  $K_2SiO_3$ ;  
 1 – восстановление при 650 °С, 4 ч; 2 – то же, при 650 °С, 4 ч и 800 °С, 2 ч

Полученные данные свидетельствуют о том, что между степенью дефектности кристаллической решетки порошков  $WO_3$  (без добавок) и вольфрама наблюдается пря-

мая зависимость. При этом частицы вольфрама имеют максимальные размеры при использовании порошков  $WO_3$  с более совершенной структурой. При наличии добавок в порошках  $WO_3$  наблюдается обратная картина: менее дефектные порошки вольфрама получаются из более несовершенных по структуре порошков  $WO_3$ , а размеры частиц вольфрама растут тем больше, чем более несовершенная решетка  $WO_3$ . Это явление связано с тем, что частицы  $WO_3$  совершенной структуры характеризуются меньшей активностью и не реагируют с добавками, вводимыми в порошок. При этом частицы  $SiO_2$  (из  $K_2SiO_3$ ) окружают частицы вольфрама, препятствуя их росту.

Аналогичное влияние на тонкую структуру порошков  $WO_3$  оказывает прокаливание при различных температурах. С увеличением температуры происходит уменьшение ширины линии (200) с  $d=0,363$  нм и степени слияния линий (200) и (020), сопровождающееся ростом их интенсивности.

Расчет, проведенный на основании данных о ширине рентгеновских линий в предположении, что уширение их вызвано малыми размерами блоков, показало, что размеры блоков и размеры зерен почти совпадают; это свидетельствует о том, что исследованные порошки  $WO_3$  представлены совершенными зернами, одноблочными и без искажений. При дополнительной прокалке зерна укрупняются, структура их остается совершенной. Порошки вольфрама, полученные восстановлением из прокаленных оксидов, характеризовались значительными микроискажениями решетки. При этом наблюдалась прямая связь между размером зерна вольфрама и степенью его дефектности (по крайней мере, в пределах одной партии порошка  $WO_3$ ). В отличие от вольфрама, для карбида вольфрама эта зависимость имеет более сложный характер и описывается кривой с максимумом. Это означает, что даже в пределах одной партии  $WO_3$  можно получить порошки  $WC$ , одинаковые по зернистости, но разные по совершенству кристаллической структуры.

Наиболее полные исследования характеристик внутренней структуры порошков вольфрама в зависимости от условий восстановления и чистоты оксидов вольфрама предприняты в работе [82]. Порошки вольфрама получали при одностадийном восстановлении  $WO_3$  в лабораторной горизонтальной трубчатой печи в атмосфере водорода при 800–1100 °С. Исследования тонкой структуры порошков вольфрама показали, что размер кристаллитов является функцией температуры получения вольфрама и не зависит от наличия примесей. Напряжения, возникающие в кристаллической решетке вольфрама в процессе восстановления металлической фазы из оксида, связаны с некогерентностью решеток  $WO_3$  и W.

При повышении температуры восстановления до 900 °С ( $\tau=1$  ч) происходит релаксация напряжений, в результате чего порошки вольфрама, полученные при температурах выше 900 °С, свободны от напряжений. Релаксация внутренних напряжений проходила более полно в присутствии примесей (рис. 12.3).

Помимо температуры, важным фактором, оказывающим влияние на внутреннюю структуру и морфологию частиц вольфрама, является парциальное давление водорода в атмосфере печи, определяющее скорость восстановления (рис. 12.4). При более медленном восстановлении в разбавленной атмосфере водорода до 900 °С образуется более совершенная упаковка атомов в первичных кристаллах, следовательно, уменьшаются напряжения в кристаллической решетке и плотность дислокаций. При этом возрастает размер частиц, и, они приобретают совершенную форму, приближающуюся к полиэдрической.

На формирование тонкой структуры порошков  $WO_3$ , W и WC оказывает влияние степень очистки порошков  $WO_3$  от примесей. Для оценки степени совершенства кристаллической структуры  $WO_3$  определяли ширину и смещение ряда дифракционных

линий, отношение интенсивностей линий (040) и (002), а также рассчитывали межплоскостные расстояния. Результаты рентгеноструктурного анализа порошков  $WO_3$  (рис. 12.5) позволили выявить различия в их тонкой структуре, которые сводятся к следующему. Наиболее дефектную структуру имеют порошки исходного  $WO_3$ . Заметное расширение исследованных рентгеновских линий свидетельствует о значительных искажениях кристаллической решетки и (или) малых размерах блоков, а максимальные межплоскостные расстояния, определенные по этим отражениям, связаны с наличием примесных атомов в решетке, что подтверждено данными химического анализа.

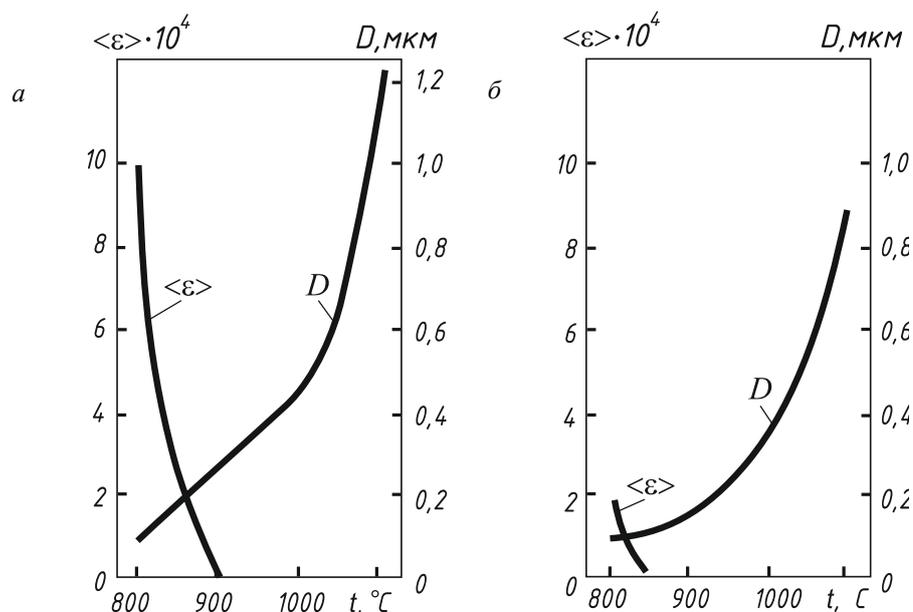


Рис. 12.3. Зависимость микродеформации кристаллической решетки  $\langle \epsilon \rangle$  и размера кристаллитов  $D$  порошков вольфрама от температуры восстановления  $WO_3$ :  
а – порошки без добавок; б – порошки с добавками

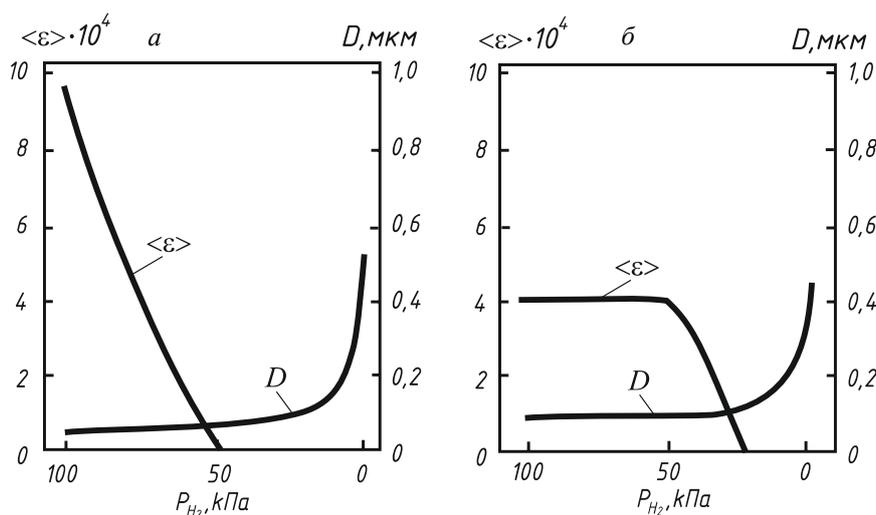


Рис. 12.4. Зависимость микродеформации кристаллической решетки  $\langle \epsilon \rangle$  и размера кристаллитов  $D$  порошков вольфрама от парциального давления водорода при восстановлении:  
а – порошки без добавок; б – порошки с добавками

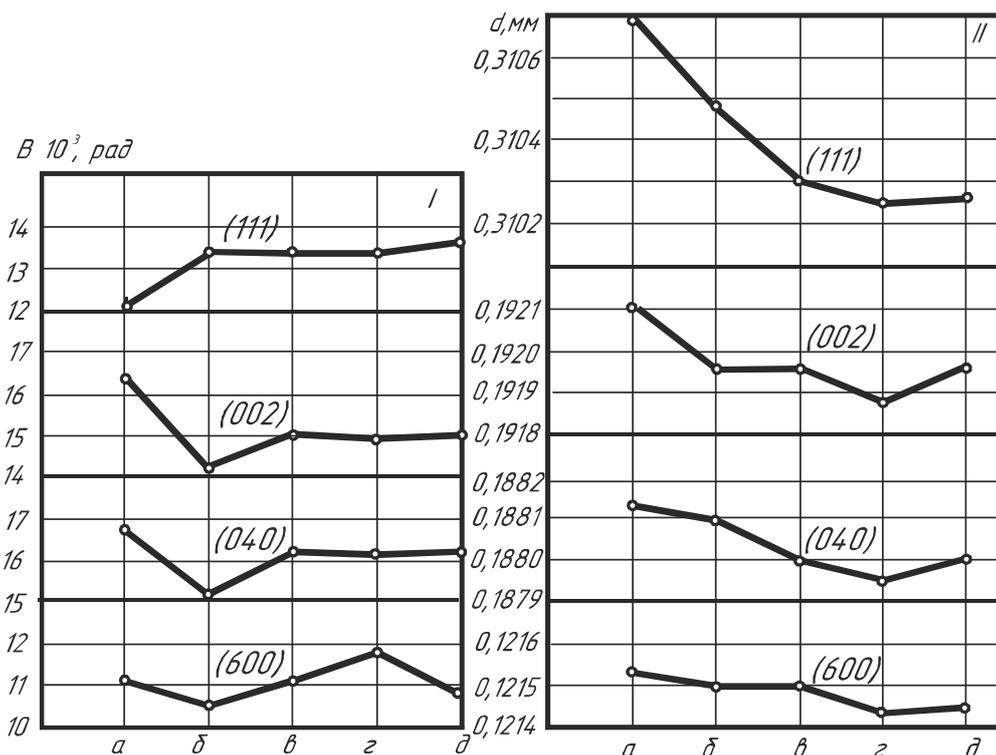


Рис. 12.5. Изменение ширины рентгеновских линий  $B$  (I) и межплоскостных расстояний  $d$  (II) порошков  $WO_3$ , полученных разными способами: а – исходный порошок; б – прокаленный; в – из низкотемпературного  $W$ ; г – из высокотемпературного  $W$ ; д – из высокотемпературного  $WC$

Уширение линии (111) связано, по-видимому, с эффектом разделения пиков (111) и  $(11\bar{1})$ , описанным выше, поэтому зависимость между шириной линии (111) и дефектностью структуры  $WO_3$  носит обратный характер.

Порошки  $WO_3$ , прошедшие очистку, отличались минимальными значениями межплоскостных расстояний и содержали наименьшее количество примесей. Наиболее совершенной структурой обладал порошок  $WO_3$ , прокаленный при  $900^\circ C$ . Однако он имел более высокие значения межплоскостных расстояний, чем  $WO_3$  после очистки, что может быть связано с неполным удалением примесей.

Интенсивная особенность отмечена в структуре порошков  $WO_3$  при сопоставлении интенсивности линий (040) и (002). Если для порошков  $WO_3$ , полученных по стандартной технологии из ПВА (исходных и прокаленных) отношение интенсивностей  $J(040)/J(002) \approx 1$ , что соответствует табличным данным, то для порошков, изготовленных повторным окислением вольфрама и карбида вольфрама, это отношение составляет 0,6–0,7. Подобное влияние свидетельствует о более глубоких различиях в структурах вольфрамового ангидрида разного происхождения.

Анализ тонкой структуры порошков вольфрама, полученных из  $WO_3$  разного происхождения, показал, что они имели близкие размеры мозаики (32–37 нм) и характеризовались отсутствием микроискажений решетки. Наиболее дефектную структуру имели порошки вольфрама, полученные из исходного  $WO_3$ . Они отличались наличием дефектов упаковки ( $1,5\alpha + \beta$ ), меньшими размерами и большей разориентацией блоков мозаики. Порошки карбида вольфрама, полученные при разных температурах карбидизации, резко различались по степени дефектности структуры независимо от способа получения  $WO_3$ ; порошки  $WC$ , полученные при более высокой температуре карбидиза-

ции, хаактеризуются более совершенной структурой. Исследование ширины рентгеновских линий  $WC$ -фазы в сплаве (после электролитического удаления кобальта) показало, что структурные различия, замеченные у «высокотемпературного» и «низкотемпературного» карбида вольфрама, отсутствуют: карбидная фаза в сплавах, независимо от температуры карбидизации, имеет одинаковую ширину линий. При этом на свойства сплавов (предельную деформацию и работу разрушения) явно влияет температура получения карбида вольфрама, независимо от метода изготовления и очистки  $WO_3$ . Аналогичные выводы о влиянии режимов изготовления порошков  $W$  и  $WC$  на характеристики их тонкой структуры и пластические свойства спеченных твердых сплавов получены в работах [83, 84, 85, 86].

Наиболее детальные исследования изменений тонкой структуры порошков  $WO_3$ ,  $W$ ,  $WC$  и  $WC$ -фазы в сплаве на всех стадиях технологического процесса проверены в работах [85]. На рис. 12.6 представлены результаты изучения интегральной ширины рентгеновских линий для порошков, отобранных на всех промежуточных технологических стадиях изготовления твердого сплава.

Первую серию порошков (низкотемпературную) готовили по обычным режимам, принятым в производстве вольфрамокобальтовых сплавов. Вторая серия отличалась значительно более высокими температурами получения вольфрама и карбида вольфрама.

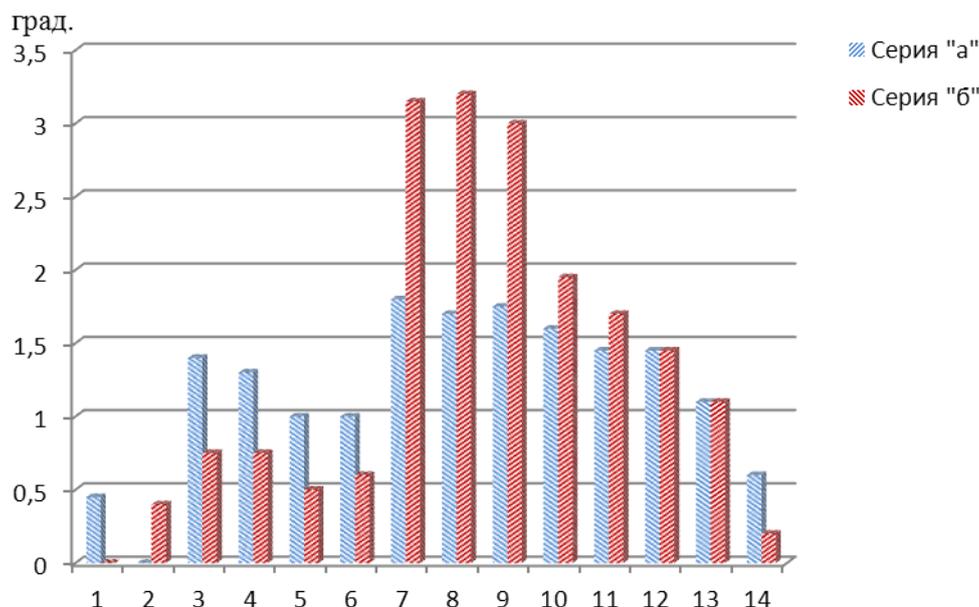


Рис. 12.6. Изменение ширины рентгеновских линий порошков  $WO_3$ ,  $W$ ,  $WC$  и  $WC$ -фазы сплава на разных стадиях технологического процесса:

*a* – низкотемпературная серия; *б* – высокотемпературная серия;

1 –  $WO_3$  исходный; 2 –  $WO_3$  прокаленный; 3 –  $W$  после восстановления;

4 –  $W$  после смешения с углеродом; 5 –  $WC$  спек; 6 –  $WC$  после дробления;

7 –  $WC$  после размолла с  $Co$  до просева; 8 – то же после просева;

9 –  $WC$ -фаза в спрессованных образцах; 10 –  $WC$ -фаза в образцах после предварительного спекания (до удаления  $Co$ ); 11 – то же, после предварительного спекания (после удаления  $Co$ ); 12 –  $WC$ -фаза в сплаве после окончательного спекания (до удаления  $Co$ ); 13 – то же (после удаления  $Co$ ); 14 – после эксплуатации

Из рис. 12.6 видно, что исходные порошки и промежуточные материалы, участвующие в производстве сплавов по низко- и высокотемпературной технологии, отличаются шириной рентгеновских линий. Порошки  $WO_3$ ,  $W$  (после восстановления и после

смешения с углеродом), *WC* (спек после карбидизации и порошок после сухого разлома) высокотемпературной серии имеют значительно более узкие линии, чем соответствующие порошки низкотемпературной серии. Это подтверждает выводы А.Е. Ковальского о том, что применение высоких температур восстановления и карбидизации способствует получению порошков вольфрама и карбида вольфрама с более совершенной кристаллической структурой: размер блоков мозаики примерно вдвое больше, чем в низкотемпературном ( $D_{\text{исм}} = 58$  и  $25$  нм, соответственно). Последний характеризуется большей степенью разориентации блоков мозаики.

При карбидизации порошков вольфрама низкотемпературной серии размеры блоков мозаики сохраняются практически без изменения и структура карбида вольфрама характеризуется наличием значительных микроискажений. В высокотемпературной серии при карбидизации происходит интенсивный рост блоков, и микроискажения в кристаллической решетке *WC* практически отсутствуют. Высокотемпературные порошки *W* и *WC* более крупнозернистые.

Размол (табл. 12.1) существенно изменяет дисперсность и структурные характеристики порошков карбида вольфрама. Ширина рентгеновских линий резко возрастает, особенно у высокотемпературных порошков. При гармоническом анализе порошков *WC* после размола установлено сильное измельчение блоков мозаики и возрастание микро-искажений решетки.

Таблица 12.1

*Результаты гармонического анализа порошков WC после размола*

	$D_{\text{эф}}^{\{1010\}}$ нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} \cdot 10^3$
Спек <i>WC</i>	23/260	4,7/0,1
Порошок <i>WC</i> после размола с <i>Co</i> (после удаления <i>Co</i> )	7/6	10,5/13,6
<i>WC</i> -фаза в сплаве (после удаления <i>Co</i> )	33/40	5,8/5,5

*Примечание. Числитель – низкотемпературная, знаменатель – высоко-температурная серия*

Основная масса зерен после размола имеет размеры менее 0,4 мкм.

Следует отметить, что измельчение блоков мозаики и деформация кристаллической решетки протекают более интенсивно в высокотемпературном *WC*, в результате чего порошки *WC*, полученные по высокотемпературной технологии, после размола приобретают более дефектную структуру: при одинаковом размере блоков искажения в решетке больше, чем в низко-температурном *WC*.

При спекании сплавов ширина линии  $(11\bar{2}2)$  *WC*-фазы уменьшается, что свидетельствует о росте совершенства кристаллической структуры этой фазы при воздействии температуры, причем значительное сужение заметно уже при предварительном низкотемпературном спекании. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в высокотемпературных сплавах, в результате чего резкое различие в дефектности структуры порошков *WC*, наблюдаемое после размола, значительно уменьшается. Однако, если на стадии предварительного спекания различие в структуре *WC*-фазы в сплавах, изготовленных по разным вариантам, еще сохраняется, то в результате окончательного спекания оно практически нивелируется. При этом ширина линий *WC*-фазы в «низкотемпературном» сплаве становится близкой к ширине линий порошка *WC* до размола.

По данным гармонического анализа, размеры блоков и микродеформации решетки в низкотемпературном порошке  $WC$  и в  $WC$ -фазе в сплаве, изготовленном по низкотемпературной технологии, имеют близкие значения.

Таким образом, особенности кристаллического строения промежуточных фаз, формирующиеся на каждой стадии технологического процесса, оказывают влияние на поведение порошков на последующих стадиях. Различия в дефектности структуры порошков после размола обуславливают, по-видимому, разный характер процесса спекания и особенности формирования микроструктуры сплавов и, соответственно, различие в их свойствах. В частности, отмечено влияние предыстории изготовления спеченных сплавов  $WC-Co$  на их микроструктуру – распределение зерен по размеру и стереологические характеристики [85]. Высокотемпературная карбидизация может также способствовать образованию сегрегаций примесей в приграничных зонах. Повышение температуры карбидизации вольфрама способствует образованию сегрегаций кобальта в приграничных прослойках [86]. Это нашло отражение в особенностях высокотемпературной деформации (в пластичной области) и более интенсивном температурном изменении упругих характеристик. Образование сегрегаций кобальта по границам карбидных зерен происходит интенсивнее при повышении температуры спекания.

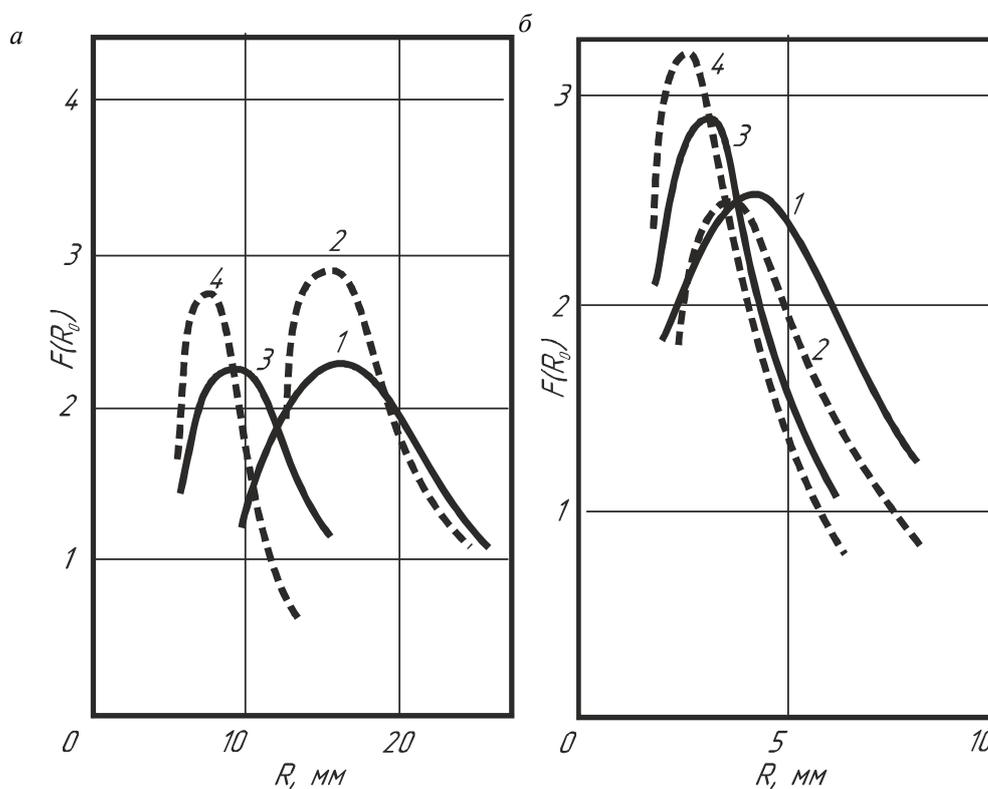


Рис. 12.7. Кривые распределения микропор по размерам в порошках:  
 а –  $WO_3$  и  $WO_2$ : 1 –  $WO_3$  исходный; 2 –  $WO_3$  прокаленный; 3 –  $WO$ , низкотемпературный;  
 4 –  $WO_2$  высокотемпературный; б –  $W$  и  $WC$ : 1 и 2 –  $W$  низко- и высокотемпературный;  
 3 и 4 –  $WC$  низко- и высокотемпературный

Дополнительным фактором, который может оказывать влияние на процесс спекания и на свойства сплавов, является субмикropористость. Исследования [86], проведенные методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей, показали, что порошки  $WO_3$ ,  $WO_2$ ,  $W$  и  $WC$ , полученные по высокотемпературной технологии, имеют более низкий объем пор и меньшие размеры микропор, чем низкотемпературные по-

рошки (рис. 12.7). Наблюдалась также меньшая дисперсия пор. Кроме того, высокотемпературные порошки отличались меньшим углом разориентации областей когерентного рассеяния. Результаты исследования сплавов свидетельствуют о наличии прямой корреляции характеристик субмикроструктуры в порошках и в карбидной фазе после спекания.

Влияние различных способов изготовления порошков карбида вольфрама на их структуру и свойства изучали в работах [84, 87]. Карбид вольфрама получали по четырем вариантам: карбидизацией в твердом состоянии шихты W + C; карбидизацией вольфрама в присутствии небольших количеств кобальта; перекристаллизацией карбида вольфрама в присутствии кобальта; кристаллизацией карбида вольфрама из жидкого расплава кобальта. Наиболее дефектной структурой отличается карбид вольфрама, полученный карбидизацией вольфрама в твердом состоянии ( $B = 17,5 \cdot 10^{-3}$  рад). Это связано с тем, что карбидизация вольфрама в отсутствие жидкофазного компонента ведет к возникновению различных несовершенств кристаллического строения, снятие которых не успевает закончиться в рамках проводимого режима получения карбида. Поэтому для получения этим способом карбида вольфрама с более совершенной кристаллической решеткой требуется более высокая температура и длительность процесса. Наличие жидкой фазы в реакционном пространстве обеспечивает диффузию компонентов при образовании WC и приводит к получению более совершенных с точки зрения кристаллического строения порошков карбида вольфрама ( $B \approx 14 \cdot 10^{-3}$  рад).

Изменение ширины рентгеновских линий порошков WC в процессе размола и спекания подчиняется общим закономерностям и согласуется с результатами [85]: размол порошка при изготовлении смесей приводит к уширению линий вследствие деформации частиц, последующее спекание прессовок снижает искажения решетки и приводит к нивелированию разницы в дефектности решетки карбидной фазы (рис. 12.8).

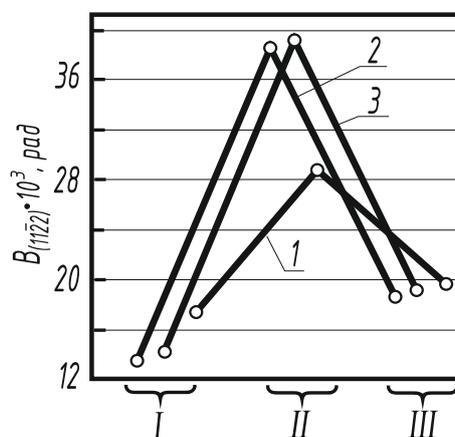


Рис. 12.8. Изменение ширины рентгеновской линии  $B_{(11\bar{2}2)}$  WC в процессе изготовления сплавов из исходных порошков WC разного происхождения:  
 I – WC исходный; II – WC размолотый; III – WC-фаза в сплаве;  
 1 – W + C; 2 – W + C + 0,5 % (по массе) Co; 3 – WC + 8 % (по массе) Co

При этом ширина линий карбидной фазы сплава практически не возвращается в исходное состояние, что наиболее четко наблюдается у сплавов, изготовленных из порошков WC с относительно более совершенной кристаллической структурой. Очевидно, термообработка (спекание) молотого в процессе изготовления смеси порошка карбида вольфрама ни по длительности, ни по температурным условиям недостаточна для полного снятия искажений решетки и возврата ширины рентгеновских линий.

Дополнительный эксперимент по термообработке образцов спеченного сплава ВК8 при 2200 °С в течение 1ч показал, что только такая высоко-температурная обработка эффективна для снятия искажений кристаллической решетки в WC-фазе. Таким образом, обычным спеканием по режимам, принятым в производстве, нельзя получить сплавы с карбидной фазой совершенной структуры. Получение мелкодисперсных порошков карбида вольфрама из вольфрамового ангидрида с добавлением  $\text{Co}_3\text{O}_4$  позволяет значительно снизить температуру карбидизации по сравнению с обычной технологией [87]. Это происходит вследствие появления сложных карбидов  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ ,  $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$  и  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  в качестве промежуточных фаз, так как они образуются при более низких температурах, чем  $\text{W}_2\text{C}$  из вольфрама и углерода и превращение  $\text{W}_2\text{C}$  в WC.

Результаты рентгеноструктурного анализа позволили установить зависимость степени протекания этого процесса от содержания  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и температуры (рис. 12.9). Пояснения к рис. 12.9 представлены в табл. 12.2.

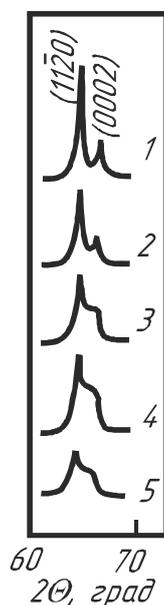


Рис. 12.9. Зависимость дифракционных линий  $(11\bar{2}0)$  и  $(0002)$  WC от содержания  $\text{Co}_3\text{O}_4$  в смеси и температуры карбидизации

Таблица 12.2

Зависимость дифракционных линий

	1	2	3	4	5
$t_{\text{карб}}^{\circ}\text{C}$	900	900	900	950	1000
Содержание					
$\text{Co}_3\text{O}_4, \%$	6,3	3,2	1,6	0,7	0,4
$d, \text{мкм.}$	0,86	0,8	0,69	0,6	0,5

В последние годы для получения тонкодисперсных порошков вольфрама и карбида вольфрама используют методы осаждения из газовой фазы. Получаемые этими методами порошки отличаются большой дефектностью структуры. Такие порошки имеют размеры кристаллитов от 36 до 66 нм, микроискажения решетки  $0,9-1 \cdot 10^3$  и концентрацию дефектов упаковки  $0,5-1,7 \cdot 10^3$ , в зависимости от температуры процесса и среды, в которой проводили осаждение.

Таким образом, применение рентгеноструктурного анализа к исследованию материалов твердосплавного производства на разных стадиях технологического процесса позволяет установить зависимость структуры порошков от технологических параметров и выбрать оптимальные режимы их изготовления.

### 12.1.2. Некоторые вопросы кристаллохимии соединений вольфрама

Особенности кристаллической структуры оксидов вольфрама и фазовые переходы при их восстановлении

Восстановление триоксида вольфрама – многоступенчатый процесс, характеризующийся наличием большого числа фазовых переходов (рис. 12.10) [88].

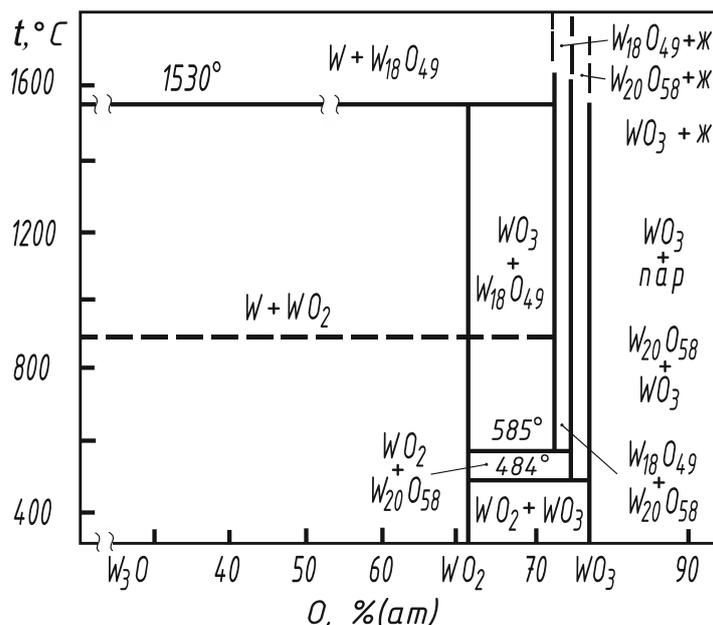


Рис. 12.10. Диаграмма состояния системы W-O

Состав оксида, образующегося при восстановлении, а также его структура, морфология и дисперсность определяются условиями процесса восстановления: температурой, скоростью и средой восстановления, наличием примесей в продукте и др.

В зависимости от температуры процесс восстановления WO<sub>3</sub> может происходить различными путями:

- при 500–575 °C WO<sub>3</sub> → WO<sub>2,9</sub> → β W → W;
- при ~ 575–900 °C WO<sub>3</sub> → WO<sub>2,9</sub> → WO<sub>2</sub> → W;
- при > 775 °C WO<sub>3</sub> → WO<sub>2,9</sub> → WO<sub>2,72</sub> → WO<sub>2</sub> → W.

Изучение кристаллохимии оксидов вольфрама позволило установить закономерности перестройки их структуры при переходе от высших к низшим. При этом показано, что в кристаллической решетке всех оксидов сохраняется постоянный структурный мотив – искажение октаэдра WO<sub>6</sub>.

Все модификации триоксида вольфрама имеют тип решетки слабо искаженного ReO<sub>3</sub> – трехмерный каркас связанных по вершинам октаэдров WO<sub>6</sub>. Согласно представлениям Магнели атом вольфрама окружен октаэдром из 6 ионов O<sup>2-</sup>, каждый из которых принадлежит двум соседним октаэдрам, т. е. образующиеся полиэдры связаны через углы. На рис. 12.11 представлены структуры таких октаэдров и межатомные расстояния в них для моноклинной модификации WO<sub>3</sub>, определенные на основании рент-

генографических и нейтрографических исследований [89]. Характерно, что удлиненные и укороченные связи W – O в октаэдрах находятся в трансположении.

В высокотемпературной (тетрагональной) модификации WO<sub>3</sub> атомы смещены из центров кислородных октаэдров вдоль оси *c* кристалла, что приводит к укорочению одной из шести связей W – O и удлинению ей противоположной.

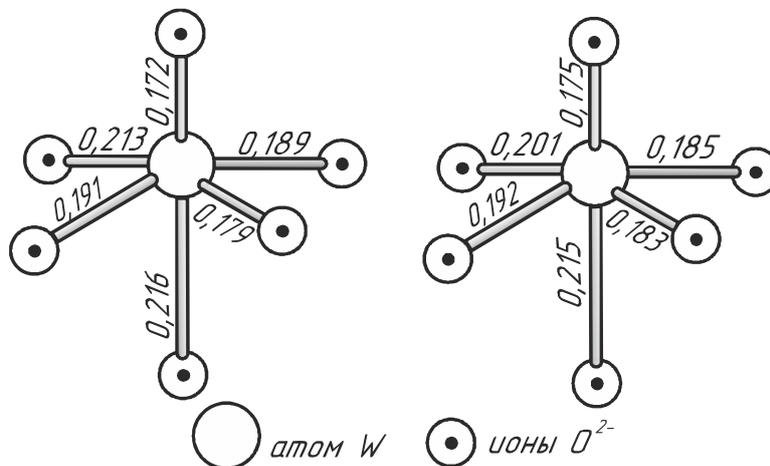


Рис. 12.11. Структура двух независимых октаэдров в моноклинной модификации WO<sub>3</sub> (цифры – межатомные расстояния в нанометрах)

В оксидах состава W<sub>n</sub>O<sub>3n-2</sub> (W<sub>20</sub>O<sub>58</sub>, W<sub>24</sub>O<sub>70</sub>, W<sub>40</sub>O<sub>118</sub>), в отличие от WO<sub>3</sub>, области со структурой типа ReO<sub>3</sub> образуют слои, протяженные в двух измерениях и ограниченные в третьем толщиной в несколько октаэдров. Соседние слои (пластины) соприкасаются друг с другом через граничные области, в которых октаэдры связаны через ребра, а не через углы, как в WO<sub>3</sub>. В такой структуре узлы металла в одном блоке играют роль междоузлий по отношению к соседним блокам и, таким образом, в соприкасающихся участках блоков содержится больше атомов металла, чем в оксидах состава WO<sub>3</sub>. В совершенных кристаллах WO<sub>2,9</sub> граничные области образуют параллельные, регулярно расположенные стенки, которые Магнели рассматривает как периодические дислокации, а такая структура получила название «структура сдвига». Она возникает в результате того, что при восстановлении WO<sub>3</sub> часть атомов кислорода покидает определенные положения и в оставшейся решетке может произойти сдвиг по анионным вакансиям (рис. 12.12). В начальной стадии восстановления образуется промежуточная фаза, отличающаяся неупорядоченной структурой границ и их хаотическим распределением, т. е. образующийся оксид на этой стадии восстановления имеет дефектную структуру. Предполагается, что эта фаза по составу находится между WO<sub>3</sub> и WO<sub>2,9</sub>. Совершенная структура образуется при дальнейшем восстановлении и имеет место, по-видимому, при стехиометрическом составе W<sub>20</sub>O<sub>58</sub>. Магнели отмечает, что оксиды W<sub>20</sub>O<sub>58</sub>, W<sub>24</sub>O<sub>70</sub> и W<sub>40</sub>O<sub>118</sub>, представляющие собой гомологический ряд W<sub>n</sub>O<sub>3n-2</sub> и являющиеся аналогичными по типу сдвига, имеют заметные структурные различия, заключающиеся в разной, степени и способе деформации металлкислородных октаэдров.

Следует отметить, что в этих сложных структурах могут возникать, кроме того, обычные точечные дефекты – избыточные атомы или вакансии. На существование точечных дефектов, по мнению Креймера, указывает то, что восстановление WO<sub>3</sub> сопровождается изменением цвета образца от желтого до зеленого, хотя по данным рентгенофазового анализа состав и кристаллическая структура при этом не меняются.

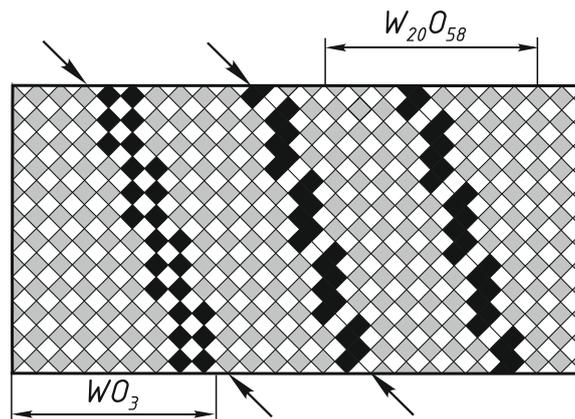


Рис. 12.12. Модель сдвигового механизма превращения  $WO_3 \rightarrow W_{20}O_{58}$

Оксид  $WO_{2,72}$  имеет довольно сложную структуру, относящуюся к семейству полигонно-сетчатых [89]. Характерная особенность строения этого оксида – наличие наряду с октаэдрами семикоординатных вольфрам-кислородных полиэдров, имеющих форму искаженных пен тагональных бипирамид (рис. 12.13). Каждая бипирамида сочленяется по ребрам своей экваториальной плоскости с пятью октаэдрами, образуя так называемые «звезды» (рис. 12.13, а). В структуре  $WO_{2,72}$  происходит объединение двух «звезд» через общее ребро октаэдров (рис. 12.13, б), в которых атомы металла сближены до расстояния  $\sim 0,26$  нм, т. е., образуются связи металл – металл, либо через вершины октаэдров (рис. 12.13, в). Другая особенность структуры  $WO_{2,72}$  – наличие петель сложной многоугольной формы, не заполненных атомами металла и образующихся вследствие сложности мотива расположения полиэдров. Так как сетки накладываются одна на другую трансляционно, такие петли образуют каналы, проходящие через всю структуру.

Оксид  $WO_2$  имеет деформированную структуру типа рутила [89], структурный мотив которого характеризуется присутствием, октаэдров, общими ребрами и объединенными в каркас общими вершинами. Атомы вольфрама смещены из центра октаэдров навстречу друг другу, в результате чего в цепи чередуются укороченные и удлиненные расстояния W – W (0,249 и 0,308 нм), вследствие чего длины связей W – O становятся неравноценными. Такое попарное сближение атомов вольфрама – свидетельство непосредственного электронного взаимодействия между атомами металла, т. е. образования связей металл – металл.

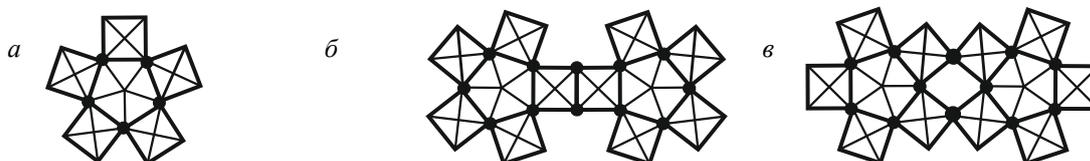


Рис. 12.13. Мотивы полигонно-сетчатой структуры оксида  $WO_{2,72}$

Знания особенностей кристаллохимии оксидов вольфрама необходимы для правильного понимания природы фаз постоянного и переменного состава в системе W – O и объяснения характера фазовых переходов при восстановлении оксидов вольфрама.

#### **Кристаллохимический аспект процесса карбидизации вольфрама**

Карбидизация вольфрама происходит путем реактивной диффузии углерода в решетку вольфрама по определенным кристаллографическим направлениям путем последовательного образования  $W_2C$  и WC.

На рис. 12.14 представлена схема последовательной перестройки кристаллической решетки вольфрама в решетку WC [90]. Схема перестройки рассматривается на одной из граней ромбододекаэдра {110}. Как видно из рис. 12.14, на первом этапе карбидизации внедрение атомов углерода происходит между сетками {110}, при этом смежные межплоскостные промежутки остаются свободными, в результате чего образуется гексагональная структура W<sub>2</sub>C.

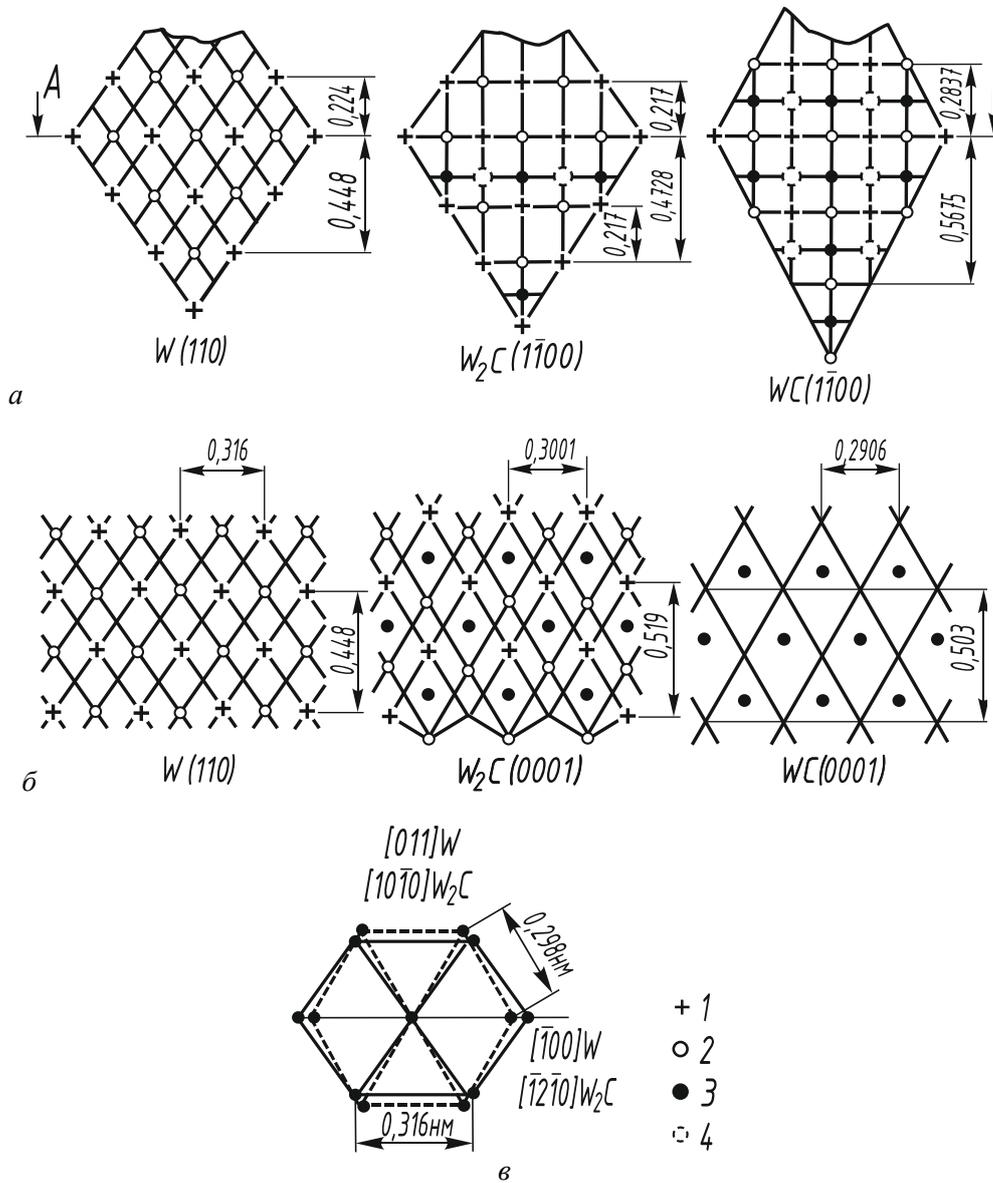


Рис. 12.14. Схема последовательной перестройки кристаллической структуры вольфрама в структуру WC:  
 а – проекция сеток на грань ромбо-додикаэдра;  
 б – то же на плоскость, перпендикулярную грани ромбододекаэдра, проходящую через малую диагональ ромба;  
 в – кристаллографическое соответствие между структурами W и W<sub>2</sub>C;  
 1 и 2 – атомы W первой и второй сетки; 3 и 4 – атомы C первой и второй сетки

Диффузия углерода вдоль сеток {110} происходит по всем возможным для данной грани направлениям (110) и обусловлена тем, что сетки {110} имеют наивысшую

ретикулярную плотность, наиболее сильные связи внутри сетки и, соответственно, наибольшее межплоскостное расстояние.

При внедрении атомов углерода атомы смежных сеток вольфрама смещаются, обеспечивая октаэдрическую координацию атомов углерода. Расстояние между сетками вольфрама увеличивается на 5 %. Сетки вольфрама (110), параллельные ромбической грани, образуют сетки  $(1\bar{1}00) W_2C$ , а сетки (110), расположенные перпендикулярно грани – базисные сетки (0001).

По данным Окуяма при карбидизации вольфрама до  $W_2C$  между структурами этих фаз существует структурное соответствие:  $\{110\} W \parallel (0001) W_2C$  и  $[112] W \parallel [1010] W_2C$  (рис. 12.14, в).

На втором этапе карбидизации ( $W_2C \rightarrow WC$ ) диффундирующие атомы углерода занимают вакантные позиции между второй парой смежных сеток металла. Атомы вольфрама смещаются, обеспечивая простую гексагональную упаковку и координацию в виде треугольной призмы. Увеличение площади ячейки в плоскости базиса  $WC$  составляет 2,2 % относительно площади ячейки вольфрама, а межплоскостное расстояние изменяется на 27 %.

### 12.1.3. Влияние условий изготовления на структуру и свойства порошков кобальта

Из практики производства твердых сплавов известно, что их свойства определяются не только состоянием карбидной фазы, но также свойствами связующего металла и характером взаимодействия между ними. Однако данные о влиянии характеристик исходных порошков на формирование тонкой структуры и свойства кобальтового связующего в литературе практически отсутствуют. Возможно, что это связано с предположениями некоторых исследователей о том, что начальные параметры порошков кобальта не имеют такого значения, как порошков карбидов, так как они значительно изменяются в результате плавления при жидкофазном спекании.

Вместе с тем, ряд работ, рассматривающих свойства кобальта в различных аспектах (например, исследование влияния фазового состава исходных порошков кобальта на процессы размола смесей  $WC-Co$ , повышения пластичности поликристаллического кобальта под влиянием термообработки и процессов рекристаллизации, новые данные о механизме деформации кобальтовой фазы в твердых сплавах и др.) [74, 91, 92, 93, 94, 95] свидетельствуют об интересе исследователей к этой проблеме. Однако вопрос о критериях выбора оптимальных порошков кобальта для изготовления твердых сплавов пока не решен.

Наиболее близко к решению этого вопроса подошли авторы [91], которые провели детальное изучение различных характеристик порошка кобальта (морфологии частиц, удельной поверхности, размера кристаллитов, соотношения  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций) в зависимости от условий их получения. Они пришли к выводу, что при изготовлении порошков кобальта с заданными характеристиками наиболее важную роль играют размер и форма частиц оксалата кобальта, являющегося исходным сырьем, и условия его разложения.

В работе [91] выполнены исследования по изучению влияния температуры и времени разложения оксалата на свойства металлических порошков. На рис. 12.15 представлены результаты рентгеновских исследований полуширины линии (200)  $\beta-Co$  и количества  $\alpha$ -модификации в порошках кобальта, полученных при различных условиях разложения оксалата. В табл. 12.3 приведены экспериментальные результаты – общая полуширина рентгеновских линий  $V_{(200)}$  и соответствующие значения после исправления на инструментальное уширение  $\beta$ .

Результаты исследования [91] показали, что решающим фактором в формировании частиц металлического порошка с заданными свойствами является температура разложения оксалата кобальта. При низких температурах оксалат распадается медленно, подвижность металлических атомов недостаточна для того, чтобы они могли образовать когерентную металлическую решетку. В результате такого распада образуются частицы металла, близко воспроизводящие форму частиц оксалата. Полученный материал характеризуется высокой пористостью и большой удельной поверхностью. При увеличении температуры разложения до 495–505 °С наблюдается заметное изменение морфологии частиц; подвижность атомов превышает некоторый предел и металлические частицы образуют когерентную решетку, а их форма приближается к сферической. При этом вследствие высокой дисперсности частицы соединяются в местах контакта, образуя непрерывные цепи. Дальнейшее повышение температуры не изменяет морфологии порошка, но приводит к возникновению более прочных контактов между частицами, которые не разрушаются при размоле. С ростом температуры увеличивается скорость самодиффузии атомов кобальта, что, как видно из рентгеновских данных, приводит к понижению дефектности кристаллической структуры порошка кобальта. При температурах распада выше 650 °С скорость самодиффузии атомов кобальта в частицах возрастает до такого уровня, что они полностью рекристаллизуются.

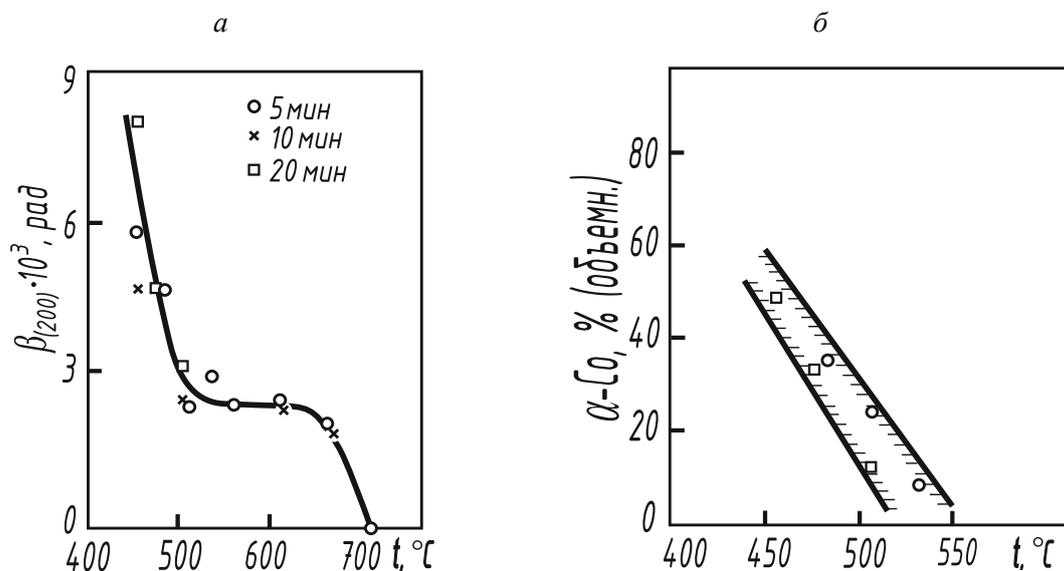


Рис. 12.15. Зависимость полуширины рентгеновской линии (200)  $\beta$ -Co (а) и количества  $\alpha$ -фазы (б) от температуры и времени разложения оксалата кобальта

Таблица 12.3

Зависимость уширения рентгеновских линий порошков кобальта от условий разложения оксалата кобальта

Условия разложения оксалата		Уширение линии, рад.		Условия разложения оксалата		Уширение линии, рад.	
$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{мин}$	$V \cdot 10^3$	$\beta \cdot 10^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{мин}$	$V \cdot 10^3$	$\beta \cdot 10^3$
456	5	7,3	5,6	556	2	4,8	1,9
456	10	7,3	5,6	556	5	5,2	2,3
				556	10	5,2	2,3

Условия разложения оксалата		Уширение линии, рад.		Условия разложения оксалата		Уширение линии, рад.	
481	5	6,6	4,4	606	2	5,2	2,3
				606	5	5,2	2,3
				606	10	5,2	2,3
506	2	5,9	3,3	656	5	4,8	1,9
	5	5,2	2,3	706	5	4,0	0
	10	5,2	2,3	756	5	4,0	0
531	5	4,8	2,0				
531	30	5,6	3,0				

Результаты исследования изменения фазового состава порошков кобальта в зависимости от температуры получения свидетельствуют о том; что в порошках, полученных при температурах значительно превышающих температуру  $\alpha - \beta$ -перехода (471 °С), содержание г.п.у.-фазы очень высоко. При этих температурах при распаде оксалата сначала формируется  $\alpha$ -фаза, а затем постепенно в зависимости от температуры и времени распада она медленно превращается в  $\beta$ -фазу. Следует отметить, что последующая стабилизация металлических порошков, полученных при низких температурах (<500 °С), вызывает резкое уменьшение содержания  $\alpha$ -фазы, например, при температуре стабилизации 530 °С.

Исследования влияния режимов восстановления оксидов кобальта на свойства порошков кобальта показали, что соотношение  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций и дефектность кристаллической структуры кобальта очень чувствительны к изменениям таких технологических параметров их получения, как температура восстановления, скорость потока водорода и загрузка в лодочке. Эти данные свидетельствуют о наличии корреляций, с одной стороны, между характеристиками исходных порошков и промежуточных материалов и с другой стороны, между свойствами спеченных твердых сплавов. Эта зависимость носит сложный характер, так как технология изготовления твердых сплавов – многостадийный процесс и включает большое количество факторов, специфически действующих на материал на каждой стадии. В конечном счете, процесс спекания твердых сплавов и, следовательно, их свойства определяются реакционной способностью порошков, зависящей от их химической и термической предыстории.

Чтобы понять общие закономерности формирования структуры и свойств твердых сплавов, необходимо рассмотреть характерные особенности кристаллического строения их компонентов и роль дефектов кристаллической структуры на разных стадиях технологического процесса.

## 12.2. Дефекты кристаллической решетки и пластическая деформация фазовых составляющих твердых сплавов

Основными компонентами, принимающими непосредственное участие в формировании структуры твердых сплавов и определяющими их физико-механические свойства, являются: карбид вольфрама и кобальт в случае вольфрамкобальтовых сплавов и карбид вольфрама, карбид титана (или твердые растворы на его основе) и кобальт в случае титановольфрамных сплавов. Особенности их структуры, склонность к образованию специальных дефектов и способность к пластической деформации – это те факторы, которые определяют их поведение в процессе изготовления и эксплуатации сплавов.

### 12.2.1. Кристаллическая структура и особенности пластической деформации карбида вольфрама

Монокарбид вольфрама  $\alpha$ -WC имеет простую гексагональную структуру и относится к пространственной группе  $D_{3h} - P6m2$  (рис. 12.16). Атомы вольфрама расположены по узлам простой гексагональной решетки и занимают положение  $0, 0, 0$ ; атомы углерода расположены в пустотах между атомами вольфрама и могут занимать положение  $1/3, 2/3, 1/2$  или  $2/3, 1/3, 1/2$ . В отличие от других гексагональных структур в карбиде вольфрама отношение  $c/a < 1$ . Каждый атом углерода имеет 6 соседей – атомов вольфрама, расположенных по углам тригональной призмы. Между атомами вольфрама и углерода существуют сильно направленные связи. Призматические плоскости  $(10\bar{1}0)$  являются полярными, что обусловлено различием в расстояниях (0,0839 и 0,1687 нм, соответственно) между плоскостями, занятыми атомами вольфрама и углерода в направлении  $[10\bar{1}0]$ . Поэтому правильнее говорить о существовании в структуре карбида вольфрама двух систем из трех эквивалентных плоскостей  $(10\bar{1}0)$ , чем о шести эквивалентных плоскостях  $(10\bar{1}0)$ .

В отличие от металлов с г.п.у.-структурой, в которой плотную упаковку имеют базисные плоскости, призматические типа  $\{10\bar{1}0\}$  и  $\{11\bar{2}0\}$  и даже пирамидальные, в решетке карбида вольфрама имеется только два типа плоскостей с плотной упаковкой: базисная  $(0001)$  и призматические  $\{10\bar{1}0\}$ . Наиболее высокая плотность упаковки наблюдается по базисной плоскости, вследствие чего карбид вольфрама ближе к слоистым структурам. Наличие указанных выше особенностей кристаллического строения карбида вольфрама, по-видимому, определяет специфику поведения при формировании структуры в процессе спекания, при деформации и разрушении. Карбид вольфрама характеризуется высокими значениями модуля упругости, твердости и прочности, анизотропией свойств, пластичностью и полной смачиваемостью кобальтом и эвтектикой Co + WC.

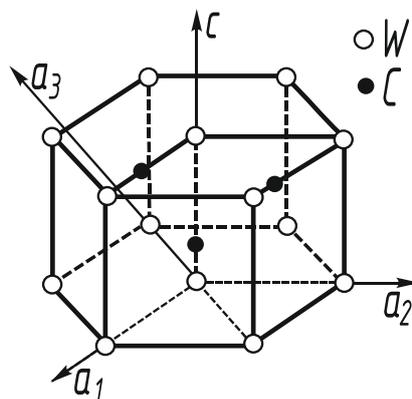


Рис. 12.16. Структура карбида вольфрама

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о способности карбида вольфрама к пластической деформации [96, 97, 98, 99, 100, 101, 102]. Наблюдение следов скольжения около индентора при определении твердости монокристаллов, образование полос скольжения и сеток дислокаций в зернах карбида вольфрама в сплавах WC-Co при испытаниях сжатием и при изгибе, появление линий скольжения волнообразного вида при трении сплавов о горную породу – все эти факторы свидетельствуют о пластичности карбида вольфрама. На основа-

нии данных электронно-микроскопических и рентгеноструктурных исследований были определены плоскости и направления скольжения.

В отличие от кристаллов с г.п.у. – структурой скольжение в карбиде вольфрама происходит не по базисной плоскости, а преимущественно по призматическим плоскостям  $\{1\bar{1}00\}$ , что связано с направленностью ковалентных связей и с тем фактом, что при единичном скольжении по плоскости  $\{1\bar{1}00\}$  разрушаются только две ковалентные связи W-C на ячейку, а при скольжении по плоскости базиса должны разрушаться три связи [97]. Возможно, это явление связано с аномальным значением  $c/a = 0,976$ , которое может свидетельствовать о существовании более сильных связей между атомами в плоскостях (0001), чем в плоскостях (10 $\bar{1}$ 0). Кроме того, плоскости скольжения  $\{1\bar{1}00\}$  содержат оба направления плотной упаковки, в то время как базисная плоскость – только одно направление  $[11\bar{2}0]$ . Однако высказано предположение [97], что скольжение по плоскости  $\{1\bar{1}00\}$  будет преобладать при низких температурах, в то время как скольжение по базисной плоскости возможно при повышенных температурах.

Это предположение экспериментально подтверждено [96]: в результате изучения износа твердых сплавов при трении о горную породу в зернах карбида вольфрама обнаружены линии скольжения волнообразного вида, появление которых возможно при одновременном скольжении по двум системам:  $[1\bar{1}20]\{10\bar{1}0\}$  и  $[11\bar{2}0]\{0001\}$ . По поводу направления скольжения имеются различные точки зрения.

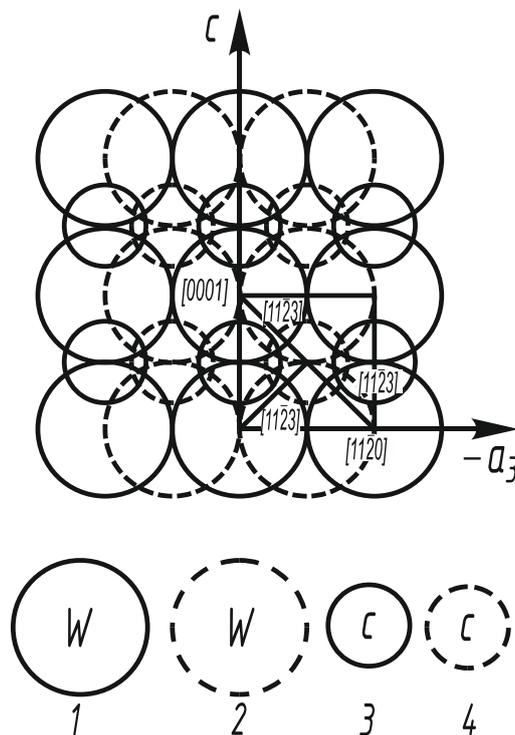


Рис. 12.17. Проекция четырех слоев атомов в структуре WC на плоскость  $(1\bar{1}00)$ :  
 1 – атомы W в плоскости рисунка;  
 2 – атомы W выше плоскости рисунка на  $\frac{c}{2}$ ;  
 3 – атомы C выше плоскости рисунка на  $\frac{c}{2}$ ; 4 – атомы C выше плоскости рисунка на  $\frac{c}{4}$

По поводу направления скольжения имеются различные точки зрения. Френч и Томас, Арндт, Такахаси и Фрейзе считают, что скольжение происходит по направле-

ниям  $[0001]$  и  $1/3 [11\bar{2}0]$ . При этом возможна диссоциация дислокаций на частичные рис. 12.17. По данным [97] более энергетически выгодной является реакция:  $1/3 [11\bar{2}0] \rightarrow 1/6 [11\bar{2}3] + 1/6 [11\bar{2}3]$ .

Различие в твердости, наблюдаемое в плоскостях  $(0001)$  и  $(1\bar{1}00)$ , объясняется легкостью передвижения дислокации с вектором Бюргера  $1/3 [11\bar{2}0]$  вследствие ее разделения на частичные дислокации  $1/6 [11\bar{2}3]$ . В работах [98, 99, 100] установлено скольжение дислокаций с вектором Бюргера  $b = 1/3 [11\bar{2}3]$ . Показано, что сверхдислокации  $b = 1/6 [11\bar{2}3]$  диссоциируют на две частичные дислокации с векторами  $b_1 = 1/6 [20\bar{2}3]$  и  $b_2 = 1/6 [02\bar{2}3]$  с плоскостями скольжения, принадлежащими системе  $\{11\bar{2}\bar{2}\}$ .

Проведено исследование особенностей дислокационных сеток в зернах карбида вольфрама в спеченных и деформированных твердых сплавах WC – 15 % Co. Наблюдаемая сетка – результат взаимодействия двух семейств дислокаций по реакции:  $[0001] + 1/3 [11\bar{2}0] \rightarrow 1/3 [11\bar{2}3]$ . При этом часть дислокаций с  $b = 1/3 [11\bar{2}3]$  немедленно диссоциирует на две частичные дислокации:  $1/3 [11\bar{2}3] \rightarrow 1/6 [20\bar{2}3] + 1/6 [02\bar{2}3]$ ; реакция энергетически выгодна. Плоскостью скольжения частичных дислокаций является  $\{11\bar{2}\bar{2}\}$  (рис. 12.18).

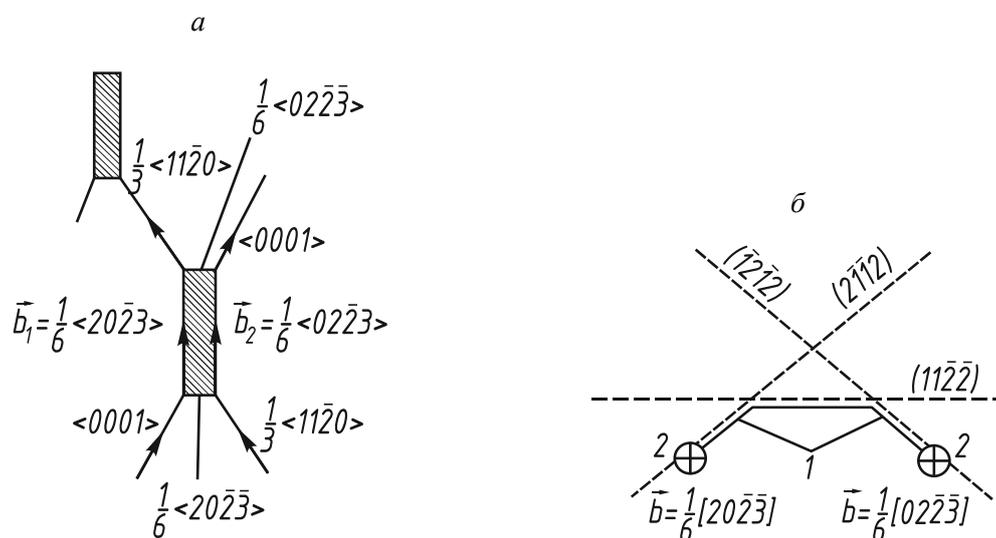


Рис. 12.18. Дислокационная структура WC: а – сетка дислокаций, образованная при взаимодействии их с векторами Бюргера  $[0001]$  и  $1/3 [11\bar{2}0]$ ; б – плоскости скольжения растянутой сверхдислокации с  $b = 1/3 [11\bar{2}3]$ :  
1 – дефект упаковки; 2 – частичные дислокации

В работе [96] дано описание двойников и дефектов упаковки, образующихся в карбиде вольфрама при спекании (рис. 12.19).

Плоскость двойникования –  $(0001)$ , ось двойникования  $[0001]$ . Нарушение нормальной последовательности чередования гексагональных слоев  $(AaAaAa\dots)$  в структуре WC, вызванное двойникованием, приводит к возникновению дефектов упаковки типа  $AaAaA\beta A\beta$  (дефект 1Δ) и дефекта упаковки, получающегося при соприкосновении двух дефектов 1Δ, типа  $AaAaA\beta AaAa$  (дефект 2Δ). Описанные особенности кристаллической структуры карбида вольфрама и характер ее перестройки при пластической деформации свидетельствуют о возможности возникновения в карбиде вольфрама политипных структур, описанных в [104].

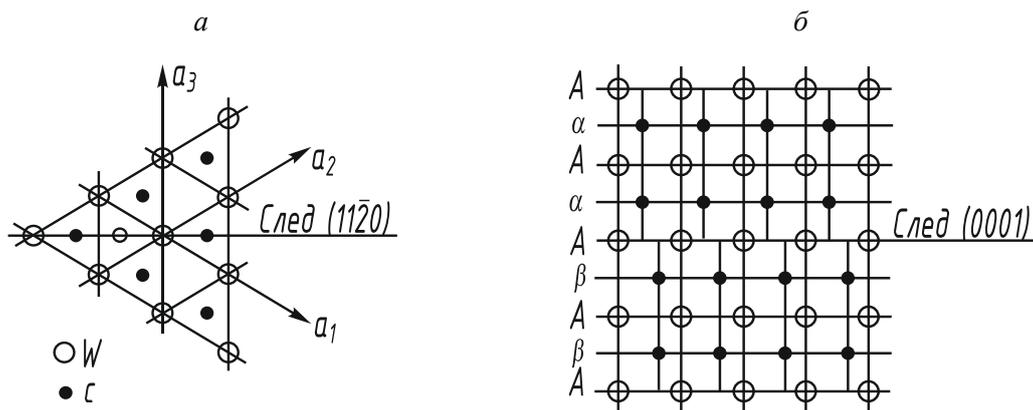


Рис. 12.19. Проекция дефекта упаковки на плоскости (0001) (а) и  $(11\bar{2}0)$  (б)

Таким образом, несмотря на некоторые различия в данных относительно направлений скольжения, имеющего место при деформации карбида вольфрама, все авторы однозначно свидетельствуют о заметной микропластичности WC уже при комнатной температуре, что определяет его поведение при деформации в процессе размола, при обработке поверхности и во время эксплуатации твердосплавных изделий.

### 12.2.2. Особенности строения карбида титана и твердых растворов на его основе

Монокарбиды переходных металлов Iva – Va групп представляют собой тугоплавкие фазы с базисной структурой типа NaCl и относятся к фазам внедрения, характеризующимся тем, что атомы металлов занимают узлы кристаллической решетки, а атомы углерода находятся в октаэдрических междуузлиях решетки металла. Структура – кубическая гранецентрированная, пространственная группа  $O_h^s - Fm\bar{3}m$ . Атомы металлов занимают положение 0, 0, 0; атомы углерода –  $1/2, 1/2, 0; 1/2, 0, 1/2; 0, 1/2, 1/2$ . Характерная особенность этих соединений – они могут существовать в широких областях гомогенности, примыкающих обычно к эквипомным составам MeC со стороны меньших содержаний углерода. Так, минимальное содержание углерода в карбиде титана при эвтектической температуре ( $\sim 1650^\circ\text{C}$ ) составляет 33 % (ат.) C. Свойства и особенности фаз внедрения достаточно полно приведены в работах [86, 87, 88].

Для карбидов переходных металлов характерна очень высокая твердость и одновременно хрупкость при низких и умеренно высоких температурах. Однако, несмотря на преимущественно хрупкое разрушение карбидов при относительно низких температурах, в ряде экспериментальных работ получены доказательства пластической деформации карбидов тугоплавких металлов с г.ц.к.-структурой. При этом установлено, что в зависимости от атомного отношения C/Me и температуры испытания пластическая деформация в карбидах переходных металлов может происходить различными путями. Так, в карбиде титана, близком по составу к стехиометрическому ( $\text{TiC}_{0,96}$ ) в условиях низких температур системой скольжения является  $\{110\}[110]$ , а в  $\text{TiC}_{0,8}$  –  $\{111\}[\bar{1}10]$ . Исследования ориентационной зависимости микротвердости монокристаллов ( $\text{TiC}_{0,96}$ ) при повышенной температуре показали переход от системы скольжения  $\{110\}[110]$  при  $25^\circ\text{C}$  к системе  $\{111\}[\bar{1}10]$  при  $610^\circ\text{C}$ . Этот переход имеет место во всех монокарбидах переходных металлов и температура перехода зависит от природы карбида: например, для TaC она соответствует температуре жидкого азота, для TiC находится в области  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ . Критическое напряжение сдвига для TiC повышается с уменьшением числа углеродных вакансий.

Особенностью фаз внедрения и, в частности твердых растворов на основе карбида титана является наличие двух подрешеток возможных положений для атомов – узлов и междоузлий, которые могут замещаться атомами разных сортов, а также содержать структурные вакансии, т. е. оставаться незанятыми. При этом концентрации атомов в подрешетках могут непрерывно изменяться в некоторых интервалах, а их чередование по узлам и междоузлиям может характеризоваться появлением упорядоченных структур. Установление порядка в расположении атомов металла и металлоида (ближнего или дальнего) должно вызывать изменение свойств твердых растворов. Поэтому рассмотрим этот вопрос более детально.

В ряде работ методами нейтронографии и электронной микроскопии, а также с помощью рентгенографии монокристаллов установлено упорядочение атомов в металлической подрешетке карбида титана. TiC в пределах области гомогенности присутствует в двух модификациях. Первая имеет структуру типа NaCl и является единственной фазой при высоких температурах (1600 °C), но сохраняется и после отжига в интервале составов > 43 % (ат.) C. Вторая реализуется в TiC при пониженных температурах при содержании < 43 % (ат.) C и представляет собой упорядоченную тригональную форму на базе структуры NaCl ( $a \approx \sqrt{2}a_{\text{NaCl}}$ ;  $c \approx 2\sqrt{3}a_{\text{NaCl}}$ ), пространственная группа R3m. Для этой упорядоченной структуры характерно последовательное чередование комплексных и малозаселенных плоскостей атомов углерода, а атомы металла смещены на ~ 0,005 нм к ближайшим комплектам углеродным плоскостям. При этом упорядоченная фаза ориентирована относительно матричной (неупорядоченной) согласно соотношению:  $(001)_{\text{уп}} \parallel (111)_{\text{неуп}}$ ,  $[100]_{\text{уп}} \parallel [101]_{\text{неуп}}$ .

Родственная по типу картина упорядоченного распределения атомов наблюдается и в других нестехиометрических карбидах металлов IVa, Va групп. При этом упорядоченная фаза в карбидах металлов IVa группы отвечает стехиометрическому составу ~  $Me_8C_5$ , а Va группы ~  $Me_5C_7$ .

В ряде монокарбидов (мононитридов), в том числе в  $TiC_x$  обнаружено наличие диффузного рассеяния, связанного с существованием ближнего порядка в размещении атомов внедрения.

В работах Я.С. Уманского, А.С. Мюллера, В.И. Фадеевой, Т.Б. Горбачевой получены экспериментальные данные, однозначно свидетельствующие о наличии ближнего порядка в расположении атомов металлов по узлам подрешетки в двойных карбидах тугоплавких металлов. В однофазных растворах карбидов, даже при составах, далеких от границы растворимости или при неограниченной растворимости, могут происходить процессы возникновения концентрационных неоднородностей с большой степенью ближнего порядка в них.

В работах [105, 106, 107, 108] детально исследованы характер и степень ближнего порядка в твердых растворах (Ti, W)C и установлены закономерности его изменения в зависимости от состава и условий получения. Металлическая подрешетка твердых растворов (Ti, W)C характеризуется наличием ближнего порядка с преимущественным соседством разноименных атомов металлов: коэффициенты ближнего порядка для первой координационной сферы  $\alpha_1$  имеют отрицательные значения. Степень ближнего упорядочения возрастает с увеличением в твердом растворе WC от 9 до 39 % (мол.) ( $\alpha_1$  изменяется от -0,05 до -0,09, соответственно). Степень ближнего порядка практически не зависит от способа карбидизации [39]. Это, по-видимому, объясняется тем, что при различных способах карбидизации (в водороде, вакууме, при перекристаллизации через жидкую фазу) температуры карбидизации и последующего спекания образцов были близки. Однако дополнительный, отжиг и характер фиксации состояния (медленное охлаждение, воздушная закалка, закалка в воду) влияют на реализующуюся степень ближнего порядка (рис. 12.20).

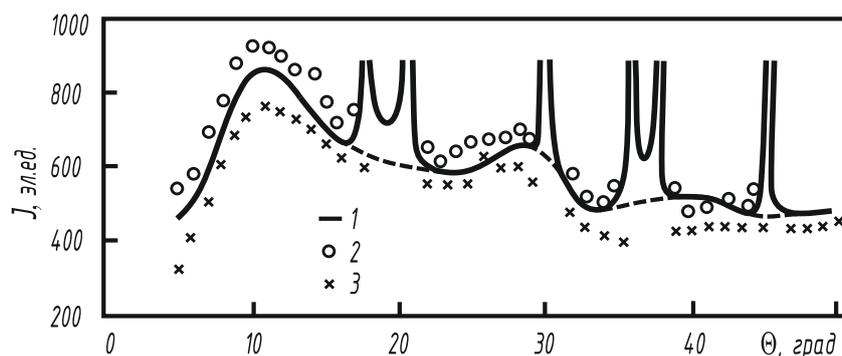


Рис. 12.20. Зависимость интенсивности диффузного рассеяния рентгеновских лучей  $J$  твердым раствором  $(Ti, W)C$  от условий отжига: 1 – исходный образец; 2 – образец, отожженный с последующим медленным охлаждением; 3 – образец, отожженный и закаленный в воду

Дополнительный отжиг образцов приводит к росту  $\alpha_1$  на 0,03, закалка снижает  $\alpha_1$  на 0,02. Следовательно, истинное значение параметров ближнего порядка, достигаемое при 2200 °С (температуре карбидизации), меньше тех, которые наблюдаются в образцах, полученных после спекания и охлаждения с печью. Вариации степени порядка, вызванные характером охлаждения образца после отжига, велики (~25–30 %). Однако и в закаленных образцах  $(Ti, W)C$  не было зафиксировано состояние с близким к хаотическому расположению атомов металла, что имеет место для  $(Hf, Zr)C$  и  $(Ta, Nb)C$ . Это указывает на большие значения энергии упорядочения в сплавах  $(Ti, W)C$  по сравнению с  $(Hf, Zr)C$  и  $(Ta, Nb)C$ . Существенное уменьшение модуляции диффузного рассеяния рентгеновских лучей наблюдали лишь на образцах  $(Ti, W)C$ , полученных методом дуговой плавки, что свидетельствует о значительно меньшей степени ближнего порядка в образцах, полученных при температурах плавления. Данные о характере локального распределения атомов в металлической подрешетке твердых растворов  $(Ti, W)C$  позволяют глубже понять некоторые особенности диаграммы состояния системы  $Ti-W-C$ . Как известно, твердые растворы  $(Ti, W)C$  обладают ограниченной растворимостью. Максимальная растворимость при 2500–2600 °С составляет 96 % (по массе). С понижением температуры растворимость вольфрама в  $TiC$  понижается, и однофазные сплавы, полученные при 2600 °С, после отжига при 1850–1900 °С претерпевают распад. Однако, как показали исследования процесса распада твердого раствора  $(Ti, W)C$ , последний очень стабилен и склонен к пересыщению. Если отжиг проводить без предварительной деформации, то распад почти не происходит из-за длительного инкубационного периода.

Результаты исследования характера расположения атомов титана и вольфрама в узлах кристаллической решетки твердых растворов  $(Ti, W)C$  показали, что обнаруженный ближний порядок в расположении этих атомов достаточно стабилен, мало меняется с изменением температуры и времени термообработки и характерен для твердых растворов различного состава. Длительные отжики образцов  $(Ti, W)C$  при 1600 и 1200 °С (без предварительной деформации) и при 1400 °С в течение 20 ч (после предварительной деформации поверхности) не изменили характер и степень ближнего порядка. Это свидетельствует о том, что миграционные процессы, влияющие на изменение ближнего порядка при охлаждении образцов, проходят заметно лишь при достаточно высоких температурах, во всяком случае выше 1600 °С.

Расчет энергии упорядочения твердых растворов  $(Ti, W)C$  разного состава показал, что при увеличении в них  $WC$  от 9 до 39 % (мол.) энергия упорядочения законо-

мерно уменьшается (от 720 до 380 К, соответственно). Уменьшение энергии упорядочения по мере приближения к эквимольному составу свидетельствует о понижении стабильности упорядоченной структуры сложного карбида (Ti, W)C при увеличении в нем количества WC. В то же время степень ближнего порядка, зависящая не только от энергии упорядочения, но и от концентрации компонентов, повышается с ростом содержания WC.

Степень ближнего порядка и энергия упорядочения, как и состав твердых растворов, определяют физические свойства сплавов, в том числе микротвердость. Рост энергии упорядочения является, по-видимому, важным фактором роста микротвердости при увеличении содержания TiC. Уменьшение числа ближайших соседей Ti–W при росте доли TiC должно вызывать понижение микротвердости. Поэтому оптимальными свойствами будут обладать твердые растворы промежуточного состава.

Таким образом, проведенные исследования позволяют предположить, что некоторые особенности твердых растворов (Ti, W)C, такие как ограниченная растворимость, высокая стабильность и склонность к пересыщению, связаны с характером локального распределения атомов в металлической подрешетке – установлением ближнего порядка с преимущественным соседством разноименных атомов и уменьшением энергии упорядочения твердых растворов при приближении к границе растворимости WC в TiC. Осуществление в структуре (Ti, W)C ближнего порядка указанного типа свидетельствует о том, что атомам титана энергетически выгоднее быть окруженными атомами вольфрама. Следовательно, в сложном карбиде (Ti, W)C роль связи между атомами разноименных металлов титана и вольфрама в общей энергии связи карбидных фаз существенна. Этот вывод согласуется с результатами работ Я.С. Умайского, в которых получены закономерности изменения электросопротивления, константы Холла и других свойств карбидных сплавов TiC–WC, TiC–NbC и ZrC–NbC в области гомогенности.

При уменьшении содержания связанного углерода в твердых растворах (Ti, W)C характер локального распределения металлических атомов, типичный для твердого раствора (Ti, W)C стехиометрического (или близкого к стехиометрическому) состава, изменяется (рис. 12.21). Особенности диффузного рассеяния рентгеновских лучей от образцов с недостатком углерода (появление второго диффузионного максимума вблизи структурных рефлексов при наличии максимума, характерного для ближнего порядка с  $\alpha < 0$ ) и расчеты коэффициентов ближнего порядка, которые приобретают положительные значения ( $\alpha_1 = 0,07$ ;  $\alpha_2 = 0,15$ ;  $\alpha_3 = 0,03$ ), дают возможность предположить о наличии в структуре двух типов ближнего порядка – с  $\alpha_1 > 0$  и  $\alpha_1 < 0$ . Это может означать, что образование сегрегаций атомов металла одного сорта происходит локально при сохранении в значительной степени структуры, типичной для твердого раствора стехиометрического состава.

Уменьшение количества углерода и, следовательно, ослабление доли связей Me–C, а также повышение количества вакансий в кристаллической решетке твердого раствора облегчает прохождение миграционных процессов, приводящих к указанной перестройке структуры. Образование сегрегаций атомов металлов является начальной стадией процесса распада твердого раствора (Ti, W)C. Тот факт, что в результате этого распада с недостатком углерода в структуре появляется вторая фаза – вольфрам (а не WC, как при распаде стехиометрических образцов), свидетельствует, по-видимому, о большей прочности связей Ti – C, чем W – C. Подобное предположение находится в хорошем соответствии с диаграммой состояния системы Ti – W – C.

Следует, однако, учитывать, что в связи с появлением в твердом растворе (Ti, W)C нестехиометрического состава вакансий возможно их упорядоченное расположение относительно атомов углерода. Элементарный расчет показывает, что вклад в общее

диффузное рассеяние рентгеновских лучей от упорядоченного расположения атомов углерода и вакансий незначителен (не более 2 %) и не может приводить к наблюдаемым модуляциям. Однако возможно возникновение дополнительных модуляций вследствие установления порядка в расположении атомов металл – углерод и металл – вакансия. Хотя анализ всех возможных вариантов взаимного расположения атомов и вакансий позволит, вероятно, уточнить параметры ближнего порядка, тем не менее полученные экспериментальные данные свидетельствуют о большой роли углерода в формировании упорядоченной структуры твердого раствора (Ti, W)C. Уменьшение содержания углерода в твердом растворе приводит, по-видимому, к изменению электронной конфигурации внешних оболочек атомов титана и вольфрама и соответственно к изменению характера их локального распределения. Аналогичные данные о роли углерода в формировании упорядоченной структуры получены для твердых растворов (Ti, W, Ta)C [108].

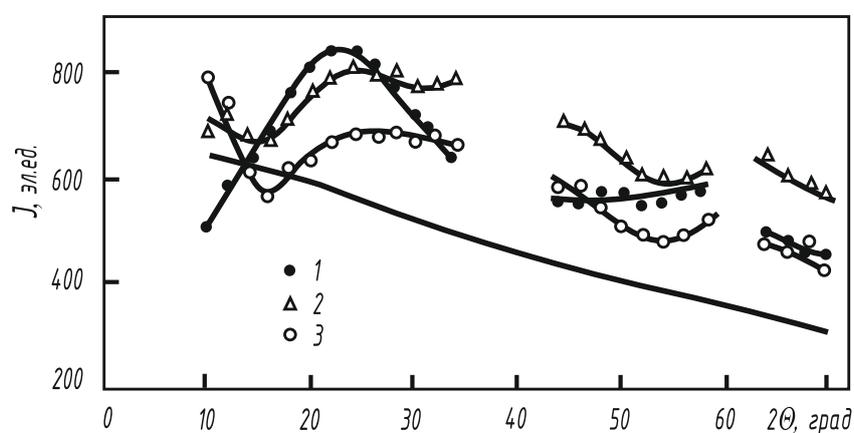


Рис. 12.21. Зависимость интенсивности диффузного рассеяния рентгеновских лучей твердым раствором (Ti, W)C от содержания связанного углерода: 1 – 94 %; 2 – 86 %; 3 – 78 %

На рис. 12.22 схематически представлены имеющиеся в литературе данные о характере ближнего порядка в двойных карбидах металлов IVa–Via групп периодической системы Д.И. Менделеева, свидетельствующие о том, что в твердых растворах переходных металлов могут устанавливаться собственно ближний порядок и ближнее расслоение.

При этом в карбидах на основе металлов одной группы обнаружено ближнее расслоение, а на основе металлов разных групп – ближний порядок (исключение составляет твердый раствор VC–WC). Следует отметить изменение знака параметра  $\alpha_1$  в сложных карбидах VC–WC, NbC–TiC, TiC–TaC по сравнению с соответствующими бинарными металлическими сплавами.

Исследование характера ближнего порядка при введении добавок карбидов металлов IV–VI групп (ZrC, HfC, Vc, NbC, TaC) в твердые растворы (Ti, W)C свидетельствуют о том, что одни добавки (TaC, HfC) вызывают понижение ближнего порядка, другие (VC) – повышение.

Таким образом, реализующаяся степень упорядочения структуры карбида титана и твердых растворов на его основе зависит от состава и температурных условий их получения и последующей обработки. Упорядочение может вызывать изменение свойств твердых растворов внедрения и поэтому его необходимо учитывать при анализе результатов различных исследований и в практике применения этих соединений.

Период	Группа элементов		
	IV	V	VI
4	22 2 10 8 2 47,90 <b>Ti</b>	23 2 11 8 2 50,942 <b>V</b>	<b>Cr</b>
5	40 2 10 18 8 2 91,22 <b>Zr</b>	41 2 12 18 8 2 92,906 <b>Nb</b>	<b>Mo</b>
6	72 2 10 32 18 8 2 178,49 <b>Hf</b>	73 2 11 32 18 8 2 180,948 <b>Ta</b>	74 2 12 32 18 8 2 183,85 <b>W</b>

Рис. 12.22. Характер ближнего порядка, реализующегося в двойных карбидах металлов IVa–VIa групп периодической системы при  $\alpha < 0$  (сплошная линия) и  $\alpha > 0$  (пунктир)

### 12.2.3. Структура кобальта и твердых растворов на его основе

Кобальт существует в двух аллотропических модификациях: высокотемпературной с г.ц.к.-структурой ( $\beta$ -Co) и низкотемпературной ( $\alpha$ -Co) с г.п.у.-структурой. Ниже в табл. 12.4. приведены основные характеристики структур  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций.

Таблица 12.4

Характеристики структур  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций

		$\alpha$ -Co	$\beta$ -Co
Пространственная группа		$R\bar{6}_3/mmc$	$Fm\bar{3}m$
Координаты атомов в ячейке		000; 1/3; 2/3; 1/4, 2/3, 1/3, 3/4	000; 1/2; 1/2, 0; 1/2, 0, 1/2; 0, 1/2, 1/2
Параметры решетки, нм:	$a$	.....0,25059	0,354
	$c$	.....0,40659	
Число атомов на элементарную ячейку		2	4
Координационное число		12	12
Слой с плотнейшей упаковкой		{0001}	{111}
Объем элементарной ячейки, нм <sup>3</sup>		0,02211	0,04436

При охлаждении ниже 400 °С кубическая модификация переходит в гексагональную по мартенситному механизму по следующей дислокационной реакции:  $a/2 [01\bar{1}] = a/6 [\bar{1}2\bar{1}] + a/6 [11\bar{2}]$ . Перестройка решетки из г.ц.к. в г.п.у. происходит путем движения частичных дислокаций Шокли с вектором Бюргерса  $a/6 [11\bar{2}]$  по каждой второй плоскости в системе параллельных плоскостей  $\{111\}$  (рис. 12.23).

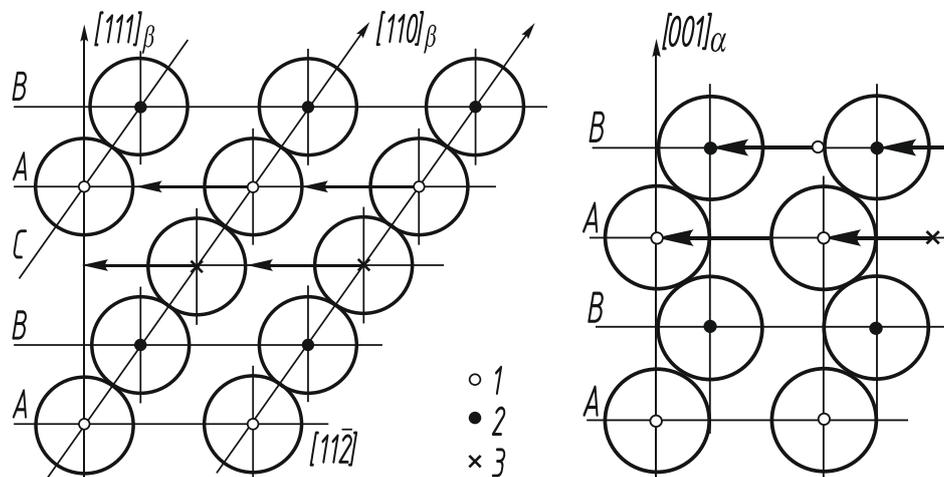


Рис. 12.23. Сдвиговый механизм превращения  $\alpha\text{Co} \rightarrow \beta\text{Co}$ :  
 1–3 – узлы однотипных плоскостей для последовательности ABCA... (г.ц.к.);  
 1, 2 – то же, для последовательности ABA... (г.п.у.);  
 стрелки показывают величину и направление сдвига

При этом в г.ц.к.-структуре образуется дефект упаковки, представляющий собой слой гексагональной упаковки и являющийся в кобальте зародышем мартенситного превращения. Имеется шесть возможных направлений сдвига  $[110]$  по плоскости  $\{111\}$ , а соответствующие дислокации  $a/2[110]$  расщепляются, образуя три частичные дислокации  $a/6 [11\bar{2}]$  в этих плоскостях. Перестройка влечет за собой очень малое изменение объема ( $\sim 0,3\%$ ). Между фазами осуществляется кристаллографическое соотношение:  $(111)$  г.ц.к.  $\parallel$   $(0001)$  г.п.у.,  $[1\bar{1}0]$  г.ц.к.  $\parallel$   $[11\bar{2}0]$  г.п.у. Таким образом, рост кристалла низкотемпературной г.п.у.-фазы начинается от плоскости  $(111)$  исходного кубического кристалла, которая остается инвариантной (межфазная граница). При превращении происходит небольшое сжатие кристаллической решетки перпендикулярно плоскости  $(0001)$ , являющейся габитусной плоскостью.

Для объяснения распространения превращения в объеме материала предложено несколько моделей. Христиан предложил механизм отражения частичных дислокаций у свободной поверхности в монокристаллах и у границ зерен в поликристаллическом образце. По спиральному механизму Зегера движение частичных дислокаций может перейти в другую плоскость, если перпендикулярно к ней в кристалле имеется винтовая дислокация. При этом возможны следующие реакции расщепления:  $a/2 [211] = 2/3a [111] + a/6 [2\bar{1}\bar{1}]$ ;  $a/2 [121] = 2/3a [111] + a/6 [12\bar{1}]$ . Механизм превращений, предложенных Боллманом и названный им динамическим, основывается на электронно-микроскопических наблюдениях поведения дефектов упаковки при их пересечении или столкновении.

Для объяснения явления мартенситного перехода в кобальте И.М. Разумовский использовал модель гетерофазных флуктуаций, согласно которой вблизи температуры фазового перехода возникают динамические смещения атомов в положение новой фа-

зы, еще не стабильной в данных условиях. В.М. Ершов, используя метод высокотемпературной рентгенографии, показал, что перед фазовым переходом происходит ослабление силовой связи атомов по отношению к сдвигу по [110] и уменьшение упругих констант  $(c_{11} - c_{12})/2$ , что приводит к потере устойчивости кристаллической решетки перед началом фазового превращения. Возникновение указанных смещений и потеря устойчивости кристаллической решетки приводят к увеличению пластичности в предпереходной области.

Значения температур мартенситного превращения  $M_S$  (при охлаждении) и аустенитного превращения  $A_S$  (при нагреве) сильно отличаются. Так, по данным Гиамея  $M_S = 390$  °С, а  $A_S = 440$  °С, а по данным Нелсона  $A_S = 417$  °С, а  $M_S$  изменяется от 300 до 400 °С, причем деформация в интервале температур аллотропического превращения приводит к понижению  $A_S$  и повышению  $M_S$ , т. е. активизирует мартенситное превращение.

Аллотропическое превращение в кобальте происходит с гистерезисом  $\sim 40-50$  °С, который можно рассматривать как разность температур, необходимая для достижения разности свободных энергий кубической и гексагональной структур, достаточной, чтобы дислокации могли двигаться. Гистерезис превращения объясняется существованием в решетке барьеров, затрудняющих движение дислокаций.

Некоторые исследователи (А.Е. Ковальский, Меткалф и др.) на основании данных о различном содержании метастабильной высокотемпературной  $\beta$ -модификации в образцах в зависимости от режимов термообработки высказали предположение о существовании второго перехода I рода при температуре около 1150 °С, причем структура высокотемпературного  $\gamma$ -Co предполагалась идентичной структуре низкотемпературной  $\alpha$ -модификации.

Однако в работе В.А. Финкеля с помощью высокотемпературных рентгеновских исследований доказано отсутствие такого перехода. Обнаруженные ранее эффекты (изменение электропроводимости и коэффициента термического расширения) связаны с магнитным превращением  $\beta$ -Co из ферромагнитного в парамагнитное состояние.

Деформация кобальта при комнатной температуре приводит к переходу метастабильной  $\beta$ -модификации в стабильную  $\alpha$ -фазу, аналогично образованию мартенсита в аустенитных сталях при деформации. Пластическая деформация кобальта также сопровождается появлением в г.ц.к.-решетке г.п.у.-слоев.

Модификации кобальта значительно различаются по пластическим свойствам.  $\beta$ -Co более пластичен, так как имеет большее число систем скольжения. Скольжение происходит по плоскости плотнейшей упаковки – плоскости октаэдра {111}, направление скольжения – диагональ грани куба [110]. Энергия полной единичной дислокации с вектором Бюргерса  $b = a/2$  [110] в г.ц.к.-решетке может понизиться вследствие расщепления в плоскости (111) на две частичные дислокации с вектором Бюргерса в направлении [121] в той же плоскости. В результате этого расщепления образуется дефект упаковки, представляющий собой тонкую прослойку с г.п.у.-структурой в г.ц.к.-решетке. В г.ц.к.-Co имеется восемь плоскостей (111), по которым возможно скольжение, что обуславливает его высокую пластичность.

В  $\alpha$ -Co с г.п.у.-решеткой скольжение происходит преимущественно в плоскостях базиса (0001), расщепление дислокации – по реакции



Возможно также расщепление дислокаций в плоскости призмы (1012):  $[0001] \rightarrow 1/2 [\bar{1}011] + 1/2 [10\bar{1}1]$  и в плоскости пирамиды (1122):  $1/3 [\bar{1}\bar{1}23] \rightarrow 1/6 [\bar{2}023] + 1/6 [0\bar{2}23]$ .

Кобальтовая связка в спеченных твердых сплавах *WC-Co* представляет собой твердый раствор вольфрама и углерода в кобальте  $\beta$ -*Co*. Атомы вольфрама замещают атомы кобальта в твердом расплаве, а атомы углерода размещаются в октаэдрических порах. Концентрация карбида вольфрама в твердом растворе может изменяться в зависимости от скорости охлаждения от 4 до 10 % (по массе) [109]. В сплавах *TiC-WC-Co* и *TiC-WC-TaC-Co* в кобальтовой фазе, помимо вольфрама и углерода, происходит растворение 0,2–6 % титана; тантал в связке не растворяется. Растворение в кобальте вольфрама и углерода снижает энергию дефектов упаковки [110]. Пластическая деформация кобальтовой фазы в процессе деформации твердых сплавов осуществляется по механизму, описанному выше, аналогично превращению в чистом кобальте: под действием сжимающих нагрузок г.ц.к.-решетка перестраивается в г.п.у.-структуру по мартенситному механизму, но в отличие от чистого кобальта в сплавах превращение никогда не идет до конца. При помощи электронной микроскопии обнаружено увеличение плотности дефектов упаковки и их коалесценцию под действием деформации. Коалесцируя, дефекты упаковки образуют пластины г.п.у.-решеткой.

Совершенно по-иному происходит деформация кобальтовой связки в случае горячей деформации твердых сплавов. При горячей деформации кобальтовая фаза находится в виде г.ц.к.-модификации и основным механизмом деформации связки является движение дислокаций по различным системам скольжения и сток их к границам зерен.

### **12.3. Рентгенографические исследования дефектов кристаллической структуры карбидов и кобальта, формирующихся при размоле**

В производстве твердых сплавов разمول – одна из самых важных операций, в значительной степени определяющая свойства конечных продуктов. Механический разمول исходных порошков и смесей применяют как способ воздействия на их активность при последующем спекании с целью получения сплавов с заданными структурой и свойствами. Процесс размола сопровождается комплексом физических и химических процессов. Помимо добавления и тщательного перемешивания компонентов смеси, являющихся необходимым условием при изготовлении однородных и качественных твердых сплавов, происходит изменение дефектности кристаллической структуры фазовых составляющих смеси, которое может сопровождаться изменениями в характере химической связи и химическом составе компонентов. В процессе размола при движении твердых тел, находящихся в контакте, большая часть работы, совершаемой против сил трения, освобождается в виде тепла. При этом в местах контактов частиц температура может повышаться до точки плавления одного из веществ, а в поверхностном слое тугоплавких веществ возможно локальное возращание температур до 1000 °С. Давления, развивающиеся на контакте частиц при размоле, могут составлять до  $15\text{--}10^8$  Па.

Таким образом, в результате воздействия различных факторов в процессе размола в компонентах твердых сплавов может происходить ряд механически стимулированных структурных изменений: деформация кристаллической структуры, приводящая к дроблению кристаллитов, дислокационным сдвиговым деформациям с сохранением остаточных микроискажений, фазовые переходы, увеличение количества точечных дефектов, возникающих при движении дислокаций в процессе пластической деформации, приводящее к активированию диффузионных процессов и увеличению скорости твердофазных реакций; вследствие удаления при размоле с поверхности частиц адсорбированных веществ более активно протекают процессы окисления и взаимодействия

с окружающей средой; при дроблении изоморфных компонентов возможно образование твердых растворов.

Таким образом, исследование механизма процессов, протекающих при размоле твердосплавных смесей, является важной задачей, решение которой необходимо для разработки методов направленного регулирования свойств твердых сплавов.

### 12.3.1. Влияние размола на тонкую структуру карбида вольфрама

В процессе размола структура порошков карбида вольфрама подвергается значительной деформации. Механизм деформации решетки карбида вольфрама при размоле исследовали в работах [111, 112, 113, 114]. Рентгенографические исследования показали, что в результате размола порошков  $WC$  происходит значительное уширение рентгеновских линий, причина которого – дробление областей когерентного рассеяния и возрастание микродеформации решетки.

По данным [111] обработка порошков  $WC$  в вибрационной мельнице давала возможность получать субмикронные порошки, размер кристаллитов которых уменьшался до 15 нм при увеличении времени размола до 16 ч, а микродеформация решетки возрастала до  $\sim 0,010 \cdot 10^{-3}$ , при этом оба показателя достигали насыщения (рис. 12.24). При изменении условий размола менялась степень деформации решетки  $WC$ . Так, при размоле в барабане «Perspex» в течение 100 ч порошки карбида вольфрама подвергались такой же деформации, как в вибрационной мельнице при 1,5 ч размоле. После размола в шаровой мельнице в ацетоне в течение 4 ч не было обнаружено уширения линий. Смеси  $WC$  с 10 %  $Co$ , размолотые в течение 4 ч, не отличались от порошков, размолотых без кобальта.

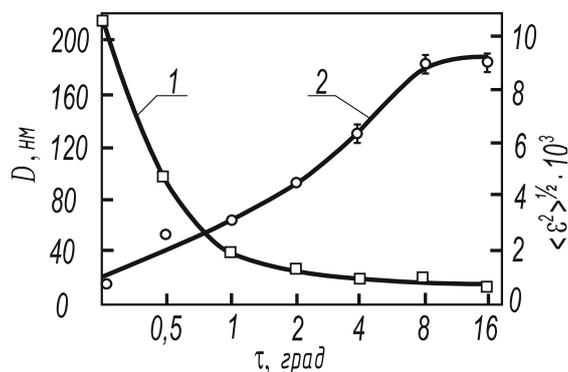


Рис. 12.24. Зависимость размера блоков  $D$  (1) и микродеформаций решетки  $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$  (2)  $WC$  от времени размола в вибрационной мельнице [42]

По мнению авторов [111], в результате ударов и трения при размоле порошков на поверхности частиц могут возникать значительные температуры, при которых материал становится более пластичным, и начинают действовать системы скольжения по базисной плоскости. Быстрое рассеяние тепла после деформации частиц приводит к их закалке и таким образом при комнатной температуре должны сохраняться дефекты кристаллического строения, возникающие при размоле.

Аналогичные исследования проведены с целью установления влияния размола на спекание зерен  $WC$  [112]. Размол порошка  $WC$  осуществляли в этаноле в мельнице объемом 2,4 л в течение 53 ч. Порошки после размола подвергали воздушной сепарации. Анализ профиля рентгеновских линий проводили по методу Уоррена-Авербаха для двух направлений  $\langle 1010 \rangle$  и  $\langle 0001 \rangle$ . Результаты исследования представлены в табл. 12.5.

Таблица 12.5

Характеристики тонкой структуры порошков WC после размола  
в зависимости от времени размола и размера частиц

Время размола, ч	Фракция, мкм	<1010>		<0001>	
		$\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2} 10^3$	D, нм	$\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2} 10^3$	D, нм
0	1–6	1,3	50	2,2	65
0	6–12	1,1	65	2,1	130
0	>12	1,0	110	1,5	300
13	<1	2,2	10	2,0	25
13	1–6	2,0	14	1,7	30
13	6–12	2,0	20	1,8	50
26	<1	4,9	6	2,2	15
26	1–6	4,5	9	2,0	18
53	<1	5,9	3	2,8	10
53	1–6	5,2	4	2,5	15

Приведенные данные свидетельствуют о возрастании дефектности кристаллической решетки порошка карбида вольфрама с увеличением длительности размола и о более интенсивной деформации в направлении <1010>. Эти данные согласуются с данными работы [113], в которой указано преимущественное расщепление дислокаций в плоскости (0001). Исследование в электронном микроскопе дислокационной структуры частиц карбида вольфрама после размола показало, что внутренняя часть частиц практически свободна от дефектов, а дислокации сосредоточены только в поверхностных слоях. Это подтверждается результатами рентгеновского анализа, свидетельствующими о большей степени деформации (т. е. повышенной плотности дислокаций) в порошках мелких фракций, которые имеют более высокое отношение поверхности к объему. Поверхностные слои частиц являются, таким образом, очень «активными», так как в них сосредоточена большая часть энергии упругой деформации. Однако исследование с помощью растрового электронного микроскопа степени спекания частиц вольфрама после размола различной продолжительности не дало возможности установить корреляцию между плотностью дислокаций и скоростью спекания порошков.

Более глубокие исследования механизма размола порошков карбида вольфрама позволили авторам [114] сопоставить изменения характеристик тонкой структуры порошков с изменениями среднего размера зерна и удельной поверхности. Установлены зависимости, по которым изменяются изученные характеристики порошков при размоле (рис. 12.25) и получены уравнения, связывающие параметры порошков со временем размола:

$$d_m = 5,6 (\tau^{-0,4}) \text{ мкм}; s = 0,12 (\tau^{0,5}) \text{ м}^2/\text{г}; \\ D = 32 (\tau^{-0,6}) \text{ нм}; \langle \epsilon^2 \rangle = (0,47\tau + 2,0) 10^7.$$

Оценка поверхностной энергии и энергии упругой деформации показала, что главной составляющей движущей силы процесса спекания является поверхностная энергия.

Проведенные в работах [111, 113] исследования изменения интегральной ширины рентгеновских отражений от различных плоскостей, показали значительный разброс данных относительно прямой, что может быть обусловлено анизотропией упругих свойств в различных направлениях и наличием дефектов упаковки.

На рис. 12.26 представлена зависимость  $(\beta^*)^2$  от  $(d^*)^2$  для молотых порошков WC, где  $\beta^* = \beta \cos \theta/\lambda$ ,  $d^* = 2 \sin \theta/\lambda$ .

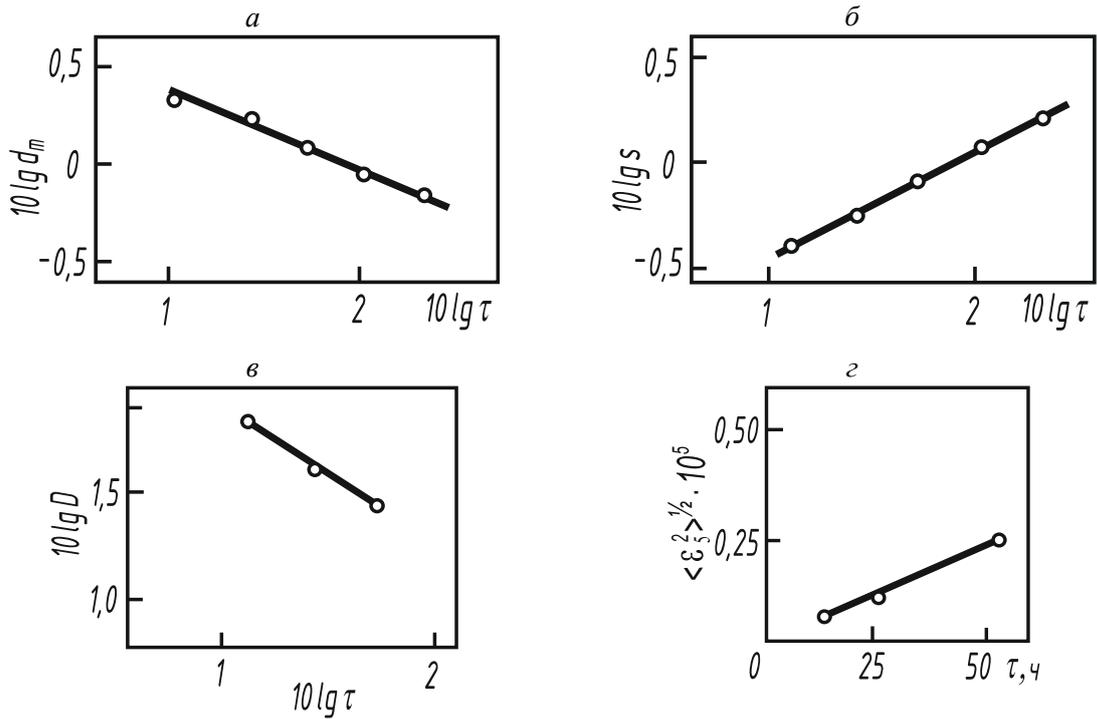


Рис. 12.25. Зависимость размера зерна по Фишеру  $d_m$  (а), удельной поверхности  $s$  (б), размера блоков  $D$  (в) и микродеформаций решетки  $\langle \varepsilon_3^2 \rangle^{1/2}$  (г) карбида вольфрама от времени размола [45]

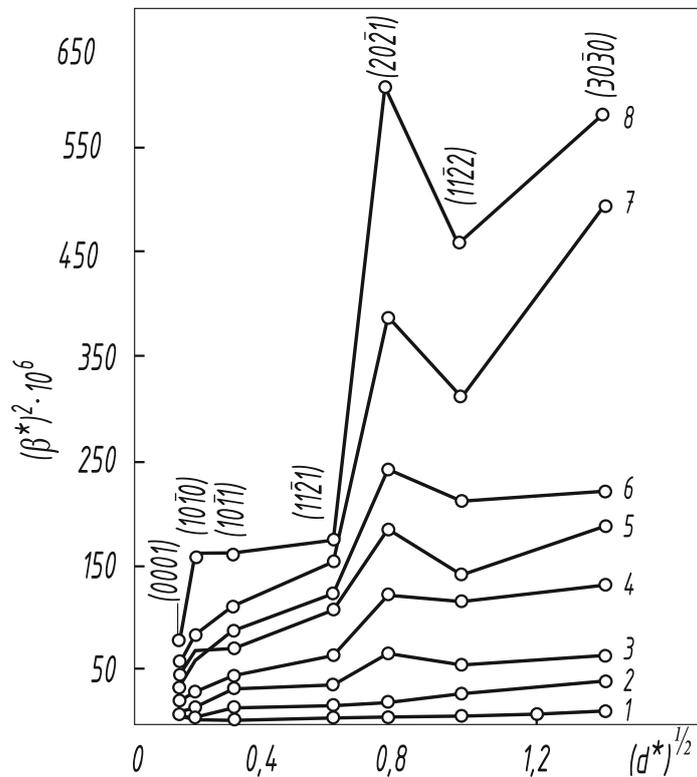


Рис. 12.26. Зависимость уширения рентгеновских линий WC с разными индексами  $(hkl)$  от времени размола [62]: 1 – исходный порошок; 2 – 1/2 ч; 3 – 1 ч; 4 – 2 ч; 5 – 4 ч, смесь WC с 10 % Co; 6 – 4 ч; 7 – 8 ч; 8 – 16 ч

Большее уширение наблюдалось для дифракционных линий с  $h-k=3N \pm 1$ , в частности для (1011) и (2021), и связано с влиянием деформационных дефектов упаковки, которые могут возникать в результате скольжения единичной дислокации с вектором Бюргера  $a$  [1120] в плоскости базиса в результате расщепления на две частичные дислокации, ограничивающие дефект упаковки, по следующей реакции:  $a$  [1120]  $\rightarrow a/\sqrt{3}$  [0110] +  $a/\sqrt{3}$  [1010]. Подобный эффект наблюдается в металлах с г.п.у.-структурой.

Возможность скольжения в базисной плоскости при повышенных температурах указана в [113]. Высокие температуры и давления, возникающие при размоле, по-видимому, могут способствовать прохождению данной реакции.

Во ВНИИТС проводили исследование особенностей деформации при размоле порошков карбида вольфрама с разной дефектностью в исходном состоянии вследствие получения их при различных температурах восстановления и карбидизации. Мокрый размол смесей WC-20% Co производили в шаровой мельнице при длительности размола 12-96 ч. После размола кобальт удаляли кипячением в соляной кислоте.

Изменение ширины рентгеновской линии (1122) порошков карбида вольфрама с увеличением времени размола свидетельствует о возрастании дефектности (рис. 12.27, а). При этом четко наблюдается разница в поведении порошков, изготовленных по различным технологическим вариантам: для высокотемпературных порошков с более совершенной структурой характерно резкое возрастание ширины линии уже при длительности размола 12 ч, в результате чего они приобретают после размола более дефектную структуру, чем низкотемпературные порошки. Это различие еще более возрастает при увеличении времени размола.

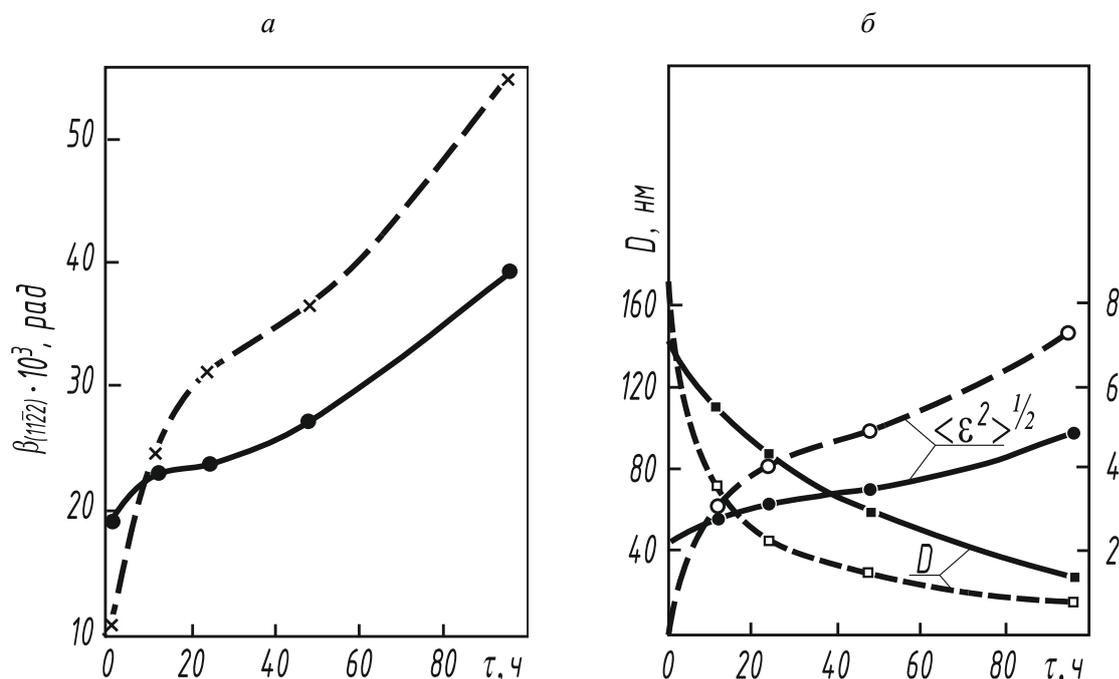


Рис. 12.27. Зависимость от времени размола ширины рентгеновской линии B (1122) WC (а), а также микродеформации решетки  $\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$  и размера блоков D (б):

пунктир – высокотемпературный WC; сплошные линии – низкотемпературный WC

Результаты гармонического анализа профиля линий размолотых порошков карбида вольфрама объясняют причину этого различия. Увеличение времени размола ведет

к закономерному уменьшению размера блоков мозаики и возрастанию микродеформаций в решетке карбида вольфрама (рис. 12.27, б). Эти процессы развиваются более интенсивно в высокотемпературных порошках, в результате чего при любой продолжительности размола, начиная с 12 ч, порошки высоко-температурного карбида вольфрама характеризуются меньшими размерами блоков и большими микронапряжениями, чем низкотемпературные. Очевидно, порошки карбида вольфрама, полученные по высокотемпературной технологии, испытывают в процессе размола больший наклеп, чем низкотемпературные порошки.

По-видимому, это явление связано с различным механизмом дробления порошков карбида вольфрама при размоле. Анализ результатов исследования дисперсности и морфологии порошков WC после размола позволяет сделать вывод, что при размоле высокотемпературного карбида вольфрама происходит разрушение (дробление) первичных частиц, а при размоле низкотемпературного карбида вольфрама – разрушение агрегатов частиц, поскольку прямое определение в электронном микроскопе размеров частиц при размоле до 48 ч не выявило их изменения. Незначительное измельчение первичных частиц низкотемпературного WC при увеличении длительности размола до 96 ч происходит, очевидно, вследствие скола частиц.

Таким образом, порошки карбида вольфрама, отличающиеся температурами получения, после длительного размола характеризуются почти одинаковой дисперсностью, но при этом различаются дефектностью кристаллической структуры, что определяет их поведение при последующем спекании. Более дефектными становятся порошки, полученные по высокотемпературной технологии, обладающие до размола совершенной структурой. О большей дефектности этих порошков WC после размола свидетельствуют и рентгеновские исследования субмикропористости. Она заметно возрастает после 48- и 96-ч размола, причем особенно значительно в высокотемпературных порошках.

Совместный размол порошков карбида вольфрама с кобальтом может изменять механизм деформации частиц WC. Характер взаимодействия компонентов смеси в процессе размола различен. Хиннубер и Рюдигер приводят результаты, полученные методом реплик, свидетельствующие об осаждении («размазывании») кобальта на неровностях частиц WC. Однако Фишмейстер и Эхнер считают, что при размоле карбидные частицы «вбиваются» в агломераты кобальта. В ряде работ показано, что при размоле значительно повышается содержание кислорода в смесях. Это может быть связано с образованием оксидов и гидрооксидов кобальта, которые покрывают частицы WC тонким слоем и способствуют равномерному распределению кобальта среди частиц WC; часть кислорода, по-видимому, может находиться в адсорбированном виде на поверхности частиц порошков. Данные, полученные в работах [41, 42], свидетельствуют о влиянии характеристик порошков кобальта на механизм измельчения и деформации карбида вольфрама. Показано, что при использовании более мелкозернистых порошков кобальта карбидная фаза после размола характеризуется повышенной дефектностью и большей дисперсностью (рис. 12.28).

Если предположить, что в процессе размола частицы кобальта, являющегося очень пластичным материалом, служат определенным демпфером при разрушении карбидных частиц, то вероятно, что, изменяя характеристики порошков кобальта, можно изменять схему деформации частиц WC и таким образом влиять на характер дислокационной структуры, возникающей при размоле. Длительность размола и характеристики исходных порошков кобальта оказывают непосредственное влияние также на равномерность распределения компонентов в смеси. Полученные данные о связи

дисперсности и структуры карбидной фазы ясле размола с характеристиками исходных порошков кобальта свидетельствуют о необходимости более строгого подхода к контролю и выбору порошков кобальта, применяемых в производстве твердых сплавов, с целью получения смесей и сплавов с оптимальными свойствами.

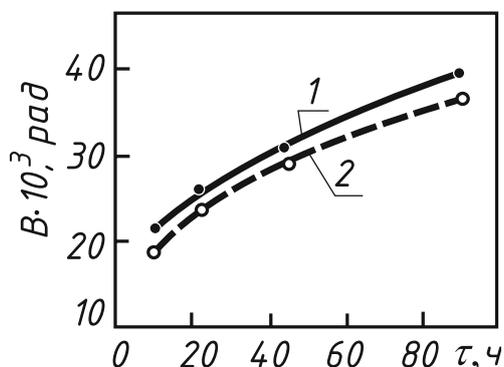


Рис. 12.28. Зависимость ширины рентгеновской линии  $B(1122) WC$  от времени размола смеси  $WC$  с оксалатным (1) и электролитическим (2) кобальтом

### 12.3.2. Влияние размола на тонкую структуру карбидов переходных металлов

В производстве твердых сплавов размол карбидов переходных металлов не играет столь существенной роли, как размол карбида вольфрама, так как обычно в смесь вводят соответствующие оксиды, которые подвергают затем карбидизации [92]. Однако исследование поведения карбидов при размоле дает ценную информацию о характере структурных превращений в них под действием деформации, и эти данные могут быть использованы при прогнозировании их поведения во время работы твердосплавных изделий.

Изучению механизма деформации карбидов переходных металлов IV–V групп при размоле посвящено значительное число работ. Карбид титана детально исследовали Снелл и Ларсон. Размол порошка  $TiC$  осуществляли в вибрационной шаровой мельнице объемом 0,14 л, время размола изменяли от 4 до 48 ч. Тонкую структуру исследовали с помощью Фурье-анализа. Было установлено, что наблюдаемое в результате размола уширение линий порошков  $TiC$  обусловлено малыми размерами областей когерентного рассеяния и напряжениями в кристаллической решетке, которые изменялись в зависимости от длительности размола.

В табл. 12.6. приведены эффективные размеры ОКР в молотых порошках  $TiC$ .

Таблица 12.6

Эффективные размеры ОКР  
в молотых реакционноспеченных порошках  $TiC$

Время размола, ч	$D_{эф}^{(111)}$ , нм	$D_{эф}^{(100)}$ , нм	$D_{эф}^{(111)} / D_{эф}^{(100)}$
4	92	96	0,96
24	39	40	0,97
48	28	29	0,97

Среднеквадратичные значения микродеформаций в молотых порошках TiC приведены в табл. 12.7. Приведенные выше, а также на рис. 12.29 данные свидетельствуют о том, что среднеквадратичные микродеформации в направлении  $\langle 111 \rangle$  больше, чем в направлении  $\langle 100 \rangle$ , что согласуется со значениями модуля Юнга для разных направлений ( $E_{\langle 100 \rangle} / E_{\langle 111 \rangle} = 1,10$ ) и с данными о преимущественной системе скольжения в  $\text{TiC}\{111\} \langle 110 \rangle$ . Микронапряжения имеют максимальные значения на небольших расстояниях (рис. 12.29), что свидетельствует о присутствии в кристаллической структуре дефектов типа дислокаций. Следует отметить, что в работе Гиллиса и Льюиса указанные характеристики для TiC, ZrC и VC найдены изотропными, а большие напряжения в направлении  $\langle 111 \rangle$  обнаружены лишь для TaC и NbC. Причиной различия данных этих авторов и Снелла и Ларсона может быть наличие примесей в карбидах, которые приводят к повышению изотропности при деформации.

Таблица 12.7

Среднеквадратичные значения микродеформаций  
в молотых реакционноспеченных порошках TiC

Время размола, ч	$\left\langle \sqrt{\varepsilon_5^2} \right\rangle_{\langle 100 \rangle}$ $\cdot 10^3$	$\left\langle \sqrt{\varepsilon_5^2} \right\rangle_{\langle 111 \rangle}$ $\cdot 10^3$	$\frac{\left\langle \sqrt{\varepsilon_5^2} \right\rangle_{\langle 111 \rangle}}{\left\langle \sqrt{\varepsilon_5^2} \right\rangle_{\langle 100 \rangle}}$	$\left\langle \sqrt{\varepsilon_{30}^2} \right\rangle_{\langle 100 \rangle}$ $\cdot 10^4$	$\left\langle \sqrt{\varepsilon_{30}^2} \right\rangle_{\langle 111 \rangle}$ $\cdot 10^4$	$\frac{\left\langle \sqrt{\varepsilon_{30}^2} \right\rangle_{\langle 111 \rangle}}{\left\langle \sqrt{\varepsilon_{30}^2} \right\rangle_{\langle 100 \rangle}}$
4	1,1	1,6	1,45	3,0	3,6	1,2
24	1,5	2,1	1,4	4,4	5,6	1,27
48	2,2	2,8	1,27	5,4	7,2	1,33

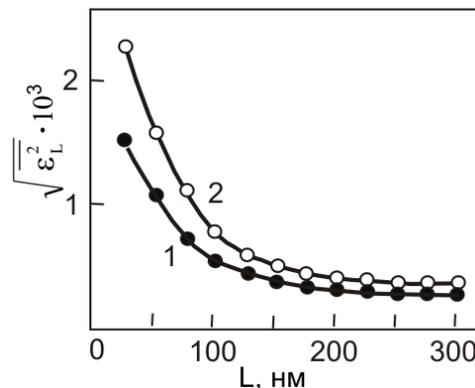


Рис. 12.29. Зависимость среднеквадратичных деформаций от среднего расстояния  $L$ , перпендикулярного к плоскостям отражения  $\langle 100 \rangle$  при  $D_{эф} = 96$  нм (1) и  $\langle 111 \rangle$  при  $D_{эф} = 92$  нм (2) для порошка TiC, подвергнутого размолу в течение 4 часов

Исследования размеров кристаллитов свидетельствуют об их изотропности в различных направлениях. Этот факт, а также отсутствие смещения линий (111) и (200) и симметричный характер их позволяют сделать заключение, что вероятность и деформационных, и двойных ДУ в порошках TiC очень низкая.

Ниже приведены значения плотности дислокаций, рассчитанные из размера блоков и среднеквадратичных деформаций ( $p_D$  и  $p_s$ ), а также запасенной внутренней энергии  $U$  и поверхностной энергии  $W$  (табл. 12.8).

Значения плотности дислокаций близки к величинам, которые характерны для сильно деформированных металлов, а внутренняя энергия, обусловленная упругими искажениями решетки, может играть значительную роль в процессе спекания.

Таблица 12.8

Значения плотности дислокаций, рассчитанные из размера блоков, среднеквадратичных деформаций ( $\rho_D$  и  $\rho_S$ ) и запасенной внутренней энергии  $U$  и поверхностной энергии  $W$

Время размола, ч	$\rho_D, \text{см}^{-2}$	$\rho_S, \text{см}^{-2}$	$U, \text{Дж/г}$	$W, \text{Дж/г}$
4	$3,4 \cdot 10^{10}$	$6,5 \cdot 10^{10}$	0,46	1,64
24	$1,9 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	0,84	3,15
48	$3,7 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	1,68	4,03

Аналогичные исследования и расчеты были проведены для порошков карбида титана после вибропомола [115]. Особенность процесса виброизмельчения – усталостный режим разрушения обрабатываемого материала, который создается вследствие высокой частоты и относительно малого ударного импульса действия мелющих тел. В результате в измельчаемом материале постепенно накапливается упругая энергия, которая при достижении определенного предела приводит к разрушению частиц. Установлено, что с увеличением времени вибропомола размер блоков уменьшается одинаково для направлений  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  (рис. 12.30).

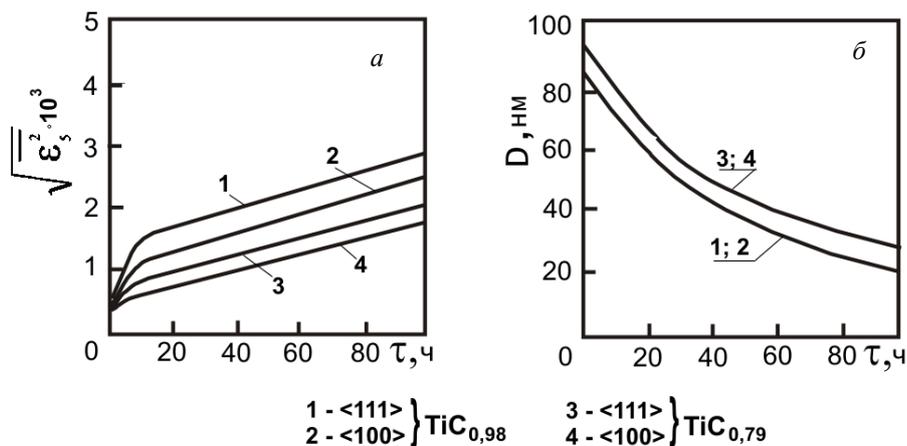


Рис. 12.30. Зависимость среднеквадратичных деформаций  $\left\langle \sqrt{\varepsilon_5^2} \right\rangle$  (а) и размера блоков  $D$  (б) от времени размола порошков  $\text{TiC}$  с различным содержанием углерода

Степень анизотропии микродеформаций оценивалась величиной отношения  $\left\langle \sqrt{\varepsilon_5^2} \right\rangle_{\langle 111 \rangle} / \left\langle \sqrt{\varepsilon_5^2} \right\rangle_{\langle 100 \rangle}$ , которая составляла  $\sim 1,17$  для порошков  $\text{TiC}$ , молотых в течение 100 ч. Близкие к единице соотношения микродеформаций и модулей Юнга для разных кристаллографических направлений согласуются с величиной фактора упругой анизотропии  $2C_{44} / (C_{11} - C_{12})$ , которая для  $\text{TiC}$  составляет 0,88. На основании полученных

данных авторы делают вывод о том, что карбид титана по отношению к характеру микропластической деформации можно рассматривать как упругоизотропный.

Отклонение от стехиометрии в карбиде титана влияет на характер деформации при размоле порошков. В работах А.Е. Кравчика показано, что с уменьшением содержания углерода величина среднеквадратичной деформации асимптотически уменьшалась, а размер блоков увеличивался (рис. 12.31), т. е. карбид титана нестехиометрического состава характеризовался большей хрупкостью. Изменение способности карбида титана к микропластической деформации в области гомогенности определяется структурными факторами и особенностями их электронного строения, которые оказывают противоположное влияние на подвижность дислокаций. С одной стороны, рост концентрации структурных углеродных вакансий должен приводить к усилению взаимодействия скользящих дислокаций с вакансиями и к усилению роли сидячих дислокаций Франка вакансионного происхождения, что вызывает уменьшение подвижности дислокаций. С другой стороны, увеличение концентрации углеродных вакансий ведет к уменьшению величины барьера Пайерлса-Набарро, а следовательно, к увеличению подвижности дислокаций за счет электронного фактора. Уменьшение среднеквадратичных смещений при изменении соотношения  $C/Me$  до 0,9 указывает на преобладающее влияние структурного фактора; при атомном соотношении менее 0,9 действие этих факторов выравнивается и уровень  $\left\langle \sqrt{\varepsilon_s^2} \right\rangle_{\langle 100 \rangle}$  остается неизменным.

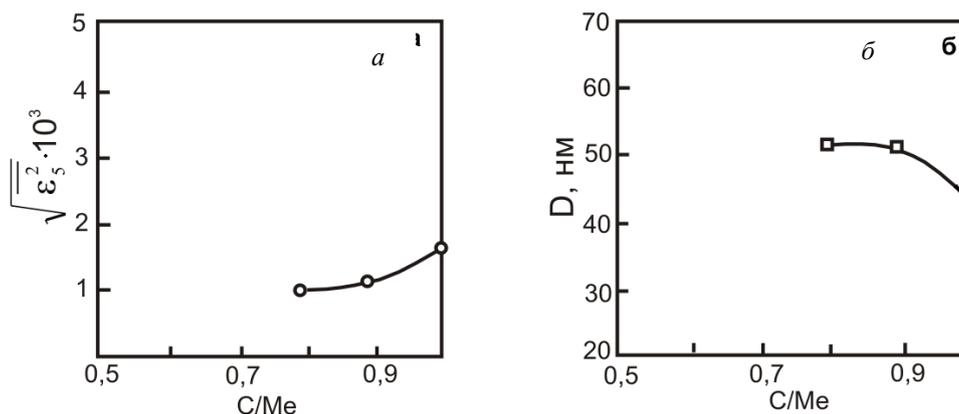


Рис. 12.31. Зависимость среднеквадратичных деформаций  $\left\langle \sqrt{\varepsilon_s^2} \right\rangle_{\langle 100 \rangle}$  (а) и размера блоков  $D$  (б) от концентрации углерода в карбидах титана

По данным Г.В. Самсонова и И.И. Тимофеевой с уменьшением содержания углерода в  $TiC$  величина остаточных микродеформаций увеличивалась, а размер блоков понижался, что свидетельствует о повышении пластичности карбида титана. Наблюдаемые различия в данных Г.В. Самсонова и А.Е. Кравчика могут быть связаны с разным механизмом деформации порошков при виброобработке [115] и при растирании порошков в агатовой ступке.

Исследования порошков карбидов  $(Ti, W)C$  разного состава после размола в шаровой мельнице по изменению интегральной ширины рентгеновской линии (420) (рис. 12.32) свидетельствуют о повышении пластичности твердых растворов  $(Ti, W)C$  при возрастании содержания вольфрама, что связано с понижением прочности связей  $Me-C$  при переходе от металлов IV группы к металлам VI группы вследствие уменьшения стабилизации  $sp^3$ -конфигураций атомов углерода в карбидах металлов VI группы.

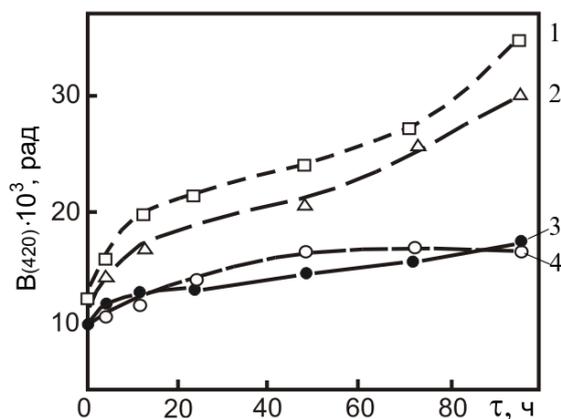


Рис. 12.32. Зависимость ширины рентгеновской линии  $B(420)$  от времени размола карбидов (Ti, W)C разного состава, % (по массе):  
 1 – TiC; 2 – 70TiC + 30WC;  
 3 – 50TiC + 50WC; 4 – 30TiC + 70WC

Структурные изменения, протекающие в других карбидах переходных металлов в процессе размола, описаны в работах [46–49]. По характеру упругой деформации карбид циркония, как и карбид титана можно отнести к упругоизотропным материалам. Максимальная деформация ZrC наблюдается в направлении  $\langle 111 \rangle$  (рис. 12.33), что соответствует минимальному значению модуля упругости в этом направлении.

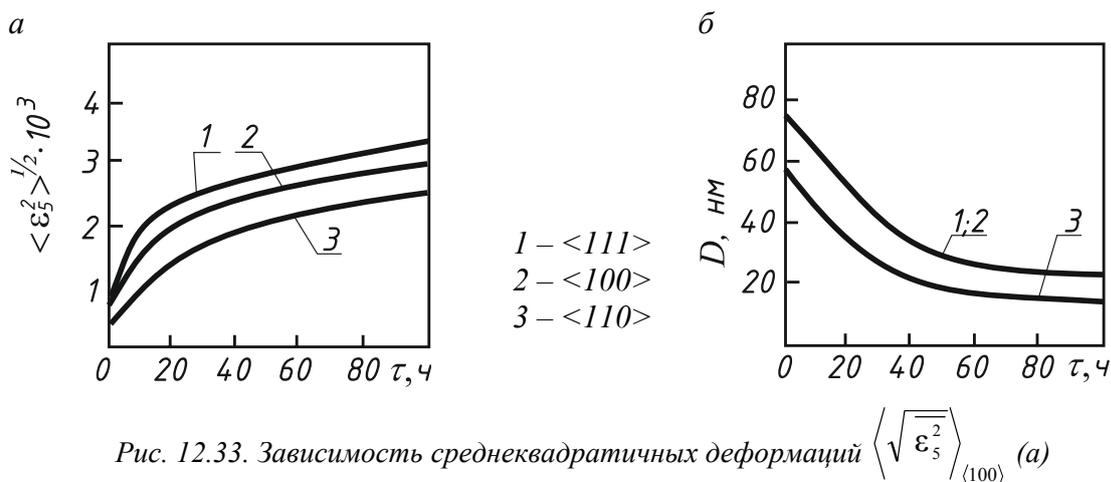


Рис. 12.33. Зависимость средневладратичных деформаций  $\langle \sqrt{\epsilon_s^2} \rangle_{\langle 100 \rangle}$  (а) и размера блоков  $D$  (б) от времени размола порошков ZrC стехиометрического состава [46]

Зависимость деформации от стехиометрии значительно заметнее у карбида ниобия. Такое различие в поведении карбидов металлов IV–V групп при размоле в области гомогенности определяется совокупностью действия структурного и электронного факторов, которые в карбидах IV группы (TiC, ZrC) действуют в разных направлениях, а в карбидах V группы (NbC) – в одном направлении. Стехиометрические карбиды по возрастанию хрупкости можно расположить в ряду NbC → ZrC → TiC.

На характер измельчения карбидов большое влияние может оказать среда размола. Так, измельчение порошков карбида циркония значительно эффективнее в жидких средах, чем при сухом помоле [116, 117]. Авторы объясняют это тем, что при деформации твердого тела в поверхностном слое развиваются клиновидные микротрещины,

способные смыкаться после снятия нагрузки. В жидких средах адсорбционные слои мигрируют по поверхности, достигают устья микротрещин и препятствуют их смыканию, а иногда даже оказывают расклинивающее действие. Поэтому при сухом помоле для разрушения необходимо накопление большего количества энергии, чем при помоле в жидких средах. Энергия деформированной решетки ZrC различна в зависимости от среды помола, что, очевидно, должно существенно влиять на процессы, с которыми связано дальнейшее использование порошков.

При размоле в шаровой мельнице в карбиде гафния, как и в других карбидах, происходит повышение среднеквадратичных микродеформаций решетки и уменьшение областей когерентного рассеяния [118]; при этом наблюдается существенная анизотропия микродеформаций.

Как видно на рис. 12.34 в направлении  $\langle 100 \rangle$  наблюдаются большие значения микродеформаций решетки. Меньшие размеры кристаллитов и более низкие значения микродеформаций в направлении  $\langle 110 \rangle$  свидетельствуют, по-видимому, о том, что по плоскостям типа  $\{110\}$  происходит скалывание частиц.

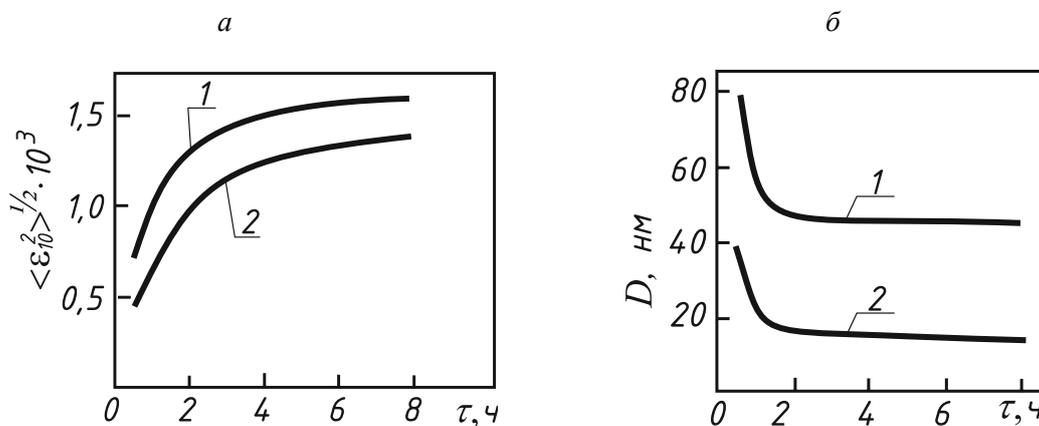


Рис. 12.34. Зависимость среднеквадратичных деформаций  $\langle \varepsilon_{10}^2 \rangle^{1/2}$  (а) и размера блоков  $D$  (б) от времени размол порошков HfC для направлений  $\langle 100 \rangle$  (кривая 1) и  $\langle 110 \rangle$  (кривая 2)

Отсутствие смещения пиков свидетельствует об отсутствии ДУ.

Значительная анизотропия в деформации HfC наблюдалась в случае размол при повышенных температурах (рис. 12.35). При этом происходило увеличение микродеформаций и уменьшение размера кристаллитов. Подобные исследования, проведенные авторами на W и WC, показали уменьшение микроискажений с увеличением температуры размол.

Таким образом, приведенные выше данные свидетельствуют о том, что при рентгенографическом исследовании порошков карбидов переходных металлов не было обнаружено принципиальных различий в изменении дифракционной картины деформированных карбидов и металлов, т. е. механизм микропластической деформации металлов и тугоплавких карбидов одинаков. В работе [117] сделано предложение, что в связи с высоким уровнем напряжений Пайерлса-Набарро в тугоплавких карбидах, вызванным значительным вкладом жестких направленных ковалентных связей и затрудняющим перемещение дислокаций на большие расстояния, характер деформации карбидов при определенных условиях должен отличаться от деформации металлов и приближаться к характеру деформации веществ с сильно выраженной ковалентной связью.

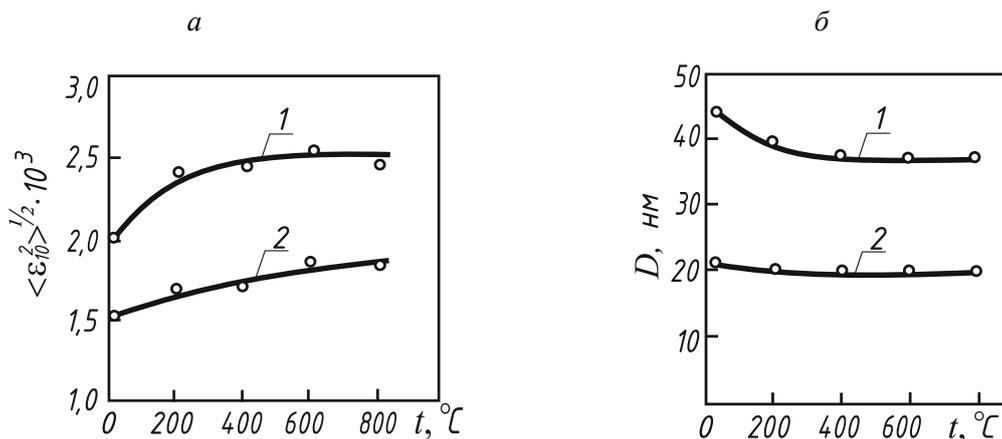


Рис. 12.35. Зависимость микродеформации  $\langle \epsilon_{10}^2 \rangle^{1/2}$  (а) и диаметра блоков  $D$  (б) в HfC от температуры размола для направлений  $\langle 100 \rangle$  (кривая 1) и  $\langle 110 \rangle$  (кривая 2) [69]

Действительно, в условиях длительного вибропомола порошков ZrC авторы наблюдали значительное увеличение диффузного рассеяния и уменьшение интегральной интенсивности отражений, что позволило сделать вывод о частичной аморфизации порошков при размоле. В процессе размола от частиц ZrC откалываются очень мелкие осколки, которым энергетически более «выгодно» находится в аморфном состоянии. Наличие в ZrC сильно локализованных направленных связей, по мнению авторов, затрудняет схватывание и рекристаллизацию этих частиц. Стабилизация аморфного состояния наиболее характерна для веществ с высокой степенью локализации межатомных связей.

### 12.3.3. Влияние размола на фазовый состав и особенности кристаллического строения кобальта

Известно, что любая пластическая деформация кобальта приводит к изменению соотношения  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций, а также тонкой структуры. Первые исследования влияния размола на деформацию кристаллической решетки кобальта, проведенные в работах Давиля, Хиннубера, Кинна, показали, что в процессе размола происходит фазовый переход  $\beta \leftrightarrow \alpha$  и образование ДУ. Более детально механизм воздействия интенсивного размола на характер поведения кобальта изучался в работах Кохановска, Сноуболла и нами [114]. В исследованиях Кохановска были использованы порошки кобальта, полученные восстановлением муравьинокислого кобальта, состоящие преимущественно из кубической фазы кобальта (содержание г.п.у.-фазы 11 %). Образцы размалывали в шаровой лабораторной мельнице в течение 0,5–96 ч, а также в шаровой вибрационной мельнице. Установлено, что изменения тонкой структуры кобальта протекают почти одинаково при обоих способах размола, однако при размоле в вибрационной мельнице эти изменения проходят менее интенсивно. Это привело автора к выводу, что изменения, происходящие в тонкой структуре порошка кобальта при размоле, осуществляются в два этапа. На первом этапе (при времени размола до ~8 ч) исходная кубическая фаза переходит в гексагональную, при этом происходит уменьшение расстояния между основными плоскостями. На основе анализа рентгеновской картины изменения интенсивности и размытия линий автор сделал заключение, что на этом этапе пластической деформации кобальта возникают деформационные дефекты упаковки и дефекты роста и этот процесс происходит спонтанно в целых областях первоначальной кристаллической решетки.

На последующих стадиях размола возникают значительные микронапряжения и начинается превращение образовавшейся гексагональной фазы в кубическую. Это явление объясняется возникновением при размоле высоких температур, которые могут быть больше температуры фазового перехода, в результате чего гексагональная фаза спонтанно превратится в кубическую. Вместе с тем, увеличение в порошке кислорода, который может проникать в решетку, а также возникновение искажений третьего рода приводят к необратимости этого перехода. На этом этапе на поверхности частиц был обнаружен слой очень мелкокристаллического оксида кобальта.

В производстве твердых сплавов знание процессов, протекающих при размоле порошков кобальта и карбидных фаз, представляет большой практический интерес, так как на этой стадии в значительной степени обеспечивается однородность готовой продукции. Различие в пластичности г.ц.к.- и г.п.у.-фаз может быть причиной разной степени их измельчения и наклепа. В связи с этим совсем не отвлеченным является вопрос об оптимальном составе исходного кобальтового порошка [110, 111] и о структурных характеристиках кобальта. В работе [114] приведены детальные исследования процессов, протекающих в порошках кобальта при размоле. Использовали порошки кобальта, полученные разложением оксалата с последующим восстановлением оксида кобальта до металла (кобальт оксалатный), а также электролизом, характеризующиеся более крупным размером частиц и повышенным содержанием г.п.у.-фазы.

Под действием деформации при размоле происходит существенное изменение фазового состава порошков кобальта вследствие перехода полиморфной  $\beta$ -модификации с г.ц.к.-структурой в модификацию с г.п.у.-структурой (рис. 12.36).

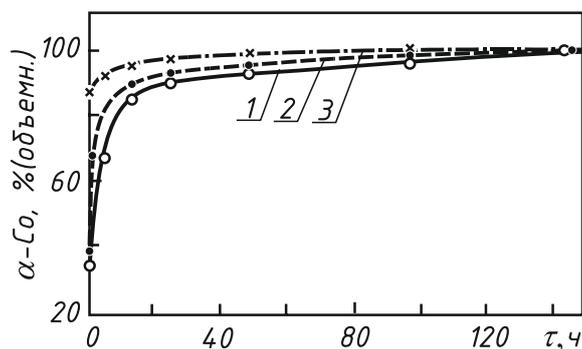


Рис. 12.36. Зависимость содержания  $\alpha$ -Co от времени размола:  
1, 2 – оксалатный кобальт разной зернистости; 3 – электролитический кобальт

Этот переход, осуществляемый по мартенситному механизму, протекает наиболее интенсивно при малом времени размола (до 24 ч). После длительного размола (96 и 144 ч) порошок кобальта представлен только  $\alpha$ -модификацией.

С увеличением длительности размола происходит значительное возрастание дефектности обеих модификаций кобальта вследствие дробления блоков мозаичной структуры, возрастания микродеформаций, а также увеличения концентрации дефектов упаковки.

#### 12.4. Рентгенографические исследования структурных изменений фазовых составляющих твердых сплавов в процессе спекания

Спекание – заключительная и наиболее ответственная операция технологического процесса производства твердых сплавов, оказывающая наибольшее влияние на свойства сплавов и их однородность. Известно большое количество работ, посвященных изуче-

нию процесса спекания, однако до сих пор отсутствует единая физическая и математическая теория спекания, большой вклад в разработку «вопросов теории спекания внесли ученые: М.Ю. Бальшин, Я.Е. Гегузин, Б.Я. Пинес, Г.А. Меерсон, В.А. Ивенсен, Г.В. Самсонов, В.В. Скороход, С.С. Кипарисов и др. Процесс спекания можно определить как термодинамический процесс, при котором система стремится перейти в состояние с минимальной энергией. Полученные после размолла смеси порошка карбидов с цементирующим металлом обладают большим избытком энергии Гельмгольца, обусловленным высокой дисперсностью и развитой поверхностью порошков, и характеризуются значительной степенью несовершенства кристаллического строения. При спекании в результате усадки, снятия напряжений, сокращения поверхности происходит уменьшение избыточной энергии, и система переходит в более устойчивое состояние.

Процесс формирования структуры твердых сплавов начинается в условиях твердофазного спекания и завершается в присутствии жидкой металлической фазы. При твердофазном спекании определяющими являются диффузионные процессы, вязкое и пластическое течение, рекристаллизация. При жидкофазном спекании увеличивается скорость диффузии компонентов, облегчается перемещение твердых частиц относительно друг друга, начинают действовать капиллярные силы. Вследствие растворения карбидов в жидкой связывающей фазе интенсифицируется перенос вещества (по механизму растворение – осаждение).

Таким образом, процесс спекания твердых сплавов сопровождается структурной перестройкой фазовых составляющих сплавов, приводящей к устранению следов наклепа и к уменьшению энергии Гельмгольца вследствие уменьшения дефектности структуры. По-видимому, элементарными процессами, протекающими при спекании компонентов сплавов и ведущими к перестройке их структуры, можно считать такие, которые сопровождают явления возврата и рекристаллизации: диффузию точечных дефектов, перераспределение дислокаций, формирование и миграцию границ.

#### **12.4.1. Процессы возврата и рекристаллизации при нагреве в карбидных фазах твердых сплавов**

Основным показателем, характеризующим особенности протекания процесса спекания, является усадка спрессованного образца, свидетельствующая о его уплотнении при нагреве. Экспериментальные данные по усадке твердых сплавов при спекании позволили сделать ряд выводов относительно влияния различных факторов на процессы спекания [91, 96]. Рост зерен фазовых составляющих твердых сплавов, формирование микроструктуры и характер взаимодействия между фазами в процессе спекания также детально изучены и описаны в работах [91, 115].

В данном разделе мы рассмотрим вопросы формирования тонкой структуры фазовых составляющих твердых сплавов в процессе спекания, которым в литературе уделено значительно меньше внимания, хотя общая дефектность материалов перед спеканием, а также виды и взаимодействие несовершенств, имеющих в кристаллической решетке фазовых составляющих твердых сплавов, определяют внутреннюю энергию данной системы и являются движущей силой процесса спекания. Присутствующие в структуре компонентов твердых сплавов несовершенства (дислокации, вакансии, границы с разным углом разориентации и др.) оказывают влияние на процессы структурообразования в сплавах, так как искажения геометрии решетки и возникающие поля напряжений вызывают изменения кинетики, а в ряде случаев и механизма фазовых и структурных превращений.

При изучении явлений возврата в карбидных составляющих твердых сплавов достаточно наглядным является метод исследования уширения рентгеновских линий, ис-

пользованный для анализа изменений тонкой структуры WC-фазы в процессе твердофазного спекания [107, 111].

Известно, что явление возврата свойств при нагреве деформированного материала приводит к перестройке созданных при наклепе несовершенств строения: преобразованию колоний вакансий в дислокационные петли; аннигиляции дислокаций; перемещению дислокаций с образованием новых конфигураций и с формированием субгранц. К сожалению, данные по возврату ширины рентгеновских линий не позволяют сделать выводы о механизме явления, однако могут характеризовать кинетику процесса и косвенно свидетельствовать о возврате накопленной энергии и уменьшении энергии Гельмгольца системы.

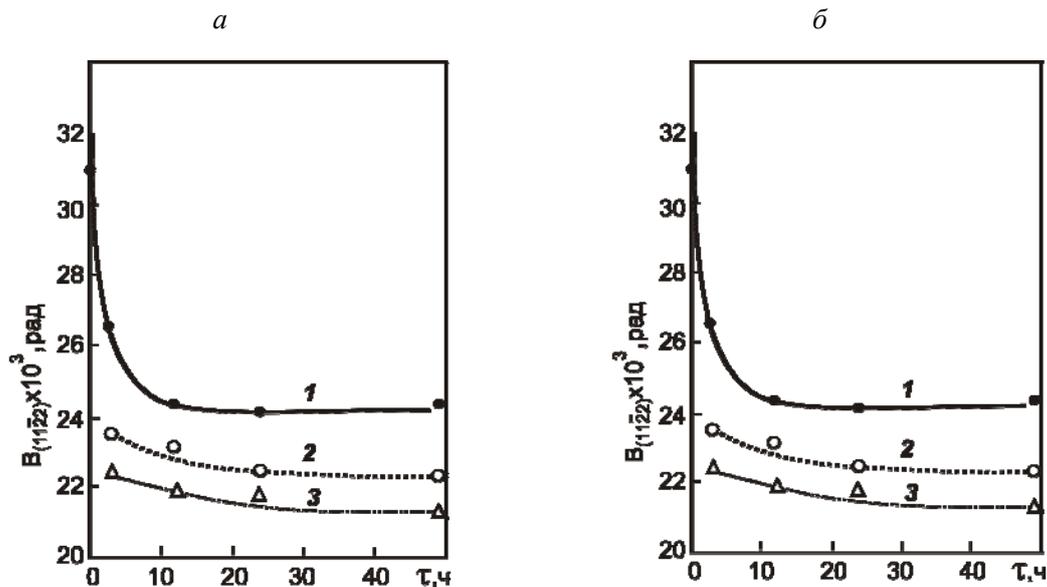


Рис. 12.37. Изменение ширины рентгеновской линии  $(11\bar{2}2)$  WC-фазы образцов, изготовленных по низкотемпературной (а) и высоко-температурной (б) технологиям после предварительного спекания в разных условиях:  
 1 – 1050°C (3, 12, 24, 48 ч); 2 – 1050°C (3, 12, 24, 48 ч) + 1250°C;  
 3 – 1050°C (3, 12, 24, 48 ч) + 1250°C (12 ч)

В работах [107, 111] исследовали смеси с кобальтом порошков карбида вольфрама, полученного по низко- и высокотемпературной технологии, характеристики которого приведены в [96]. При спекании кинетика «изотермического уменьшения» ширины рентгеновской линии  $(11\bar{2}2)$  молотых порошков карбида вольфрама носит различный характер и процесс совершенствования структуры (рис. 12.37) WC протекает с различной интенсивностью. В образцах, изготовленных по низкотемпературной технологии, изменение ширины линий  $(11\bar{2}2)$  WC-фазы при температуре спекания 1050 °C заканчивается за 12 ч, и она составляет 22 % от первоначальной ширины. В высокотемпературных образцах уменьшение ширины линии  $(11\bar{2}2)$  WC более значительно – около 50 % от первоначальной ширины и продолжается при увеличении выдержки спекания вплоть до 24 ч. Однако при этом структура высокотемпературного WC продолжает оставаться более дефектной, т. е. сохраняется различие в тонкой структуре, полученное при размоле. Дополнительное спекание образцов при 1250 °C (в течение 3 и 12 ч) вызывает более значительное сужение линии  $(11\bar{2}2)$  WC-фазы в «высокотемпературных» образцах. Разная интенсивность процесса совершенствования структуры

порошков WC, полученных по разным режимам, приводит к тому, что после предварительного спекания при 1250 °С они характеризуются близкой степенью совершенства структуры. Исследования размера зерен WC-фазы в спеченых образцах показали, что в условиях твердофазного спекания происходит рост зерна (при 1250 °С в 5–10 раз), особенно значительный в высокотемпературном WC. Последнее связано с микродеформациями кристаллической решетки, которые в высокотемпературном карбиде вольфрама достигают больших значений.

Температурные зависимости ширины рентгеновских линий и характеристик тонкой структуры молотых порошков карбида вольфрама, приведенные на рис. 12.38, свидетельствуют о частичном снятии несовершенств кристаллического строения до рекристаллизации и имеют вид, свойственный зависимостям для чистых металлов. Незначительные изменения в структуре WC наблюдаются при температурах отжига до 400 °С.

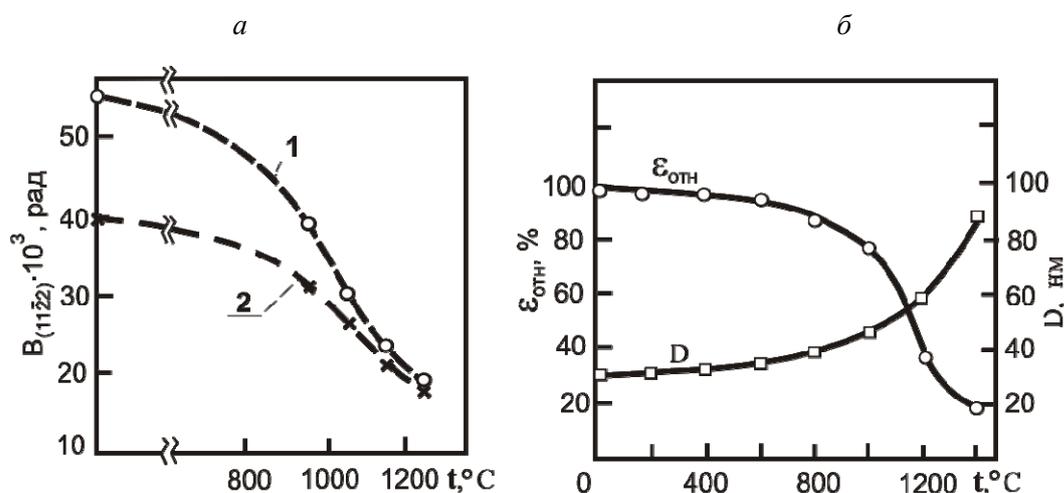


Рис. 12.38. Зависимость от температуры отжига:

*а* – ширины рентгеновской линии  $B(11\bar{2}2)$  WC (время размолы – 96 ч) образцов изготовленных по высокотемпературной (1) и низкотемпературной (2) технологиям;

*б* – микродеформации решетки  $\varepsilon_{отн}$  и размера блоков  $D$  (время размолы – 2 ч)

В интервале 400–1000 °С происходит заметное уменьшение микродеформаций решетки и рост блоков. Основная часть микродеформаций снимается при 1000–1200 °С, как это имеет место при отжиге металлов. Однако даже при отжиге в течение 16 ч при 1400 °С часть микродеформаций решетки сохраняется.

Размеры кристаллитов постепенно возрастают от 25 нм в исходных порошках до 70 нм при 1400 °С.

Для выявления влияния кобальта на процессы возврата в WC-фазе сплавов в условиях твердо- и жидкофазного спекания исследовали образцы, изготовленные из смесей WC + 20 % Co и из карбида вольфрама без кобальта [111]. Данные рис. 12.39 свидетельствуют о том, что в условиях твердофазного спекания наличие кобальта способствует более быстрому совершенствованию тонкой структуры карбида вольфрама, что особенно четко проявляется при низких температурах спекания (1050 °С).

Дополнительное спекание образцов при более высокой температуре (1250 °С) еще более снижает уровень дефектности в карбидной фазе, но не приводит к нивелированию ширины рентгеновских линий. При окончательном спекании при 1360 °С образцов без кобальта в структуре WC сохраняется заметное различие не только в зависимости

от технологии получения карбида вольфрама, но и от режимов предварительного спекания. В присутствии кобальта эти различия нивелируются.

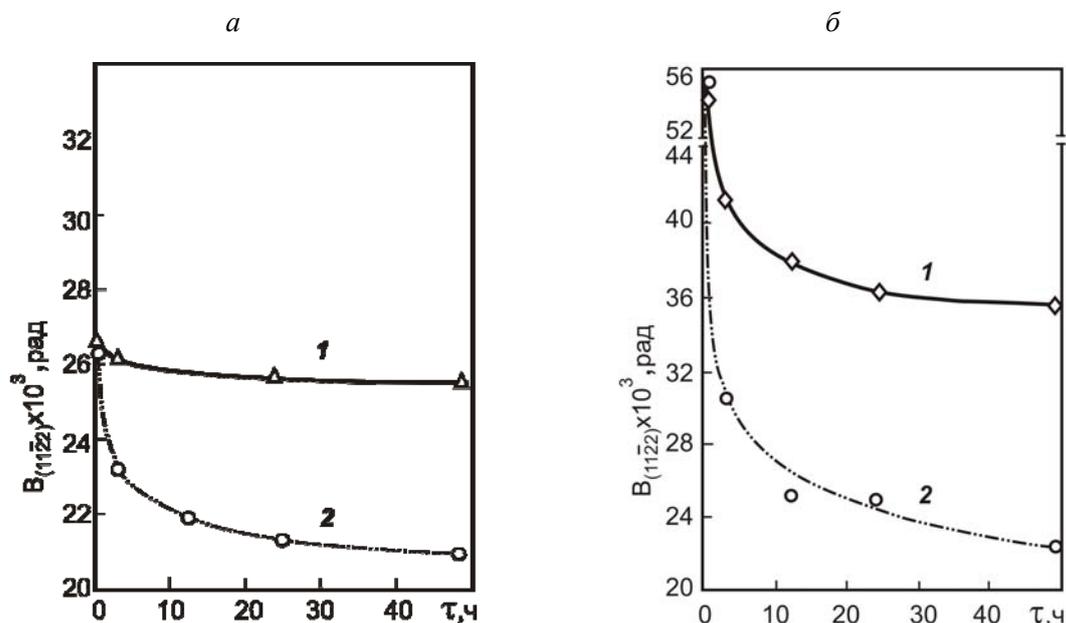


Рис. 12.39. Зависимость ширины рентгеновской линии  $V(11\bar{2}2)WC$  фазы в образцах после твердофазного спекания без кобальта (1) и с кобальтом (2) при  $1050^\circ C$  от времени спекания: а – низкотемпературная серия; б – высоко-температурная серия

В табл. 12.9 приведены значения ширины рентгеновской линии  $V(11\bar{2}2) \times 10^3$ , рад, WC-фазы в сплаве и WC, спекенного без кобальта, на стадии окончательного спекания (числитель – низкотемпературная серия, знаменатель – высокотемпературная серия).

Таблица 12.9

Значения ширины рентгеновской линии  $V(11\bar{2}2) \times 10^3$  рад WC-фазы

Условия предварительного спекания	Спекание без Co	Спекание с Co	Окончательное спекание без Co*
$1050^\circ C$ , 3 ч	20,7/27,0	18,0/18,3	19,4/23,4
$1050^\circ C$ , 3 ч + $1250^\circ C$ , 3ч	19,5/24,0	16,6/16,8	
$1050^\circ C$ , 3 ч + $1250^\circ C$ , 12 ч	15,2/20,4	16,2/16,1	

Примечание. Ширину линий измеряли после удаления из образца кобальта.

\* Кобальт удален после предварительного спекания.

Чтобы разделить эффект влияния кобальта на процесс формирования тонкой структуры карбида вольфрама на стадии предварительного и окончательного спекания, был проведен специальный опыт: после предварительного спекания из образцов сплавов WC-Co удаляли кобальт и дальнейшее спекание проводили без него. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что влияние кобальта проявляется на стадиях и твердофазного, и жидкофазного спекания, а особенно сильно – в образцах на основе высокотемпературного карбида вольфрама. По-видимому, в присутствии кобальта

структура карбида вольфрама достигает состояния, близкого к равновесному при данной температуре. Следует отметить, что уже на стадии твердофазного спекания в сплаве после охлаждения возникают термические напряжения, которые могут оказывать дополнительное влияние на процесс формирования его структуры.

Механизм влияния кобальта на совершенствование тонкой структуры WC-фазы в сплаве на стадии твердофазного спекания пока не совсем ясен. Влияние связывающей фазы можно объяснить, по-видимому, исходя из представления об «активированном» спекании сплавов. Односторонняя диффузия вольфрама и углерода в связку сопровождается образованием повышенной концентрации избыточных вакансий по границам зерен WC и увеличением энергии Гельмгольца системы; это приводит к уменьшению концентрации дефектов WC-фазы в результате взаимодействия дислокаций с избыточными вакансиями.

Результаты исследования возврата при отжиге в карбиде титана и твердых растворах (Ti, W)C разного состава приведены на рис. 12.40. В качестве исходных служили порошки, подвергнутые интенсивному размолу в шаровых мельницах в одинаковых условиях. Вследствие различной пластичности порошки с разным соотношением TiC : WC после размолы отличались степенью дефектности структуры. Более хрупкие порошки – TiC и (Ti, W)C с 30 % WC характеризовались наименьшими искажениями кристаллической решетки и медленным возвратом ширины рентгеновских линий с увеличением температуры отжига. В более пластичных порошках твердых растворов с соотношением TiC:WC, равным 50:50 и 30:70, этот процесс протекает более интенсивно. При 1400 °C ширина рентгеновских линий всех исследованных твердых растворов одинакова.

Процессы рекристаллизации в (карбидах тугоплавких металлов изучены недостаточно, хотя температурный уровень рекристаллизации является важной характеристикой, определяющей границы и возможности их рациональной эксплуатации при высоких температурах. Изучение процесса рекристаллизации тугоплавких карбидов имеет важное значение при отработке режимов их спекания.

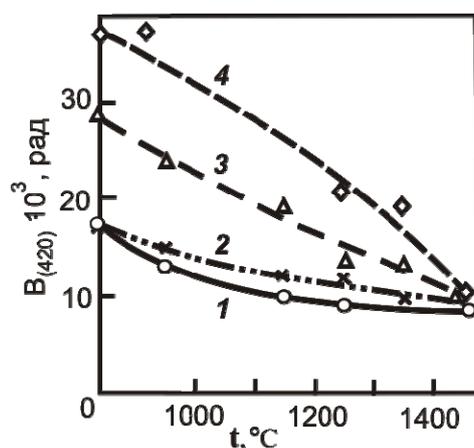


Рис. 12.40. Зависимость ширины рентгеновской линии  $B_{(420)}$  от температуры отжига молотых порошков TiC и твердых растворов (Ti, W)C разного состава, % (по массе):  
 1 – TiC; 2 – 70TiC + 30WC; 3 – 50TiC + 50WC; 4 – 30TiC + 70WC

В работах С.С. Горелика методами рентгеноструктурного анализа исследован процесс рекристаллизации в карбидах WC и TiC, а также в слржных карбидах. (Ti, W)C, (Ta, W)C и (Ti, Ta, W)C с разным соотношением бинарных соединений, в том

числе ненасыщенных (однофазных) и пересыщенных – (стареющих сплавах). Для деформации карбидов их предварительно спекали и применяли поверхностный наклеп образцов обдиркой на шлифовальном круге. Последующие изменения при нагреве исследовали в этом поверхностном слое. Некоторые образцы готовили с использованием связующего металла (кобальта). Характеристики процессов рекристаллизации карбидов по данным С.С. Горелика приведены в табл. 12.10.

Таблица 12.10

*Характеристики процессов рекристаллизации карбидов WC и TiC*

Образец	Содержание связи, % (объемн.)	$T_P^H$ , К	$T_{ПЛ}$	$\frac{T_P^H}{T_{ПЛ}}$	E, кДж/моль
WC горячепрессованный	–	1570	2870	0,55	318
WC спеченный	–	1570	2870	0,55	318
WC + Co	0,5	1520	2870	0,53	284
	5	1500	2870	0,52	276
	20	1420	2870	0,49	242
TiC + Co	5	1780	3500	0,51	552
	10	1730	3500	0,49	552

Процесс рекристаллизации карбидов тугоплавких соединений имеет ряд характерных особенностей. Температура начала рекристаллизации карбидов более высокая (0,5–0,6  $T_{ПЛ}$ ), чем у металлов (0,4  $T_{ПЛ}$ ). Эффективная энергия активации рекристаллизации относительно невелика и примерно такая же, как у твердых растворов на основе металлов. Добавки кобальта в качестве связующего металла заметно снижают температуру рекристаллизации карбидов. У сложных карбидов  $T_P^H$  линейно растет с повышением в них концентрации более тугоплавкого металла. Так, при уменьшении молярной концентрации WC в сложном карбиде (Ti, W)C с 44 до 30 и 25 %  $T_P^H$  повышается соответственно с 1400 до 1450 и 1500 °С.

Наложение на рекристаллизацию распада пересыщенных твердых растворов смещает  $T_P^H$  к более высоким температурам, как и в случае пересыщенных твердых растворов на основе металлов. С увеличением пересыщения количество дисперсной фазы и эффект повышения  $T_P^H$  возрастают.

Горелик С.С. объясняет особенности процесса рекристаллизации в тугоплавких карбидах и дает рекомендации по повышению его температурного уровня. Он считает, что отдых и рекристаллизация в тугоплавких карбидах протекают в основном как процессы собирательной рекристаллизации блоков, основной движущей силой которой является стремление к уменьшению зернограничной энергии. Роль объемной энергии (энергии дислокаций внутри блоков, ускоряющей рекристаллизацию) мала и, очевидно, тем меньше, чем более хрупок материал. Эта особенность процесса рекристаллизации, а также более высокие энергии связи в тугоплавких соединениях по сравнению с чистыми металлами, являются причинами более высокого температурного уровня их рекристаллизации.

Следует, однако, отметить, что предположение относительно малой роли объемной упругой энергии дислокаций в деформированных карбидах переходных металлов не подтверждается данными работ [116, 117, 118], в которых детальные исследо-

вания тонкой структуры карбидов после размола показали наличие значительных микронапряжений, сравнимых по величине с микронапряжениями в сильно наклепанных металлах.

Таким образом, температурный уровень рекристаллизации хрупких материалов можно повысить, вводя в твердый раствор элементы и соединения, повышающие прочность межатомных связей, а также путем легирования, при котором возникает пересыщенный раствор, распадающийся при рекристаллизационном отжиге и создающий гетерофазность с устойчивой против коагуляции равномерно распределенной дисперсной фазой.

Дислокационную структуру в деформированном состоянии можно, по-видимому, изменять, варьируя температуру деформации. Пластическая деформация при температурах выше и ниже порога хрупкости должна по-разному сказываться на дислокационной структуре. Можно предполагать, что материал, деформированный при температуре несколько выше  $T_{хр}$ , будет обладать более низкой  $T_P^H$  чем деформированный при  $T < T_{хр}$ .

#### **12.4.2. Структура и состав кобальтовой фазы в твердых сплавах, особенности фазовых переходов $\alpha \leftrightarrow \beta$ при нагреве и охлаждении**

Связующая фаза твердых сплавов ( $\gamma$ -фаза) представляет собой твердый раствор металлов IV–VI групп (в зависимости от марки сплава) и углерода в кобальте. В процессе спекания и последующего охлаждения формируются характерные особенности кобальтовой фазы, к которым прежде всего следует отнести состав (соотношение  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций, количество растворенных металлов и углерода), размер зерна и тонкую структуру.

Состав кобальтовой фазы твердых сплавов определяется конкретными условиями охлаждения, скоростью распада твердых растворов на основе кобальта и содержанием углерода в сплавах. Величины предельной растворимости карбида вольфрама в кобальте в твердом состоянии по данным разных авторов различны [92, 108, 109]. На основании анализа литературных данных сделан вывод [92], что величина 10 % (по массе) приближается к истинной растворимости карбида вольфрама в кобальте при температуре затвердевания эвтектики  $\gamma + WC$ . Количество растворенного, вольфрама в кобальтовой фазе изменяется в зависимости от содержания углерода в сплаве: от 2–3 % W при высоком содержании углерода (в пределах двухфазной области) до 9–10 % при низком содержании углерода. На рис. 12.41 представлена зависимость периода решетки  $\beta$ -Co от содержания растворенного карбида вольфрама [23]. Эту зависимость можно использовать для рентгенографического определения состава кобальтовой фазы твердых сплавов WC–Co на основании данных о параметрах решетки связующей фазы.

В связи с противоречивостью экспериментальных данных разных авторов относительно изменений периода решетки твердого раствора вольфрама и углерода в кобальте в зависимости от состава, представляют интерес исследования, предпринятые в работе [104]. Измерения, проведенные на кубической и на гексагональной модификациях кобальтовой фазы, показали, что период решетки твердых растворов значительно возрастает при увеличении содержания и вольфрама, и углерода. При стехиометрическом отношении вольфрама и углерода (WC) в кобальтовой фазе вклад углерода в увеличение периода решетки кобальтовой фазы оказался больше, чем вклад вольфрама. Для кубической модификации зависимость периода решетки от содержания углерода и вольфрама определяется выражением:  $a = a_0 + 0,00014 X_w + 0,004 X_c$  (нм), где  $a$  – период ре-

шетки твердого раствора;  $a_0$  – период решетки кубической модификации чистого кобальта,  $a_0 = 0,3542$  нм;  $X_w$  и  $X_c$  – содержание вольфрама и углерода в твердом растворе, % (по массе).

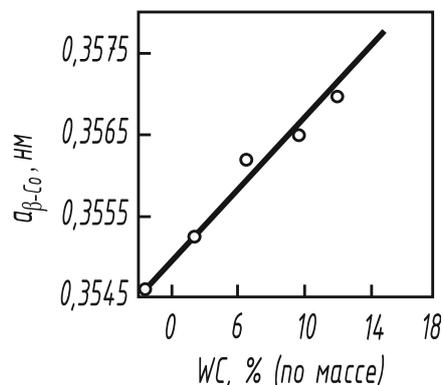


Рис. 12.41. Зависимость периода решетки  $a_{\beta-Co}$  от содержания растворенного WC

Прямые, вычисленные на основе выражения для раствора вольфрама в кобальте и для раствора вольфрама и углерода в стехиометрическом отношении (WC) в кобальте приведены на рис. 12.42 и сопоставлены с данными других авторов.

Свойства связующей фазы (магнитная проницаемость, электрическое сопротивление, точка Кюри, твердость) зависят от концентрации растворенных вольфрама и углерода. Поэтому изменение периода решетки кобальтовой фазы в твердых сплавах при различных режимах их получения может свидетельствовать об изменении их свойств.

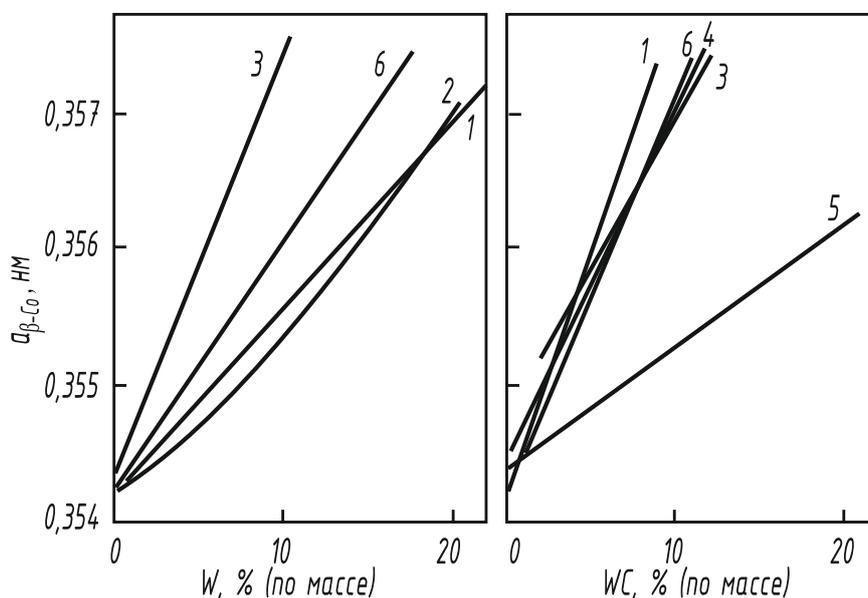


Рис. 12.42. Зависимость периода решетки  $a_{\beta-Co}$  от содержания вольфрама и вольфрама и углерода по данным:

- 1 – Вильбранда и Виланда, 1975 г.; 2 – Пфау, Рикса, 1953 г.;  
3 – Нисияма, 1962 г.; 4 – Миеси, 1966 г.; 5 – Фукатсу, 1961 г.; 6 – Йонсона, 1973 г.

Другой характеристикой кобальтовой фазы в твердых сплавах, тесно связанной с их физико-механическими свойствами, является размер зерна. В ряде работ, посвя-

ценных рентгенографическому исследованию связующей фазы, установлено, что кобальтовая фаза имеет крупнозернистое строение (от 8 мкм до 1 мм). Размер зерна кобальтовой фазы зависит от состава сплава (содержания кобальта), зернистости карбидной фазы, температуры и длительности спекания, условий охлаждений и пр. При этом размер зерна связующей фазы может оказывать значительное влияние на механические свойства сплавов, например, на сопротивление поперечному изгибу при повышенных температурах (по данным Сузуки).

Относительно тонкой структуры кобальтовой фазы твердых сплавов данных в литературе очень мало. Наибольший интерес представляют такие характеристики, как ДУ и угол разориентации между областями когерентного рассеяния рентгеновских лучей, наличие которых обусловлено мартенситным характером фазовых превращений в кобальте. Эти дефекты кристаллического строения, с одной стороны, могут быть связаны с технологическими особенностями изготовления сплавов (например, с чистотой исходных компонентов, количеством растворенных элементов в кобальтовой фазе, условиями спекания и охлаждения сплавов, степенью деформации и релаксации напряжений, дополнительной термической обработки и др.); с другой стороны, эти характеристики субструктуры кобальтовой фазы, как и размер зерна, должны оказывать влияние на характер пластической деформации кобальтовой фазы и, таким образом, влиять на физико-механические свойства твердых сплавов.

Первые попытки определить деформационные ДУ в кобальтовой фазе твердых сплавов сделаны А.Е. Ковальским и Л.Х. Пивоваровым. Для сопоставления исследовали образцы технического кобальта, твердого раствора  $Co + 2,5\%$  (по массе)  $WC$ , а также кобальтовую фазу сплавов  $VK15$  и  $VK25$ . В результате не удалось обнаружить изменения вероятности деформационных ДУ при растворении в кобальте вольфрама и углерода. Значительное возрастание концентрации ДУ наблюдалось в кобальтовой фазе твердых сплавов  $VK$  по сравнению с кобальтовой фазой аналогичного состава, но не взаимодействующей с карбидом вольфрама.

Угол разориентации блоков мозаики зависит от содержания кобальта в сплаве и температуры спекания. При увеличении содержания кобальта от 15 до 25 % (по массе) и возрастании температуры спекания от 1380 до 1500 °С наблюдалась большая степень разориентации блоков мозаики.

Формирование особенностей структуры кобальтовой фазы в значительной степени определяется мартенситным характером фазовых переходов. Аллотропическое превращение в кобальте сопровождается искажениями кристаллической структуры. Степень превращения и дефектность фаз могут изменяться в зависимости от термических условий обработки. Это превращение полностью завершается при нагреве. При охлаждении превращение г.ц.к.-модификации в г.п.у., как правило, не осуществляется до конца и некоторое количество г.ц.к.-фазы сохраняется при комнатной температуре. В кобальтовой фазе сплавов при охлаждении количество стабилизированной высокотемпературной модификации ( $\beta-Co$ ) может достигать ~100 %.

Относительное количество модификаций кобальта в образцах при одинаковом размере зависит прежде всего от температуры обработки и не зависит от времени выдержки при постоянной температуре. В крупнозернистом материале превращение проходит почти полностью, в то время как в мелкозернистом и в порошках сохраняется значительное количество  $\beta$ -модификации. В работе Оуэна установлено, что независимо от размера зерна кобальт, закаленный с температуры более 1000 °С в воду, состоит из обеих фаз, т. е. высокотемпературный отжиг стабилизирует кубическую фазу.

Используя рекристаллизационные отжиги образцов кобальта при различных температурах, авторы [106] получали различную микроструктуру и разное количество ос-

таточного аустенита, что оказывало значительное влияние на механические свойства кобальта (прочность при растяжении и относительное удлинение). Прочность при изгибе твердых сплавов WC – 25 % Co (по массе) повышали [118] путем определенной термообработки (дополнительный нагрев спеченных образцов при 1100 и 740 °С). Так как образцы после термообработки содержали  $\beta$  и  $\alpha$ -модификации, улучшение механических свойств авторы связывали с ростом зерна кобальтовой фазы.

Влияние температуры, среды отжига и характеристик исходных порошков кобальта на степень аллотропического превращения и рекристаллизацию, а также на свойства спеченных образцов детально изучено в работе [36]. Подтверждаются выводы о том, что механические свойства кобальта связаны в значительной степени с сосуществованием при комнатной температуре г.ц.к.- и г.п.у.-модификаций кобальта и что важным фактором является стабильность высокотемпературной фазы при комнатной температуре. Спекание порошков кобальта разной зернистости приводит к изменению их фазового состава (рис. 12.43, 12.44).

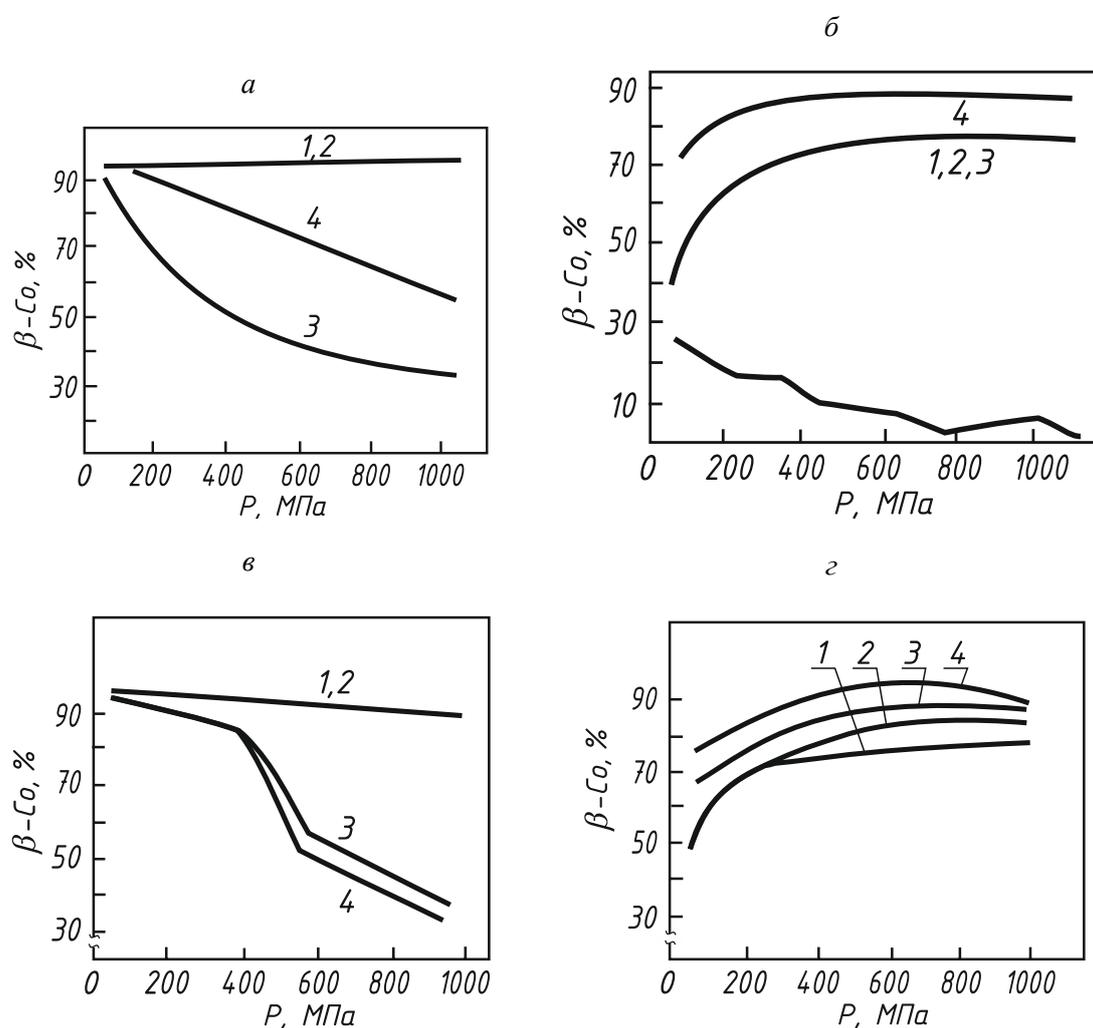


Рис. 12.43. Зависимость содержания  $\beta$ -Co в порошках от давления прессования и температуры спекания:  
 а, б – спекание в вакууме; в, г – спекание в водороде; а, в –  $d_3 = 1,5 \text{ мкм}$ ; б, г –  $d_2 = 10 \text{ мкм}$ ;  
 1 – 700 °С; 2 – 800; 3 – 900; 4 – 1100 °С

При спекании в вакууме ультратонких порошков (1,5 мкм) при низких температурах (700–800 °С) количество  $\beta$ -фазы после охлаждения достигает 95–100 %. Оно резко уменьшается до 30–50 % после спекания при более высоких температурах (900–1000 °С). Рентгеновские данные показали, что в образцах, спеченных при 900 и 1100 °С, произошла полная рекристаллизация. В тонких порошках (10 мкм) максимальное количество  $\beta$ -модификации (70–75 %) достигалось при 700, 800 и 900 °С (на образцах, подвергнутых максимальной пластической деформации при прессовании) и возрастало до 90 % в образцах, спеченных при более высокой температуре (1100 °С), даже при меньшей начальной пластической деформации. Это явление авторы связывают с отсутствием рекристаллизации в порошках при спекании, что установлено рентгеновским методом.

Спекание образцов в водороде дало аналогичные результаты, но рекристаллизация в ультратонких порошках наблюдалась при более низкой температуре спекания и при меньших давлениях прессования (т. е. при меньшей деформации порошка). Таким образом, количество стабилизированной при комнатной температуре высокотемпературной модификации уменьшается по мере прохождения рекристаллизации и роста зерна; при спекании в водороде восстановление порошков облегчает рекристаллизацию и способствует превращению при охлаждении. Специальными опытами [119] доказано, что оксиды кобальта, диспергированные в чистом кобальте, как и пористость в комнатных образцах, влияют на рекристаллизацию при спекании, а также  $\beta \rightarrow \alpha$ -переход при охлаждении, что приводит к увеличению пластичности материала.

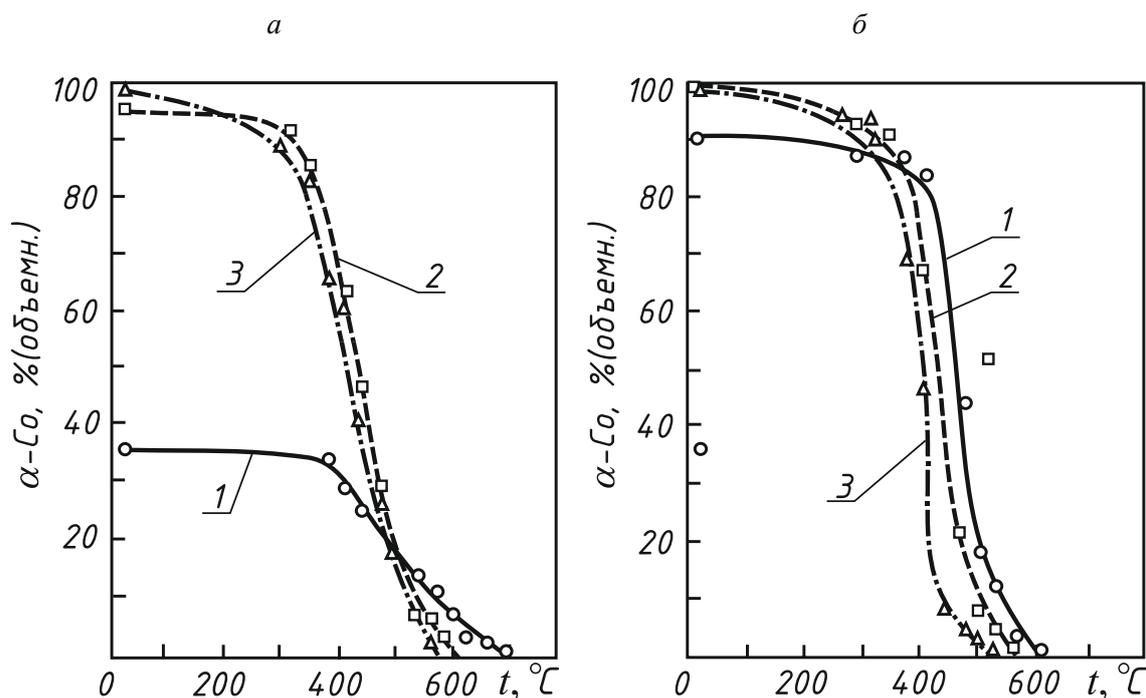


Рис. 12.44. Зависимость содержания  $\alpha$ -фазы в порошках кобальта от времени предварительного размола и температуры нагрева:

1 –  $\tau = 0$  ч; 2 – 48 ч; 3 – 96 ч

Соотношение фаз в кобальте значительно зависит также от числа циклов превращения, т. е. от того, сколько раз материал нагревался выше точки превращения. При циклической обработке поли кристаллических образцов кобальта возможно и увеличе-

ние, и уменьшение степени превращения, которая зависит от числа циклов превращения и от степени предшествующей холодной деформации.

Многokратная циклическая термообработка кобальта в интервале 20–550 °С (10–12 циклов), сопровождается увеличением количества несовершенств кристаллического строения и в кубической, и в гексагональной фазе [50]. Фазовый наклеп, возникающий при аллотропическом превращении, приводит к увеличению концентрации ДУ, плотности дислокаций, уменьшению среднего размера зерна и элементов субструктуры, увеличению среднего угла разориентации блоков мозаики. Упругие искажения, возникающие при повторяющихся фазовых переходах, вызывают расщепление все большего числа полных дислокаций, находящихся в г.п.у.-фазе; расщепление происходит не только на базисной плоскости, но и на плоскостях типа  $\{1012\}$  и  $\{1122\}$ . В процессе многokратной циклической термообработки в обеих фазах интенсивно развивается двойникование, что может привести к образованию политипных структур [119]. Длительная циклическая термообработка (20 циклов) приводит к релаксации дефектов кристаллического строения, накопленных после предыдущих циклов, и к восстановлению исходной степени совершенства структуры, в результате чего снижается концентрация ДУ и плотность дислокаций, уменьшается угол разориентации элементов субструктуры, увеличивается размер субструктурных составляющих и происходит их последующая коагуляция.

Многokратная циклическая термообработка увеличивает активность аллотропического превращения, что приводит к 100%-му превращению кобальта в г.п.у.-модификацию. Значительная пластическая деформация снижает активность последующего аллотропического превращения, в результате чего количество г.п.у.-фазы уменьшается.

Внутренние напряжения, возникающие под действием фазового наклепа, можно значительно уменьшить, подвергнув металл отдыху, а затем рекристаллизации. При высокотемпературном отжиге (1050 °С) часть дислокаций, находящихся в кубической фазе и приобретающих высокую подвижность, мигрирует к границам зерен и аннигилирует. Таким образом, общее количество дислокаций, участвующих в последующем превращении при охлаждении, уменьшается. Следствие этого – присутствие значительного количества кубической фазы в кобальте после охлаждения. Меняя время выдержки при температурах отдыха, рекристаллизации и при высокотемпературном отжиге, можно влиять на количество фаз в металле при комнатной температуре.

Практический интерес представляют вопросы о влиянии предварительной пластической деформации порошков кобальта на последующие процессы фазовых переходов. Температуры прямого и обратного мартенситного превращения в значительной степени будут определяться дефектностью кристаллической структуры металла, характер которой зависит от степени предварительной пластической деформации.

Исследования [109, 110], выполненные методом высокотемпературной рентгенографии на порошках кобальта, подвергнутых интенсивному размолу, показали, что деформация их при размолу активизирует процессы перехода при нагреве, снижая температуры начала ( $A_s$ ) и конца ( $A_f$ ) обратного мартенситного превращения. Причина этого – образование большого количества деформационных ДУ в г.п.у.-фазе, которые являются зародышами г.ц.к.-фазы и соответственно стимулируют превращение. Исследование фазового перехода в порошках кобальта при охлаждении показало, что после нагрева до 700 °С мартенситное превращение в порошках, подвергнутых размолу перед нагревом, практически не происходит. Незначительное количество  $\alpha$ -фазы (9 %) наблюдалось в порошках исходного оксалатного кобальта лишь при 100 °С. Стабилизация высокотемпературной фазы в предварительно деформированных порошках кобальта

объясняется высокой дефектностью и дисперсностью кристаллической структуры  $\beta$ -Co, полученного из деформированного мартенсита ( $\alpha$ -Co).

Исследования образцов, спеченных при разных температурах из порошков кобальта, отличающихся дефектностью структуры, показали (рис. 12.45), что чем выше эта температура, тем больше стабилизируется высокотемпературная модификация кобальта, составляя при 1150 °С ~90 %. При этом  $\beta$ -Co характеризуется более совершенной структурой, что связано с отжигом несовершенств кристаллического строения при повышении температуры спекания и, возможно, с процессами рекристаллизации в кубической модификации. Характерно, что при спекании при 400 и 700 °С высокотемпературная модификация кобальта проявляет наследственность в отношении степени дефектности структуры молотых порошков кобальта.

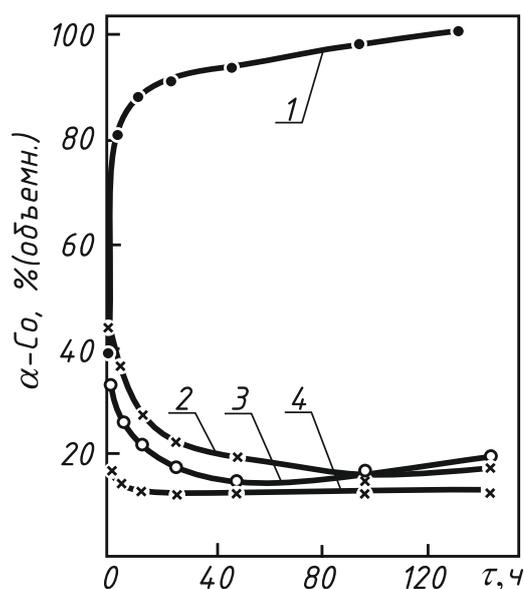


Рис. 12.45. Зависимость содержания  $\alpha$ -фазы в порошках оксалатного (а) и электролитического (б) кобальта, отличающихся временем предварительного размола  $\tau$ , от температуры спекания, °С: 1 – 20; 2 – 400; 3 – 700; 4 – 1150

При температуре спекания 1050 °С  $\beta$ -модификация имеет совершенную структуру независимо от степени деформации исходных порошков кобальта; это, по-видимому, свидетельствует о том, что при данной температуре прошла рекристаллизация в  $\beta$ -фазе кобальта. Для  $\alpha$ -модификации, имеющей более низкую температуру рекристаллизации, такая наследственность субструктуры наблюдается лишь при 400 °С.

### 12.4.3. Межфазовые микронапряжения в спеченных сплавах

Свойства твердых сплавов и их поведение в процессе эксплуатации определяются не только составом, особенностями микроструктуры и специфическими чертами субструктуры фазовых составляющих, но и характером взаимодействия между компонентами. Так как твердые сплавы – это композиционные материалы и состоят из фаз, значительно отличающихся температурными коэффициентами линейного расширения, то при охлаждении сплавов с температур спекания между фазами возникают микронапряжения, названные межфазовыми, или термическими. Их исследованию и расчету посвящен ряд работ, показавших, что термические микронапряжения могут вносить определенный вклад в прочные свойства сплавов.

Хотя между результатами, полученными разными авторами, имеются значительные расхождения, что может быть связано с применяемыми модельными представлениями и способами расчетов, к настоящему времени ряд выводов можно считать достаточно надежным. Установлено, что в спеченных вольфрамокобальтовых сплавах карбидная фаза находится под действием напряжений сжатия, а связующая фаза – под действием напряжений растяжения. С увеличением количества кобальтовой фазы в сплаве от 6 до 25 % (по массе) абсолютная величина микронапряжений в ней падает, а в карбидной фазе растет. При нагреве сплавов термические микронапряжения уменьшаются и при 400 °С практически снимаются.

В работах Бернарда при исследовании серии образцов с различным содержанием кобальта [0–52 % (объемн.)] и с различным размером зерен карбидной фазы показано, что оба фактора влияют на термические напряжения в фазах. В малокобальтовых сплавах в карбидной фазе наблюдали растягивающие напряжения, достигающие максимума при 10 % (объемн.) Со, что по мнению автора, связано с таким расположением фаз, при котором кобальт окружен карбидом вольфрама. С увеличением содержания кобальта преобладает такое расположение фаз, при котором, наоборот, карбид вольфрама окружен кобальтом, вследствие чего увеличиваются сжимающие напряжения в карбидной фазе.

В карбиде вольфрама, полученном после удаления кобальта, обнаружены остаточные напряжения сжатая, особенно значительные у образцов с исходным содержанием кобальта 15–30 % (объемн.). Автор предполагает, что эти напряжения присущи карбидному скелету. Они возникают в карбидной фазе при температурах выше эвтектической и не исчезают при удалении кобальта.

Величина термических напряжений зависит от размера зерен кобальтовой фазы. Как показано в работах Л.Х. Пивоварова, при росте зерен кобальтовой фазы термические микронапряжения несколько уменьшаются.

Более сложное напряженное состояние наблюдала А.В. Варакина в титано-вольфрамовых сплавах. Независимо от состава сплава (содержания карбида титана и кобальта) WC-фаза находилась под действием сжимающих напряжений (рис. 12.46), при этом величина микронапряжений в WC-фазе возрастала при увеличении содержания в сплаве и карбида титана, и кобальта.

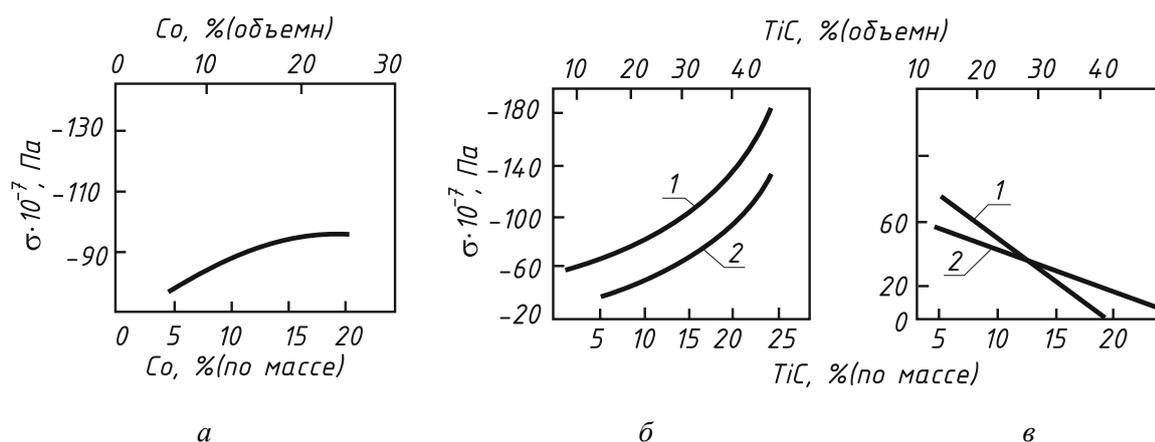


Рис. 12.46. Зависимость величины термических микронапряжений в карбидных фазах сплавов WC–TiC–Co от состава сплава до (1) и после (2) удаления кобальта из образца:  
а – в WC-фазе; б – в WC-фазе; в – в фазе (Ti, W)C

Фаза (Ti, W)C занимает промежуточное положение между кобальтом и карбидом вольфрама по температурному коэффициенту линейного расширения и модулю упругости. В сплавах при изменении отношения карбидных фаз в фазе (Ti, W)C изменяются не только величина термических микронапряжений, но и знак. При большем содержании карбида вольфрама в сплаве фаза (Ti, W)C находится под действием растягивающих напряжений, которые при уменьшении содержания WC уменьшаются, исчезают и затем становятся сжимающими.

Удаление Co-фазы из сплавов приводило к перераспределению напряжений (см. рис. 12.46, кривые 2), уровень микронапряжений снижался, однако характер зависимости от содержания карбидных фаз сохранялся. Снятие микронапряжений в сплаве T15K6 достигалось при температурах 700–800 °С.

#### 12.4.4. Особенности структуры поверхностных слоев спеченных твердых сплавов

Поверхностный слой изделий, изготовленных из различных металлов и сплавов, нередко заметно отличается от внутренних частей. Эти отличия могут заключаться в существовании напряжений разной величины и знака, в изменении тонкой кристаллической структуры, в появлении трещин, преимущественных ориентировок, диспергировании структуры, а также в изменениях фазового состава и пр. Во многих случаях указанные изменения поверхности могут простираться на некоторую глубину, образуя на образце поверхностный слой, отличающийся от сердцевины.

Образование при спекании твердых сплавов поверхностных слоев, отличающихся по характеристикам от центральной части спеченных изделий, отмечено в ряде работ. Наиболее характерно обогащение поверхностных слоев кобальтовой фазой. Так Кингери в образцах сплава WC + 7,5 % Co, спеченного в вакууме при 1370 °С в течение 1 ч, металлографически обнаружил толстый поверхностный слой кобальтовой фазы. Это явление, нашедшее в литературе название «выпотевания» жидкой связки на поверхность изделий, отмечено также В.И. Третьяковым у сплава (Ti, W)C + 40 % (объемн.) Co, спеченного в атмосфере водорода.

Увеличение количества связующей фазы на поверхности спеченных сплавов наблюдали А.Е. Ковальский и Л.Х. Пивоваров по усилению линий кобальта на рентгенограмме, полученной от поверхности образцов разного состава.

Другие изменения, характерные для поверхностных слоев спеченных твердых сплавов, касаются характеристик карбидной фазы. Так в работах А.Е. Ковальского обнаружено изменение соотношения интенсивности дифракционных линий карбида вольфрама при получении дифракционной картины с поверхности образца, наиболее заметное для отражения от плоскости (001). Эффект обнаружен у вольфрамокобальтовых сплавов разного состава и оказался чувствительным к неоднородности образцов в пределах одной марки сплава и одного режима спекания, к продолжительности размолла смесей, к изменению температуры восстановления вольфрама и карбидизации, к изменению температуры спекания.

Характерно, что в образцах спеченного (без кобальта) карбида вольфрама описанное выше явление не установлено. Обнаруженный эффект изменения интенсивности линий карбидной фазы был объяснен наличием текстуры карбида вольфрама в поверхностном слое.

Подобные результаты получены и для сплавов группы ТК. Однако характер изменения рентгенограммы поверхностных слоев сплавов марок ТК и ВК был различным. В сплавах TiC–WC–Co с усилением линии (001) абсолютная интенсивность линии (100)

уменьшалась, а в сплавах WC–Co, наоборот, увеличивалась. Глубина слоя, в котором имеют место изменения, не превышала 0,1 мм у вольфрамокобальтовых сплавов и 100 мкм у титановольфрамовых.

Для поверхностных слоев титановольфрамовых сплавов характерно также изменение соотношения карбидных фаз, что проявляется в изменении интенсивности рентгеновских линий от WC и (Ti,W)C и зависит от температуры спекания образцов. Изменение этого соотношения Крайнер связывает с изменением концентрации твердого раствора вольфрама в карбиде титана при увеличении температуры спекания. А.Е. Ковальский предположил, что при повышении температуры спекания усиливается «вытекание» на поверхность образца жидкой кобальтовой фазы с растворенным в ней преимущественно карбидом вольфрама. При охлаждении поверхность образца оказывается обогащенной кобальтовой фазой и выкристаллизовавшимся из нее карбидом вольфрама. В любом случае отношение интенсивности линий на поверхности спеченных сплавов карбидных фаз может характеризовать температурные режимы спекания. В связи с этим в работах А.Е. Ковальского предложено использовать отношение характеристики линии (1011) WC-фазы и линии (200) фазы (Ti, W)C в качестве характеристики неоднородности титановых сплавов после спекания.

В работах Л.Х. Пивоварова разработана методика рентгенографического контроля технологических режимов спекания сплавов WC–TiC–Co и использована для исследования различных технологических факторов, влияющих на неоднородность сплавов. За рентгеновский показатель, характеризующий различие поверхностных слоев по составу, было выбрано отношение интенсивности линии (200) титановой фазы на поверхности изделия и в центре. С помощью предложенной методики на примере сплавов WC–TiC–Co были установлены технологические факторы, влияющие на интенсивность миграции жидкого цемента к поверхности образца и образование поверхностных слоев: температура спекания, содержание кобальта и углерода в сплаве, условия нагрева, зернистость исходной смеси порошков, структура спеченных сплавов. Показано, что на поверхности спеченных образцов имеется слой глубиной до 20 мкм, состоящий из карбида вольфрама и кобальта; ниже расположена область глубиной 10–15 мкм, обедненная кобальтовой фазой.

Зерна карбида вольфрама поверхностного слоя имеют преимущественную ориентировку: направление [0001] располагается перпендикулярно поверхности образца. Наличие слоев измененного состава и структуры на поверхности резовых пластин из титановольфрамовых твердых сплавов способствует повышению их износостойкости при неизменной прочности.

Приведенные результаты о неоднородности спеченных сплавов по сечению следует рассматривать двояко. С одной стороны, поверхностные слои, обладающие специфическими характеристиками структуры и свойствами, сами по себе представляют объект исследования с точки зрения использования их для повышения механических свойств сплавов, особенно в неплетачиваемых пластинах. С другой стороны, при изучении структурных характеристик фазовых составляющих твердых сплавов следует проводить тщательную подготовку образцов для исследования, чтобы исключить влияние поверхностного слоя.

В области структурообразования и физики прочности порошковых тел получил дальнейшее развитие и был практически реализован принцип повышения прочности и вязкости разрушения поликристаллических веществ с увеличением дисперсности и фрагментарности структуры. Модифицированные методы изготовления позволяют при наличии соответствующих мелкодисперсных и чистых исходных веществах достигать среднего размера зерна менее 1 мкм, что существенно сказывается на из-

носостойкости материала. В результате расширения технологических возможностей процессов производства твердых сплавов и развития методов порошковой металлургии создана новая группа твердых сплавов на основе тугоплавких соединений. В настоящее время можно считать установленным тот факт, что свойства спеченных твердых сплавов определяются не только их составом (соотношение и состав карбидной и связующей фаз, наличие избыточных фаз) и микроструктурой (размер зерна фазовых составляющих и стереологические характеристики), но и особенностями внутризеренной структуры компонентов твердых сплавов (субмикроструктура). При этом свойства спеченных сплавов в значительной степени определяются характеристиками исходного сырья и промежуточных продуктов твердосплавного производства, которые изменяются в зависимости от различных технологических параметров. Твердые сплавы отличаются тем, что при связывании диспергированных частиц твердой фазы (карбид вольфрама и т. д.) фазой металла, обладающей определенной вязкостью, обеспечивается высокий уровень прочностных и вязкостных характеристик получаемых сплавов, например, на основе карбидов. В твердых сплавах на основе карбида вольфрама при использовании чистой металлической фазы в качестве связующей фазы получение высококачественных материалов определяется технологическими путями и возможностями получения мелкозернистых твердых сплавов с матричной структурой.

В процессе обработки инструмента из твердых сплавов (заточки, доводки) на его рабочих гранях образуется поверхностный слой, состояние которого определяет стойкость инструмента и качество поверхности обрабатываемых деталей. Проблема повышения износостойкости инструментов и деталей машин, работающих в условиях высоких скоростей резания, давления и температур, связана с решением таких вопросов, как упрочнение твердых сплавов. В настоящее время широкое распространение получили методы поверхностного и объемного упрочнения.

При обработке поверхности твердых сплавов происходит необратимое превращение механической энергии в тепловую. При этом часть механической энергии расходуется на снятие поверхностного слоя, часть необратимо рассеивается в виде тепла, а часть переходит в поглощенную скрытую энергию и сохраняется в обрабатываемом материале в виде структурных дефектов. Поверхностных слоях происходит ряд структурных изменений, приводящих к их упрочнению. Состояние поверхностных слоев характеризуется величиной, знаком и характером распределения остаточных напряжений, изменениями тонкой кристаллической структуры и др.

Из полученных результатов видно, что исходные порошки и промежуточные материалы, участвующие в производстве сплавов по двум технологиям, отличаются шириной рентгеновских линий. Порошки, полученные реакционным спеканием имеют значительно более узкие линии, чем исходные порошки, полученные карботермическим методом. Применение высоких температур карбидизации способствует получению порошков с более совершенной кристаллической структурой: размер блоков мозаики примерно вдвое больше, чем у карботермических порошков.

Размол существенно изменяет дисперсность и структурные характеристики порошков карбида титана. Ширина рентгеновских линий резко возрастает, особенно у порошков полученных реакционным спеканием. При анализе по методу ГАФРЛ порошков WC после размола установлено сильное измельчение блоков мозаики и возрастание микроискажений решетки.

Следует отметить, что измельчение блоков мозаики и деформация кристаллической решетки протекает более интенсивно у реакционноспеченных порошков, в результате чего порошки WC после размола приобретают более дефектную структуру.

При спекании сплавов ширина линии WC-фазы уменьшается, что свидетельствует о росте совершенства кристаллической структуры этой фазы при воздействии температуры, причем значительное сужение ширины линии заметно уже при предварительном низкотемпературном спекании порошков сплавов. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в высокотемпературных сплавах, в результате чего резкое различие в дефектности структуры порошков WC, наблюдаемое после размола, значительно уменьшается. Однако, если на стадии предварительного спекания различие в структуре WC-фазы в сплавах, изготовленных по разным вариантам, еще сохраняется, то в результате окончательного спекания оно практически нивелируется.

Таким образом, применение рентгеноструктурного анализа к исследованию материалов твердосплавного производства на различных стадиях технологического процесса позволяет установить зависимость структуры порошков от технологических параметров и выбрать контролируемые режимы их изготовления.

Особенности структуры WC и Co, их склонность к образованию специальных дефектов и способность к пластической деформации – это те факторы, которые определяют их поведение в процессе изготовления и эксплуатации сплавов.

Особенностью фаз внедрения, в частности твердых растворов на основе карбида вольфрама, является наличие двух подрешеток возможных положений для атомов-узлов и междоузлий, которые могут замещаться атомами разных сортов, а также содержать структурные вакансии, то есть оставаться незанятыми. При этом концентрации атомов в подрешетках могут непрерывно изменяться в некоторых интервалах, а их чередование по узлам и междоузлиям может характеризоваться появлением упорядоченных структур. В однофазных растворах карбидов, даже при составах далеких от границы растворимости или при ограниченной растворимости, могут происходить процессы возникновения концентрационных неоднородностей с большой степенью ближнего порядка в них.

Особенность процесса виброизмельчения – усталостный режим разрушения обрабатываемого материала, который происходит вследствие высокой частоты и относительно малого ударного импульса действия мелющих тел. В результате в измельчаемом материале постепенно накапливается упругая энергия, которая при достижении определенного предела приводит к разрушению частиц. Установлено, что с увеличением времени вибропомола размер блоков уменьшается одинаково для направлений  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ . Исследования размеров кристаллов свидетельствуют об их изотропности в разных направлениях. Этот факт, а также отсутствие смещения линий (111), (200) и их симметричный характер позволяют сделать заключение, что вероятность и деформационных и двойных ДУ в порошках WC очень низкая.

Механизм влияния кобальта на совершенствование тонкой структуры в WC-фазе в сплаве на стадии твердофазного спекания пока не совсем ясен. Влияние связующей фазы можно объяснить, по-видимому, исходя из представления об «активированном» спекании сплавов. Односторонняя диффузия вольфрама и углерода в связку сопровождается образованием повышенной концентрацией избыточных вакансий по границам зерен WC. Это приводит к уменьшению концентрации дефектов WC-фазы в результате взаимодействия дислокаций с избыточными вакансиями. К упрочняющим характеристикам относят изменение напряжений I рода в WC- и Co-фазах, напряжений.

После жидкофазного спекания в вакуумной печи структура твердосплавного материала имеет равномерное распределение карбидных частиц в матрице, прослеживаются поры.

Таким образом, температура начала рекристаллизации хрупких материалов типа карбид зависит от предыстории, наследственности технологического процесса изготов-

ления твердого сплава. Более хрупкие реакционноспеченные порошки WC с увеличением температуры отжига характеризовались большими искажениями кристаллической решетки и быстрым возвратом ширины рентгеновских линий.

При ходе электроспекания в более спокойном темпе на межчастичных контактах имеют место поверхностная диффузия и растекание, наблюдающиеся и при обычном спекании. Экспериментально установлено, что вклад контактного сопротивления между частицами больше при более продолжительном размоле WC – Co и влияние этого фактора продолжается длительное время. Кратковременность электроспекания предупреждает протекание нежелательных реакций между активированными размолом порошками и газами воздушной среды, так что детали из этих порошков можно спекать на воздухе.

Ультразвуковой метод отличается отсутствием высоких температур в зоне обработки и эффективен при обработке тугоплавких соединений повышенной хрупкости. По данным И.И. Муханова и В.Н. Филимоненко, в результате ударного воздействия абразива при ультразвуковой обработке в поверхностных слоях твердых сплавов наблюдается фрагментация зерен WC-фазы, образование остаточных напряжений первого и второго рода, структурные превращения в кобальтовой фазе. Наибольшее влияние на величину напряжений первого и второго рода оказывала амплитуда колебаний.

Теория упрочнения ультразвуком еще окончательно не разработана, но доказано воздействие переменных напряжений различной частоты и амплитуды на макроструктуру материалов, макро- и микронапряжения, углы разориентации блоков мозаики, плотность дислокаций, распад пересыщенных твердых растворов [96]. Исследования влияния воздействия переменных напряжений различной частоты на структуру и механические свойства твердых сплавов (BK15) показали сложную зависимость происходящих в них изменений от условий воздействия ультразвуком. Это привело авторов к выводу, что часть изменений в структуре материала характеризует упрочняющее действие ультразвуковых колебаний, а часть – разупрочняющее.

Это позволило выделить способ контроля связи между изменением микроструктуры, в том числе тонкой, а также между структурой и физико-механическими свойствами твердосплавного материала системы «WC–Co», заключающийся в контроле интегральной ширины рентгеновских линий на всех стадиях технологического процесса. Для осуществления эффективного процесса изготовления твердосплавного материала на основе карбида вольфрама необходимо и достаточно, чтобы отношение ширины рентгеновских линий порошков WC после размолва с Co более чем в 5 раз превышало ширину рентгеновских линий исходных порошков карбида вольфрама.

## 13. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЦОВ

Радиальные резцы изготавливают методом штампования с последующей механической обработкой.

Для армирования применяют вставки в виде пластинок из твердого сплава. Пластины бывают с плоской выпуклой цилиндрической или выпуклой клиновидной передней поверхностью и других форм. Режущие кромки различают прямо- и криволинейные. Наиболее прочны пластинки с выпуклой передней поверхностью и округлой формой режущей кромки. Требуемая высота пластинки твердого сплава (мм) [22]:

$$H_a = H_o + m_3 a_u + h_k, \quad (13.1)$$

где  $H_o$  – глубина паза, в который впаивается пластинка, мм;  $m_3$  – число переточек за время работы инструмента;  $a_u$  – износ пластинки по высоте на одну заточку, мм;  $h_k$  – средняя высота контакта резца с породой, мм.

Толщина вставки выбирается из условий прочности на изгиб и на удар. Пластины минимальной толщины (4 мм) применяют для резцов при сверлении угля ручными горными сверлами, пластинки толщиной 4–5 мм – для буровых резцов по породе, пластинки толщиной 5–8 мм и вставки диаметром 8–10 мм – для резцов очистных и проходческих комбайнов. Пластины, вставки должны быть расположены так, чтобы твердый сплав работал на сжатие. Для этого надо знать положение результирующей нагрузки на инструмент, которое у резцов зависит от толщины стружки, крепости породы и степени затупления. При резании крепких пород и включений, а также при динамической нагрузке для увеличения прочности режущих кромок следует: применять отрицательный угол, равный 20–25°; производить притупление лезвия; размещать пластинки, штыри в закрытом или полузакрытом пазе.

### 13.1. Виды пазов при армировке

Пазы применяют открытые, закрытые и полузакрытые (рис. 13.1).

Открытый паз (рис. 13.1, а) применяют в резцах очистных комбайнов и горных сверл. В открытом пазе пластинку припаивают к корпусу инструмента одной широкой плоскостью и одной торцевой. Преимущество такого паза – простая и дешевая технология механической обработки [23].

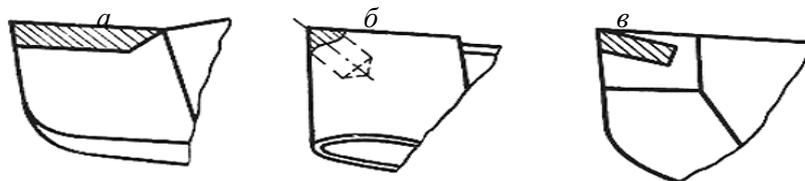


Рис. 13.1. Виды пазов:

*а – открытый; б – закрытый; в – полузакрытый*

Закрытый паз (рис. 13.1, б) применяют главным образом в резцах для разрушения пород средней крепости.

В закрытом пазе пластинку твердого сплава, вставку припаивают всеми сторонами к корпусу инструмента, поэтому обеспечивается более высокая прочность пайки. Кроме того, армировка находится в условиях всестороннего сжатия, что благоприятно сказывается на ее прочности. К недостаткам закрытого паза следует отнести возмож-

ность появления опасных внутренних напряжений, а также усложнение и удорожание технологии производства.

Полузакрытый (рис. 13.1, в) паз в чистом виде применяется редко. Одна из его разновидностей – широко применяемый паз с технологическим «усиком», который служит для удержания пластинки твердого сплава при пайке методом погружения.

Пластинки твердого сплава в режущем инструменте крепятся методом пайки. Для снижения внутренних напряжений в пластинках твердого сплава применяют следующие методы: увеличивают толщину корпуса инструмента под пластинкой твердого сплава; изготавливают корпус инструмента из стали, способствующей снижению внутренних напряжений; используют низкотемпературные пластичные припои; производят закалку инструмента; применяют релаксационный отпуск; используют компенсационные прокладки.

Из технологических методов снижения внутренних напряжений наиболее эффективным является закалка режущего инструмента после пайки. Многолетний опыт применения закалики на Краснолучском машиностроительном заводе показывает, что закалка инструмента с использованием для этого раствора селитры ( $\text{KNO}_3$  – 50 % и  $\text{NaNO}_3$  – 50 %) снижает внутренние напряжения в пластинках твердого сплава до минимальных значений.

Закалка – процесс термической обработки, обуславливающий получение структур аустенита, мартенсита, троостита. Закалка состоит из нагрева стали до температуры выше или в интервале структурных превращений, выдержки при этой температуре и последующего охлаждения обычно с большой скоростью в водных растворах солей  $\text{NaOH}$  или  $\text{NaCl}$  в воде, масле, расплавленных солях или на воздухе. Для инструментов, изготавливаемых из стали 35ХГСА, применяют так называемую изотермическую закалку.

Изотермическая закалка – нагрев стали до температуры на 30–50 °С выше интервала структурных превращений, выдержка при этой температуре, охлаждение в среде с температурой на 30–100 °С выше начала мартенситного превращения для изотермического превращения аустенита и последующее охлаждение (вне этой среды) с заданной скоростью. Сталь 35ХГСА относится к группе сталей повышенной прокаливаемости. Подвергнутая изотермической закалке при температуре 870 °С, охлажденная в смеси калиевой и натриевой селитры при 280–310 °С с последующим охлаждением на воздухе, она приобретает следующие механические свойства: предел прочности при растяжении 1650 МПа, предел текучести 1300 МПа, ударная вязкость 40 Дж/см<sup>2</sup>. Закалку армированных инструментов производят сразу после пайки, без повторного нагрева. Отпуску армированный инструмент не подвергают.

В настоящее время применяют два метода пайки: ручной (с нагревом ТВЧ в многоместных индукторах) и полуавтоматический (на установке с использованием метода погружения в расплавленный припой).

При ручной пайке выполняют следующие операции. На поверхность паза насыпают флюс. В качестве флюса обычно применяют техническую буру ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), прокаленную, размолотую в порошок и просеянную через сито. Затем в паз укладывают прокатанную и обезжиренную сетку или пластинку пермаллоя (если применяют компенсационные прокладки), пластинки припоя и твердого сплава. Подготовленное таким образом изделие вводят в индуктор и нагревают до полного расплавления припоя. После этого изделие выводят из индуктора и прижимают его к корпусу резца до затвердевания припоя, а боковые поверхности очищают от наплывов буры и припоя. Затем инструмент охлаждают до температуры 850–880 °С и производят термообработку. Если инструмент термообработке не подвергается (например, буровые резцы), то режущую часть резца помещают в сухой горячий песок до полного остывания, что предотвращает образование трещин в пластинках твердого сплава.

При пайке методом погружения пластинка твердого сплава предварительно закрепляется на корпусе резца опрессовкой технологического «усика» или конденсаторной сваркой. В таком виде резец устанавливают головкой вниз в держателе полуавтоматической установки (их на установке 80 шт.). Установка сообщает инструменту непрерывное перемещение по кругу с заданной скоростью, а на отдельных участках – вверх и вниз. В процессе движения головка резца последовательно проходит сначала через щелевой индуктор, где нагревается до 1070–1100 °С, а затем погружается в тигель с расплавленным припоем, покрытым сверху слоем расплавленного флюса. Выйдя из тигля, резец остывает на воздухе до температуры закалки (880–920 °С), освобождается из держателя и попадает по конвейеру в селитровую ванну. Температура расплавленных солей (KNO<sub>3</sub> – 50 % и NaNO<sub>3</sub> – 50 %) в ванне поддерживается в пределах 240–280 °С. Резцы находятся в ванне 8–12 мин, откуда автоматически перегружаются в водяную промывочную ванну. При пайке погружением смачивание поверхностей припоем происходит без доступа воздуха, заполнение зазоров производится не только в результате капиллярного эффекта, но и под действием гидростатического давления. Установка позволяет легко контролировать и регулировать все параметры процесса пайки. Все это обеспечивает высокое и стабильное качество паяного соединения.

### 13.2. Припой и флюсы

Для соединения твердых сплавов с корпусами горных инструментов можно использовать припой (табл. 13.1).

В качестве флюса используют обезвоженную техническую буру. В последнее время стали широко применять флюсующие смеси буры и борной кислоты с добавками разных солей для повышения активности флюса (табл. 13.2).

Таблица 13.1

*Механические показатели припоев*

Припой	Температура плавления, °С	Прочность паяного шва на срез, МПа	Коэф. растекаемости	Механические свойства	
				предел прочности при растяжении, МПа	относительное удлинение, %
Медь МО	1083	160	–	240	35
Латунь Л62	902	170	1,0	340	43
ПЛМнМц68-4-2	930	220	2,31	260	39
ПЛНКoМц49-9-0,2-0,2	955	250	1,52	480	25
ПЛНМцЖК1,5-0,75-0,15	893	210	2,24	460	25
ПЛНМц10-5	995	290	2,50	350	41
ПСр44	800	180	–	500	58

Свойства припоя должны обеспечить наиболее полное сохранение качества твердого сплава после пайки. Из используемых в настоящее время этому требованию в большей мере отвечают серебряные припои (например, ПСр44) [22]. Они пластичны при циклических нагрузках, обеспечивают весьма прочные соединения и хорошо смачивают все сплавы и металлы. Низкая температура плавления и высокая пластичность обеспечивают самые низкие напряжения в твердом сплаве после пайки. Однако вслед-

ствии дороговизны и дефицитности серебра эти припои в отечественной практике для пайки горных инструментов почти не применяются.

Таблица 13.2

*Состав флюсов*

Флюс	Состав, %					Температура действия, °С	Припои
	бура плавленная	борный ангидрид	фтористый кальций	фтористый калий	фторобораг калия		
Бура	100	–	–	–	–	800–1100	Медные
Флюс: № 209	–	35	–	42	23	600–1100	Серебряные
№ 284	–	25	–	35	40	500–850	Серебряные
№ 200	19	66	15	–	–	850–1150	Медные и латунные
№ 201	12	77	10	–	–	850–1150	Медные и латунные
№ 100	36,5	–	–	–	46,5	900–1100	На медной основе сплавов с малым содержанием кобальта

Широкое распространение получили медно-цинковые припои с присадками никеля, марганца, кремния и др. Эти присадки повышают прочность и надежность паяного соединения и улучшают механические и технологические свойства припоев. Из используемых в настоящее время этому требованию в большей мере отвечают припои ПЛНКоМц 49-9-0,2-0,2, ПЛНМцЮ-5 и ПЛМцЖК 1,5-0,75-0,15, содержащие никель, кобальт и марганец (остальное латунь).

### **13.3. Особенности технологии изготовления тангенциальных поворотных резцов**

В настоящее время на проходческих и очистных комбайнах большое распространение получили так называемые тангенциальные поворотные резцы. Для повышения стойкости к износу их в головной части армируют твердосплавными вставками обычно из сплавов группы ВК. Однако эта мера не исключает контакта головной части стального корпуса резца с разрушаемой породой, а, следовательно, и ее изнашивания. Более того, эксплуатация показывает, что в большинстве случаев первопричиной выхода резцов из строя при работе по породам является истирание головной части их корпуса. Это приводит к обнажению и последующему скалыванию твердосплавной вставки.

Замена твердого сплава новыми материалами открывает ряд возможностей для повышения технико-экономических показателей работы режущего инструмента угледобывающих комбайнов:

- создание инструмента с более рациональными параметрами режущей части;
- создание более технологичной и менее материалоемкой армировки инструмента;
- повышение производительности комбайна на пластах сложного строения за счет ликвидации поломочных отказов армировки инструмента;
- снижение стоимости резцов за счет применения более дешевого армирующего материала.

Обобщая изложенное, можно сформулировать следующие требования к новым материалам для армирования инструмента угледобывающих комбайнов:

1. Создаваемые армирующие материалы должны обеспечивать улучшение показателей работы угледобывающих машин при выемке пластов сложного строения за счет ликвидации или значительного уменьшения поломоочных отказов армировки, имеющих место при применении твердых сплавов типа ВК.

2. По сравнению с вольфрамокобальтовыми сплавами новые материалы должны обладать более высокими прочностными характеристиками при ограниченном снижении износостойкости. При ориентировочной оценке требуемых физико-механических свойств новых материалов можно исходить из равенства расходов вновь создаваемых и серийных режущих инструментов.

3. Новые армирующие материалы могут использоваться в виде армирующих изделий, а также напыляемых и наплавляемых покрытий, обеспечивающих создание необходимых геометрических форм и размеров режущей части.

4. В процессе разрушения угольного пласта режущими инструментами, армированными новыми материалами, искрообразование не допускается. Новые армирующие материалы должны быть пригодны для работы с периодической подачей воды в зону контакта резца с массивом.

5. Способ армирования резца новыми материалами:

- должен быть технологичен и приемлем для массового производства инструмента;
- должен обеспечивать возможность рациональной термообработки державки резца из стали 35ХГСА до твердости HRC 42–47.

6. Удельная стоимость инструмента (руб./т.) с новыми материалами не должна превышать удельную стоимость серийного твердосплавного инструмента.

В результате анализа наблюдений за резцами, установлено, что одним из видов отказа резцов, является износ корпуса вокруг твердосплавной вставки с последующим выломом ее из паза. Причиной данной поломки явилась существенная разница в твердости поверхности и износостойкости корпуса резца, изготавливаемого из легированной стали, и твердосплавной вставки, выполненной из сплава вольфрамокобальтовой группы.

При работе таких резцов по мягким породам и углю, существенная разница в износостойкости корпуса резца и твердосплавной вставки приводит к тому, что корпус резца изнашивается значительно быстрее, чем твердосплавная вставка, обнажает последнюю и создает условие ее вылома из гнезда резца.

Исходя из этих данных, в условиях предприятия ООО «Горный инструмент», были изготовлены опытные образцы тангенциального поворотного резца с режущим элементом из стали Х12МФ (табл. 13.3), работоспособность которых была подтверждена на очистном комбайне К-500 на ш. Комсомолец.

Таблица 13.3

*Химические свойства стали Х12МФ, %*

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V
1,45–1,65	0,1–0,4	0,15–0,45	до 0,35	до 0,03	до 0,03	11–12,5	0,4–0,6	0,15–0,3

Применение данной стали для производства матриц и пуансонов вырубных и проточных штампов, в связи с высокой твердостью после отжига, предопределил ее выбор для применения в качестве режущего элемента резца.

Также в целях увеличения износостойкости резца, за счет более высокой твердости после закалки и отпуска, в качестве материала корпуса была использована сталь 50ХФА.

Задачей новой конструкции [17] явилось снижение разницы между износостойкостью корпуса резца и режущего элемента, что обеспечивало самозатачивание резца по мере более или менее равного износа, как корпуса, так и режущего элемента.

Сущность предлагаемого резца (рис. 13.2) заключалась в том, что вставка запаиваемая в корпус резца, выполнялась из инструментальной стали.

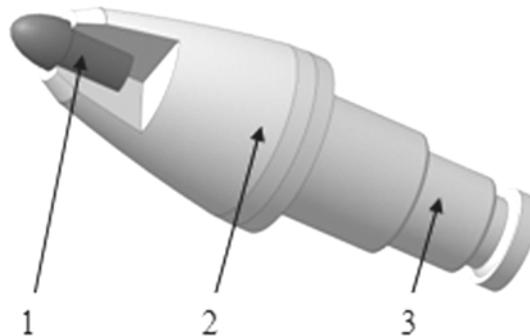


Рис. 13.2. Тангенциальный поворотный резец РШ 32-70/16Х со вставкой из износостойкой стали Х12МФ:  
1 – вставка; 2 – головная часть ТПР; 3 – хвостовая часть ТПР

Работает резец следующим образом: направленный на разрушаемый объект шнеком или короной комбайна, резец своей вставкой врезается в толщу породы (угля), отделяя стружку от массива, проворачиваясь вокруг собственной оси благодаря цилиндрическому исполнению хвостовика, по мере износа, как вставки, так и головной части резца, последний остается работоспособным до тех пор, пока не будет изношена вся вставка.

Это достигается тем, что вставка, выполненная из инструментальной стали будет изнашиваться пропорционально тому, как будет изнашиваться головная часть резца.

Ударная прочность стали значительно выше ударной прочности твердых сплавов вольфрамокобальтовой группы, поэтому применение данных резцов для работы по углю и углю с наличием твердых включений является перспективным.

В отечественной практике корпуса ТПР изготавливают за небольшим исключением из легированных сталей: хромоникелевых, хромоникельмолибденованадиевых, хромкремнемарганцевых [17].

Применение этих сталей в сочетании с соответствующими технологическими операциями способствует снижению напряжений в твердом сплаве, которыми армируют корпуса, и повышению прочностных показателей.

Наиболее широко применяемые марки сталей следующие: 30ХГСА, 35ХГСА. Для снижения напряжений в паяном соединении, без резкого охлаждения, рекомендуется применять стали мартенситного класса 38ХНЗМФА и 45ХНЗМФА, закаливающиеся на воздухе.

При температуре 200–300 °С, когда припой теряет пластичность, в сталях этого класса происходят мартенситные превращения, размеры пазов увеличиваются и тем самым снижаются или совсем устраняются термические напряжения. Аналогичный эффект получается у сталей перлитного класса 30ХГСА и 35ХГСА при изотермической закалке в селитровых ваннах после пайки.

Способность упрочняться на ту или иную глубину при одинаковом содержании углерода определяется влиянием легирующих элементов, но при небольших сечениях изделий это влияние менее заметно, а в деталях крупного размера у углеродистых и менее легированных сталей механические свойства значительно ниже.

Поэтому выбор марки стали зависит как от уровня требуемых свойств, так и от толщины изделия, для диаметра 50–75 мм – 40ХН, 30ХГСА. Перспективно применение хромоникельмолибденованадиевых и хромоникелевольфрамовых сталей.

Зарубежные производители, в частности компания «Kennametal» для системы «резцедержатель-втулка-резец» применяет различные материалы, представленные ниже.

В качестве материала резцедержателя (табл. 13.4) применяется конструкционная легированная сталь 17CrNiMo6 (российский аналог 20ХН2М, 20ХНМ).

Таблица 13.4

*Химические свойства стали 20ХН2М, %*

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu
0,15–0,22	0,17–0,37	0,4–0,7	1,6–2,0	до 0,035	до 0,035	0,4–0,6	0,2–0,3	до 0,3

Данная сталь характерна сохранением высокой твердости после отпуска, что обеспечивает износостойкость резцедержателю.

При производстве втулки резцедержателя (табл. 13.5) используется конструкционная легированная сталь X19NiCrMo4 (российский аналог 18Х2Н4МА).

Сталь применяется для ответственных деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности, вязкости и износостойкости.

Материалом для изготовления непосредственно самих резцов (табл. 13.6), является сталь 15В35 (российский аналог 30ХГФРЛ).

Особенностью изготовления корпусов ТПР, является применение литых заготовок, в связи с этим и была применена сталь для отливок. В целях повышения износостойкости горных инструментов их режущую часть оснащают металлокерамическими или наплавочными твердыми сплавами.

Таблица 13.5

*Химические свойства стали 18Х2Н4МА, %*

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu
0,14–0,2	0,17–0,37	0,25–0,55	4,0–4,4	до 0,025	до 0,025	1,35–1,65	0,3–0,4	до 0,3

Таблица 13.6

*Химические свойства стали 30ХГФРЛ, %*

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	Cu
0,28–0,36	0,2–0,6	0,8–1,25	до 0,3	до 0,04	до 0,04	0,5–0,9	0,05–0,1	до 0,3

В результате многочисленных испытаний резцов проведенных конструкторским отделом ООО «Горный инструмент», была выявлена следующая тенденция износа резцов: при работе резца по твердым породам (проходческие забои), как например песчаник, наблюдался контакт резца с массивом в пределах длины твердого сплава, т. е. изнашиванию подвергались лишь твердосплавная вставка и головная часть резца вокруг нее.

Было предложено выполнить резец разборным [17], то есть состоящим из стержня резца со вставкой и съемной втулки (рис. 13.3). Принятие данного решения позволяло решить ряд задач.

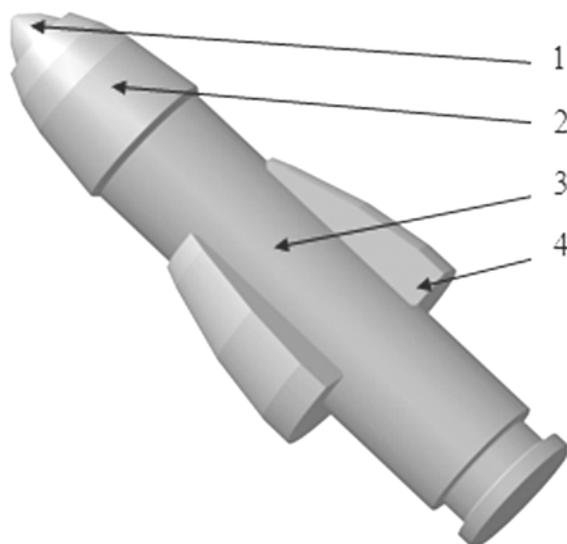


Рис. 13.3. Составной тангенциальный поворотный резец (РШС):  
1 – вставка; 2 – головная часть; 3 – хвостовая часть; 4 – съемная втулка

Самой опасной поломкой резцов, как известно, является излом корпуса в месте перехода головной части в хвостовую. Данная зона характеризуется как зона концентрации высоких напряжений. Использование разъемной конструкции исключает концентрацию напряжений в зоне перехода. Другой важной задачей явилось обеспечение более равномерной термообработки (закалка, отжиг) при производстве резцов. Идея использования сменных изнашиваемых стержней, позволяет уменьшить стоимость резца для потребителя, в виду сохранения исправной втулки. Соединение стержня резца с втулкой обеспечивалось конусным соединением, с углом конусности  $0-3^\circ$  (угол самоторможения).

Описанный резец успешно прошел испытания на угледобывающих предприятиях Кузбасса, в частности на ш. им. Кирова (2005г.). В период с 14.03 по 09.04.05г. на ш. им. Кирова проходили испытания резцов РШС.

Резцы были установлены на проходческий комбайн 12СМ18 (табл. 13.7) [17] в кутковой части барабана (общее количество резцов на барабане 56 шт.).

Выработка представлена угольной пачкой с присечкой аргиллита. За период испытаний было пройдено 114 м, при общем сечении выработки  $19,1 \text{ м}^2$ , таким образом, объем отбитого угля равен  $2177,4 \text{ м}^3$ .

Таблица 13.7

Технические данные комбайна 12СМ18

Параметры	Ед. изм.
Диаметр исполнительного органа, мм	915
Общая мощность, кВт	459
Скорость перемещения минимальная, м/мин	4,6
Количество оборотов исп. органа, $\text{мин}^{-1}$	50
Скорость резания, м/мин	170

При снятии с барабана комбайна резцы РШС оставались полностью работоспособными.

Низкая износостойкость корпуса тангенциальных резцов объясняется спецификой распределения микроструктуры и, как следствие, твердости используемого материала по длине корпуса резца [120].

Для исследований были взяты три резца: российский марки PC32 и два резца Q2AA австрийской фирмы «First-Alpina» консорциума «Sandvik» подобной геометрии, отличающиеся существенно более высокой износостойкостью. Химический состав материала корпуса резцов исследовали рентгенофлуоресцентным способом на спектрометре ED2000, микроструктуру различных зон корпуса резцов анализировали под микроскопом Zeiss Observer DIm. Замеры твердости проводили на твердомере Роквелла и универсальном твердомере Zwick/Roel ZHU. Поскольку данные приборы предназначены для измерения твердости только горизонтальных поверхностей материалов, для получения достоверных результатов анализируемые резцы подвергали специальной механической обработке в целях создания на них указанных поверхностей. Для определения твердости сердцевины резца каждая зона предварительно разрезалась в направлении, перпендикулярном его оси.

Замеры твердости показали, что по окружности корпуса резца PC32 твердость поверхности каждой зоны практически одинакова (рис. 13.4). В то же время по длине резца она распределена крайне неравномерно: максимальна ( $\sim 55$  HRC<sub>3</sub>) на самой широкой части корпуса (рис. 13.4, зона I) и минимальна ( $\sim 32$  HRC<sub>3</sub>) в его средней части (зона III), несколько больше в головной (зона IV). Причем зоны III, IV как раз и контактируют с разрушаемой породой в процессе эксплуатации, подвергаясь абразивному износу. Кроме того, твердость сердцевины корпуса резца PC32 (кривая 1, рис. 13.5) меньше, чем на поверхности (кривая 2) и также убывает по направлению к головной части.

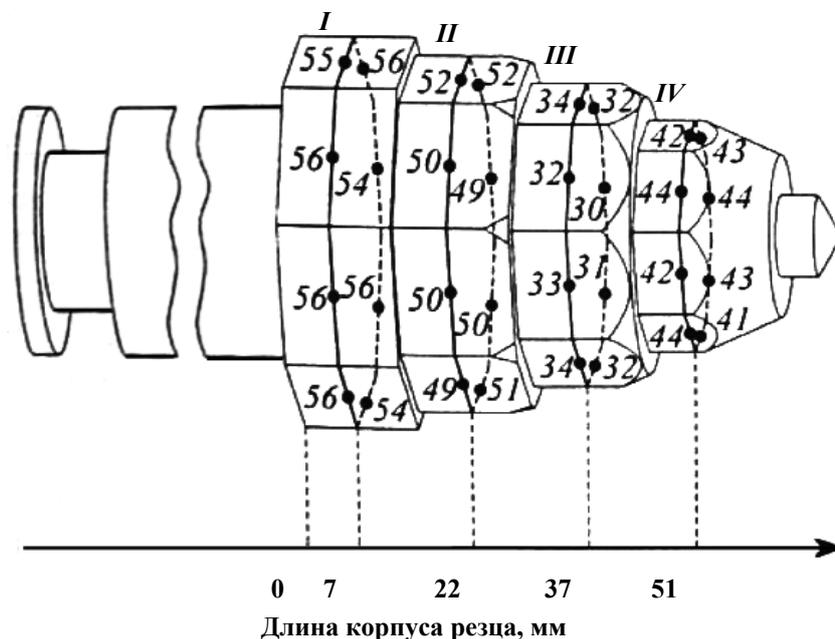


Рис. 13.4. Распределение твердости (HRC<sub>3</sub>) по длине головной поверхности резца PC32

Исследования корпуса резца Q2AA показали, что твердость поверхности по всей его длине остается неизменной (кривая 3) и имеет величину  $\sim 49$  HRC<sub>3</sub>, достаточную для обеспечения высокой износостойкости материала. Твердость в середине резца Q2AA также неизменна и составляет  $\sim 45$  HRC<sub>3</sub> (кривая 4).

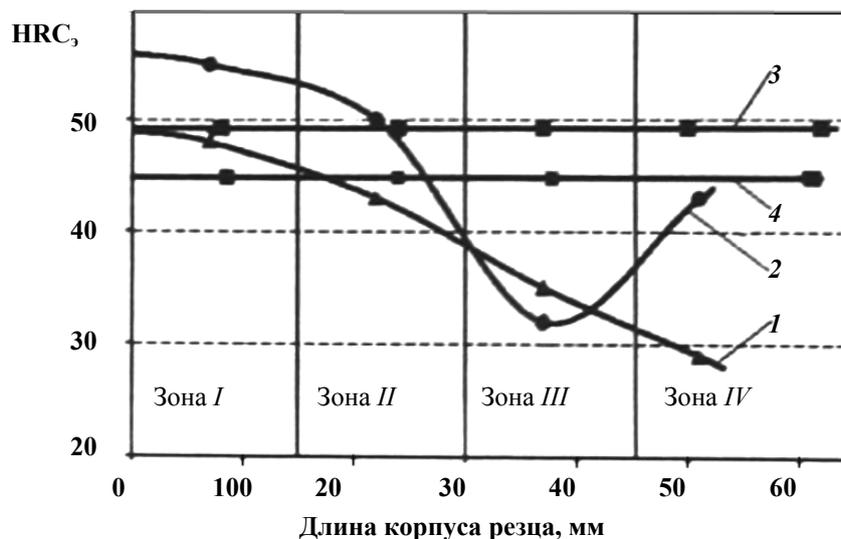


Рис. 13.5. Распределение твердости по длине резцов:  
 1 – в середине резца PC32; 2 – на поверхности резца PC32;  
 3 – на поверхности резца Q2AA; 4 – в середине резца Q2AA

Таким образом, исследования показали, что резцы марки PC32 имеют различную твердость корпуса по его длине, причем минимальная твердость наблюдается в головной части корпуса резца.

Низкая твердость и, как следствие, недостаточная износостойкость головной части корпуса резцов обусловлена закалкой материала этой зоны не на мартенсит, а на более мягкие сорбит и бейнит. Эта неоднородность появляется в процессе охлаждения перед изотермической закалкой изделий. Коническая форма резца приводит к неравномерному его охлаждению. В результате к этапу изотермической закалки изделие имеет разную температуру от твердосплавной вставки до хвостовика резца. Охлаждение не на воздухе, а в жидкой среде (расплаве соли) позволит получить одинаковую по всей длине изделия температуру и избежать появления неоднородности в структуре в процессе изотермической закалки.

Стойкость тангенциального инструмента зависит от стойкости твердосплавной вставки и стойкости корпуса. Эти факторы взаимосвязаны и определяют скорость износа резца. Наилучший результат достигается тогда, когда скорость износа твердосплавной вставки равна скорости износа головной части и износ происходит равномерно по всему периметру. Худший вариант, когда опережающий износ головной части приводит к «вымыванию» твердосплавной вставки и ее последующему выпадению.

До настоящего времени для производства корпуса тангенциальных резцов основными технологическими операциями являлись резание или штамповка. В зависимости от технологии производства корпус резца наследует свойственную этой технологии макроструктуру. Для производства корпуса резца, как правило, используется пруток, полученный методом прокатки. Макроструктура исходного материала содержит непрерывные волокна, направленные вдоль образующей и примерно равномерно распределенные по сечению (рис. 13.6) [55].

При производстве корпуса резца из этого материала методом резания часть волокон перерезается, они перестают быть непрерывными (рис. 13.7), а это, как известно, существенно снижает общую прочность корпуса. На режущей части резца волокна выходят на образующую рабочей поверхности (A) под углом ( $\gamma$ ). При последующей экс-

плутации резца вдоль поверхности ( $A$ ) действует сила трения ( $Q$ ), направление которой совпадает с направлением образующей. Очевидно, что это обстоятельство вызывает снижение прочности материала в направлении действия силы трения. Как показали результаты исследований, величина снижения прочности головной части резца пропорциональна синусу угла ( $\gamma$ ).



Рис. 13.6. Макроструктура материала перед обработкой

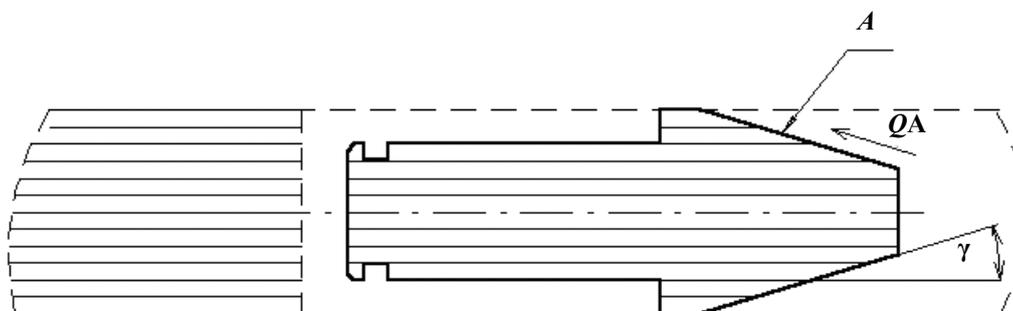
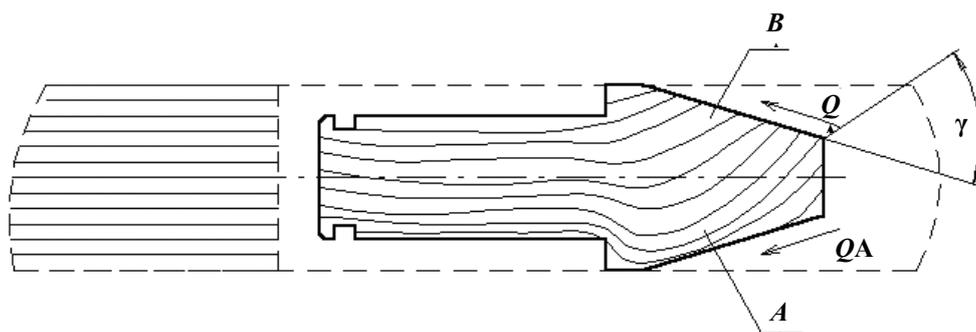


Рис. 13.7. Макроструктура корпуса резца, изготовленного точением заготовки

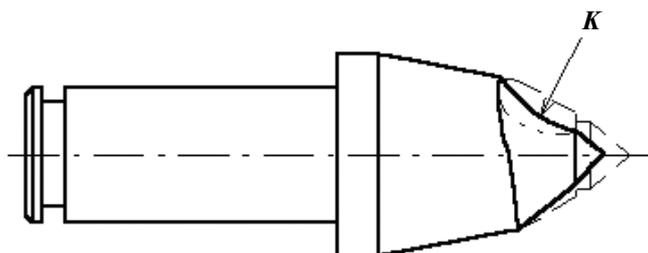
При производстве корпуса резца методом штамповки прутки деформируют, вызывая течение материала. При этом течение материала является неравномерным и преобладает направление, поперечное оси резца. При горячей штамповке волокна сохраняют свою непрерывность, а при холодной – нарушается непрерывность значительной части волокон металла.

На рис. 13.8 показана макроструктура, характерная процессу горячей штамповки. Макроструктура корпуса резца после горячей штамповки содержит две ярко выраженные зоны: зону ( $A$ ), где волокна уплотнены к поверхности и их направление совпадает с направлением силы трения ( $Q$ ), и зону ( $B$ ), где волокна удалены на более значительное расстояние, чем в зоне ( $A$ ), и направлены под углом  $\gamma$  к направлению силы трения ( $Q$ ). Износостойкость зоны ( $A$ ) значительно выше, чем зоны ( $B$ ). Таким образом, по периметру рабочей части изделия возникают две разнопрочные зоны – ( $A$ ) и ( $B$ ), наличие которых обуславливает неравномерный износ резца по периметру рабочей части. Это явление вместе с несоосностью рабочей части относительно хвостовика является причиной одностороннего износа. Как показано на рис. 13.9, в зоне ( $K$ ) образуется выработка в виде кратера или плоской поверхности. Резцы, износ которых приобретает характер одностороннего, перестают вращаться, их дальнейший износ происходит лавинообразно. Обычно, если на резцах проявляется односторонний износ, их заменяют сразу, не дожидаясь полного износа.



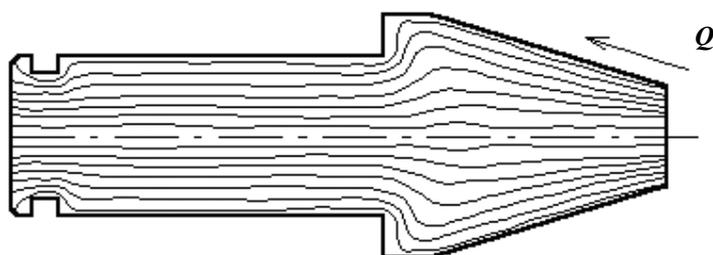
*Рис. 13.8. Макроструктура корпуса резца, изготовленного штамповкой заготовки*

За последние годы в ЗАО «Белтехнология и М» ([www.beltechnology.com/cutters](http://www.beltechnology.com/cutters)) разработана новая технология производства корпусов тангенциальных поворотных резцов – клиновой прокатки, которая относится к процессам горячего деформирования. При клиновой прокатке деформация вращающейся заготовки осуществляется в радиальном направлении. Такая схема воздействия на заготовку позволяет сформировать осесимметричную макроструктуру с непрерывными волокнами, где волокна уплотнены к поверхности и направлены вдоль образующей (рис. 13.10).



*Рис. 13.9. Резец с односторонним износом рабочей части*

Расположение волокон корпуса резца, полученного методом клиновой прокатки (рис. 13.10), указывает на возможность формирования макроструктуры, наилучшим образом удовлетворяющей условиям эксплуатации, которая позволяет достичь значительно более высокой прочности, чем при точении или штамповке.



*Рис. 13.10. Макроструктура корпуса резца, изготовленного клиновой прокаткой заготовки*

Для проверки сделанных выводов были проведены промышленные испытания горного инструмента, полученного клиновой прокаткой. Испытания проводились в шахтах ПО «Беларуськалий» (г. Солигорск) и на шахтах Донецкого угольного бассейна.

На шахтах ПО «Беларуськалий» испытывались резцы РКС-1, полученные методом резания и методом клиновой прокатки. В результате испытаний установлено, что износостойкость корпуса возросла в среднем на 30 %. В результате износ твердосплавной вставки стал опережать износ корпуса. Это позволило изменить конструкцию самого резца путем уменьшения угла его заострения с 28 до 22° (рис. 13.11). Уменьшение угла заострения резца способствовало снижению усилия резания в пределах от 5 до 10 %.



Рис. 13.11. Конструкция резца РКС-1, изготовленная по традиционной (а) и новой (б) технологиям

Результаты испытания резцов на ПО «Беларуськалий» были использованы при разработке резцов для очистных и проходческих комбайнов. Новая конструкция головной части резца имеет меньший на 30 % объем металла. На рис. 13.12 традиционная конструкция головной части резца (линия 2) совмещена с новой конструкцией (волнистая линия 1). Площадь максимального сечения рабочей части резца традиционной конструкции ( $S_2$ ) уменьшена относительно площади сечения резца новой конструкции ( $S_1$ ) на 60 %.

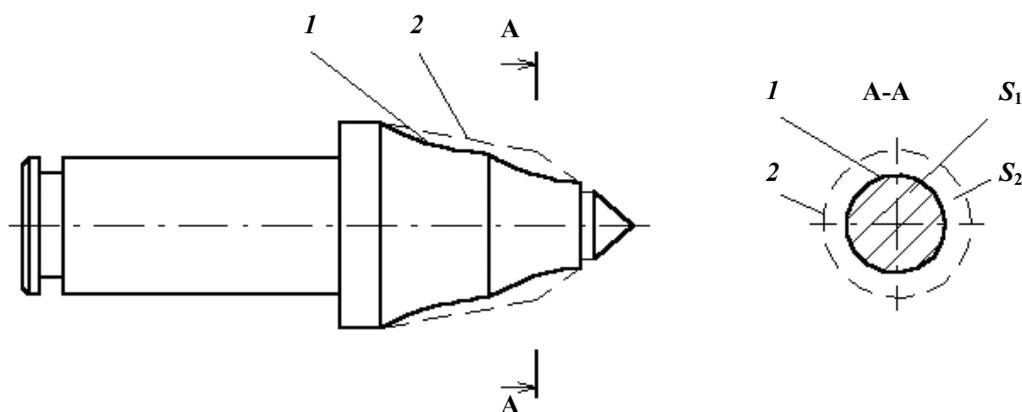


Рис. 13.12. Конструкция режущей части резца для угольных комбайнов:  
 контур 1 резца, изготовленного клиновой прокаткой;  
 контур 2 резца, изготовленного по существующим технологиям;  
 $S_1$  – площадь сечения рабочей части резца по контуру 1;  
 $S_2$  – площадь сечения рабочей части резца по контуру 2

Результаты испытаний, которые проводились на шахте Краснолиманская (Украина), показали, что стойкость новых резцов, корпуса которых были получены клиновой прокаткой, возросла более чем в два раза.

### 13.4. Особенности технологии изготовления буровых резцов

#### 13.4.1. Припой для пайки бурового инструмента

Припой ЛМцЖ 57-1,5-0,75 (табл. 13.7) – однослойный, выпускается в ленте толщиной 0,3 и 0,5 мм, рекомендуется для пайки с индукционным и электроконтактным

нагревом всех марок твердых сплавов, обеспечивает среднюю прочность паяных соединений инструмента, хорошо растекается по паяемым поверхностям в условиях флюсовой защиты боратнофторидными флюсами, в ряде случаев позволяет снизить уровень остаточных напряжений и повысить надежность работы инструмента. Температура пайки с применением этого припоя составляет 920–930 °С [121].

Припой МНМц 68-4-2 выпускается в ленте толщиной 0,6 мм или в слитке 50×250×350 мм, рекомендуется для пайки с индукционным или электроконтактным нагревом всех марок твердых сплавов, хорошо растекается по паяемым поверхностям, по сравнению с припоем ЛМцЖ 57-1,5-0,75 обеспечивает более высокую прочность паяного шва, но вызывает более высокий уровень остаточных паяльных напряжений в твердом сплаве.

Припой АНМц 06-4-2 выпускается в ленте толщиной 0,6 мм или в слитках 50×200×350 мм, рекомендуется для пайки при индукционном или электроконтактном нагреве соединений, работающих в тяжелых условиях с весьма нагруженным паяным швом малой протяженности. Применение наиболее целесообразно в сочетании с флюсом марки Ф100. Припой П102 порошковый, занимает особое положение по сравнению с предыдущими. Это обусловлено его медно-оловянной основой, обладающей наименьшей объемной усадкой (до ~1,0 %) из перечисленных припоев, низкой температурой солидуса (~650 °С), что приближает его по температуре кристаллизации к серебряным припоям. Припой содержит ограниченное количество легкоиспаряемого компонента – цинка, что позволяет использовать его при пайке в печах с нейтральной и восстановительной газовой средой и частично в вакууме.

Таблица 13.7

*Химический состав припоев*

Марка припоя	Химический состав, %										Температура плавления, °С	
	Основные компоненты											
	медь	никель	марганец	бор	железо	кремний	цинк	олово	хром	алюминий	солидус	ликвидус
П102	Ост.	1–2			2–4		8–10	8–10	0,5–1,5		650	900
ПрМНМц 68-4-2	62–68	4–5	1,5–2,5				Ост.				950	980
ПрАНМц 0,6-4-2	Ост.	3–4	1,5–2,5							0,5–0,6	1050	1070
ПрЛМцЖ 57-1,5-0,75	56–58		1–1	0,07–0,15	0,5–1	0,1–0,2	Ост.				865	873

Все перечисленные свойства припоя П102 (табл. 13.8) позволяют использовать его в качестве заменителя серебряных припоев на ряде видов инструмента. Это особенно важно при производстве сложного многолезвийного инструмента с особо жесткими требованиями к качеству паяных соединений. Припой обеспечивает требуемую прочность паяных соединений (25–30 кгс/мм<sup>2</sup>, или 245–294 МПа), повышает надежность работы инструмента, позволяет снизить уровень паяльных напряжений, обеспечивает оптимальную толщину шва. Кроме того, применение припоя в виде паяльной пасты значительно упрощает технологический процесс и создает предпосылки для широкой его механизации при использовании высокопроизводительных печей непрерывного действия типа СКЗ. Припой можно также использовать при пайке с индукционным нагревом в виде прессованных заготовок из смеси припоя и флюса. Это делает порошковые припои типа П102 достаточно универсальными и удобными в применении.

Таблица 13.8

*Механические свойства припоев*

Марка	Предел плавления, °С		Механические свойства припоев при разных температурах, °С					Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	
	Начало	Конец	Предел прочности при растяжении, МПа		Предел текучести при растяжении, МПа		Удлинение, %		
			20	600	20	600		20	20
П102	650	900	375	–	130	–	32–38	65	40
ПрМНМц 68-4-2	950	980	330	100	140	70	43	130	3–5
ПрАНМц 06-4-2	1050	1070	260	120	120	60	36,5	120	80
ПрЛМцЖ-57-1,5-0,75	865	873	460	25	250	170	25	45	91

*Примечания:* При пайке жидкая фаза припоя, взаимодействуя с основными металлами, частично их растворяет, поэтому свойства паяного соединения обуславливаются не только механическими характеристиками припоя, но и степенью диффузионного взаимодействия, зависящего от температуры пайки, величины зазора, состава припоя и характера кристаллизации жидкой фазы, который зависит от скорости охлаждения и теплофизических свойств основных материалов.

Кроме выше отмеченных для пайки буровых резцов применяются припои: Л63, ПрМнМц 68-4-2, ЛНКоМц 49-9-0,2-0,2.

### 13.4.2. Флюсы для пайки буровых резцов

В тех случаях, когда пайка инструмента сопряжена с нагревом на открытом воздухе, то есть при индукционной пайке, пайке методом электросопротивления и другими, применяются флюсы – неметаллические вещества, предназначенные для защиты паяемых поверхностей основных материалов и припоя от окисления, удаления с этих поверхностей дефектных, в том числе окисных, пленок предотвращения их образования во время пайки, снижения поверхностного натяжения расплава припоя и иногда для высаживания металлического слоя. При пайке инструмента применяют, как правило, флюсы боридофторидной группы. В качестве примера в табл. 13.9 представлены некоторые марки флюсов.

Таблица 13.9

## Химический состав флюсов

Марка флюса	Химический состав, %						Температура, °С		Вид применения
	окись кобальта Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	окись вольфрама WO <sub>3</sub>	бура обезжиренная Na <sub>2</sub> D <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	фторборат калия KBF <sub>4</sub>	борный ангидрид B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	фториды и другие соединения	плавления	интервала активного действия	
Ф100	2–3	14–16	32–36	45–52			635	1000–1100	С припоем в виде ленты, проволоки, порошка (1:4). С бурой (1:1).
Бура			100				741	800–1100	С флюсом Ф100. С припоем в виде порошка.
ВНИИ			69–73		21–22	5–10	620	800–1100	С припоем в виде порошка.
№ 200			19–21		68–72	8–10	635	850–1150	С припоем в виде порошка. С припоем в виде водной пасты.
№ 201			13–15		79–81	5–6	635	850–1150	С припоем в виде порошка. С припоем в виде водной пасты.

Активность флюсов проявляется в строго определенном температурном интервале их жидкого состояния. Температура плавления порошковых флюсов, применяемых в виде порошка или паст, ниже температуры плавления припоев в среднем на 100–150 °С. Интервал активного действия флюсов для пайки твердосплавного инструмента припоями на медной основе находится в пределах 850–1100 °С [121].

При превышении верхней температурной границы этого интервала происходит частичное или полное испарение, разложение или выгорание компонентов флюса, что может привести к снижению качества паяных соединений. При недостаточной же активности флюса требуется перегрев расплавленного припоя, что приводит к его частичному вытеканию из зазора и, следовательно, к дефектам паяного соединения. Активность флюса может быть также ограничена во времени вследствие взаимодействия с окружающей газовой средой, паяемыми материалами и припоем.

Таким образом, прочность и плотность паяного шва при флюсовой пайке зависят от правильного выбора марки флюса, температуры и скорости процесса при прочих равных условиях.

Температурный интервал активности флюсов является неотъемлемой частью их характеристики и может быть определен с помощью технологической пробы на растекаемость припоя. Такая проба должна производиться при аттестации партии флюса по-

сле его изготовления и может также служить показателем качества флюса в производственных условиях.

Наибольшей активностью в указанном температурном интервале обладает флюс марки Ф100 (табл. 13.9), являющийся основным при пайке на воздухе трудносмачиваемых твердых сплавов марок Т15К6, Т30К4 и др.

Действие флюса марки Ф100 основано на высаживании чистых металлов (вольфрама и кобальта) на паяемых поверхностях при температуре не ниже 1000 °С, поэтому его применение наиболее эффективно при пайке припоем марки АНМц 06-4-2, имеющим температуру плавления 1020 °С.

При пайке инструмента другими припоями с меньшей температурой ликвидуса необходим перегрев до указанной температуры. В противном случае активность флюса Ф100 не только не проявляется, но происходит и ухудшение качества паяного соединения. Порошковые флюсы могут быть использованы непосредственно в виде порошка, смесей с порошковыми припоями или в виде водных паст (при электроконтактной пайке). Норма расхода флюсов при указанных способах пайки в среднем составляет 25–30 % веса припоя, идущего на образование паяного соединения, или 0,15–0,20 г на 1 см<sup>2</sup> площади пайки.

Следует отметить, что на поверхности пластин твердых сплавов всех марок часто встречается такой распространенный дефект производства, как графитный или карбидный слой, по которому не растекаются припой в регламентированном интервале активного действия флюсов всех марок при пайке на воздухе. В этих случаях следует проводить очистку поверхностей пластин перед пайкой.

При пайке в печах с защитной газовой средой припой хорошо смачивает паяемые поверхности и необходимость в дополнительных операциях очистки твердого сплава отпадает.

### **13.4.3. Технологический процесс пайки буровых резцов**

Пайкой называется образование соединения с межатомными связями посредством нагрева соединяемых материалов ниже температуры плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации.

Пайка является одним из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений деталей машин, элементов инструментов и приборов.

Основное достоинство пайки – формирование паяного шва при температуре ниже температуры автономного плавления соединяемых металлов. Это позволяет получать соединения в труднодоступных местах, соединять детали не только последовательно по контуру шва, но и по поверхности.

Основные признаки пайки [121]:

1. Пайка осуществляется при температуре ниже точек плавления соединяемых металлов.

2. Процесс пайки во всех случаях связан с введением в зазор между соединяемыми металлами жидкой металлической прослойки (расплавленного припоя).

3. Соединение образуется в результате взаимодействия твердого основного металла с жидким припоем, который после завершения пайки кристаллизуется. Если условия для такого взаимодействия отсутствуют, то паяное соединение не образуется.

Свойство материалов образовывать паяное соединение при заданном режиме пайки называется паяемостью. В качестве припоя при пайке, как правило, используется металл или сплав с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов. Для удаления оксидов с поверхности паяемых материалов и припоя и предотвращения их образования в процессе пайки применяется вспомогательный матери-

ал, называемый паяльным флюсом. В настоящее время для пайки применяют восемь способов:

- 1) пайка горелкой;
- 2) пайка независимой угольной дугой;
- 3) пайка в печи;
- 4) индукционная пайка;
- 5) пайка сопротивлением;
- 6) пайка погружением;
- 7) пайка нагретым блоком;
- 8) пайка путем заливки припоя.

При любом из указанных способов пайки в качестве припоя применяется сплав из цветных металлов с температурой плавления выше 425 °С, но ниже, чем температура плавления основного металла.

Паяное соединение – элемент паяного изделия, включающий паяный шов и прилегающие к нему участки основного металла (рис. 13.13).

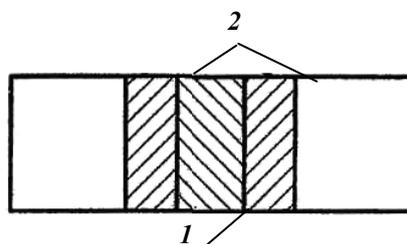


Рис. 13.13. Основные зоны паяного соединения

Различают следующие основные зоны паяного соединения (рис. 13.13):

Зона сплавления 1 – прослойка между соединенными деталями, образуется в результате взаимодействия жидкого припоя с металлом; Диффузионная зона 2 – граничащий с зоной сплавления слой основного металла, образовавшийся в результате диффузии компонентов припоя и основного металла. Принципиальную роль в образовании качественного паяного соединения играют явления смачивания и капиллярности.

Смачивание – физико-химическое взаимодействие расплавленного припоя с паяемым металлом, проявляющееся в растекании припоя. Растекание флюсов по оксидным пленкам, затекание в зазоры, химическое растворение оксидных пленок во флюсе – все эти процессы также связаны со смачиванием. Без смачивания флюсами паяемых металлов вообще невозможна флюсовая пайка, которая в общем объеме пайки занимает приблизительно 95–98 %.

Буровые резцы представляют сложное паяное соединение, на примере которого студенты смогут освоить методологию решения комплекса технологических задач. Паяные соединения твердых сплавов со стальными корпусами (стали 55Л и 60) буровых резцов выходят из строя из-за поломок, обусловленных остаточными напряжениями соединений после пайки. Уменьшение напряжений – основной резерв повышения качества паяных буровых резцов.

Технологический процесс пайки буровых резцов (рис. 13.14.) включает сборку под пайку – укладку таблеток и вставок в паз, фиксацию правильного положения вставки и таблетки в пазах, ввод собранного изделия в зону нагрева, непосредственно пайку, выдержку для полного выравнивания температур корпуса и вставки, поджатие припаиваемой вставки, вывод изделия из зоны нагрева, выдержку на воздухе для пол-

ной кристаллизации припоя, перемещение изделия в емкость для охлаждения. Режимы пайки представлены в табл. 13.10.

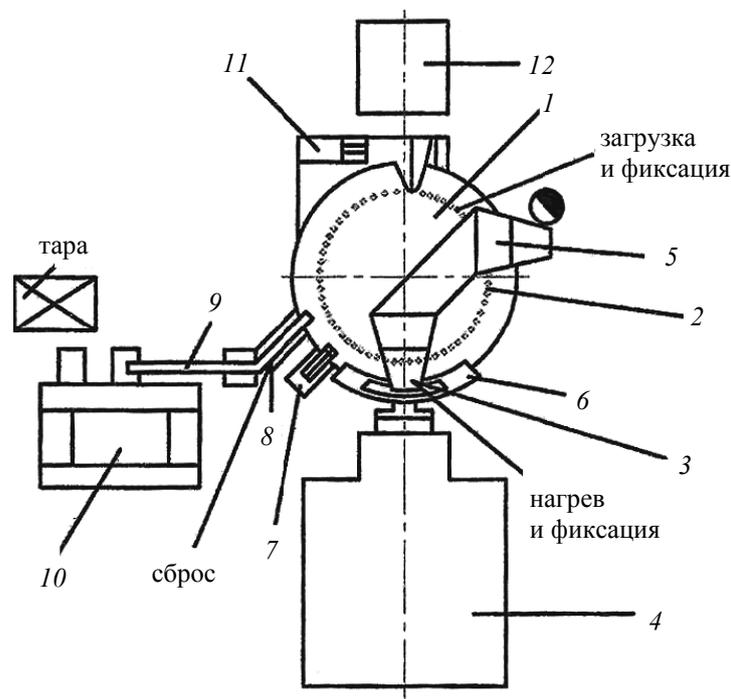


Рис. 13.14. Установка для пайки буровых резцов

В АО «ВНИПТИМ» (г. Кемерово) разработана, изготовлена и внедрена в ОАО «Кузнецкгормаш» механизированная установка (рис. 13.14) для пайки буровых резцов состоящая из загрузочного роторного стола 1 со штырями 2, щелевого индуктора 3 с высоко-частотным блоком 4, дозаторов 5, 6, фиксатора 7, автосъемника 8, конвейера 9, ванны 10 для изотермической закалки, шагового привода 11 и шкафа управления 12. В зависимости от варианта технологического осуществления выбирают тот или иной цикл пайки с соблюдением основных параметров.

Таблица 13.10

Режимы пайки резцов при нагреве ТВЧ  
на установках типа ВЧГ 1-60/0,06644:

Параметры	Температура
– скорость нагрева первоначальная до 600–700 °С	100–200 °С/с
до температуры пайки 1000–1050 °С	45–50 °С/с
– скорость охлаждения	10–20 °С/с
– температура пайки	1000–1050 °С
– время выдержки при пайке	15–20 с

Один из вариантов пайки резцов таблетированным припоем – пайка на роторном столе с тремя основными позициями: загрузка и фиксация, нагрев и фиксация, разгрузка в емкость для охлаждения.

Длительность пребывания резца на каждой позиции ограничивается основным технологическим временем – выдержкой при нагреве во время непосредственно пайки

(20 с). Загрузочные операции и разгрузка укладываются по времени в эту расчетную длительность.

Общий цикл и последовательность операций могут быть в этом случае такими:

- укладывают в гнездо резец (2–3 с);
- затем в паз укладывают таблетку, а сверху – твердосплавную вставку (5–10 с);
- фиксируют детали собранного узла специальным фиксатором (1–3 с);
- подают деталь в зону нагрева, в индуктор, со скоростью межпозиционного вращения роторного стола;
- производят первичный подогрев паяемого узла (1–2 с);
- производят нагрев детали до температуры пайки (14–13 с);
- осуществляют прижим твердосплавной вставки к основанию паза (1–3 с);
- выводят резец из индуктора со скоростью межпозиционного вращения роторного стола;
- выдерживают резец на воздухе в течение нескольких секунд до полной кристаллизации припоя;
- производят разгрузку резца в лоток (2–3 с).

После этого резцы направляют на закалку и последующую механическую обработку (очистку, заточку).

Равномерный и качественный прогрев корпуса и вставок обеспечивается правильно выбранной скоростью вращения роторного стола и длительностью нахождения деталей в индукторе.

Во избежание выгорания компонентов припоя, приводящего к пористости и хрупкости паяного соединения, время выдержки припоя в расплавленном состоянии не должно быть большим и может составлять примерно 5–15 с.

Усилие поджатия твердосплавной вставки устанавливается из расчета 1–2 кг на 1 см<sup>2</sup> поверхности основания. Во время процесса кристаллизации и охлаждения какого-либо сдвига или перемещения вставок по пазу не должно быть.

Для обеспечения качественной пайки и последующей термообработки скорость охлаждения резца должна быть малой с последующим выравниванием температуры на уровне закалочной. Это обеспечивает резкое снижение внутренних остаточных напряжений в соединении «сталь – припой – твердый сплав». Растягивающие напряжения на наружной поверхности твердого сплава минимальны. Это увеличивает эксплуатационную стойкость бурового инструмента.

Оборудование для пайки выбирается таким образом, чтобы при сочетании высокой производительности пайки с оптимальной скоростью нагрева обеспечить высокое качество паяного шва и заданную прочность соединения.

По сложившейся практике этим требованиям соответствуют установки индукционного нагрева ТВЧ. Основные характеристики некоторых из них приведены в табл. 13.10.

Таблица 13.10

*Техническая характеристика высокочастотных генераторов*

Параметр	Марка генератора	
	ВПЧ-60/0,066	ВПЧ-100/0,066
Напряжение питающей сети, В	380	380
Частота питающей сети, Гц	50	50
Число фаз	3	31

Параметр	Марка генератора	
	ВПЧ-60/0,066	ВПЧ-100/0,066
Мощность, потребляемая от сети, кВт, не более	85	41
Мощность колебательная, кВт, не менее	60	100
Частота рабочая, кГц	66 <sup>+7,9</sup> <sub>6,6</sub>	66 <sup>+7,9</sup> <sub>6,6</sub>
Напряжение анодное, кВ, номинальное	10	11
Напряжение на контуре, кВ, не более	7	7
Ток анодный, А, не более	8	13,5
Ток сеточный, А, не более	1,5	1,7
Коэффициент мощности при номинальном анодном напряжении, не менее	0,85	0,85

В комплекс оборудования для индукционной пайки буровых инструментов входит щелевой индуктор, обеспечивающий оптимальное сочетание равномерности прогрева и режимов работы источника ТВЧ. Конструктивные особенности индуктора (ширина и рельеф внутренней поверхности, высота, длина активной части, зазор между деталью и индуктором) должны обеспечивать равномерный прогрев твердого сплава и корпуса инструмента со скоростью, близкой к скорости передачи тепла внутрь материала этих элементов. Эти скорости выбирают в пределах 5–15 °С/с. Более ускоренный и интенсивный нагрев может вызвать большие внутренние напряжения и способствовать образованию микротрещин как в твердом сплаве, так и в стали.

Так, для пайки буровых резцов (рис. 13.15) используется проходной индуктор (рис. 13.16), изготовленный из медной трубки (ГОСТ 617-90) [122] диаметром 8–10 мм. В индукторе предусмотрен подвод и отвод охлаждающей воды.

При использовании ламповых генераторов для пайки угольных или породных резцов используются индукторы кольцевого и щелевого типов.

Необходимая концентрация магнитного поля достигается за счет конструкции индуктора: он выполняется с двусторонними выточками в П-образных пластинах магнитопровода.

Корпуса буровых резцов изготавливаются из сталей 60 и 55А, 35ХГСА. Для армирования бурового инструмента применяются изделия по ГОСТ 880-75 [53] из твердого сплава ВК11В, ВК8В и другие по ГОСТ 3882-74 [62].

При изготовлении таблеток для пайки бурового инструмента используется мелкодробленая стружка припоев латуни Л63, ПрМнМд 68-4-2, ЛНКоМЦ 49-9-0,2-0,2, обеспечивающих прочность паяного соединения на срез около 150 МПа.

За последние годы для изготовления таблеток стали широко применяться порошковые припои марок П100 (ПД53Цн2ГГН) и П102 (ПД760л9Цн9Н), ТУ 14-1-231-78, выпускаемые ОАО «Тулачермет». Для изготовления таблетки готовится специальный клей. В сосуд со спиртово-ацетоновой смесью (1:1) небольшими порциями вводится предварительно просушенный поливинилбутираль и тщательно перемешивается, после чего выдерживается на водяной бане при температуре не выше 40 °С до полного растворения.

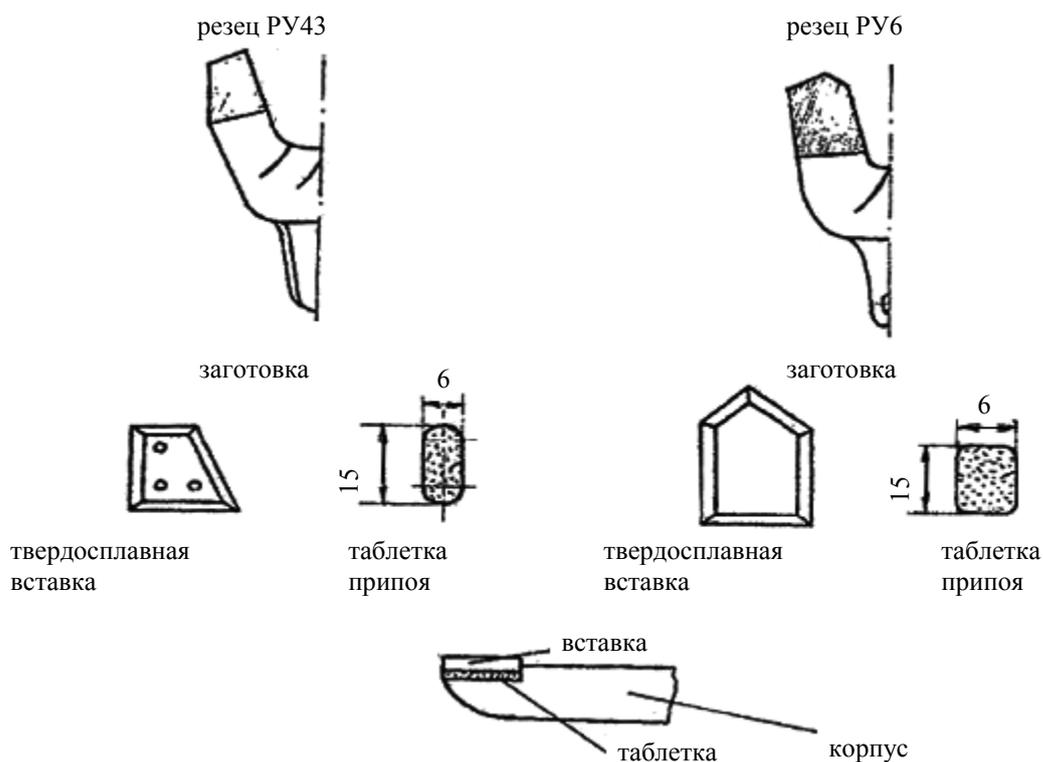


Рис. 13.15. Общий вид элементов пайки и узла в сборе

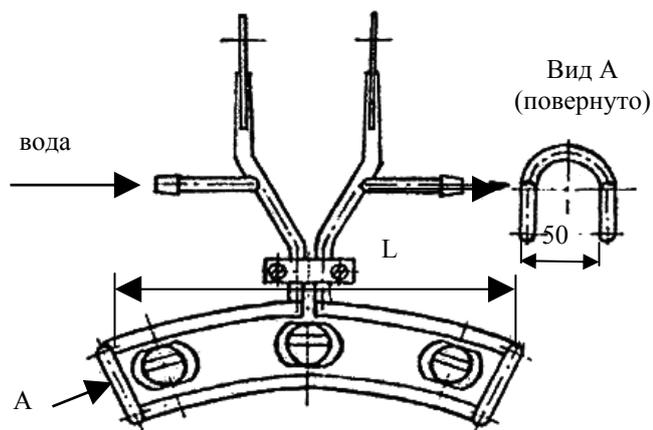


Рис. 13.16. Индуктор для пайки буровых резцов

Для приготовления 1 кг клея необходимо:

- поливинилбутирала – 70 г;
- спирта этилового – 465 г;
- ацетона – 465 г.

После приготовления таблетки высушиваются на воздухе в течение 2–3 часов для удаления растворителей.

#### Особенности пайки таблетками.

Неправильно считать паяльную смесь в таблетке простой механической смесью. В этой смеси в тесном контакте находятся мелкодисперсные вещества с высокой поверхностной энергией. Площадь поверхности такого порошка может в несколько сотен раз превышать площадь поверхности проволоки или фольги. Отличие поверхностной

энергии такого порошка от монолитного металла приводит к тому, что паяльная смесь плавится при меньшей затрате энергии, поэтому при индукционной пайке сокращается время нагрева.

Кроме того, широкое применение флюса Ф100 обеспечивает хорошую растекаемость припоя и хорошо очищает поверхности в процессе пайки от загрязнений и продуктов химических реакций. Однако недостатком этого флюса является его токсичность – при пайке выделяются фтористые соединения, поэтому пайка должна производиться при хорошей вентиляции. Установлено испытаниями, что использование флюса Ф100 приводит к повышению прочности паяного шва на срез.

#### 13.4.4. Контроль качества паяного соединения

После завершения пайки контролируется качество соединения твердосплавной вставки и корпуса резца.

Внешний осмотр паяных соединений – наиболее простой и распространенный способ контроля качества пайки. Признаками качественной пайки бурового инструмента являются правильное положение припаянной твердосплавной вставки, непрерывный валик-галтель вдоль всего паяного шва, отсутствие не пропаянных раковин, наплывов, трещин. После окончательной подготовки бурового резца определяются два параметра качества пайки: наличие или отсутствие не пропаянных раковин и прочность паяного шва [121].

В соответствии с ГОСТ 6086-75 [123] допускается общая длина видимой не пропаянной раковины не более 5 % периметра паяного шва.

Метод цветной дефектоскопии основан на способности специальных красителей проникать в мелкие поры, трещины, раковины и изменять цвет красок.

Контролируемая деталь очищается от излишков флюса и припоя, твердосплавная пластинка отшлифовывается, производится обезжиривание паяного шва. Затем на подготовленные поверхности кистью наносится красный краситель и просушивается в течение одной минуты. После этого слой краски удаляется тампоном, смоченным в растворе керосина и трансформаторного масла (3:7), и наносится тонкий слой белой краски. Трещины, раковины при этом проявляются в виде красных линий, копирующих их расположение.

Составы красок следующие:

*Красная краска*

Состав 1: 95 мл бензола, 5 мл авиационного масла МК8 и 1 г темно-красного красителя «Судан 4»;

Состав 2: 20 мл скипидара, 30 мл керосина, 1 г красителя «Судан 3».

*Белая краска*

Состав 1: 70 мл коллодия, 20 мл бензола, 10 мл ацетона, 5 г густотертых цинковых белил;

Состав 2: 1 л воды (или керосина), 300–400 г каолина.

*Люминесцентный метод* контроля качества паяного соединения основан на способности люминофоров светиться при ультрафиолетовом облучении. В качестве люминофора используются следующие составы, %:

Состав 1: триэтанолламин, 5–6; олеиновая кислота, 9–10; керосин, 23–24; трансформаторное масло, 61–63;

Состав 2: керосин, 75 трансформаторное масло, 25.

Буровой резец погружается на 3–5 минут в состав, затем промывается в проточной воде и сушится в струе воздуха. После этого он облучается ультрафиолетом в затемненной кабине. Имеющиеся в паяном шве трещины, раковины ярко светятся.

Прочность паяного шва на буровом инструменте определяется на образцах при испытании на статический срез.

#### **13.4.5. Перспективы совершенствования технологии пайки буровых резцов**

Перспективой совершенствования технологии пайки инструмента дозированным припоем является создание автоматизированного участка или комплекса сборки – пайки – термообработки. Для улучшения качества паяного шва, снижения его пористости, уменьшения газовых пор и не пропаянных раковин при использовании таблеток припоя перспективно использование эффекта воздействия ультразвуковых колебаний на ванну припоя. Ультразвук способствует перемешиванию расплавленных масс припоя, дегазации ванны припоя, перемещению частиц шлаковых включений вверх, ускоренной диффузии на границе жидкость – твердое тело.

Для изготовления таблеток припоя в объемах более 10 тысяч штук в год целесообразно сформировать на заводе автоматизированный участок с роторной линией по подготовке исходных материалов, их перемешиванию, прессованию таблеток, последующей обработке (например, сушке), перемещению на участок пайки.

Для крепления твердосплавных вставок в пазах бурового инструмента и их надежной фиксации перспективно использование сплавов с эффектом памяти в виде гофрированной фольги (ленты). Перспективным при изготовлении бурового инструмента можно считать применение пастообразных припоев, что позволило бы решить проблему крепления твердосплавных вставок в пазах перед пайкой, а при дозировании пасты – экономить припой в значительных количествах.

Таким образом, технология пайки бурового инструмента дозированным припоем в виде компактных таблеток лишена многих недостатков традиционной технологии пайки и позволяет экономно расходовать припой.

Применение новых материалов припоя, входящих в составы таблеток с повышенной прочностью на срез, позволяет повысить эксплуатационную стойкость бурового инструмента не менее чем на 20 %, что в свою очередь создает значительный экономический эффект в народном хозяйстве.

#### **13.4.6. Пайка пластин из твердого сплава**

##### *Пайка спеченных твердых сплавов*

Спеченные твердые сплавы состоят из карбидов вольфрама, титана, тантала и кобальта. Твердые сплавы изготавливают методом прессования из смеси тонкоразмолотых порошков карбида и металла с последующим спеканием в защитной атмосфере при 1400–1600 °С. По ГОСТ 3882-74 [61] промышленность выпускает три типа спеченных твердых сплавов: вольфрамовые, титано-вольфрамовые и титанотанталовольфрамовые ([www.ritscomp.ru](http://www.ritscomp.ru)).

Приготовленные методом спекания пластины твердого сплава припаяют к корпусу инструмента, изготовленного из углеродистой стали. Коэффициент линейного расширения применяемых сталей в 2–3 раза больше, чем у твердого сплава. Это обстоятельство требует, чтобы нагрев и охлаждение твердосплавного инструмента при пайке происходили равномерно, в противном случае на пластинах твердого сплава образуются трещины. Влияние разности коэффициентов линейного расширения стали и твердого сплава снижают применением компенсационных прокладок, изготовленных из сплава железа с никелем (45 % Ni) и устанавливаемых при пайке между двумя соединяемыми материалами.

Перед пайкой пластины твердого сплава очищают песком и шлифуют по опорным плоскостям шлифовальными кругами. Подготовленные для пайки пластины не должны иметь трещин, расслоений и посторонних включений. В корпусе инструмента фрезеруют паз по конфигурации пластины, куда устанавливают для припайки предварительно обезжиренную и очищенную пластину. Паз под пластину должен быть ровным, не иметь завалов, ступенек и заусенцев. Пластина должна быть хорошо пригнана к основной грани паза.

Во избежание выпадения пластины из паза во время пайки ее предварительно закрепляют. Крепление проволокой неудобно тем, что она всегда припаивается к корпусу и для ее удаления требуется дополнительная механическая обработка. Кроме того, проволока нагревается быстрее твердого сплава, что приводит к образованию трещин в местах касания пластин с проволокой, поэтому такой метод крепления применяют очень редко. Закрепление хрупких пластин твердого сплава чеканкой и клиньями иногда приводит к их поломке.

Наиболее приемлемым способом считают закрепление пластин при помощи компенсационных прокладок различной толщины технологической стенки. При контактной пайке или при пайке нагревом ТВЧ применяют различные приспособления для крепления и прижима пластины твердого сплава к корпусу резца.

Спеченные твердые сплавы можно паять методами электросопротивления, нагревом ТВЧ, в печах с восстановительной средой и погружением в расплавленный припой.

Пайка инструмента электросопротивлением состоит в том, что подготовленную под пайку пластину вставляют в корпус инструмента, который зажимают между контактами сварочной машины. Перед включением тока пластину посыпают порошком флюса, сверху кладут припой, который также покрывают флюсом. Чтобы не происходил перегрев, ток в процессе нагрева включают периодически. Во время расплавления флюса следят за тем, чтобы он был в достаточном количестве и смачивал соединяемые поверхности, в противном случае флюс добавляют. В момент начала расплавления припоя ток выключают и дают возможность припою растечься по пластине и заполнить шов. Пластину поджимают к корпусу резца до температуры 800 °С, затем давление снимают до момента прекращения растекания припоя и продолжают прижимать до полной кристаллизации припоя. При пайке с нагревом ТВЧ большое значение имеет правильный выбор формы и размеров индуктора. Последовательность пайки следующая: в паз корпуса резца вносят небольшое количество флюса, укладывают компенсационную прокладку, покрывают ее тем же флюсом, после чего укладывают пластину. На пластину в зоне соединения с корпусом резца помещают припой, который также покрывают флюсом. Собранный таким образом инструмент помещают в индуктор. Ток при этом включают периодически. Скорость нагрева для лучшего смачивания припоем и уменьшения окисления пластины и перегрева стали державки должна быть строго определена и составляет 30 °С/с – для инструмента с поперечным сечением до 150 мм<sup>2</sup> и 60 °С/с – для инструмента с поперечным сечением до 1000 мм.

При пайке твердосплавного инструмента важным условием получения качественного соединения является обеспечение равномерного нагрева. Для этой цели инструмент помещают в индуктор так, чтобы в первую очередь нагреть корпус инструмента и за счет его теплопроводности прогреть пластину твердого сплава. После прогрева для выравнивания температуры производят нагрев места пайки.

Во время пайки положение пластины в пазу поправляют (если нет зажимного приспособления) фарфоровой или асбестовой палочкой). Спаянный инструмент охлаждают в печи или на воздухе, для чего его укладывают на кирпичные, асбестовые, керамические или другие подставки. При охлаждении в печи инструменту дают от-

пуск при 200–250 °С в течение 6 часов. В результате нагрева изделия при пайке твердость корпуса инструмента снижается, поэтому он нуждается в дополнительной термической обработке. Если требуется закалка, то ее производят сразу же после пайки. Для предотвращения появления трещин в пластинах их закаливают в среде с температурой 260–320 °С.

Пайку инструмента можно осуществить в печи с восстановительной атмосферой. При этом пластины из вольфрамкобальтовых сплавов на сталь напаивают без флюса, а пластины из титановольфрамовых сплавов требуют применения высокоактивных флюсов. Трудность печной пайки в основном сводится к креплению пластины к корпусу инструмента. Наиболее рациональным способом крепления при этом методе пайки является обвязка головки инструмента асбестовым шнуром с предварительным размещением компенсационной прокладки, припоя и флюса.

Пайку инструмента погружением в расплавленный припой обычно применяют для совмещения пайки с термической обработкой корпуса. Процесс пайки-закалки состоит из трех основных операций: предварительного нагрева в соляной ванне до 800–850 °С, пайки погружением в расплавленный припой и закалки инструмента. Предварительный нагрев при температуре 260–280 °С осуществляют в ванне, содержащей, %: 70 BaCl<sub>2</sub>, 30 NaCl. Закалку сплавов марок ВК8 и Т15К6 производят в расплаве солей при 380–400 °С состава, %: 70 КОН, 30 NaOH. Для сплава Т15К.6 после основной закалки необходима дополнительная закалка в нагретой до 180–200 °С селитре.

При пайке погружением требуется тщательное крепление порошковой пластины и обработка собранного под пайку инструмента в кипящем насыщенном водном растворе буры (для пластин из вольфрамкобальтовых сплавов) или в растворе с 35 % фтористого калия (для пластин из титановольфрамовых сплавов).

В связи с резким различием теплового коэффициента линейного расширения соединяемых материалов пайку твердосплавного инструмента нельзя вести при высоких температурах. Наилучший результат, т. е. наибольшая долговечность инструмента, достигается при пайке серебряными припоями, легированными для повышения теплоустойчивости никелем или марганцем, однако из-за дефицитности серебряные припои применяют редко.

Наибольшее распространение получили медно-цинковые припои типа Л63, легированные для повышения теплоустойчивости небольшими добавками никеля, марганца или алюминия, обеспечивающими высококачественные соединения. В качестве флюса употребляют буру или буру с добавками ферромарганца, фтористого калия или борной кислоты.

Практика показала, что при пайке твердых сплавов группы WC-Co с большим содержанием кобальта стандартные флюсы ПВ200 и ПВ201 обеспечивают получение качественных соединений, но при пайке сплавов группы WC-TiC-Co и WC-Co с малым содержанием кобальта (Т15К6 и ТЗОК4) активность этих флюсов недостаточна, поэтому требуется вводить дополнительные операции подготовки поверхности твердого сплава: пескоструйную или дробеструйную, электрохимическую или химико-механическую. Эти операции не обязательны при применении флюса марки Ф100 следующего состава, %: 46,5 KBF<sub>4</sub>; 36,5 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>; 13,5 WO<sub>3</sub> и 3,5 Co<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. Флюс плавится при 500 °С и имеет температуру активного действия 900–1100 °С. Использование этого флюса позволяет в 4–8 раз увеличить площадь растекания припоя по поверхности твердого сплава и повысить прочность паяных соединений. Этот флюс из-за токсичности испарений целесообразно применять только на мелкосерийных предприятиях при условии хорошей вентиляции на рабочих местах. На крупных предприятиях вместо флюса Ф100 применяют стандартные флюсы, но поверхности твердого сплава при этом об-

рабатывают специальным методом. Сущность этого метода заключается в нагреве сплава в печах в атмосфере воздуха до 800 °С в течение 10–30 мин с последующим удалением окисленного слоя во вращающемся барабане со смесью речного песка, древесных опилок и раствора каустической соды. В настоящее время для замены дефицитных серебряных припоев рекомендован ряд сплавов на медно-цинковой основе. Наряду с литыми припоями в последние годы разработаны порошковые сплавы П-100, П-102 и трехслойный припой марки ТП-1. Эти припои позволяют паять соединения с некапиллярными зазорами, т. е. более 0,3 мм. Порошковый припой П-100 имеет  $T_{пл} = 870$  °С и состав: 2 % Сг, 1 % Ni, 8 % Mn, 15 % Fe, 23 % Zn и 31–36 % Cu, а также 15–20 % порошка стали X18H15 (наполнителя). Припой может быть использован в виде прессованных пластин или пасты.

Припой ТП-1 представляет собой триметаллическую полосу, полученную прокаткой. Плавающие в процессе пайки наружные слои толщиной 0,2 мм состоят из латуни марки ЛНМц 50-2-2, имеющей  $T_{пл} = 872$  °С. Внутренний слой не плавится в процессе пайки и служит прокладкой, изготовлен из бронзы марки БрНБ 7-0,5 толщиной 0,4 мм и имеет  $T_{пл} = 1126$  °С. Главным преимуществом трехслойного припоя является получение паяного шва достаточной прочности, способного компенсировать разность сокращения размеров стали и твердого сплава при охлаждении паяного соединения в большей степени, чем все известные припои, в том числе и серебряные. Припой ТП-1 меньше, чем другие припои, деформируется во всем температурном интервале (от температуры солидуса наружных слоев до 20 °С). Это объясняется низким пределом текучести паяного шва, не превышающим во всем температурном интервале охлаждения 132 МПа. Снижению остаточных напряжений в паяном шве и твердом сплаве способствует и толщина паяного шва, равная в этом случае 0,7–0,8 мм. Следует отметить, что для получения качественных паяных соединений помимо правильно выбранных припоя и флюса требуется также выбрать сталь для корпуса инструмента, режимы пайки и термической обработки. Нагрев под пайку следует производить на высокочастотных установках, имеющих частоту тока 2,5–8,5 кГц, дающих более глубокий и равномерный нагрев, чем установки, имеющие частоту 60 кГц.

## 14. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ

Несмотря на то, что корпус тангенциального поворотного резца имеет достаточно сложную форму с вырезами, переходами, галтелями и т. п. в первом приближении он может быть представлен в виде конуса, к вершине которого приложена сила.

В итоге поставленную задачу о нахождении напряженного состояния корпуса тангенциального поворотного резца, можно условно разделить на две части: определение напряженного состояния резца от действия поперечной силы  $S$  и от действия продольной силы  $P$  [17]. На рис. 14.1 и 14.2 представлены модель нагружения и сферическая система координат.

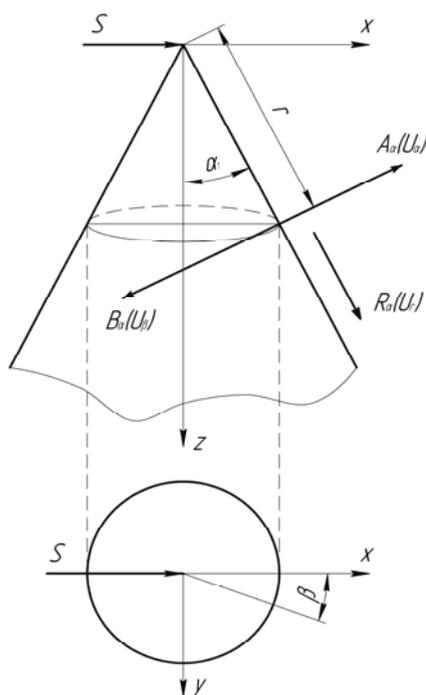


Рис. 14.1. Модель нагружения бесконечного конуса поперечной силой:

$S$  – сила резания,  $\alpha$  – угол конусности,

$\beta$  – угол определяющий положение рассматриваемой точки по отношению к действующим силам,  $R$  – радиальная составляющая тензора напряжений,

$B$  – окружная составляющая тензора напряжений,

$A$  – нормальная составляющая тензора напряжений,

$r$  – радиус сферы, описывающий расстояние от вершины до рассматриваемой точки

Обратимся к известной задаче теории упругости (задаче Митчелла) о напряженно-деформированном состоянии бесконечного конуса, нагруженного поперечной силой  $S$  (рис. 14.1).

Задача решается в сферической системе координат (рис. 14.2). За начало координат принимается вершина бесконечного конуса, а любая точка конуса при этом определяется координатами  $\alpha$  – углом наклона образующей к его оси,  $r$  – радиусом сферы описываю-

шей расстояние от вершины конуса до заданной точки и  $\beta$  – угол, показывающий положение рассматриваемой точки по отношению к направлению действия сил.

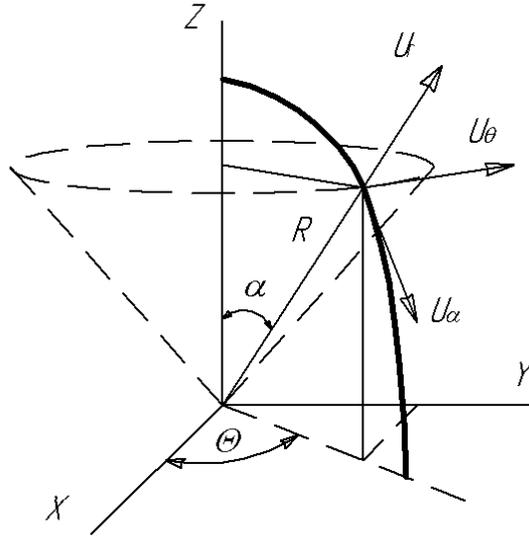


Рис. 14.2. Сферическая система координат:

$\alpha$  – угол, определяющий положение проекции рассматриваемой точки в плоскости  $YZ$ ;  
 $\beta$  – угол, определяющий положение проекции рассматриваемой точки в плоскости  $XY$ ;  
 $U_r$  – радиальная составляющая деформаций;  $U_\theta$  – окружная составляющая деформаций;  
 $U_\alpha$  – нормальная составляющая деформаций;  
 $R$  – радиус сферы, описывающий расстояние от вершины до рассматриваемой точки

J.H. Michell в 1900г [123], разработал метод решения данной задачи.

Воспользуемся его подходом, который не потерял своей значимости до настоящего времени.

#### 14.1. Напряженно–деформированное состояние конуса нагруженного поперечной силой

Задача ставится следующим образом: найти распределение напряжений в бесконечном конусе  $\alpha = \alpha_1$ , в вершине которого перпендикулярно оси конуса действует сила  $S$ .

Уравнения в перемещениях:

по образующей конуса

$$(\lambda + 2G)r \sin \alpha \frac{\partial \Theta}{\partial r} - 2G \left[ \frac{\partial \omega_\alpha}{\partial \beta} - \frac{\partial}{\partial \alpha} (\omega_\beta \sin \alpha) \right] + r \sin \alpha R = 0;$$

по углу  $\beta$

$$(\lambda + 2G) \frac{1}{\sin \alpha} \frac{\partial \Theta}{\partial \beta} - 2G \left[ \frac{\partial \omega_r}{\partial \alpha} - \frac{\partial}{\partial r} (r \omega_\alpha) \right] + r B = 0; \quad (14.1)$$

по углу  $\alpha$

$$(\lambda + 2G) \sin \alpha \frac{\partial \Theta}{\partial \alpha} - 2G \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r \omega_\beta \sin \alpha) - \frac{\partial \omega_r}{\partial \beta} \right] + r \sin \alpha A = 0;$$

где  $\omega_r$ ,  $\omega_\beta$ ,  $\omega_\alpha$  – компоненты вращения;  $G$  и  $\lambda$  – коэффициенты Лямэ,  $\Theta$  – угол в горизонтальной плоскости,  $R$  – радиус до искомой точки.

$$\begin{aligned}\omega_{\alpha} &= \frac{1}{2r \sin \alpha} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (ru_{\beta} \sin \alpha) - \frac{\partial u_r}{\partial \beta} \right], \\ \omega_{\beta} &= \frac{1}{2r} \left[ \frac{\partial u_r}{\partial \alpha} - \frac{\partial}{\partial r} (ru_{\alpha}) \right]; \\ \omega_r &= \frac{1}{2r \sin \alpha} \left[ \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial \beta} - \frac{\partial}{\partial \alpha} (u_{\beta} \sin \alpha) \right].\end{aligned}\quad (14.2)$$

Примем перемещения  $u_r$  и  $u_{\alpha}$  – пропорциональными  $\cos n\beta$ , а  $u_{\beta}$  –  $\sin n\beta$ .

В этом случае перемещения будут

$$u_r = \frac{\cos n\beta}{r} \left( -\frac{\lambda + 2G}{G} \frac{r^2 \Theta}{\cos n\beta} + C \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} + D \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} \right); \quad (14.3)$$

$$u_{\alpha} = \frac{\cos n\beta}{r \sin \alpha} \left[ -\frac{\lambda + 3G}{2G} \sin \alpha \frac{d}{d\alpha} \left( \frac{r^2 \Theta}{\cos n\beta} \right) + \left( C \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} + D \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} \right) \cos \alpha + F \operatorname{tg}^n \frac{\alpha}{2} + H \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} \right]; \quad (14.3)$$

$$u_{\beta} = \frac{\sin n\beta}{r \sin \alpha} \left[ n \frac{\lambda + 3G}{2G} \frac{r^2 \Theta}{\cos n\beta} - \left( C \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} + D \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} \right) \cos \alpha - F \operatorname{tg}^n \frac{\alpha}{2} + H \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} \right];$$

где  $\Theta = \frac{\cos n\beta}{r^2} \left[ A(n + \cos \alpha) \operatorname{tg}^n \frac{\alpha}{2} + B(n - \cos \alpha) \operatorname{ctg}^n \frac{\alpha}{2} \right]$ , А, В, С, D, F, H – произвольные постоянные. Для решения задачи комбинируются три типа решений:

а) если линия действия силы параллельна оси  $x$ , то смещения будут равны

$$\begin{cases} u_r = \frac{F}{4\pi G} \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r}; \\ u_{\alpha} = \frac{\lambda + 3G}{2(\lambda + 2G)} \frac{F}{4\pi G} \frac{\cos \alpha \cos \beta}{r}; \\ u_{\beta} = -\frac{\lambda + 3G}{2(\lambda + 2G)} \frac{F}{4\pi G} \frac{\sin \beta}{r}; \end{cases} \quad (14.4)$$

компоненты напряжения составят

$$\begin{cases} R_r = -\frac{3\lambda + 4G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi G} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2}; \\ A_{\alpha} = B_{\beta} = \frac{G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2}; \\ A_{\beta} = 0; \\ B_r = \frac{G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{\sin \beta}{r^2}; \\ A_r = -\frac{G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{\cos \alpha \cos \beta}{r^2}; \end{cases} \quad (14.5)$$

б) при использовании полярных координат

$$\begin{cases} u_r = 0; \\ u_\alpha = -\frac{C}{r} \cdot \frac{\cos \beta}{1 + \cos \beta}; \\ u_\beta = \frac{C}{r} \cdot \frac{\sin \beta}{1 + \cos \beta}; \end{cases} \quad (14.6)$$

компоненты напряжения составят

$$\begin{cases} R_r = 0; \\ A_\alpha = -B_\beta = -\frac{2GC}{r^2} \cdot \frac{(1 - \cos \alpha) \cos \beta}{(1 + \cos \alpha) \sin \alpha}; \\ A_r = \frac{2GC}{r^2} \cdot \frac{(1 - \cos \alpha) \sin \beta}{(1 + \cos \alpha) \sin \alpha}; \\ B_r = -\frac{2GC}{r^2} \cdot \frac{\sin \beta}{(1 + \cos \alpha)}; \\ R_\alpha = \frac{2GC}{r^2} \cdot \frac{\cos \beta}{(1 + \cos \alpha)} \end{cases} \quad (14.7)$$

в) при использовании полярных координат

$$\begin{cases} u_r = \frac{D}{r} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{1 + \cos \alpha}; \\ u_\alpha = \frac{D}{r} \cdot \cos \beta; \\ u_\beta = -\frac{D}{r} \cdot \sin \beta; \end{cases} \quad (14.8)$$

компоненты напряжения составят

$$\begin{cases} R_r = -A_\alpha = -\frac{2GD}{r^2} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{(1 + \cos \alpha)}; \\ B_\beta = 0; \\ A_\beta = -\frac{GD}{r^2} \cdot \frac{\sin \alpha \sin \beta}{(1 + \cos \alpha)}; \\ B_r = \frac{GD}{r^2} \cdot \left( 2 - \frac{1}{1 + \cos \alpha} \right) \sin \beta; \\ R_\alpha = -\frac{GD}{r^2} \cdot \left( 2 - \frac{1}{1 + \cos \alpha} \right) \cos \beta. \end{cases} \quad (14.9)$$

Краевые условия задачи имеют вид: при  $\alpha = \alpha_1$ ,  $A_r = R_\alpha = B_\alpha = 0$ , что приводит к трем однородным уравнениям относительно  $C, D$  и  $F$ .

Из полученных уравнений

$$C = -\frac{(1 + \cos \alpha_1)^2}{8\pi(\lambda + 2G)} F, \quad (14.10)$$

$$D = -\frac{1 + \cos \alpha_1}{4\pi(\lambda + 2G)} F. \quad (14.11)$$

Составляя сумму проекций на ось  $x$  силы  $S$  и напряжений по сферической поверхности с центром в вершине конуса, получаем:

$$S = \frac{F}{4} \cdot \frac{(2 + \cos \alpha_1)\lambda + 2G}{\lambda + 2G} \cdot (1 - \cos \alpha_1)^2. \quad (14.12)$$

2. Нагружение конуса сжимающей (продольной) силой [124].

Найти распределение напряжений в бесконечном конусе  $\alpha = \alpha_1$ , в вершине которого вдоль оси конуса действует сила  $P$ .

Ввиду симметрии относительно оси  $z$ ,

$$u_\beta = A_\beta = R_\beta = 0, \quad \omega_r = \omega_\alpha = 0.$$

Уравнения в перемещениях при отсутствии массовых сил в случае, когда смещения обратно пропорциональны радиусу  $r$ , имеют вид:

$$\begin{cases} u_r = \frac{F}{4\pi G} \cdot \frac{\cos \alpha}{r}; \\ u_\alpha = -\frac{\lambda + 3G}{2(\lambda + 2G)} \cdot \frac{F}{4\pi G} \cdot \frac{\sin \alpha}{r}; \end{cases} \quad (14.13)$$

$$\begin{cases} R_r = -\frac{3\lambda + 4G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{\cos \beta}{r^2}; \\ A_\alpha = B_\beta = \frac{G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{\sin \alpha}{r^2}; \\ R_\alpha = -\frac{G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{\sin \beta}{r^2}; \end{cases} \quad (14.14)$$

$$\begin{cases} u_r = \frac{B}{r}; \\ u_\alpha = -\frac{B}{r} \cdot \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha}; \end{cases} \quad (14.15)$$

$$\begin{cases} R_r = -2G \frac{B}{r^2}; \\ R_\alpha = \frac{2GB}{r^2} \cdot \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha}; \\ A_\alpha = \frac{2GB}{r^2} \cdot \frac{\cos \alpha}{1 + \cos \alpha}; \\ B_\beta = \frac{2GB}{r^2} \cdot \frac{1}{1 + \cos \alpha}. \end{cases} \quad (14.16)$$

где  $F$  и  $B$  – произвольные постоянные.

Краевые условия задачи, при  $\alpha = \alpha_1 A_\alpha = R_\alpha = 0$ , после сокращения пропорциональных членов приводятся к одному уравнению вида:

$$B = -\frac{1 + \cos \alpha_1}{8\pi(\lambda + 2G)} F. \quad (14.17)$$

Второе условие для определения  $F$  получим, составив сумму проекций на ось конуса  $z$  силы  $P$  и напряжений по сферической поверхности с центром в вершине конуса. Из последнего уравнения следует:

$$P = \frac{F}{3(\lambda + 2G)} \left[ \lambda(1 - \cos^3 \alpha_1) + G(1 - \cos \alpha_1)(1 + \cos^2 \alpha_1) \right]; \quad (14.18)$$

Рассматривая данные задачи максимально приближенно к реальным конструкциям ТПР, принимаем  $\mu = 0,33$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ . Таким образом, упругие постоянные Лямэ составят:

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0,33}{(1+0,33)(1-2 \cdot 0,33)} = 11,3 \cdot 10^4; \quad (14.19)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{2 \cdot 10^5}{2(1+0,33)} = 7,5 \cdot 10^4. \quad (14.20)$$

В результате преобразования решений о нагружении бесконечного конуса (рис. 14.3) поперечной силой, найденных Митчеллом и подстановки значений найденных выше, получены следующие выражения:

$$F = 4S \cdot \frac{(2 + \cos \alpha_1) \lambda}{(2 + \cos \alpha_1) \lambda + 2G} \cdot \frac{1}{(1 - \cos \alpha_1)^2}, \quad (14.21)$$

$$C = -\frac{S(1 + \cos \alpha_1)^2}{2\pi(1 - \cos \alpha_1)^2} \cdot \frac{1}{(2 + \cos \alpha_1) \lambda + 2G}, \quad (14.22)$$

$$D = -\frac{S(1 + \cos \alpha_1)}{\pi(1 - \cos \alpha_1)^2} \cdot \frac{1}{(2 + \cos \alpha_1) \lambda + 2G}. \quad (14.23)$$

Считая, что теоретически угол между осью резца и образующей корпуса может изменяться в интервале значений 0–40 градусов (в практике используются резцы с углом конусности до 60 градусов), определим изменение силы  $S$  в зависимости от угла наклона образующей конуса к оси резца.

Учитывая значения упругих постоянных Лямэ, найденных выше, значения  $S$  в зависимости от угла  $\alpha$ , представлены в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Значения  $S$  в зависимости от угла конусности, с учетом постоянных Лямэ

$\alpha_1$	0	5	10	15	20
S	0	$0,07 \cdot 10^{-4} F$	$1,1 \cdot 10^{-4} F$	$5,4 \cdot 10^{-4} F$	$16,7 \cdot 10^{-4} F$
$\alpha_1$	25	30	35	40	45
S	$40 \cdot 10^{-4} F$	$55 \cdot 10^{-4} F$	$99 \cdot 10^{-4} F$	$162,6 \cdot 10^{-4} F$	$371 \cdot 10^{-4} F$

График зависимости результирующей силы от угла конусности представлен на рис. 14.4.

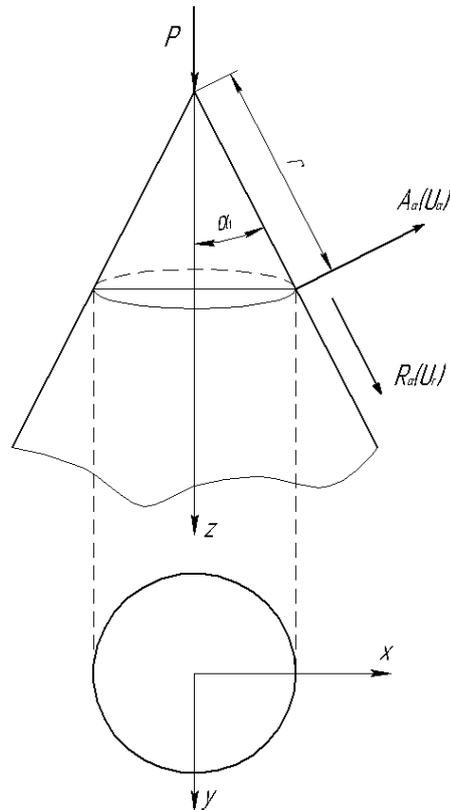


Рис. 14.3. Модель нагружения бесконечного конуса продольной силой:

$P$  – сила резания,  $\alpha$  – угол конусности,  
 $\beta$  – угол определяющий положение рассматриваемой точки по отношению к действующим силам,  $R$  – радиальная составляющая тензора напряжений,  
 $A$  – нормальная составляющая тензора напряжений,  
 $r$  – радиус сферы, описывающий расстояние от вершины до рассматриваемой точки

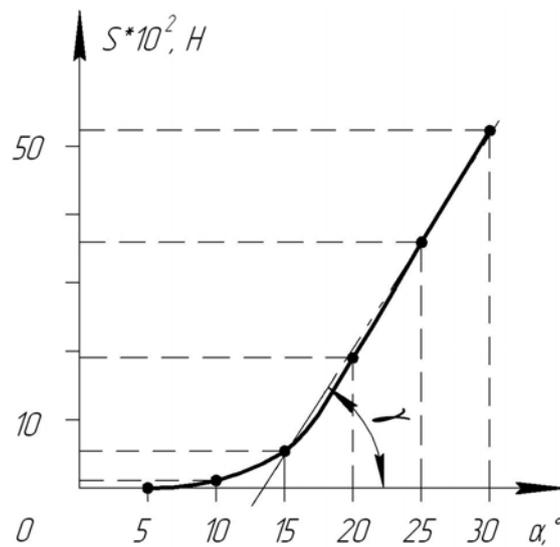


Рис. 14.4. – График зависимости предельной силы  $S$  от угла конусности  $\alpha$

$$\left\{ \begin{aligned} R_r &= -\frac{3\lambda + 4G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi G} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2} = -1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2} S; \\ A_\alpha = B_\beta &= \frac{G}{\lambda + 2G} \cdot \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2} = 17,37 \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2} S; \\ A_\beta &= 0; \\ B_r &= 17,37 \cdot \frac{\sin \beta}{r^2} S; \\ A_r &= -17,37 \cdot \frac{\cos \alpha \cos \beta}{r^2} S. \end{aligned} \right. \quad (14.24)$$

Компоненты напряжения для решения, при котором линия действия силы параллельна оси  $X$ , составят:

$$\left\{ \begin{aligned} R_r &= -1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2} S = \{\beta = 0\} = -1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\sin \alpha}{r^2} S; \\ A_\alpha = B_\beta &= 17,37 \cdot \frac{\sin \alpha \cos \beta}{r^2} S = \{\beta = 0\} = 17,37 \cdot \frac{\sin \alpha}{r^2} S; \\ A_\beta &= 0; \\ B_r &= 17,37 \cdot \frac{\sin \beta}{r^2} S = \{\beta = 0\} = 0; \\ A_r &= -17,37 \cdot \frac{\cos \alpha \cos \beta}{r^2} S = \{\beta = 0\} = -17,37 \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2} S. \end{aligned} \right. \quad (14.25)$$

При угле  $\beta = 0$ , определяются напряжения в наиболее нагруженном месте конуса.

Значения компонентов тензора напряжений представлены в табл. 14.2.

На рис. 14.5, 14.6 и 14.7 представлены зависимости компонентов тензора напряжений от угла конусности корпуса тангенциального поворотного реза.

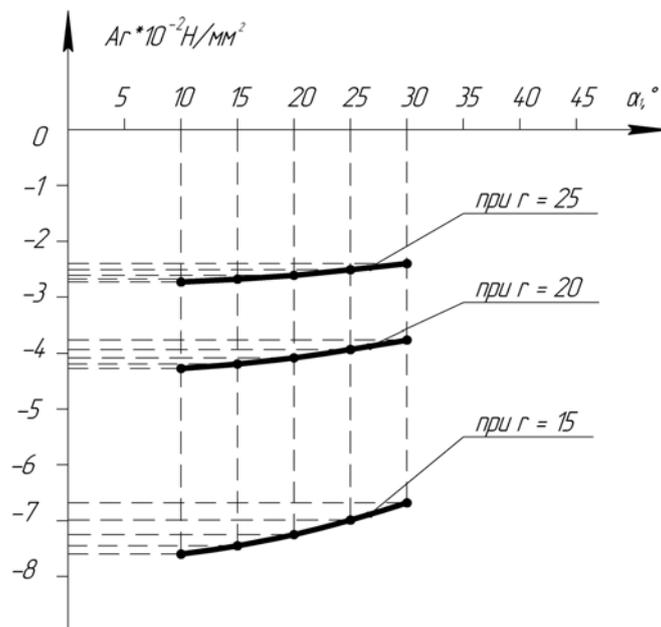


Рис. 14.5. График зависимости компонента тензора напряжений  $A_r$  от угла конусности  $\alpha$

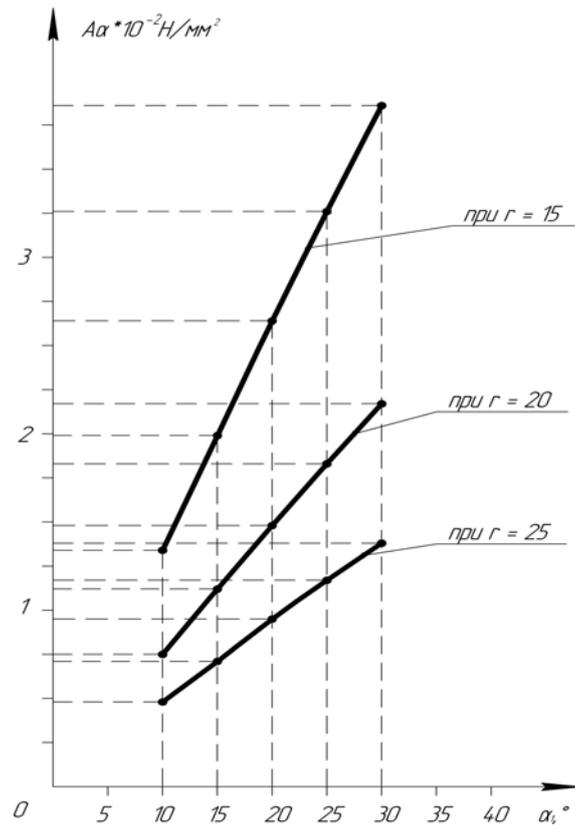


Рис. 14.6. График зависимости компонента тензора напряжений  $A_\alpha$  от угла конусности  $\alpha$

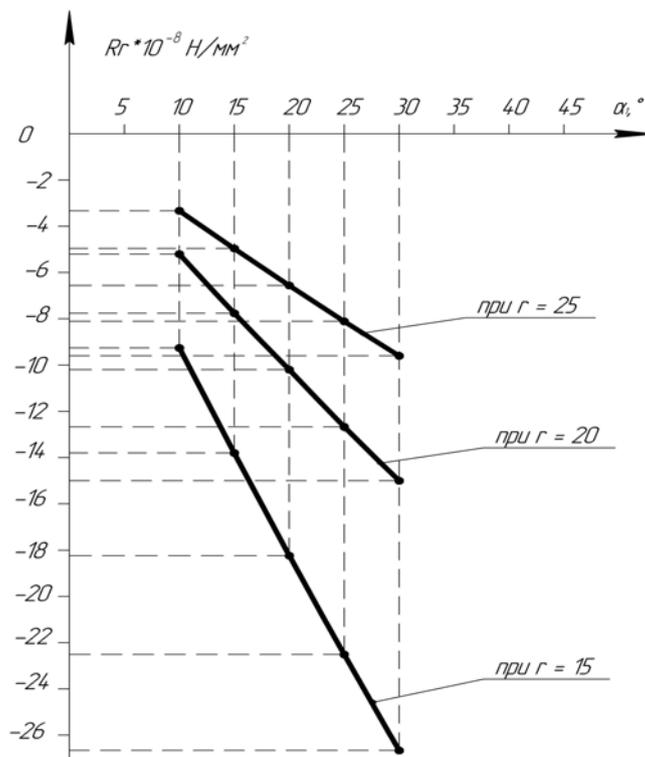


Рис. 14.7. График зависимости компонента тензора напряжений  $Rr$  от угла конусности  $\alpha$

Таблица 14.2

Значения тензора напряжений в зависимости от угла конусности

Угол конусности $\alpha$	Компоненты тензора напряжений					
	$R_r$	$A_\alpha$	$B_\beta$	$A_\beta$	$B_r$	$A_r$
при $r = 15$ мм						
10	$-9.26 \cdot 10^{-8} S$	$1.34 \cdot 10^{-2} S$	$1.34 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-7.6 \cdot 10^{-2} S$
15	$-13.8 \cdot 10^{-8} S$	$1.99 \cdot 10^{-2} S$	$1.99 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-7.45 \cdot 10^{-2} S$
20	$-18.24 \cdot 10^{-8} S$	$2.64 \cdot 10^{-2} S$	$2.64 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-7.25 \cdot 10^{-2} S$
25	$-22.51 \cdot 10^{-8} S$	$3.26 \cdot 10^{-2} S$	$3.26 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-6.99 \cdot 10^{-2} S$
30	$-26.66 \cdot 10^{-8} S$	$3.86 \cdot 10^{-2} S$	$3.86 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-6.68 \cdot 10^{-2} S$
при $r = 20$ мм						
10	$-5.20 \cdot 10^{-8} S$	$0.75 \cdot 10^{-2} S$	$0.75 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-4.27 \cdot 10^{-2} S$
15	$-7.76 \cdot 10^{-8} S$	$1.12 \cdot 10^{-2} S$	$1.12 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-4.19 \cdot 10^{-2} S$
20	$-10.2 \cdot 10^{-8} S$	$1.48 \cdot 10^{-2} S$	$1.48 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-4.08 \cdot 10^{-2} S$
25	$-12.67 \cdot 10^{-8} S$	$1.83 \cdot 10^{-2} S$	$1.83 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-3.93 \cdot 10^{-2} S$
30	$-15.00 \cdot 10^{-8} S$	$2.17 \cdot 10^{-2} S$	$2.17 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-3.76 \cdot 10^{-2} S$
при $r = 25$ мм						
10	$-3.33 \cdot 10^{-8} S$	$0.48 \cdot 10^{-2} S$	$0.48 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-2.73 \cdot 10^{-2} S$
15	$-4.96 \cdot 10^{-8} S$	$0.71 \cdot 10^{-2} S$	$0.71 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-2.68 \cdot 10^{-2} S$
20	$-6.56 \cdot 10^{-8} S$	$0.95 \cdot 10^{-2} S$	$0.95 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-2.61 \cdot 10^{-2} S$
25	$-8.11 \cdot 10^{-8} S$	$1.17 \cdot 10^{-2} S$	$1.17 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-2.51 \cdot 10^{-2} S$
30	$-9.6 \cdot 10^{-8} S$	$1.38 \cdot 10^{-2} S$	$1.38 \cdot 10^{-2} S$	0	0	$-2.4 \cdot 10^{-2} S$

Компоненты тензора напряжений  $A_\alpha$  и  $A_r$  в зависимости от расстояния до рассматриваемой точки имеют значения варьирующиеся в интервале:  $0,71 \div 3,86 \times 10^{-2} S$  и  $2,4 \div 7,6 \times 10^{-2} S$  соответственно.

Компонент тензора напряжений  $R_r$  в зависимости от расстояния до рассматриваемой точки имеет значения, варьирующиеся в интервале  $3,3 \div 26,6 \times 10^{-8} S$ .

Установлено, что кривая зависимости силы от угла конусности на интервале от 15 до 30 градусов (угол между образующей конуса и осью конуса), может быть описана уравнением:

$$S = k(\alpha - \alpha_0) \quad (14.26)$$

Таким образом, выяснена зависимость, определяющая максимальное значение силы для определенного угла конусности, при которых в конусе сохраняются упругие деформации.

Очевидно, что при превышении порога допустимых напряжений, конструкция охарактеризуется как непрочная, на поверхности ТПР наблюдаются сколы головной части резца (рис. 14.8).

Данные результаты подтверждаются структурой поломок корпуса тангенциальных поворотных резцов при проведении испытаний на угледобывающих предприятиях (рис. 14.8).

На основании изложенного можно утверждать, что известное решение Митчелла о напряженном состоянии бесконечного конуса, может быть положено в основу создания методики прочностного исследования тангенциальных поворотных резцов, а введение конкретных данных о материалах, о формах тангенциальных резцов позволяют

доводить расчеты до конкретных чисел и обеспечивать их прочность в зависимости от реально возникающих сил.



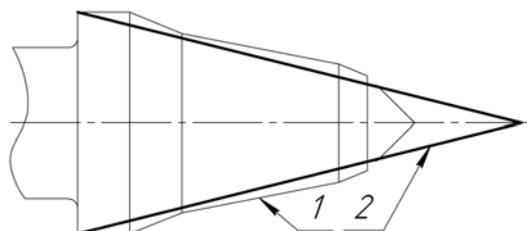
*Рис. 14.8. Скалывание головной части резца с потерей вставки, шахта Первомайская, 2005 г.*

Реально, конструкции тангенциальных поворотных резцов, оказываются достаточно сложными, т. е. не являются классическим конусом, они содержат в своей геометрии галтели, выточки, ступенчатые переходы.

Для исследования напряженного состояния резца в целом и, особенно в местах перехода, необходимо было рассмотреть наиболее близкие к реальным конструкциям модели резца.

На рис. 14.9 показана модель резца в виде классического конуса для определения напряженного состояния и головная часть реального тангенциального поворотного резца. Такой конструкции резца характерен ряд локальных изменений формы.

Всего таких приведенных отличий – пять, это: форма поверхности твердосплавной вставки; форма и вид соединения вставки с корпусом резца; наличие цилиндрического бурта; галтель перехода головной части резца к посадочной части и проточка для установки стопорного элемента.



*Рис. 14.9. Сопоставление реальной формы головной части ТПР в виде конуса:  
1 – форма головной части реального резца,  
2 – головная часть в виде конуса*

Наиболее существенными из них являются, галтель перехода головной части в хвостовую и зона закрепления вставки.

Во всех этих элементах могут появиться локальные концентраторы напряжений (рис. 14.10, а), в которых максимальные напряжения могут превосходить номинальные напряжения многократно.

При циклической, пульсирующей нагрузке, которой подвержен тангенциальный поворотный резец при разрушении массива, в зоне перехода головной части в хвостовую

вую, при отсутствии галтели, происходит развитие трещины. Наиболее опасным видом отказа резца для работоспособности очистного комбайна, является излом корпуса резца, который, происходит в месте перехода хвостовика, к опорной поверхности и приводит к нарушению схемы резания и истиранию резцедержателя о массив.



Рис. 14.10. Зона перехода головной части в хвостовую:  
*а* – с развитой трещиной, *б* – с галтелью,  
 1 – головная часть ТПР, 2 – дефект в зоне концентрации напряжений,  
 3 – хвостовая часть

При производстве корпусов тангенциальных поворотных резцов применяют в основном три технологических схемы:

1. Клиновая прокатка – является наиболее производительной, но является наименее качественной (разница в размерах, овальность).

2. Токарная обработка [125] – при данной схеме заготовка нарезается нужной длины и затем по копиру или на станках с ЧПУ происходит обработка корпуса заданной геометрии.

3. Применение штамповки [126] для придания головной части требуемой геометрии с последующей токарной обработкой технологических элементов (сверловка под вставку, проточка под замковое устройство).

При любой используемой схеме производства ТПР, так или иначе, возникают технологический дефект: отсутствие галтели в зоне перехода головной в хвостовую части. Применение двух последних схем (как самых распространенных) исключает появление овальности хвостовой части, но явление отсутствия галтели в зоне перехода является общим признаком для любого из выше перечисленных способов производства.

Рассмотрим влияние различных дефектов [127] на прочность ТПР, расчет будет производиться с использованием численного метода (метода конечных элементов).

Так называемая «Эра вариационных методов» [128] (приблизительно 1964–1973 гг.) дала жизнь теории конечных элементов и обеспечила ей строгое математическое обоснование. С математической точки зрения наиболее интересными оказались пути последующего развития метода конечных элементов.

МКЭ – один из основных методов решения задач строительной механики [129], механики твердого тела, теплопроводности, гидромеханики и т. д. МКЭ – представляет собой обобщение метода Релея – Ритца – Галеркина, обеспечивающего минимизацию функционала потенциальной энергии путем отыскания линейной комбинации пробных функций.

Основная проблема [130] заключается в выборе пробных функций, обеспечивающих простоту вычислений и достаточную точность. Принимая в качестве базовой формы МКЭ, форму метода перемещений, разрешающие уравнения получают путем минимизации полной потенциальной энергии системы, выраженной через перемещения. Выбор вида конечного элемента и его размеров имеет существенное влияние на достоверность результатов расчета.

Расчет с помощью МКЭ в форме метода перемещений [131] включает следующие этапы:

1. Разбиение конструкции на конечные элементы и подготовка топологической, геометрической и физической информации; установление факторов взаимодействия с окружающей средой.

2. Построение для выделенных конечных элементов соответствующих матриц и векторов, определяющих зависимости между реакциями и перемещениями в узлах элемента.

3. Формирование разрешающей системы линейных алгебраических и дифференциально-алгебраических уравнений [132].

4. Решение полученной системы уравнений и установление полей перемещений, внутренних силовых факторов, температуры и т. д.

5. Обработку результирующей информации и ее анализ.

Расчеты на основе этого метода находят широкое применение при решении задач механики сплошных сред. Объясняется это широкой возможностью МКЭ и возможностью идеализации самых сложных конструкций конечными элементами простой конфигурации [133].

Метод МКЭ основан на идеализации сплошного тела (континуума) совокупностью конечных элементов [134], взаимодействующих между собой в конечном числе узловых точек и вполне подходит для предварительного суждения о напряжениях и деформациях.

Для расчета воспользуемся системой Ansys 9.0 интегрированной в программный комплекс Solid Works 2007. Эта программа [135] позволяет выполнять расчеты двух- и трехмерных тел для случаев плоского и объемного напряженного – деформированного состояний, результаты вычислений соответствуют третьей (теория максимальных касательных напряжений) и четвертой (критерий максимальной энергии формообразования) теории прочности [136] и выводятся в качестве напряжений по Мизесу и интенсивности напряжений.

В качестве конечного элемента был выбран SOLID 95, применяемый при расчетах трехмерных тел [137].

Элемент SOLID 95 (рис. 14.11) представляет собой объемный шестигранник подобный SOLID 45, но имеющий не 8, а 20 узлов [138].

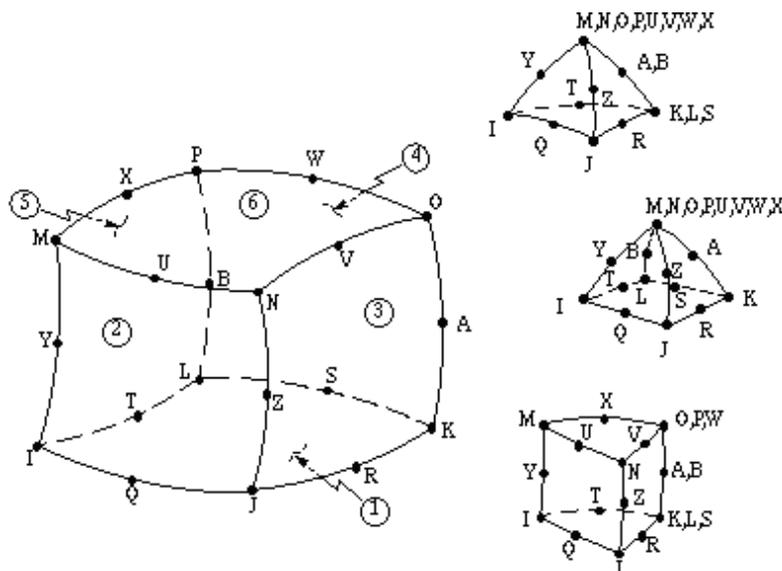


Рис. 14.11. Элемент SOLID 95

К узлам, находящимся в вершине, добавлены промежуточные узлы на серединах сетки. Он поддерживает элементы вырожденной формы: четырехугольные, призматические, пирамидальные.

Объектом для расчета примем упрощенную модель резца. Упрощение будет заключаться в принятии корпуса резца и твердосплавной вставки, как однородной конструкции.

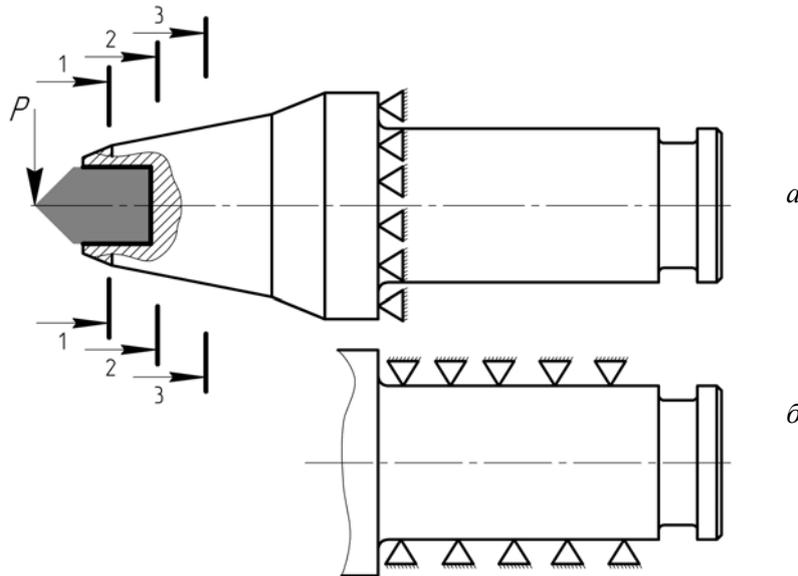


Рис. 14.12. Приложения нагрузки и ограничений к ТПР:  
*a* – головная часть резца представлена жесткозакрепленной консольной балкой;  
*б* – закрепление, которое моделирует неполную посадку резца;  
*P* – изгибающая сила

Моделирование взаимодействия с разрушаемой средой достигается представлением резца в виде жесткозакрепленной консольной балки с приложенной к ней изгибающей силы (рис. 14.12).

Максимальные напряжения [139], при которых ТПР может оставаться вполне работоспособным, можно найти по зависимости

$$\sigma = \frac{Pl}{I} y \leq [\sigma]. \quad (14.27)$$

где *P* – изгибающая сила, *l* – конструктивный вылет, *I* – осевой момент инерции.

Результаты [140] расчетов произведенных методом определения максимальных напряжений в опасном сечении в сравнении с расчетами, произведенными МКЭ, показали, что погрешность составляет 7 %.

Таким образом, получены методические основания, позволяющие производить исследования напряженного состояния тангенциальных поворотных резцов, обладающих различными формами головной части, содержащих различные технологические дефекты.

Очевидно, что напряжения в опасных сечениях резцов не должны превосходить допускаемых напряжений.

Естественно, что в остальных сечениях резца напряжения будут меньше допускаемых, то есть все сечения резца, кроме опасного, имеют излишний запас прочности.

Наиболее рациональной формой головной части резца следует считать такую, при которой во всех сечениях напряжения будут одинаковыми и не более допустимых.

Такие конструкции называют равнопрочными [141]. Для них изменение площади сечения по длине  $X$  (рис. 14.13) должно удовлетворять условию:

$$\frac{M_x}{W_x} = \sigma = const. \quad (14.28)$$

То есть моменты сопротивления сечений должны быть прямо пропорциональны соответствующим изгибающим моментам.

Согласно [142], максимальные усилия резания, зарегистрированные при использовании одиночных резцов могут достигать 10 кН.

В результате анализа существующих конструкций резцов [25], [143], применяемых для работы по углю и углю с присечкой породы, было замечено, что, в большинстве случаев, вылет твердосплавной вставки и диаметр корпуса в месте их закрепления у всех резцов одинаков и составляет соответственно 10 и 20 мм.

В связи с этими данными, вполне возможно установить оптимальные размеры корпуса тангенциальных поворотных резцов в зависимости от усилия резания, конструктивного вылета резцов.

Подстановка приведенных выше средних значений прикладываемой силы и реальных значений вылета в формулу (14.28) позволяет найти, возникающие в теле резца напряжения  $\sigma_x \cong 250 \text{ МПа}$ .

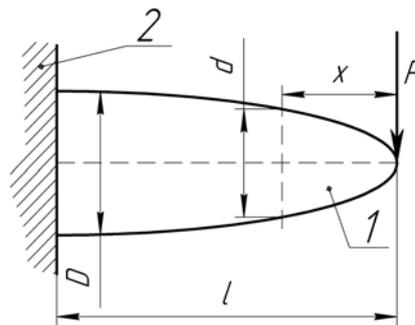


Рис. 14.13. Схема расчета параметров равнопрочной балки:  
 1 – консольная балка, 2 – опора,  
 P – изгибающая сила, D – диаметр балки в месте заделки,  
 x – переменный конструктивный вылет

Такие напряжения оказываются меньшими, в сравнении с допустимыми для стали 35ХГСА, из которой изготавливаются корпуса резцов.

Закон изменения диаметров сечений головной части резца, обеспечивающих равнопрочность корпуса можно определить из зависимости

$$d_x = \sqrt[3]{\frac{32P \cdot x}{\pi \cdot \sigma_x}}. \quad (14.29)$$

где  $x$  – переменный конструктивный вылет.

Результаты расчетов для четырех значений конструктивного вылета (60, 70, 75, 90 мм) представлены в табл. 14.3.

Рассчитанные параметры головной части являются оптимальными с точки зрения равнопрочности корпуса резца, уменьшение поперечных сечений головной части приводит к снижению усилия внедрения резца в массив.

Таким образом, конструкции тангенциальных поворотных резцов, выпускаемые во всем многообразии заводами-изготовителями горного инструмента, должны удовлетворять критерию равнопрочности.

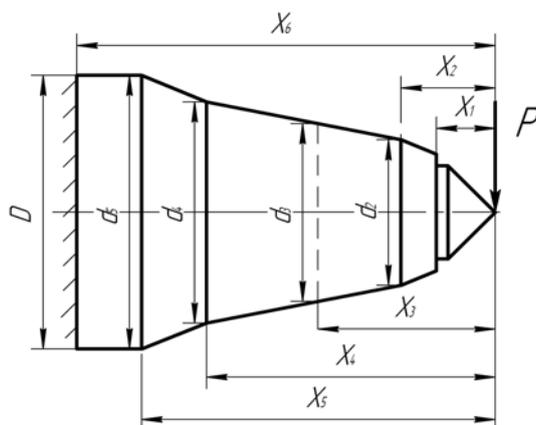
Известно, что поверхности, реализуемые физически, могут лишаться касательной плоскости в так называемых конических точках [145]. Такие точки всегда являются концентраторами напряжений в физическом теле и тела, не имеющие в таких точках площади сечения, не могут сопротивляться воздействию нагрузок, что приводит к разрушению тел.

Таблица 14.3

*Параметры головной части ТПР  
при разных значениях конструктивного вылета*

<i>l = 60 мм.</i>									
x1	10	x2	15	x3	30	x4	40	x5	50
d1	20*	d2	21,5	d3	27	d4	30	d5	45*
<i>l = 70 мм.</i>									
x1	10	x2	15	x3	30	x4	50	x5	60
d1	20*	d2	21,5	d3	27	d4	32	d5	45*
<i>l = 75 мм.</i>									
x1	10	x2	15	x3	35	x4	50	x5	60
d1	20*	d2	21,5	d3	29	d4	32	d5	50*
<i>l = 90 мм.</i>									
x1	10	x2	25	x3	40	x4	55	x5	70
d1	20*	d2	25,5	d3	30	d4	33	d5	50*
<i>* обеспечивается технологией производства резца</i>									

На рис. 14.14 представлена расчетная схема тангенциального поворотного резца выполненного в виде равнопрочной балки [144].



*Рис. 14.14. Схема расчета равнопрочной балки:  
P – изгибающая сила; D – диаметр балки в месте заделки;  
x – переменный конструктивный вылет*

Исключение концентраторов напряжений достигнуто выполнением поверхности вставки в таком виде, при котором на ней исключаются конические точки, т. е. она во всех сечениях описывается монотонной функцией в широком смысле. Такие поверхности называют гладкими [146].

#### 14.2. Определение напряженно-деформированного состояния тангенциального поворотного резца с применением метода конечных элементов

Для вооружения исполнительного органа комбайна применяются ТПР с различной конструкцией головной части: с линейной, вогнутой и выпуклой образующей (рис. 14.15).

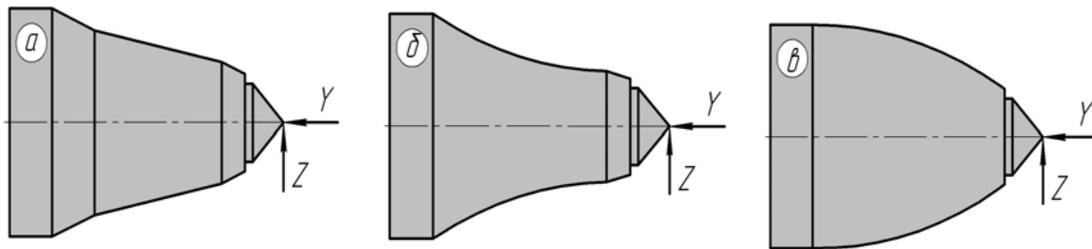


Рис. 14.15. ТПР с различной формой головных частей:  
а – линейной; б – вогнутой; в – выпуклой

Расчетные модели соответствовали по геометрии реальным конструкциям головных частей резцов – одного из основных производителей резцов в Кузбассе – ООО «Горный инструмент», изготовленных из легированной стали 35ХГСА с физическими характеристиками  $E = 2,15 \cdot 10^5$  МПа,  $\nu = 0,3$ . К вершине резца прикладывалось изгибающее усилие в 4 кН. Торцевая поверхность головной части закреплялась неподвижно. В качестве конечного элемента использовался элемент *SOLID95*.

На рис. 14.16–14.18 представлено напряженное состояние головных частей ТПР.

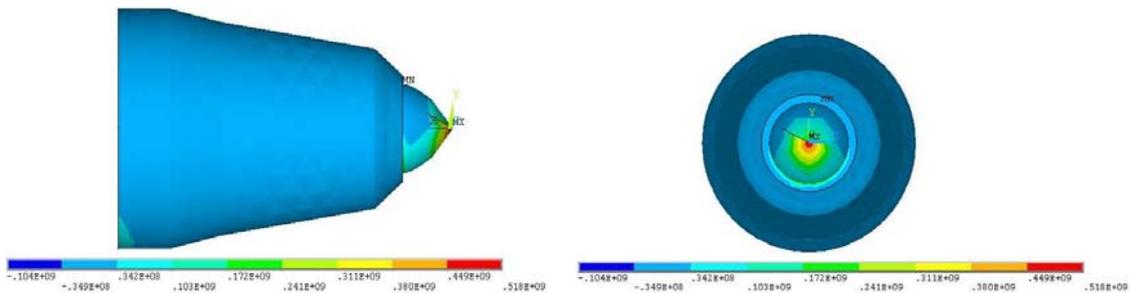


Рис. 14.16. Напряженное состояние головной части (SI) с линейной образующей

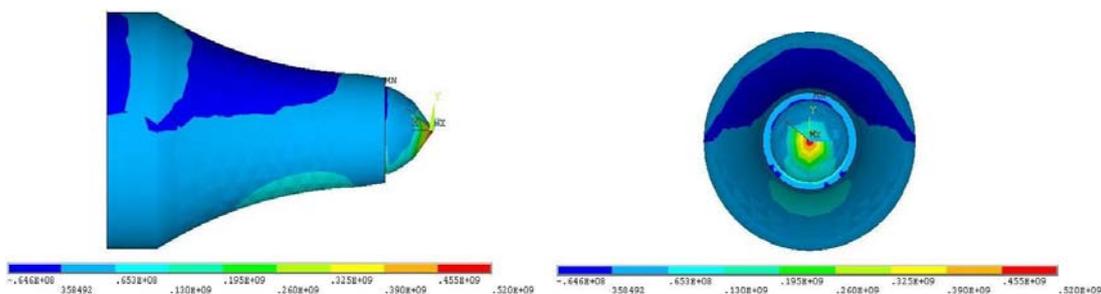


Рис. 14.17. Напряженное состояние головной части (SI) с вогнутой образующей

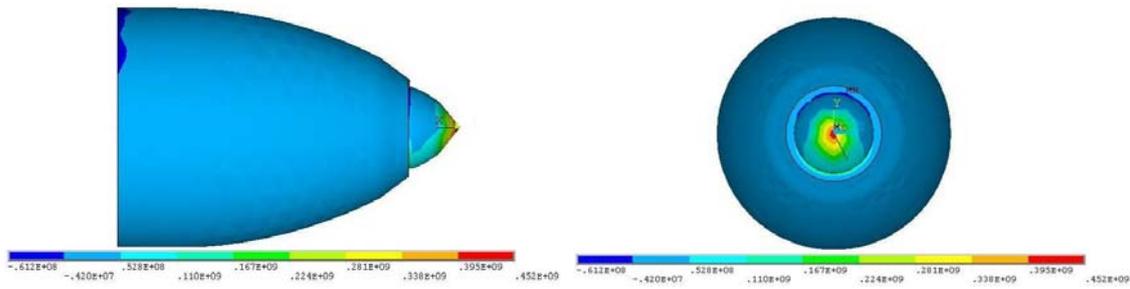


Рис. 14.18. Напряженное состояние головной части ( $S_1$ ) с выпуклой образующей

Результаты расчета представлены напряжениями, действующими на главных площадках ( $S_1, S_2, S_3$ ), а также нормальными напряжениями ( $S_x, S_y, S_z$ ) и эквивалентными напряжениями.

Исследование напряженного состояния головных частей тангенциальных поворотных резцов (рис. 14.16–14.18) позволяет оптимизировать их конструкцию и определить область применения той или иной формы головной части резца.

Сравнение напряжений возникающих в теле резца позволило сделать вывод, что наиболее прочной является выпуклая головная часть, а наименее – вогнутая.

Как известно, головная часть резца может быть выполнена как гладкое тело вращения с определенной криволинейной образующей, так и с дополнительно сформированными ребрами жесткости (рис. 14.19). В практике встречаются резцы, имеющие 3, 4 и 5 ребер жесткости.

Ребра жесткости обеспечивают резцу более высокую прочность и сообщают ему дополнительное вращение. Угол конусности головной части резца составляет 12–17 градусов, что согласно [147], является наиболее рациональным.

Определим напряжения, возникающие в головной части резца с тремя ребрами жесткости.

Прежде всего численно определим в трех сечениях максимальные напряжения. Сечения отстоят от вершины ТПР соответственно на 15, 25 и 35мм. На рис. 14.19 эти сечения обозначены как  $S_1, S_2, S_3$  соответственно.

Расчеты напряжений для каждого из сечений, включая параметры сечений, представлены в табл. 14.4.

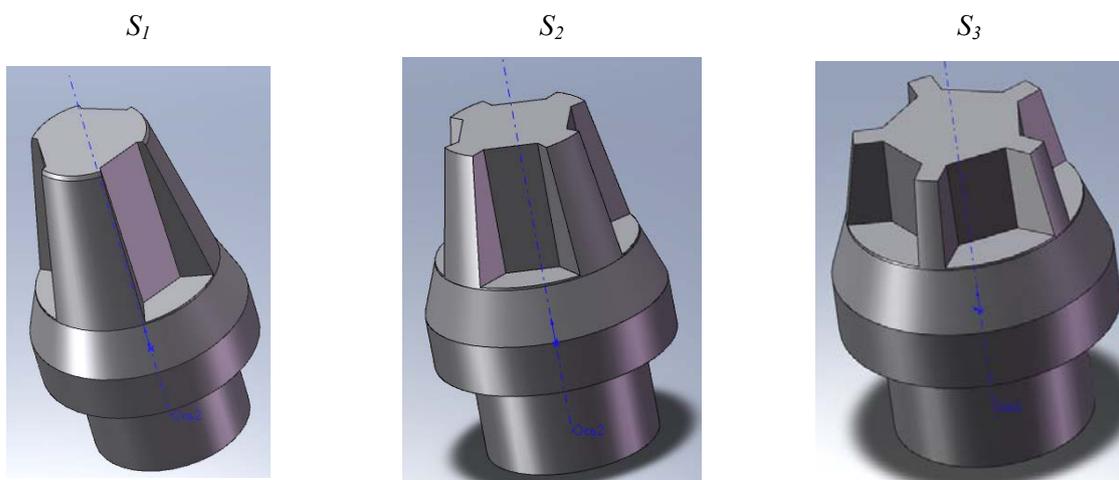


Рис. 14.19. Сечения корпуса ТПР с ребрами жесткости

Таблица 14.4

*Расчеты напряжений в сечениях от вершины ТПР с тремя ребрами*

№ рассм. сечения	$S_{\text{сеч}}, \text{мм}^2$	$l_1, \text{мм}$	$J_p, \text{мм}^4$	$J_x = J_y, \text{мм}^4$	$\sigma, \text{МПа}$
1	394,0	15,0	25480,0	12740,0	61
2	500,0	25,0	43160,0	21578,0	66
3	609,0	35,0	66930,0	33466,0	67

Таким образом, напряжения в соответствующих сечениях равно 35 МПа ( $S_1$ ), 66 МПа ( $S_2$ ) и 67 МПа ( $S_3$ ).

Далее определим напряжения, возникающие в головной части резца с четырьмя ребрами жесткости. Исследование напряженно-деформированного состояния ТПР с четырьмя ребрами жесткости, проведено аналогично исследованию резца с тремя ребрами жесткости.

Расчеты напряжений для каждого из сечений, включая параметры сечений, представлены в таблице 14.5.

Таблица 14.5

*Расчеты напряжений в сечениях от вершины ТПР с четырьмя ребрами*

№ рассм. сечения	$S_{\text{сеч}}, \text{мм}^2$	$l_1, \text{мм}$	$J_p, \text{мм}^4$	$J_x = J_y, \text{мм}^4$	$\sigma, \text{МПа}$
1	373,0	15,0	22890,0	11450,0	68
2	455,0	25,0	36130,0	18100,0	79
3	540,0	35,0	53800,0	26900,0	84

Напряжения в соответствующих сечениях составят 40 МПа ( $S_1$ ), 79 МПа ( $S_2$ ) и 84 МПа ( $S_3$ ).

Затем определим напряжения, возникающие в головной части резца с пятью ребрами жесткости. Исследование напряженно-деформированного состояния ТПР с пятью ребрами жесткости, проведено аналогично исследованию резца с тремя ребрами жесткости. Расчеты напряжений для каждого из сечений, включая параметры сечений, представлены в таблице 14.6.

Таблица 14.6

*Расчеты напряжений в сечениях от вершины ТПР с пятью ребрами*

№ рассм. сечения	$S_{\text{сеч}}, \text{мм}^2$	$l_1, \text{мм}$	$J_p, \text{мм}^4$	$J_x = J_y, \text{мм}^4$	$\sigma, \text{МПа}$
1	352,0	15,0	20300,0	11150,0	76
2	410,0	25,0	29100,0	14550,0	99
3	470,0	35,0	40650,0	20300,0	111

В табл. 14.7 приведены сводные данные о напряжениях, действующих в опасных сечениях для резцов с 3, 4 и 5 – ребрами жесткости

Сводные данные по напряжениям в опасных сечениях для ТПР

№	Тип резца	Напряжения, МПа		
		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
1	ТПР с 3 ребрами жесткости	61	66	67
2	ТПР с 4 ребрами жесткости	68	79	84
3	ТПР с 5 ребрами жесткости	76	99	111

Из таблиц следует, что наиболее предпочтительной формой головной части с ребрами жесткости, с точки зрения напряженного состояния, является 3-реберная модель головной части резца.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что наиболее напряженными участками конструкции тангенциального поворотного резца являются: зона перехода головной части в хвостовую часть, и зона закрепления твердосплавной вставки. Использование резцов с ребрами жесткости является перспективными при условии определения области применения, причем наиболее оптимальной следует считать конструкцию резца, содержащую три ребра жесткости расположенных через 120 градусов.

### 14.3. Определение напряженного состояния твердосплавных вставок тангенциальных поворотных резцов различных форм

При разрушении угольного массива вся энергия передается через тангенциальные поворотные резцы, а точнее через твердосплавную вставку. При этом твердосплавная вставка испытывает как сжимающую, так и изгибающую нагрузку.

Моделируя корпус резца и часть режущей вставки (запаянной в корпусе) жестко-закрепленной, можно определять напряженно-деформированное состояние самой вставки [148], возникающее от воздействия сил сопротивления разрушению среды.

Консольное закрепление вставки по цилиндрической поверхности обуславливает однородность напряжений в пределах зоны закрепления [149].

На рис. 14.20 представлена расчетная схема нагружения твердосплавной вставки.

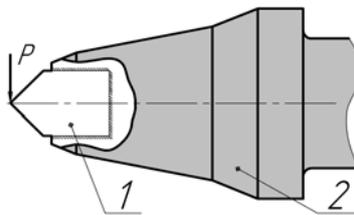


Рис. 14.20. Расчетная схема для определения эквивалентных напряжений в твердосплавной вставке цилиндрической формы:

$P$  – изгибающая сила;

1 – твердосплавная вставка; 2 – корпус ТПР

В связи с тем, что твердый сплав наилучшим образом сопротивляется изгибу, исследование прочности вставок производится при моделировании поперечного изгиба.

В качестве армирующих элементов резца, применяются вставки различной геометрической конфигурации (14.21): цилиндрическая, грибовидная, а также вставки с различной гауссовой кривизной (эллипсоид вращения).

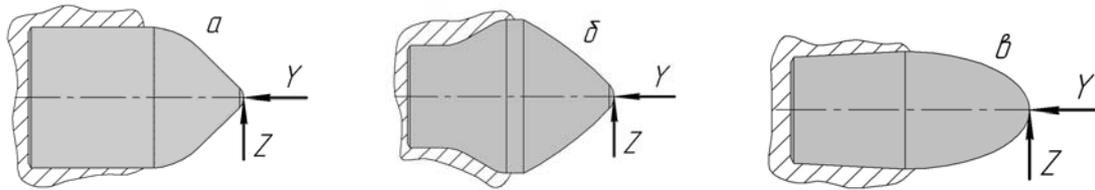


Рис. 14.21. Расчетные модели твердосплавных инденторов различных форм:  
*a* – цилиндрической; *б* – грибковой; *в* – эллипсоид-вращения

Расчетные модели инденторов, были представлены геометрически точными конструкциями вставок (производства завода «КЗТС» – основного производителя твердых сплавов в РФ), с физическими параметрами ( $E=5,98 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu=0,2$ ) соответствующими вольфрамокобальтовому твердому сплаву, с приложенной к вершине изгибающей силой 4 кН и закрепленной посадочной частью. В качестве конечного элемента использовался элемент SOLID95. Напряженное состояние для вставок различных форм представлено на рис. 14.22, 14.23 и 14.25.

Результаты расчета представлены напряжениями, действующими на главных площадках ( $S_{1,2,3}$ ), а также нормальными напряжениями ( $S_{x,y,z}$ ) и эквивалентными напряжениями.

Очевидно, что распределение и максимальные значения напряжений в теле твердосплавных вставок цилиндрической и «грибковой» форм от действия изгибающей силы являются близкими.

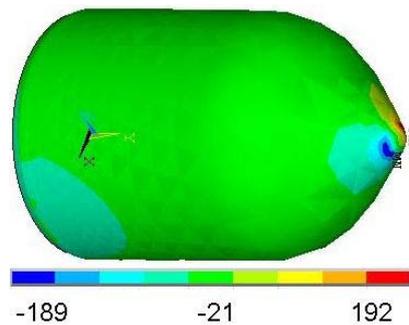


Рис. 14.22. Напряженное состояние вставки цилиндрической формы ( $S_1$ )

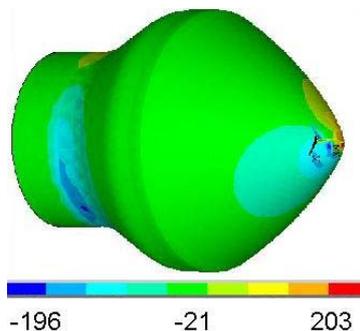


Рис. 14.23. Напряженное состояние вставки грибковой формы ( $S_1$ )

При применении грибковой формы вставки, так называемая «шляпка» защищает поверхность закрепления от износа, чем достигается более продолжительная работоспособность ТПР. Обязательным условием при этом является выполнение посадочной части грибковой вставки более длинной, чем режущая часть вставки.

$$l_{п.ч} = k \cdot l_0, \quad (14.30)$$

где  $l_{п.ч}$  – длина посадочной части вставки,  $l_0$  – конструктивный вылет вставки,  $k = 1.2 \dots 2$  – коэффициент увеличения длины посадочной части.

Полученные на рис. 14.22 и 14.23 эквивалентные напряжения, соответствуют выкрашиванию режущей вставки (рис. 14.24), имеющему место при реальном взаимодействии твердого сплава ТПР с массивом.



Рис. 14.24. Выкрашивание вершины режущей вставки

Режущие вставки, приведенные выше, имеют существенный недостаток. Все эти вставки по аналогии с режущими инструментами, применяемыми при бурении горных пород, имеют заостренную форму. Это приводит к тому, что вершина вставки представляет собой не что иное, как мощный концентратор напряжений.

Применение вставок, не имеющих концентраторов напряжений в вершине, а обладающие некоторой гауссовой кривизной – перспективное направление совершенствования ТПР.

В настоящей работе было показано, что более предпочтительной с точки зрения разрушения массива, является тупая вставка. Рассмотрим напряженное состояние твердосплавной вставки с рабочей частью в виде эллипсоида вращения.

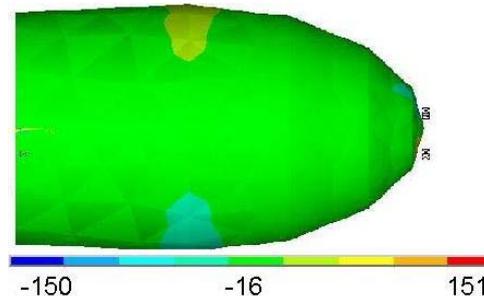


Рис. 14.25. Напряженное состояние вставки в виде эллипсоида вращения (SI)

Известно, что эллипсоид – как поверхность 2-го порядка с центром симметрии, описывается каноническим уравнением в виде

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1. \quad (14.31)$$

Эллипсоид [150] образуется путем вращения эллипса (задаваемого уравнением  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  при  $a = b < c$ ) лежащим в плоскости  $OXZ$ , вокруг его большей оси.

Чтобы избавиться от концентратора напряжений, нужно задать вершине эллипсоида минимально допустимый радиус кривизны.

Известно, что гауссова кривизна поверхности определяется зависимостью

$$K = \frac{1}{\rho_1} \cdot \frac{1}{\rho_2}, \quad (14.32)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – главные кривизны в рассматриваемых точках. Для эллипсоида вращения:  $\rho_1 = R_1, \rho_2 = R_2$ .

$$K = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2} = 0,264a^2. \quad (14.33)$$

На рис. 14.25 представлено напряженное состояние твердосплавной вставки с рабочей поверхностью в форме эллипсоида вращения. Вставка конструктивно выполнена таким образом, чтобы посадочная часть (идентичная посадочной части цилиндрической вставки) сопрягалась с полуэллипсоидом вращения. Напряжения, возникающие в теле вставки, имеют меньшие значения, так как благодаря гладкой поверхности эллипсоида и более медленной скорости изменения площади поперечного сечения (в сравнении с конусом) отсутствуют концентраторы напряжений.

Таким образом, результаты исследования НДС твердосплавных вставок различных форм с помощью численных методов (метода конечных элементов), позволяют утверждать, что с точки зрения прочности конструкций вставок, очевидные преимущества имеют вставки в форме тел вращения второго порядка, в частности эллипсоид вращения (ввиду меньшего значения гауссовой кривизны).

## 15. ОСНОВЫ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ И РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА

### 15.1. Правила приемки

При разработке и эксплуатации резцы должны быть подвергнуты в соответствии с ГОСТ 16504-81 [152] предварительным, приемочным (межведомственным), квалификационным и эксплуатационным испытаниям. Конкретный перечень испытаний, которым должны быть подвергнуты резцы, определяется техническим заданием.

Применяемость показателей в зависимости от видов испытаний приведена в табл. 15.1.

Таблица 15.1

*Применяемость показателей в зависимости от видов испытаний*

Наименование показателя	Виды испытаний					
	Предварительные	Приемочные	Приемосдаточные	Квалификационные	Эксплуатационные	Сертификационные
1. Габаритные размеры						
2. Конструктивный вылет и длина хвостовика						
3. Размеры сечения хвостовика или диаметр						
4. Задний конструктивный угол						
5. Угол заострения						
6. Твердость державки в зонах закалки, вставки						
7. Прочность соединения вставки с резцом						
8. Прочность резца						
9. Суммарная длина разрыва слоя припоя						
10. Трещины и выкрашивание вставок						
11. Нависание и западание вставок по задней и боковой поверхностям						
12. Режущая способность резца						
13. Удельный расход резцов						
14. Нарботка на резец						
15. Масса резца						
16. Удельная масса резца						
17. Удельная масса вставок резцов						
18. Показатель приведенной степени измельчения угля						
19. Относительная взрывобезопасность						

При изготовлении резцы должны быть подвергнуты приемосдаточным и периодическим испытаниям.

Предварительные приемочные (междуведомственные), квалификационные и эксплуатационные испытания резцов проводят по специальным методикам, разрабатываемым в соответствии с разделом 8 по ГОСТ Р 51047-97 [18] для резцов конкретных видов.

*Примечание:* знаком «+» отмечены показатели, которые контролируют при испытаниях; знаком «-» – отмечены показатели, которые не контролируются при испытаниях.

При приемосдаточных испытаниях резцов должны быть выполнены следующие проверки:

1. Соответствие требованиям ТУ материалов, применяемых при изготовлении резцов.

2. Линейные и угловые размеры. Для проверки отбирают не менее пяти резцов от партии в 100 шт.

3. Прочность паяного соединения твердосплавной вставки с державкой. Для испытаний ежемесячно отбирают по 3 резца от партии в 100 шт.

4. Твердость резцов после термообработки. Для испытаний ежемесячно отбирают по 5 резцов от каждой установки для закалки или по пять резцов от каждой партии в 100 шт.

5. Отсутствие наплавов припоя или флюса – на каждом резце.

6. Отсутствие разрывов стоя припоя – на каждом резце.

7. Отсутствие трещин на твердосплавных вставках. Для испытаний отбирают по десять резцов от каждой партии в 100 шт.

При неудовлетворительных результатах проверки по одному из выше приведенных пунктов должны быть проведены повторные испытания на удвоенном количестве резцов, взятых из той же партии.

При неудовлетворительных результатах повторной проверки бракуют всю контрольную партию резцов.

Периодические испытания следует проводить не реже одного раза в год в объемах, установленных нормативной документацией на резец конкретного типа.

## **15.2. Цели приемочных испытаний**

Приемочные испытания опытных образцов (опытных партий) резцов проводятся с целью определения их соответствия техническому заданию, требованиям стандартов и конструкторской документации, техники безопасности и промышленной санитарии, возможности постановки на промышленное производство (или разработки предложений о целесообразности продолжения работ по данному изделию), а также для подготовки рекомендаций по категории качества.

Программа и методика испытаний должны обеспечивать получение данных, необходимых для определения фактической технической характеристики изделия, его эксплуатационных качеств, экономической эффективности промышленного применения.

Оценка эксплуатационных качеств режущего инструмента должна производиться по следующим основным показателям:

- 1) производительности горной машины;
- 2) удельному расходу резцов (шт./1000 т) – общему, приведенному и по видам отказов (износу, поломкам и выпадению твердосплавной вставки (пластины), поломкам корпусов резцов и их потерям);
- 3) наработке на резец (т/шт.) – при применении на исполнительных органах резцов разных типов;

- 4) удельному весу (%) резцов, пригодных для повторного использования;
- 5) удельному расходу твердого сплава (г/1000 т);
- 6) сортности добываемого угля и пылеобразованию;
- 7) энергоемкости выемки угольного пласта;
- 8) динамической нагруженности горной машины;
- 9) интенсивности изнашивания резцов (мм/км, мм<sup>2</sup>/км) – только при испытании резцов с новыми марками твердого сплава.

При испытании новых средств крепления резцов оценка их эксплуатационных качеств производится по следующим показателям:

- 1) трудоемкости крепления – времени на замену резца, мин/резец;
- 2) надежности крепления – удельному расходу резцов из-за потерь, шт./тыс. т;
- 3) сроку службы (ч) или наработке (т/шт.) крепления, его отдельных элементов и резцедержателей;
- 4) степени универсальности крепления (возможность применения на одном или нескольких исполнительных органах и резцах).

По результатам испытаний резцов и средств крепления также устанавливаются:

- 1) экономическая эффективность их промышленного применения;
- 2) объем производства установочной серии.

### **15.3. Виды приемочных испытаний**

Программа и методика должны предусматривать проведение испытаний новых изделий в сравнении с серийно выпускаемыми резцами и средствами их крепления в случаях, если:

- 1) новое изделие (режущий инструмент или конструкция крепления) предназначено для замены определенного изделия, серийно выпускаемого для данной области применения и данного типа машины;
- 2) в модернизированном изделии изменена конструкция, технология изготовления или материал и оно соответствует по области применения серийно выпускаемому изделию.

Сравнительные испытания проводятся на одной машине и в одном забое. Испытания режущих инструментов рекомендуется проводить при одинаковых способах крепления.

### **15.4. Объект испытаний**

В программе и методике испытаний должны быть отражены:

- 1) наименование испытываемого изделия;
- 2) назначение;
- 3) соответствие типоразмерному ряду (для резцов);
- 4) конструкция;
- 5) предполагаемая область применения;
- 6) соответствие изделия ТЗ;
- 7) необходимая рабочая документация в соответствии с ОСТ 12.47.008-74 [153].

Техническая характеристика испытываемых резцов составляется по форме, представленной в табл. 15.2, а форма регистрации для схемы расстановки резцов – в табл. 15.3.

Техническая характеристика испытываемых креплений должна содержать сведения о конструкции резцедержателя и резца, зазорах в соединении резца и резцедержателя, конструктивных особенностях, материале, способах установки и снятия резца. В методике указывается тип комбайна, на котором будут проводиться испытания, и принятая схема (чертеж) расстановки испытываемых резцов на исполнительном органе.

Таблица 15.2

Форма для записи параметров технической характеристики резцов

Типоразмер резца	Шифр резца	Масса резца, г	Характеристика режущей части										Характеристики хвостовика				Способ крепления в резцедержателе	Дополнительные данные
			Вылет резца, мм	Ширина режущей кромки, мм	Форма режущей кромки	Форма передней грани	Углы резца, град			Форма твердосплавной вставки* и масса, г	Марка твердого сплава	Марка припоя	Сечение, мм	Длина, мм	Размеры упора	Марка стали		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

282 Примечание: \* В случае применения нестандартной твердосплавной вставки должен быть приведен ее чертеж и основные размеры.

Таблица 15.3

Форма регистрации параметрической схемы расстановки резцов

Тип исполнительного органа	Параметры схемы расстановки линейных резцов							Параметры схемы расстановки кутковых резцов					
	Тип резца	Кол-во линий резания	Число резцов в линии резания	Общее число резцов	Шаг резания, мм	Угол наклона резца, град	Тип резца	Кол-во линий резания	Общее число резцов	Число резцов в линии резания	Шаг резания, мм	Угол наклона резца, град	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	

При испытаниях новых резцов, предназначенных для работы с прогрессивными параметрами резания, должны применяться исполнительные органы со схемами расстановки резцов, обеспечивающими достижение параметров резания (сечения, шага и глубины среза), предусмотренных техническим заданием. Параметры схемы расстановки резцов должны быть указаны в методике по форме (табл. 15.3).

Сравнительные испытания резцов, имеющих одинаковое назначение, область применения и параметры резания, должны проводиться при одинаковых схемах расстановки резцов.

Сравнительные испытания средств крепления должны проводиться с резцами, имеющими одинаковые конструктивные параметры (вылет, сечение, длина хвостовика, величина упора и др.) при одинаковых схемах их расстановки.

Опытные образцы изделий (резцы и крепления), предъявляемые для испытаний, должны подвергаться заводским испытаниям и контролю, результаты которых оформляются протоколом комиссии (ОСТ 12.47.008-74) [153].

Разработчик перед началом приемочных испытаний передает междуведомственной комиссии (МВК) результаты стендовых (лабораторных) испытаний по:

- 1) оценке эффективности разрушения углей испытываемыми резцами;
- 2) установлению прочностных характеристик корпусов резцов и паяного соединения.

#### **15.5. Условия и объем испытаний**

Выбор места и условий испытаний режущего инструмента и средств крепления производится в соответствии с ОСТ 12.47.008-74 [153] и оформляется протоколом.

Испытания опытных образцов (партий) резцов и средств крепления, предназначенных для применения на различных машинах, рекомендуется проводить на двух (наиболее распространенных) типах машин. Для каждого типа машин выбирается два забоя с различными горнотехническими условиями.

Горнотехнические условия испытаний резцов должны максимально соответствовать области их применения, определяемой типоразмерным рядом и техническим заданием на проектирование.

Характеристиками условий испытаний являются:

- 1) показатели сопротивляемости угольных пластов и породных прослоек разрушению;
- 2) класс относительной абразивности угольного пласта и породных прослоек, определяемый по удельному расходу серийных резцов;
- 3) показатели, характеризующие содержание крупных твердых включений; средняя площадь твердых включений ( $S$ , см<sup>2</sup>), плотность включений  $n$  (количество включений на 100 м длины исследуемого забоя, шт./100 м), удельное содержание включений (отношение площади включений к площади забоя, %).

В случаях, если требования к области применения не оговорены в техническом задании или резцы предназначены для применения на пластах любой сопротивляемости разрушению и абразивности, для испытания опытных образцов (партий) резцов и средств крепления для каждого типа машин должны быть выбраны два забоя.

В одном забое угольный пласт по разрушаемости должен относиться к категории не ниже крепких при сопротивляемости разрушению не менее 240–300 Н/мм, по удельному расходу резцов – не ниже IV класса при наличии значительных твердых включений.

В другом забое угольный пласт по разрушаемости должен относиться к категориям средней и выше средней крепости ( $A = 150\text{--}240$  Н/мм), по удельному расходу резцов – к II–III классам при наличии незначительных твердых включений.

Когда требования к области применения оговорены в техническом задании (указана предельная сопротивляемость), один забой должен соответствовать предельной области применения по ТЗ, а другой – наибольшей области применения режущего инструмента.

Объем испытаний режущего инструмента и средств крепления определяется, например для очистного комбайна, по объемам добываемого угля. Количество опытных резцов, поставляемых для испытаний, должно быть не менее потребности в серийных резцах для установленного объема добычи.

Объемы добычи угледобывающими машинами должны составлять:

- 1) при испытаниях каждого типа опытных образцов (опытных партий) резцов 20–50 тыс. т в зависимости от горно-геологических условий;
- 2) при испытаниях каждого типа опытных образцов (опытных партий) средств крепления – не менее 50 тыс. т.

Для сравниваемого серийного инструмента или серийных средств крепления объемы добычи могут быть уменьшены на 30 %.

На крутых и тонких (до 1,0 м) пологих пластах допускается уменьшение объема испытаний на 25 %.

#### **15.6. Организация и порядок проведения приемочных испытаний**

Приемочные испытания образцов (опытных партий) резцов и средств крепления проводятся междуведомственной комиссией, задачи которой и состав определяются в соответствии с ОСТ 12.47.008-74 [153].

По каждой шахте, в забоях которой намечено проведение испытаний, служебным распоряжением председателя МВК назначаются из участников испытаний рабочие комиссии, в состав которых входят работники шахты и представители организаций и предприятий.

В задачу рабочих комиссий (по ОСТ 12.47.008-74) [153] входит:

- 1) подготовка места испытаний;
- 2) проведение инструктажа рабочих бригад и руководства участка (шахты) по целям и методике испытаний;
- 3) контроль за оснащением горной машины только испытываемыми резцами (резцы других типов должны быть изъяты);
- 4) обеспечение работоспособного состояния испытываемого изделия и комбайна, на котором проводятся испытания;
- 5) регистрация результатов наблюдений в журналах установленной формы;
- 6) учет выдачи новых и возврата использованных резцов (или креплений) по каждому забою;
- 7) проведение предусмотренных программой и методикой измерений;
- 8) постоянное наблюдение за изменением горно-геологических условий в процессе испытаний;
- 9) обеспечение сохранности резцов и средств крепления, подвергнутых дефектовке до утверждения акта испытаний;
- 10) обобщение результатов испытаний и представление полученных данных и материалов междуведомственной комиссии.

На период испытаний приказом по шахте устанавливается единый порядок выдачи и учета испытываемых резцов, предусматривающий:

- 1) ежедневную выдачу маркированных резцов в объеме суточной потребности при условии сдачи не менее 80 % резцов, полученных в предыдущие сутки, с фиксацией в специальном журнале;
- 2) хранение всех резцов, возвращенных после эксплуатации, и передача их между ведомственной комиссией;
- 3) учет общего расхода элементов крепления резцов, выданных для замены вышедших из строя в период испытаний.

Обеспечение испытываемыми изделиями (резцы, средства крепления, исполнительные органы), принятыми ОТК, осуществляется организациями-разработчиками и заводом-изготовителем в сроки, предусмотренные ОСТ 12.47.008-74 [153].

Резцы должны иметь отличительную маркировку (рекомендуется нанесение маркировки механическим способом в местах, не подвергаемых износу). При использовании на исполнительном органе резцов разных типов они должны быть маркированы различными метками. Передача маркированных резцов для испытаний производится согласно протоколу. Использование при испытаниях однотипных немаркированных резцов не допускается.

Повторное (после заточки) использование резцов допускается только при проведении ресурсных испытаний.

При испытаниях средств крепления учет выдачи элементов испытываемых креплений фиксируется в журнале (табл. 15.4 и 15.5).

Перед началом проведения испытаний оформляется протокол передачи опытных образцов (опытно-промышленной партии) резцов на испытания, который утверждается представителем организации-разработчика, представителем междуведомственной комиссии, главным инженером и начальником участка шахты (см. ниже).

В протоколе фиксируется передача междуведомственной (рабочей) комиссией опытных образцов (опытной партии) маркированных резцов. Указывается тип режущего инструмента и его количество. В протоколе обязательно отмечается соответствие резцов технической документации на изготовление и ОТК. При испытаниях необходимо согласовать место их проведения (участок, шахта, забой).

В процессе испытаний ведутся журналы: учета выдачи и возврата резцов; учета выдачи элементов крепления резцов (табл. 15.4, 15.5).

В процессе испытаний должны осуществляться контроль состояния исполнительного органа, в целом горной машины и фиксироваться добыча полезного ископаемого (суточная и с начало испытаний).

Горнотехнические условия и организация работ в забое во время испытаний должны обеспечивать достижение режимных параметров машины, соответствующих технической характеристике испытываемого изделия.

При проведении испытаний должен обеспечиваться контроль за правильной эксплуатацией резцов. Резцы рекомендуется заменять при достижении длины площадки износа по задней грани не более толщины твердосплавной пластины.

В процессе испытаний организацией-разработчиком и шахтой должно быть обеспечено проведение всех необходимых измерений, предусмотренных программой и методикой.

Распределение обязанностей между участниками испытаний осуществляется в соответствии с ОСТ 12.47.008-74 [153].

Журналы и протокол обязательно должны заверяться представителями: организации-разработчика; междуведомственной (рабочей) комиссией; горного предприятия.

Таблица 15.4

## Журнал учета выдачи и возврата резцов при испытаниях

Дата	Добыча, т	Резцы типа _____ *			Резцы типа _____ *			Подпись ответственного шахты			
		Выдано, шт.	Возвращено, шт.	Вдано, шт.	Возвращено, шт.	Вдано, шт.	Возвращено, шт.				
	с начала испытаний	в данные с начала испытаний									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Примечание: \* Заполняется по каждому типу резца, устанавливаемому на исполнительном органе.

Таблица 15.5

## Журнал учета выдачи элементов крепления резцов

Дата	Добыча, т	Крепление типа _____ * резца _____			Крепление типа _____ * резца _____			Подпись ответственного шахты	Примечание			
		Элемент **	Элемент **	Элемент **	Элемент **	Элемент **	Элемент **					
	с начала испытаний	в данные с начала испытаний	с начала испытаний	с начала испытаний	с начала испытаний	с начала испытаний	с начала испытаний					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Примечание: \* Заполняется по каждому виду крепления, примененному на исполнительном органе.  
\*\* Заполняется по каждому элементу согласно чертежу.

## ПРОТОКОЛ

передачи опытных образцов (опытно-промышленной партии) резцов \_\_\_\_\_ на испытания

Дата \_\_\_\_\_ Место составления протокола \_\_\_\_\_

1. Организацией-разработчиком \_\_\_\_\_ переданы междуведомственной (рабочей) комиссии для испытания на участке № \_\_\_\_\_ шахты \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ забое опытные образцы (опытные партии) резцов типа \_\_\_\_\_ в количестве \_\_\_\_\_ штук.

2. Предназначенные для испытаний резцы приняты ОТК и соответствуют предъявленной технической документации на изготовление.

3. Резцы маркированы путем \_\_\_\_\_

---

Представитель  
организации-разработчика (должность, подпись)

Представитель междуведомственной  
(рабочей) комиссии (должность, подпись)

Главный инженер  
шахты (подпись)

Начальник участка № \_\_ шахты \_\_\_\_\_ (подпись)

## 15.7. Методы контроля при испытаниях

### 15.7.1. Контролируемые показатели

При испытаниях контролируют показатели резцов по ГОСТ Р 51047-97 [18], приведенные в табл. 15.6.

Таблица 15.6

*Номенклатура показателей, методы контроля и средства измерений*

Наименование показателя	Методы контроля и средства измерений
Длина, ширина, диаметр, конструктивный вылет, длина хвостовика, размеры сечения хвостовика, мм	Универсальными измерительными инструментами по ГОСТ 166-89 [77], ГОСТ 427-75 [78], ГОСТ 8.401-80 [79]
Задний конструктивный угол, угол заострения, град	Угломерами по ГОСТ 2875-88 [80], шаблонами по ГОСТ 9013-59 [81]
Прочность соединения вставки с корпусом резца, кН	На испытательном стенде по значению равномерно распределенной статической нагрузки, приложенной к армирующей вставке (см. рис. 13.5)
Прочность резца, кН	На испытательном стенде путем вдавливания резца в эталонную стальную пластину
Длина раковины слоя припоя, мм; трещины, выкрашивания и нависания вставки	Оптический прибор с увеличением в 2,5–4 раза
Режущая способность резца, кВт·ч/м <sup>3</sup>	На стенде с помощью динамометра и штангенциркуля при резании образцов угля, породы и расчетом по формуле $H_w = 0,00272 Z/t h$ , где $Z$ – средняя сила резания, $H$ ; $t$ и $h$ – ширина и глубина стружки, мм
Удельный расход резцов, шт./1000 т или шт./м <sup>3</sup>	По результатам испытаний в производственных условиях и расчетом по формуле $N_{py} = \sum N/Q$ , где $\sum N$ – общий расход резцов за время испытаний, шт.; $Q$ – объем добычи, тыс. т (проходки, м <sup>3</sup> ) за время испытаний
Наработка на резец, т или м <sup>3</sup>	По результатам испытаний в производственных условиях и расчетом по формуле $q = Q/\sum N$ , где $\sum N$ – общий расход резцов за время испытаний, шт.; $Q$ – объем добычи, тыс. т (проходки, м <sup>3</sup> ) за время испытаний
Масса резца, кг	По результатам взвешивания 10 резцов на технических весах (ГОСТ 24104-2001) [82]
Удельная масса резца и вставки, кг/1000 т или кг/м <sup>3</sup>	По результатам взвешивания и расчетом по формулам: $M_{py} = M_p N_{py}$ ; $M_{vy} = M_v N_{py}$ , где $M_{py}$ , $M_{vy}$ – удельные массы резца и вставки, кг/1000 т или кг/м <sup>3</sup> ; $M_p$ , $M_v$ – массы резца и вставки, кг; $N_{py}$ – удельный расход резцов, шт./1000 т или шт./м <sup>3</sup>

Испытательные средства и средства измерений должны обеспечивать проверку резцов в соответствии с предложенными методами контроля, схемами и режимными параметрами, а также регистрацию значений необходимых параметров.

Испытательные средства должны быть аттестованы.

Для проведения испытаний применяют поверенные серийные средства измерений. Допускается использовать специальные средства измерений или контроля при условии обеспечения ими необходимой точности измерений.

Объемы испытаний, допустимые значения и погрешности параметров резцов в случаях, не указанных в настоящем стандарте, должны быть установлены в ТУ на эти резцы (для приемо-сдаточных и периодических испытаний), в методиках приемочных и квалификационных испытаний, а также в нормативной документации, регламентирующей сертификацию резцов.

Результаты испытаний должны быть обработаны для возможности сравнения их со значениями, установленными нормативной или технической документацией.

Результаты испытаний получают расчетом по формулам, приведенным в табл. 15.6, или путем измерений соответствующими средствами измерений с точностью, предусмотренной нормативными документами на эти средства измерений.

Для математической обработки данных применяют автоматизированную систему сбора и обработки информации.

### 15.7.2. Испытание резцов на усталость

В общем случае при работе на резец действует усилие, которое можно разложить на составляющие усилия: резания  $Z$ , подачи  $Y$  и боковое  $X$ . Анализ напряженного состояния опасного сечения корпусов, обусловленного действием указанных нагрузок, с учетом вероятных значений отношения  $Y/Z$  показал, что наиболее нагруженные зоны, подверженные максимальным растягивающим напряжениям, расположены у радиальных резцов на границе боковой и передней поверхностей, у тангенциальных – на границе боковой и задней поверхностей [160].

Исследования, проведенные в ИГД им. А.А. Скочинского, показали, что уровень среднепиковых сил резания при разрушении угля составляет  $Z_y = 5-10$  кН, а при резании включений –  $Z_b = 25-50$  кН. Экспериментально при испытаниях корпусов резцов ЗР1.80 при различных схемах нагружения установлено, что усилия, соответствующие пределу ограниченной выносливости, составляют  $Z_{пв} = 25-33$  кН, т. е. существенно выше нагрузок  $Z_y$  и соизмеримы с усилиями  $Z_b$ . Следовательно, усталостные повреждения в корпусах возникают преимущественно при прорезании твердых включений.

Методика испытаний резцов на усталость предопределяет следующую последовательность действий:

- 1) подготовка резцов к испытаниям;
- 2) выбор схемы нагружения и величины нагрузки;
- 3) проведение усталостных испытаний;
- 4) расчет параметров кривой усталости по результатам испытаний;
- 5) расчет пути резания резца до усталостной поломки корпусов.

Объектом испытаний являются корпуса резцов без твердосплавной вставки, механически обработанные (за исключением паза под твердосплавную вставку) и термообработанные в соответствии с рабочей документацией.

Схема нагружения принимается в соответствии с типом резца и формой сечения хвостовика резца:

- 1) радиальные резцы с прямоугольной и овальной формами сечения хвостовика испытываются при приложении нагрузки, перпендикулярной к передней (рис. 15.1, схема 1) и боковой (см. рис. 15.1, схема 2) поверхностям;

- 2) тангенциальные резцы с прямоугольным сечением хвостовика державки испытываются при приложении нагрузки, перпендикулярной к задней (рис. 15.2, схема 1) и боковой (рис. 15.2, схема 2) поверхностям хвостовика;
- 3) тангенциальные резцы 1 с круглым сечением хвостовика державки 2 испытываются при одной схеме установки (рис. 15.3), соответствующей приложению нагрузки, перпендикулярной к продольной оси державки.

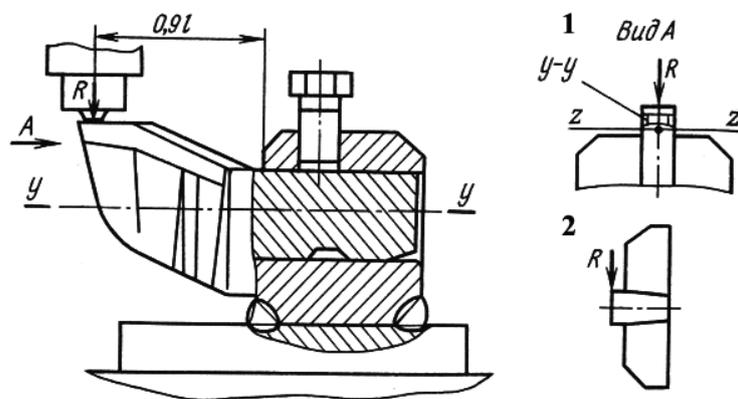


Рис. 15.1. Схема нагружения радиальных резцов

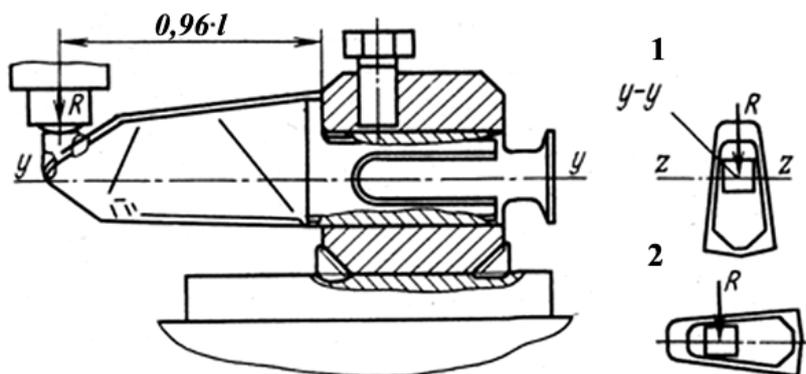


Рис. 15.2. Схема нагружения тангенциальных резцов с прямоугольным сечением хвостовика

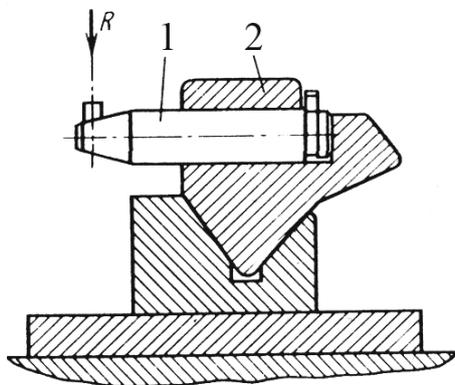


Рис. 15.3. Схема нагружения тангенциальных резцов с круглым сечением хвостовика:  
1 – тангенциальный резец; 2 – резцедержатель

Испытания резцов проводятся на гидропульсационных машинах (например, МУП50). Колебания их подвижной траверсы в горизонтальной плоскости с амплитудой более 2 мм не допускаются. Для обеспечения этого требования необходимо ввести в конструкцию стенда дополнительные устройства, ограничивающие перемещение подвижной траверсы в горизонтальной плоскости.

Нагрузка на корпус резца передается через тензопуансон со встроенным (завальцованным) стальным термообработанным шариком диаметром 10–12 мм и системой тензодатчиков, обеспечивающей регистрацию нагрузок с точностью  $\pm 2,5\%$ .

Контроль, регистрация испытательной нагрузки и параметров пульсирующего цикла ( $t_n$ ,  $t_{\text{п}}$ ) производятся с помощью тензоаппаратуры, включающей в себя тензоусилитель и шлейфовый осциллограф.

Рекомендуемая частота циклов нагружения  $f = 10\text{--}17$  Гц.

Испытательная машина должна обеспечивать пульсирующий цикл напряжений (рис. 15.4, где  $t_{\text{п}}$  – время паузы, в течение которой сохраняется гарантированный зазор между пуансоном и корпусом резца,  $T = t_n + t_{\text{п}}$  – период цикла).

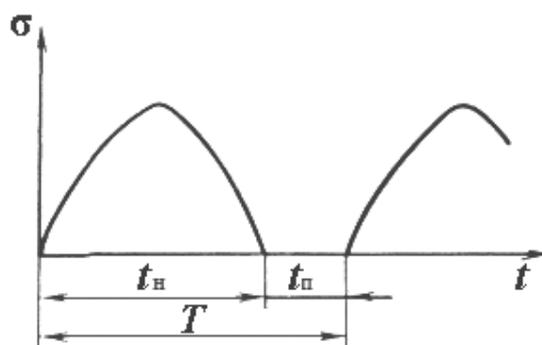


Рис. 15.4. График пульсирующего цикла нагружения

Для создания гарантированного зазора между тензопуансоном и поверхностью корпуса должно быть выполнено условие  $t_n/t_{\text{п}} \geq 0,3$ .

Испытываемый корпус резца должен с помощью болта закрепляться в резцедержателе, приваренном к плите, жестко установленной на подвижной траверсе испытательной машины. Установка плиты должна осуществляться таким образом, чтобы точка приложения нагрузки тензопуансоном находилась на расстоянии, равном 90 % от конструктивного вылета резца, в центре площадки.

Число испытываемых резцов в группе должно составлять при испытаниях:

1. для радиальных и тангенциальных резцов с прямоугольным сечением хвостовика не менее десяти по каждой схеме;
2. для тангенциальных резцов с круглым сечением хвостовика не менее десяти.

Испытания проводятся при мягком нагружении (заданной величиной является нагрузка) до образования видимых микротрещин или полного разрушения корпуса резца. При этом контролируется стабильность амплитуды испытательной нагрузки визуально по отклонению светового луча на экране осциллографа.

Стабильность параметров пульсирующего цикла контролируют путем снятия осциллограммы на быстро проявляемую бумагу.

Измерение циклической долговечности производится с помощью счетчика циклов испытательной машины.

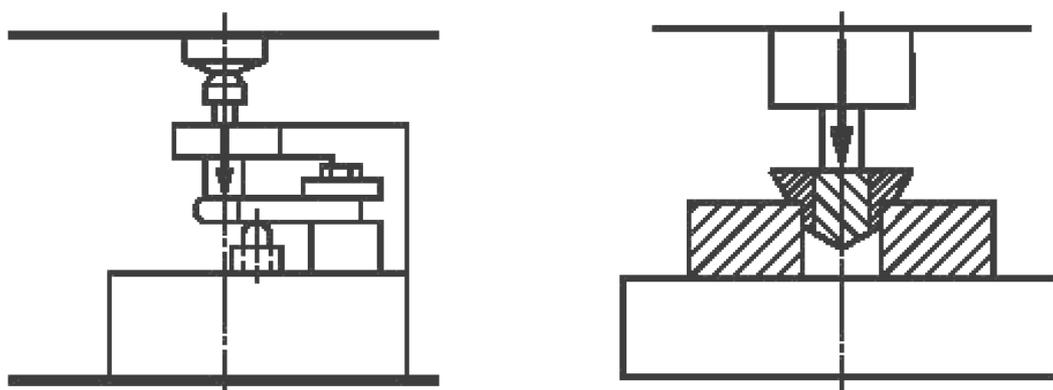
Каждая из групп резцов испытывается равными количествами на двух уровнях нагрузки – нижнем и верхнем. Уровни испытательных нагрузок должны выбираться таким

образом, чтобы соответствовать значениям циклической долговечности: не более 20 и не менее 130 килоциклов.

Если известна статическая разрушающая нагрузка  $R_{ст}$ , соответствующая пределу прочности  $\sigma_b$ , испытания рекомендуется проводить при уровнях нагрузки: нижнем  $R_n = 0,1 R_{ст}$ ; верхнем  $R_v = 0,4 R_{ст}$ .

При проведении контрольных испытаний, когда угловой коэффициент кривой усталости известен, допускается проведение испытаний при одном уровне нагрузки, соответствующем  $0,2-0,3 R_{ст}$ .

По результатам испытаний каждой схемы нагружения корпуса резца рассчитываются и строятся кривые усталости в координатах  $\lg \sigma - \lg N$ , где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $N$  – циклическая долговечность (килоцикл).



*Рис. 15.5. Схема определения прочности соединения армирующей вставки с корпусом для резцов, армированных:  
а – в открытый паз пластиной; б – в закрытый паз цилиндрической вставкой*

Прочность соединения армирующей вставки с корпусом резца определяется на специальном испытательном стенде по значению равномерно распределенной статической нагрузки, приложенной к боковой грани армирующей вставки и направленной параллельно плоскостям сплава. Нагружение производят до разрушения паяного соединения (рис. 15.5 и табл. 15.6) [18].

### **15.8. Определение прочности соединения резцедержателей с корпусом исполнительного органа**

Методический опыт, накопленный при проведении экспериментальных работ по усталостным испытаниям корпусов резцов различных конструктивных вариантов, позволил перейти к ускоренным испытаниям соединения резцедержатель – корпус исполнительного органа горной машины.

Например, в структуре отказов шнековых исполнительных органов очистных комбайнов отрыв резцедержателей составлял 40–70 % от всего объема отказов [160].

С целью установления причин отрыва и ускорения поиска технологических и конструктивных решений, обеспечивающих существенное увеличение долговечности исполнительных органов, была разработана методика испытаний соединения резцедержатель – корпус исполнительного органа на усталость.

Исследования проводились на стенде, базой которого является гидропульсационная машина МУП50. Нагрузка на резцедержатель передавалась через пуансон со встроенным (завальцованным) стальным шариком и системой тензодатчиков, обеспечивающих регистрацию нагрузок с точностью  $\pm 2,5$  %. Испытания проводились при мягком

нагрузении (заданной величиной являлась нагрузка) до образования видимых микротрещин или до полного разрушения (рис. 15.6).

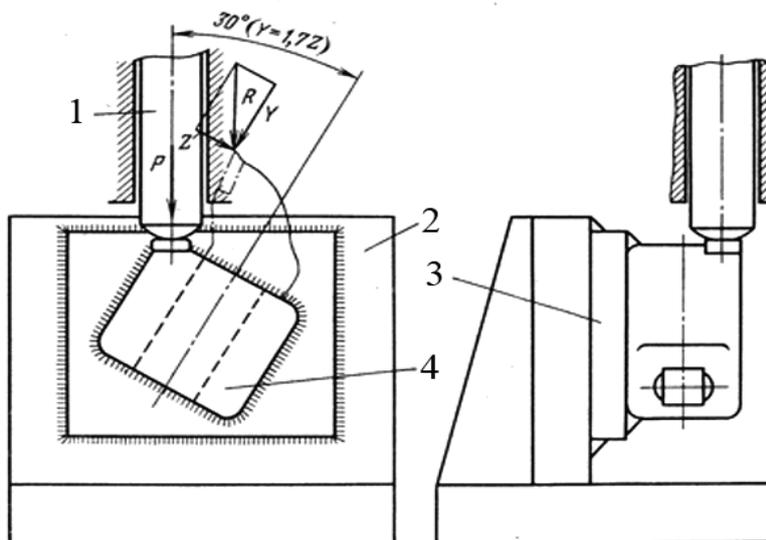


Рис. 15.6. Схема нагружения резцедержателя:  
1 – пуансон; 2 – плита; 3 – подставка; 4 – резцедержатель

Схема нагружения (рис. 15.6) соединения соответствовала отношению усилия подачи  $Y$  к усилию резания  $Z$ , равному 1,7 (случай затупленного инструмента с площадкой затупления  $1,5 \text{ см}^2$ ). Усилие  $R$ , действующее на резец при эксплуатации ( $R=40-60 \text{ кН}$ ) для ускорения испытаний, было заменено нагрузкой  $P=200 \text{ кН}$ , приложенной к торцу резцедержателя. При линейном характере кривой усталости в двойных логарифмических координатах такая замена допустима. Частота нагружения принималась равной 11 Гц. Испытания проведены на примере серийного резцедержателя 2Ш88Р.061.

## 16. СПОСОБЫ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ГОРНЫХ МАШИН

### 16.1. Мероприятия и средства по борьбе с пылью

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что при работе исполнительных органов горных машин и режущего инструмента необходимо использовать средства пылеподавления.

Современные способы добычи угля и проведения подземных горных выработок характеризуются значительным пылеобразованием. Основным источником пылеобразования (до 90 %) является процесс разрушения угля (породы) режущим инструментом горной машины. Технологические операции погрузки, перегрузки и транспортирования угля (породы) дают лишь небольшой прирост пылеобразования (до 10 %). Едиными правилами техники безопасности для угольных и сланцевых шахт установлена предельно допустимая норма концентрации пыли в воздухе, подаваемом в шахту, – 0,2 мг/м<sup>3</sup>. Этими же правилами определено и количество пыли, которое может находиться в зоне дыхания подземных рабочих в зависимости от содержания в ней двуокиси кремния (табл. 16.1) [20, 45].

Таблица 16.1

*Предельно допустимая концентрация пыли*

Содержание двуокиси кремния, %	70	70–10	Менее 10	0
Предельно допустимая концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>	1	2	4	10

Все мероприятия по борьбе с пылью при работе режущего инструмента можно разделить на следующие три группы:

- 1) предупреждение пылеобразования;
- 2) предотвращение распространения взвешенной пыли;
- 3) удаление и связывание осевшей пыли.

Для предупреждения пылеобразования применяют метод нагнетания жидкости в массив, подлежащий разрушению.

Например, для нагнетания воды в пласт в массиве угля пробуривают шпуры или скважины, в которые специальным насосом нагнетают воду под большим давлением (до 30 МПа) в течение 10–15 мин. Вода расходится по имеющимся в угольном массиве трещинам, смачивает уголь и находящуюся в трещинах пыль. В итоге снижается запыленность воздуха при выемке угля. Нагнетание воды в пласт осуществляется через шпуры диаметром 40–90 мм, глубиной 2–5 м, через короткие скважины диаметром 42–50 мм, глубиной 5–15 м и через длинные скважины диаметром 45–160 мм и глубиной более 15 м. Описанный процесс осуществляется специальными установками – переносными или передвижными.

Для предупреждения распространения взвешенной пыли используют следующие способы:

- 1) орошение зоны работы режущего инструмента;

- 2) очистка воздушного потока от пыли с помощью водяных завес;
- 3) сухое пылеулавливание у очагов пылеобразования;
- 4) мокрое пылеулавливание с помощью аспирационных установок.

Удаление и связывание осевшей пыли достигается уборкой и смывом напластования пыли, обработкой осевшей пыли специальными растворами, побелкой горных выработок.

Особое место среди мероприятий по борьбе с пылью занимает обеспыливающее проветривание горных выработок, основанное на разжижении пылевого облака, выносе пыли из забойного пространства.

Орошение водой является наиболее распространенным способом гашения пыли при работе очистных, проходческих комбайнов и бурильных установок. Для более эффективного пылеподавления наряду с орошением водою может осуществляться и отсос запыленного воздуха от зон погрузки угля на конвейер.

Гашение пыли может осуществляться также пеной, которая обволакивает отделенный от массива пласта уголь и не оседает в течение нескольких минут.

Воспламенение метановоздушной смеси возможно только в том случае, если одновременно существуют следующие три предпосылки [84]:

- 1) наличие взрывоопасной метановоздушной смеси;
- 2) наличие достаточно горячей поверхности в качестве источника воспламенения;
- 3) достаточно длительное время контактирования метановоздушной смеси с источником воспламенения.

Системы орошения должны предотвращать образование всех трех этих предпосылок, хотя воспламенение не происходит уже при отсутствии лишь одной из них.

## **16.2. Опыт эксплуатации средств пылеподавления на горных машинах**

Общеизвестно, что в настоящее время в РФ около 70 % угольных шахт относятся к опасным по газу (метану) и 90 % – опасны по взрыву угольной пыли. Данные статистики свидетельствуют о том, что основным источником взрывов газа и пыли при подземной добыче угля является воспламенение пылегазовоздушной смеси в результате фрикционного контакта резцов с прослойками породы и твердыми включениями в угольном массиве. Установлено [162], что начальное возгорание этой смеси возникает от искр в 10–20 мм позади вершины резца при его нагреве до 750–1200 °С.

В России и в ближнем зарубежье предложен ряд способов интенсификации процесса улавливания и осаждения пыли, а также ряд мер по усовершенствованию существующих способов:

- 1) электризация капель диспергированной жидкости;
- 2) добавка к воде поверхностно-активных веществ;
- 3) магнитная обработка воды;
- 4) распыление воды сжатым воздухом;
- 5) гидроакустическое осаждение пыли;
- 6) орошение с помощью пара.

Однако эти способы не получили широкого распространения при работе горных машин по различным причинам: нетехнологичности, вредного влияния на здоровье рабочих, малой эффективности пылеподавления. Поэтому на практике применяется в основном орошение. Такая система рассчитана на применение двух способов: гидравлического и пневмогидравлического. Эффективность пылеподавления этой системы составляет 70–90 % [86], а по мелкодисперсной пыли 50–60 %. Следовательно, актуальной задачей по усовершенствованию орошения является повышение эффективности пылеподавления, особенно по мелкой пыли, при уменьшенном расходе воды.

### **16.2.1. Средства пылеподавления буровой установки**

При эксплуатации бурильных установок для проходки восстающих скважин большого диаметра на угольных шахтах при разрушении угля резцами бурового инструмента в забойной зоне скважины образуется большое количество пыли и метана, что создает угрозу взрыва. Для пылеподавления бурильные машины оснащаются устройствами интенсивного орошения этой зоны. Бурильные установки имеют в своем составе насос, пустотельный буровой став для подачи под давлением воды посредством форсунок к режущему инструменту. В средства пылеподавления также входят: краны, фильтры, клапаны, гибкие прорезиненные рукава. Для подавления пыли в устьях скважин нашли применение воздушно-водяные завесы [57].

### **16.2.2. Средства пылеподавления очистных комбайнов**

При эксплуатации очистных комбайнов, которые являются основным источником пылеобразования в лаве, в разное время получили распространение орошение, пылеотсос с пылеулавливанием и подавление пыли пеной. Орошение – самый распространенный способ, сущность которого заключается в подводе воды на исполнительный орган комбайна и распылении ее с высокой степенью дисперсности. Исторически известны два способа орошения: внешнее и внутреннее. На первых моделях узкозахватных комбайнов применялось внешнее орошение и форсунки устанавливались на корпусе комбайна вблизи исполнительного органа. Этот способ пылеподавления имел низкую эффективность, так как исполнительный орган в процессе работы менял свое положение относительно корпуса комбайна. При этом расстояние от форсунок до резцов увеличивалось и, по этой причине, снижалась эффективность орошения. В этой связи на современных очистных комбайнах более целесообразно использование внутренней схемы орошения, когда форсунки устанавливают непосредственно на исполнительном органе вблизи режущего инструмента. Чем ближе форсунки устанавливаются к резцам, тем эффективнее система пылеподавления. Подвод воды к вращающемуся исполнительному органу производится через полый вал, на котором он установлен. Для этого в осевом отверстии вала прокладывают трубопровод, от которого жидкость через распределительное устройство, трубопроводы на спиральных исполнительного органа и форсунки поступает к резцам. Для уменьшения общего расхода жидкости были разработаны схемы, в которых вода подается только к форсункам и резцам, находящимся в контакте с угольным забоем [164].

На некоторых конструкциях очистных комбайнов наряду с орошением использовались пылеотсасывающие устройства, что позволяет, вместе с водяным орошением, улавливать до 95–98 % пыли. Отсасываемый воздух осаждается на стенках пылеуловителей, далее смывается водой и выбрасывается в виде шлама на забойный конвейер. Основными элементами пылеотсасывающей установки являются вентилятор и пылеуловитель. Пылеотсасывающие устройства могут устанавливаться на корпусе или поворотном редукторе комбайна.

Шнековый исполнительный орган (рис. 16.1) представляет собой шнековый транспортер с захватом от 500 мм до 1220 мм, диаметром от 560 до 3900 мм. Конструктивно он бывает выполненным 2, 3, 4-заходным [17].

Резцедержатели выполнены с термоупрочненными втулками различного диаметра, конструкции и твердосплавной наплавкой в зоне возможного контакта с забоем. В резцедержатели встроена форсунка 1 (рис. 16.2) с фильтром, таким образом, чтобы обеспечивать подачу водовоздушной смеси в след резца.

В конструкции резцедержателя реализуется эжекторный эффект, что улучшает пылеподавление за счет смачиваемости пыли.

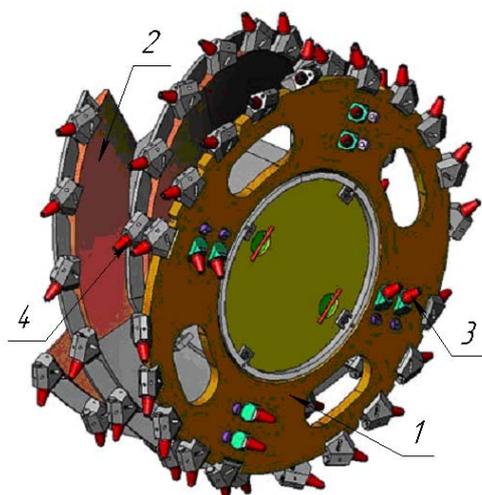


Рис. 16.1. Трехзаходный шнек очистного комбайна К600:  
1 – кутковая часть шнека; 2 – спираль шнека; 3 – кутковые резцы; 4 – линейные резцы

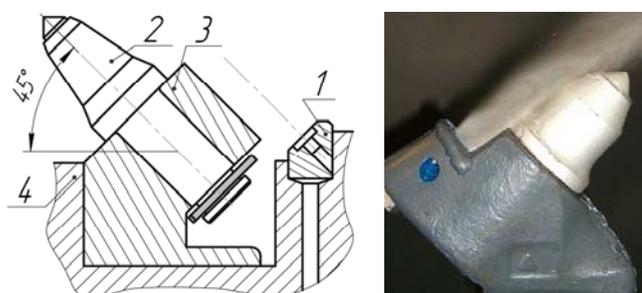


Рис. 16.2. Конструкция устройства орошения шнека комбайна К-500:  
1 – форсунка, 2 – тангенциальный поворотный резец, 3 – резцедержатель, 4 – шнек

Устройство снабжено фильтром шелевого типа для очистки воды, поступающей на комбайн, промывка которого осуществляется обратным потоком воды.

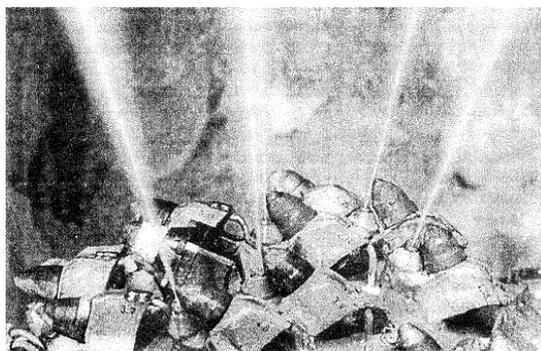
### 16.2.3. Средства пылеподавления проходческих комбайнов

С целью повышения эффективности подавления искрообразования в зоне контакта резцов с породой и улучшения пылеподавления на проходческих комбайнах ET120 «Айкгофф», E301 «Паурат», SM130 – фирма «IBS» (Германия), RH22 «Андерсен» (Англия), AM65 – фирма «Фест-Альпине» (Австрия) и др. нашла применение система внутреннего высоконапорного орошения. Например, в проходческом комбайне AM65, выпускаемом фирмой «Фест-Альпине» (Австрия), используется система «Set-Jet» с давлением воды 15–20 МПа [162]. Таким образом, наибольшие перспективы имеют системы пылеподавления с внутренним высоконапорным орошением с давлением воды до 30 МПа.

Отечественная система высоконапорного орошения СВК-1.00.000 состоит из следующих основных частей: коронки, водосъемника, насосного блока, преобразователя давления с гидропанелью и электрооборудования. Специальная коронка СВО-1.01.100.4 имеет насадки для подачи воды под давлением до 15 МПа в зону работы режущего инструмента [48].

Исследованиями [165] установлено, что высокая эффективность пылеподавления (97,5 %) при уменьшенном расходе воды в 2 раза по сравнению с типовым орошением достигается при высоконапорном орошении с давлением воды 10 МПа и более. Высо-

конапорную струю воды подавали к каждому резцу в точке, расположенной примерно в 2 мм перед острием резца на коронке комбайна WAV 300 (рис. 16.3) [166].

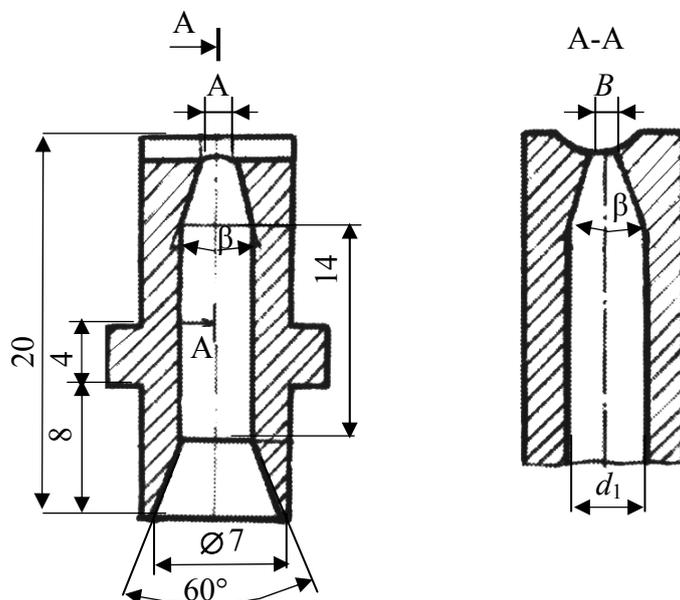


*Рис. 16.3. Резцы с коническим резцедержателем и орошением струей воды высокого давления*

Предпосылкой целесообразности повышения давления воды является усиление коагуляции пылинок с каплями благодаря увеличению скорости движения струи.

Установлено, что при резании с орошением высококонапорными водяными струями запыленность шахтной атмосферы существенно ниже, чем при внешнем орошении зоны резания, так что одновременно улучшаются условия труда в проходческом забое и повышается уровень безопасности, но для повышения надежности эксплуатации система внутреннего орошения нуждается в доработке.

Такие струи воды могут создаваться с помощью насадок, представленных на рис. 16.4 [162].



*Рис. 16.4. Двухступенчатый профиль насадки с эллиптической формой выходного отверстия для формирования плоских струй воды*

Рациональные параметры этих насадок при угле конусности насадки  $\alpha = 30^\circ$  приведены в табл. 16.2 [85].

В результате исследований, выполненных в РФ и за рубежом, установлено, что наиболее надежная пылевзрывозащита достигается при подаче струи воды не на переднюю грань резца, не впереди резца, а наоборот, позади резца непосредственно на раскаленный след в горной породе. При этом более эффективны плоские струи воды, которые должны обладать следующими характеристиками:

- 1) плотность и ширина факела в месте контакта резца с углем (породой);
- 2) диаметр выходного отверстия насадки;
- 3) давление воды перед насадкой;
- 4) длина и диаметр начального участка водяных струй.

В сотрудничестве со специалистами ДМТ на шахте Нидерберг (Германия) разработана комбинированная система орошения зоны работы коронки проходческого комбайна, оснащенной режущим инструментом. Для сокращения расхода воды в призабойное пространство через резцовую коронку выбрасывается водовоздушная смесь. Мелкодисперсная, распыленная вода обволакивает частицы пыли, резцы, коронку и создает взрывобезопасную атмосферу, эффективно предотвращает воспламенение метана. Благодаря этому существенно сокращается расход воды, требуемой на орошение. Эта система была впервые установлена на проходческом комбайне избирательного действия АМ 105. Система пылеподавления включает [161]:

- 1) упрощенное устройство подвода воды к резцам, в котором вода из каждого резцедержателя в зависимости от размера сопла подается либо периодически, либо непрерывно;
- 2) модифицированные пневмоструйные блоки (Aero Safe Jet), струи которых проветривают призабойное пространство.

Таблица 16.2

*Рациональные параметры насадки и факела плоских струй воды*

Давление воды $P$ , МПа	Диаметр выходного отверстия насадки $D$ , мм	Длина большой оси эллипса $L_1$ , мм	Длина малой оси эллипса $L_2$ , мм	Ширина струи воды $B$ , мм
4	0,89	1,10	0,73	51,9
5	0,84	1,03	0,69	51,0
6	0,80	0,98	0,66	50,2
7	0,77	0,95	0,63	49,5
8	0,75	0,92	0,61	48,8
9	0,73	0,89	0,59	48,3
10	0,70	0,87	0,58	47,7
11	0,69	0,85	0,56	47,3
12	0,68	0,83	0,55	46,8
13	0,66	0,81	0,54	46,4
14	0,65	0,80	0,53	46,0
15	0,64	0,78	0,52	45,6

В воздушные струи каждого из пяти сопел направленно впрыскивается вода, распыляемая воздушными струями на мельчайшие частицы. Образующаяся водовоздушная смесь с высоким охлаждающим и пламегасящим потенциалом обволакивает пылевидные частицы, резцы, коронку и интенсивно омывает всю зону резания. Существенные пре-

имущества новой системы орошения в отличие от применявшейся ранее: упрощенное техническое исполнение вследствие отказа от управления подачей воды к отдельным резцам в зависимости от их положения, а также от контрольных перепускных клапанов; более простое техническое обслуживание; меньший расход воды, а также меньший износ компонентов системы вследствие меньшего давления воды на соплах.

Высокий эффект пылеподавления (90 %) при уменьшенном в 2 раза расходе воды и давлении на форсунке 2–3 МПа дает орошение водовоздушными эжекторами, благодаря хорошей очистке запыленного воздуха, проходящего через эжектор. Однако водовоздушные эжекторы по конструктивным особенностям не на всех комбайнах применимы, так как загромождают стрелу исполнительного органа комбайна и усложняют проведение выработок малого сечения [167].

На практике система внутреннего орошения (СВО) на отечественных комбайнах фактически не подавляет ФВМ (фрикционное воспламенение метана) по трем причинам:

- 1) не выдерживаются рациональные параметры орошения;
- 2) установка форсунок при изготовлении этой системы не точна, вследствие чего водовоздушные струи не локализуют источника ФВМ на каждом следе резца;
- 3) надежность (СВО) очень низка в основном из-за засорения форсунок как изнутри (при сборке системы), так и, чаще всего, извне при контакте исполнительного органа комбайна с горным массивом.

При отключенном орошении 20 % форсунок засоряется в течение рабочей смены, а для ФВМ достаточно засорения одной форсунки [163]). На крепких и абразивных породах ФВМ гарантировано. Пример эксплуатации (СВО) на импортных проходческих комбайнах «Альпине Майнер АМ-75, 105» показывает, что вышеперечисленные недостатки могут быть устранены [161].

В области орошения особенно следует выделить запатентованное изобретение фирмы «Крумменауэр» ([www.krummenauer.de](http://www.krummenauer.de)) – эжекторное орошение (рис. 16.5). Оно представляет собой модернизацию обычного орошения. Форсунка для воды расположена в защищенной камере за резцедержателем. По принципу водоструйного вакуумного насоса она всасывает пылесодержащий воздух и тем самым активно способствует пылеподавлению. Затем распыляющаяся струя воды смешивается с воздухом и образуется очень мелкий воздушно-водный туман, который, с одной стороны, подавляет пыль, а с другой стороны, обеспечивает надежную взрывозащиту.

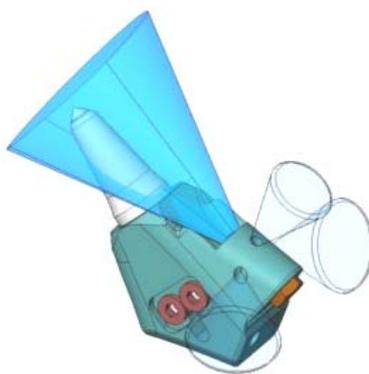


Рис. 16.5. Эжекторное орошение

Преимущества эжекторного орошения фирмы «Крумменауэр» по сравнению с традиционными видами орошения следующие:

- 1) выполнение директивы АТЕХ о гидравлическом напоре в 20 бар на форсунке ( $\varnothing$  0,7 мм);

- 2) уменьшение на 30 % необходимого количества воды;
- 3) активное пылесвязывание;
- 4) при использовании чистой воды почти полное отсутствие необходимости в обслуживании;
- 5) самоочищение воздуховсасывающих каналов;
- 6) несложная замена, либо чистка форсунки.

Взрывозащита эжекторного орошения была доказана на испытательном стенде лаборатории фирмы «ДМТ» при приближенных к практике условиях резания при наличии взрывоопасной метано-воздушной смеси.

В качестве более эффективного внешнего орошения предложен способ импульсного орошения [163], при котором искусственно турбулизуется пылеводовоздушная среда, благодаря импульсам давления воды на оросителях. Усиливается турбулентная коагуляция капель воды с частицами угольной пыли. Эффективность пылеподавления внешним орошением повышается с 80–90 % до 93–97 %, при этом количество эжектируемого воздуха импульсной струей жидкости в 2,8 раза больше, чем сплошной струей, при одинаковых расходах жидкости. Этот способ эффективен как по крупной, так и по мелкой пыли, наиболее взрывоопасной и вредной для здоровья. При импульсном орошении концентрация пыли составляет  $4 \text{ мг/м}^3$ , в то время как при заводском орошении  $27 \text{ мг/м}^3$ .

Рекомендованы следующие рациональные параметры импульсного орошения [163]:

- 1) амплитуда давления 1–2 МПа;
- 2) частота импульсов 6–13 Гц;
- 3) средний размер капель 30–50 мкм;
- 4) плотность капель в факеле  $(0,5–1,5) \cdot 10^9 \text{ л/м}^3$ ;
- 5) расход воды 50–70 л/мин;
- 6) эффективная длина факела 0,8–1,2 м.

Эксплуатация систем импульсного орошения при высокой эффективности пылеподавления возможна без оросительных насосных установок, поскольку повышение давления в импульсе происходит непосредственно в самой системе за счет гидравлического удара, при этом амплитудное давление превышает начальное в 2 раза.

## 17. РЕЗУЛЬТАТЫ ШАХТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НОВЫХ ВИДОВ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ПОВОРОТНЫХ РЕЗЦОВ

### 17.1. Горно-геологические условия шахтных испытаний тангенциальных поворотных резцов

Применение тангенциальных поворотных резцов в мире можно охарактеризовать как повсеместное. Шахты Кузбасса оснащены разнообразным парком очистной и проходческой техники, лишь на некоторых из них используются комбайны, оснащенные радиальными резцами.

Угленосная толща южной части Кузнецкого угольного бассейна [168] представлена двумя сериями: верхней Кольчугинской и нижележащей Балахонской. Каждая далее подразделяется на подсерии и свиты.

Стратиграфически, самые нижние угольные пласты приурочены к Балахонской серии, которая представляет собой переход от морских к континентальным и прибрежно-континентальным отложениям позднего каменноугольного – раннего пермского периодов.

Верхнебалахонская свита, представлена эстуарийными отложениями с мощными песчаниками, до 50м, и конгломератами линзовидной формы. Отложения вышележащей Кольчугинской серии содержат чередование тонкослоистых песчаников, аргиллитов, алевролитов и угля, причем алевролиты становятся все более частыми в верхних частях серии.

Пригодные для отработки угольные пласты встречаются во всех частях серии за исключением самой верхней, представленной кузнецкой свитой.

Угольные пласты, лежащие в нижней части серии, имеют самую высокую степень метаморфизма (антрацит, марка «Т»), при движении вверх по разрезу степень метаморфизма постепенно снижается – сначала до коксующихся марок, а затем до марки «Д» в самом верху серии.

Перечень угледобывающих предприятий с указанными горно-геологическими условиями выемочных участков и техническим вооружением, а также удельным расходом инструмента, представлены в табл. 17.1, 17.2.

Таблица 17.1

*Сопrotивляемость угольных пластов резанию*

№	Пласт (Шахта)	Сопrotивляемость резанию, кН/м
1	«Великан II» (Хакасская)	360
2	«Байкаимский» (7 Ноября)	190
3	16 (Юбилейная)	125
4	IV–V (Ленина)	126–300
5	VI (Ленина)	172
6	«Толмачевский» (Полысаевская)	140 (аргиллит 250, колчедан 760)
7	«Полысаевский 1» (Октябрьская)	155 (колчедан 800)
8	29 (Антоновская)	127

Таблица 17.2

Техническое вооружение и горно-геологические условия  
выемочных участков угледобывающих предприятий

Предприятие	Пласт, лава	Вмещ. породы	Комбайн	Резец	Уд. расход
Хакасская	«Великан» № 44	Мощность 2,08 м, 3,07 % породных прослоек, из них 2,3 % колчеданы крепостью $f=6-7$ , 0,77 % алевролиты $f=4-5$	K500Ю	РШ32-70/18SK	12.9 шт./т.т.
Хакасская	«Великан» № 42	Мощность 2,16 м, 7,4 % породных прослоек, из них 3,7 % колчеданы крепостью $f=6-7$ , 3,7 % алевролиты $f=4$	K500Ю	РШ32-70/16SK	59.3 шт./т.т.
Хакасская	«Великан» № 42	Мощность 2,16 м, 8,7 % породных прослоек, из них 1,5 % колчеданы крепостью $f=6-7$ , 7,2 % алевролиты $f=4$	SL300	РШ38-110/16SK	20.1 шт./т.т.
Романовская-1	«Абрамовский» № 2	Мощность 1,8 м, крепость $f=1,0-1,5$ , 21 % песчаника $f=4-5$	K500Ю	РШ32-70/17.5	16.7 шт./т.т.
Романовская-1	«Абрамовский» № 2	Мощность 1,8 м, крепость $f=1,0-1,5$ , 21 % песчаника $f=4-5$	K500Ю	РШ32-70/16S.M1	27.1 шт./т.т.
Романовская-1	«Абрамовский» № 2	Мощность 1,8 м, крепость $f=1,0-1,5$ , 21 % песчаника $f=4-5$	K500Ю	РШ32-70/18SK	89.1 шт./т.т.
Хакасская	«Великан 2» № 24	Мощность 1,7–2,3 м, строение простое, наблюдаются небольшие включения алевролитов	K500Ю	РШ32-70/17.5, РШ32-70/16MW	9.3 шт./т.т. -----
Березовская	«XXII» № 16-10	Мощность 1,9–2,1 м, полублестящий уголь $f=1,0$ , с прослойками алевролита 0,3–0,42 м, $f=2,5-3,0$	KGS345	РШ32-78/18SK (35XГСА) РШ32-78/18SK (35XГМ)	0.85 шт./т.т. 1.4 шт./т.т.
Юбилейная	16 № 16-13	Мощность 1,41–1,72 м, уголь марки К $f=0,8-1,0$	SL300	РШ38-110/16.M2	0.7 шт./т.т.
Заречная	«Польсаевский 2» № 804	Мощность 4.0 м, уголь $f=1,5$ , включение породы 5–6 %, $f=2$	MB12	РШ32-70/16	1.7 шт./т.т.
ш/у Анжерское	«Румянцевский» № 31	Мощность 1,64 м, пересекает кровлю 0,02 м, алевролит $f=2,5-5,5$	KSW460	РШ32-78/16	Не установлен

Предприятие	Пласт, лава	Вмещ. породы	Комбайн	Резец	Уд. расход
Чертинская-Коксовая	№ 567	Уголь $f=1,3$ , алевролиты и песчаник $f=6-7$	KGS345	PШ32-85/16SK	6,5 шт./т.т.
Егозовская	№ 870	Не указаны	KGS445	PШ32-70/16	Установлены резцы PШ32-78/16 (зазор 5–7 мм)
Листвяжная	№ 1108	Мощность 3,54 м, уголь $f=1,5$ , прослойки алевролита до 0,3 м при $f=3$	4LS20	PШ35-95/18SK	1,1 шт./т.т.
Комсомолец	«Емельяновский» № 1924	Мощность 1,45–1,6м, уголь $f=1,5$ , включения «колчеданов» $f=7-8$	K500Ю	PШ32-70/12BL	2 шт./т.т.
Комсомолец	«Бреевский» № 1726	Мощность 2,72 м, уголь $f=1,5$ , прослойки алевролита $f=2-3$	K500Ю	PШ32-70/16.10	1,2 шт./т.т.
Комсомолец	«Бреевский» № 1726	Мощность 2,72 м, уголь $f=1,5$ , прослойки алевролита $f=2-3$	K500Ю	PШ32-70/16SK	0,52 шт./т.т.
Кирова	№ 2586	Мощность 1,5–1,8м, уголь $f=1,5-2$	4LS5	PШ32-70/16SK. M1	0,15 шт./т.т.
7 Ноября	«Байкаимский»	Уголь $f=1,5-1,9$ , породные прослойки $f=3-5$ , «колчеданы» $f=8$	KGS445	PШ32-78/16	0,7 шт./т.т.
Октябрьская	«Полысаевский 1» № 996	Мощность 2,15–2,36 м, уголь $f=1,2$ , «колчеданы» $f=8$	K500Ю	PШ32-70/16	2,97 шт./т.т.

Структурно угольный бассейн разделяется на несколько широких асимметричных брахисинклиналей с плоским днищем и крутопадающими западными крыльями. Складки разделены крупными надвигами.

Угольные пласты, в пределах которых проводились испытания, имели значение крепости угля от  $f=1$  до  $f=2$ , лишь в отдельных случаях крепость угля достигала  $f=2,5$  (ш. Алардинская) по Протождяконову. Мощность пласта изменялась в интервале значений 1,5–4,0 м, в ряде пластов присутствовали твердые включения.

Таким образом, значения величины сопротивления пластов резанию варьируется в интервале 125–360 кН/м, что дает возможность применения полученных закономерностей и выводов к шахтам, обладающим схожими горно-технологическими условиями.

### 17.2. Методика промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов производства ООО «Горный инструмент»

Для установления основных причин выхода из строя ТПР использовалась методика промышленных испытаний, применяемая заводом – изготовителем резцового инструмента ООО «Горный инструмент», позволяющая учитывать и выявлять основные причины тех или иных отказов резцов.

В соответствии с [169] показателем надежности резцов является величина удельного расхода резцов в штуках на 1000 т горной массы (шт./1000 т.) или в штуках на кубический метр объема проходки (шт./м<sup>3</sup>).

Правильный выбор инструмента, соответствующего конкретным горно-геологическим характеристикам и техническим характеристикам комбайна, подтверждается показателями удельного расхода при проведении сравнительных испытаний.

На промышленные испытания представлялась серийная (опытная) партия тангенциальных поворотных резцов, предназначенных для оснащения рабочих органов очистных комбайнов [170].

Целью промышленных испытаний серийной (опытной) партии резцов является определение удельного расхода резцов  $N_{уд}$  очистных комбайнов, шт./1000 т. Он определяется по результатам испытаний в производственных условиях, на основании общего расхода резцов (шт.) и объема добычи по горной массе (тыс.т) за время испытаний.

В случае установки на исполнительный орган резцов разных типов общий расход резцов определялся по формуле

$$N_{уд} = \frac{\sum N}{Q}, \quad (17.1)$$

где  $\sum N$  – общий расход резцов за время испытаний, шт.;  $Q$  – объем добычи (проходки) резцами за время испытаний, шт., (согласно ГОСТ Р 51047-97);

При этом фиксировались причины отказов (поломка корпуса резца, изгиб корпуса резца, поломка твердого сплава, отрыв твердого сплава, затупление, другие причины).

Испытания проводились в один этап путем промышленной эксплуатации резцов при выемке угля очистным комбайном.

Количество резцов используемых в испытании составляло два номинальных комплекта разрушающего инструмента, который устанавливается на рабочий орган очистного (проходческого) комбайна.

Для проведения испытаний создавались комиссии. Состав комиссий утверждался техническим руководителем предприятия, проводящего испытания.

По согласованию, в комиссию включались представитель завода-изготовителя резцов для выявления области применения и типа оборудования для проведения испытания.

На председателя комиссии возлагалось руководство и ответственность за проведение испытаний в соответствии с программой и методикой, систематическое наблюдение за ходом испытаний, и при необходимости, периодическое рассмотрение промежуточных результатов испытаний, а также правильность выводов и предложений комиссии.

Испытания проводились на одном из участков, котрый имел характерные горно-геологические свойства пород (ископаемого) для шахты. Выбор места проведения испытания осуществлялся комиссией и оформлялся протоколом.

Промышленные испытания проводились на исправном комбайне, укомплектованном рабочим органом, оснащенном исправными резцедержателями и управляемым опытным машинистом.

Режимы работы комбайна и резцов соответствовали их техническим характеристикам.

Справка о составе и характеристике углей, где проводились испытания, предоставлялись геологической службой шахты. К началу испытаний шахта обеспечивалась серийной (опытной) партией резцов. На протяжении всего периода испытаний велся учет отбойки в тысячах тонн, и заполнялся журнал учета выдачи и возврата инструмента, испытанного на очистном комбайне.

По результатам испытаний составлялся акт и протокол испытаний, который содержал следующие основные разделы:

- 1) цель и задачи испытаний, подбор режущего инструмента, максимально соответствующего горно-геологическим условиям по показателю «удельный расход»;
- 2) исходные данные горно-геологических условий и технической характеристики комбайна (тип комбайна, диаметр шнека, суммарная номинальная мощность привода комбайна, производительность, масса, механизм подачи, номинальная мощность привода подачи, максимальная скорость подачи, тяговое усилие, наработка до капитального ремонта);
- 3) место испытаний;
- 4) геометрические параметры применяемого и опытного инструмента, схема расстановки инструмента на исполнительном органе комбайна.

В течение испытаний проводились непрерывные наблюдения и измерения: в процессе испытаний, каждые сутки проводился осмотр резцов. По данным осмотра велся журнал учета выдачи и возврата инструмента, испытанного на очистном комбайне.

На основе данных подсчитывался удельный расход резцов за время испытаний.

После испытаний опытных партий резцов давались рекомендации: по передаче в серийное производство; объему установочной партии; объему доработки инструмента и корректировки конструкторской документации; по категории качества.

На основании вышеизложенной методики на ряде угледобывающих предприятий Кузбасса, Хакасии, Краснодарского края, Украины, были определены удельные расходы и выяснены основные причины выхода из строя тангенциальных поворотных резцов.

### **17.3. Анализ результатов испытаний тангенциальных поворотных резцов на угледобывающих предприятиях Кузбасса**

Схема испытания: при односторонней отбойке ведущий шнек снаряжался комплектом новых резцов (резцы промаркированы), осмотр состояния резцов производился каждую смену, при износе 1/3 от первоначально установленного количества резцов или при добыче более 20000 тонн угля, испытание прекращалось, и производился расчет удельного их расхода ( $N_{уд} = \frac{n}{Q} = \frac{шт.}{тыс.т}$ ).

#### **Испытание 1**

1. Испытания опытной партии комбайновых резцов типа РШ 32-70/16 СК в лаве № 1726 пласта «Бреевский» на ш. Комсомолец.

Испытания опытной партии резцов типа РШ 32-70/16 СК для очистного комбайна К500Ю проводились с целью определения удельного расхода инструмента (резцов/тыс. тонн угля), и выявления положительных тенденций при применении вместо цилиндрического твердого сплава, сплава имеющего «грибковую» форму.

Пласт «Бреевский» имеет сложное строение (рис. 17.1), состоит из 2-4-х угольных пачек крепостью  $f=1,5$ , разделенных породными прослойками алевролита мелкозернистого, крепостью  $f=2-3$ . Соппротивление угля резанию 15 МПа.

Мощность угольных пачек довольно выдержанная, средняя мощность по чистым угольным пачкам по всей лаве составляет – 2,72 м.

В пласте встречаются включения «колчеданов», крепостью  $f=7-8$ , булкообразной формы, размерами до  $2 \times 0,5 \times 0,5$  м, приуроченных к нижней угольной пачке.

Отработка пласта «Бреевского» в контурах выемочного участка лавы № 1726 велась очистным узкозахватным комбайном «КУЗБАСС 500» (рис. 17.2), технические характеристики комбайна [161] приведены в табл. 17.3.

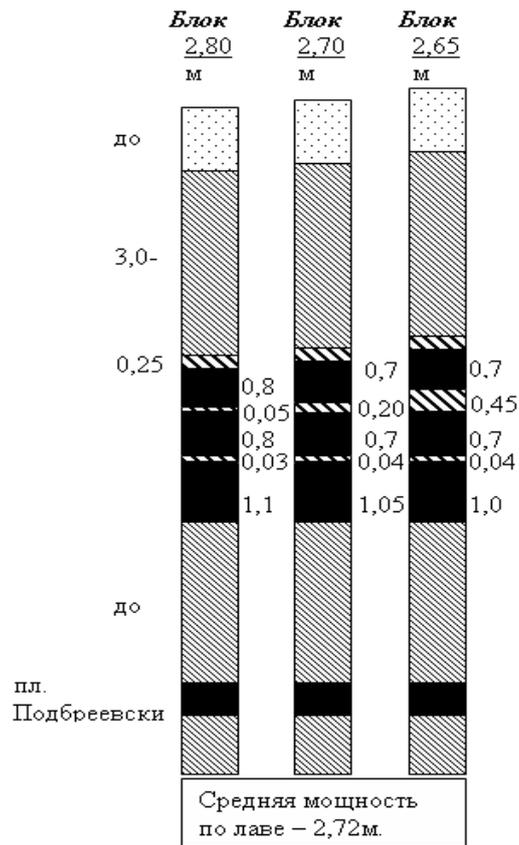


Рис. 17.1. Стратиграфическая колонка лавы № 1726



Рис. 17.2. Комбайн «КУЗБАСС 500Ю»

Таблица 17.3

Технические характеристики комбайна К-500Ю

Суммарная номинальная мощность привода комбайна, кВт	535(200*2+45*3)
Диаметр шнека, м	1,8 м
Производительность, т/мин	Не менее 8
Максимальная скорость подачи, м/мин	До 6

В качестве материала корпуса (рис. 17.4) была выбрана сталь легированная конструкционная 35 ХГСА (ГОСТ 4543-71). Механические характеристики материала корпуса тангенциального поворотного резца представлены в табл. 17.5.

Форма твердого сплава К2880/2 (грибковая форма). Марка твердого сплава ВК 10-КС. В табл. 17.6 приводятся свойства данного сплава [171].

Геометрические параметры резца РШ 32-70/16SK (рис. 17.3) и характеристики материалов корпуса и вставки резца приведены в табл. 17.4, 17.5, 17.6.

Таблица 17.4

*Химический состав материала корпуса резца, % (по массе)*

Сталь	С	Si	Mn	Cr
35 ХГСА	0,32–0,39	1,10–1,40	0,80–1,10	1,10–1,40

Таблица 17.5

*Механические характеристики материала корпуса резца*

Сталь	Закалка			Отпуск		$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi$ , %	$\delta$ , %	$a_{H\tau}$ , кДж/м <sup>2</sup>	Предельная твердость, НВ
	t <sub>1</sub> , С	t <sub>2</sub> , С	Ср.охл.	t <sub>1</sub> , С	Ср.охл.						
35 ХГСА	950, масло	890	масло	230	Воздух или масло	1274	1617	9	40	392	269/241

Таблица 17.6

*Физико-механические свойства твердого сплава*

Марка сплава	Предел прочности при поперечном изгибе кгс/мм <sup>2</sup> (Н/мм <sup>2</sup> ), не менее	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, HRA, не менее	Коэффициентная сила кА/м Эрстед	
ВК10-КС	240(2352)	14,2–14,6	85,0	4,8–7,2	60–90

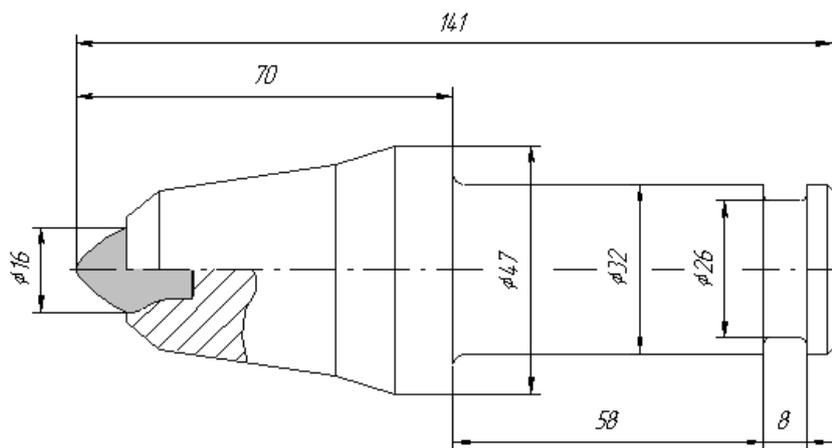


Рис. 17.3. Резец РШ 32-70/16SK

Резцы типа РШ 32-70/16 SK в количестве 46 штук были установлены на правый шнек. Очистной комбайн использовался по односторонней схеме.

В период с 16.01.04 по 23.01.04 в лаве № 1726 было добыто 26,675 тыс. т. угля (табл. 17.7).

Таблица 17.7

Журнал регистрации результатов испытаний РШ 32-70/16 СК

Дата	Отбито угля, т	Количество резцов вышедших из строя		
	Резцами РШ 32-70/16 СК	Выпадение твердого сплава	Разрушение твердого сплава	Разрушение корпуса резца
16.01.04	–	–	–	–
17.01.04	3575	–	1	–
18.01.04	3850	–	2	–
19.01.04	3850	–	–	4
20.01.04	3850	–	1	–
21.01.04	3850	–	2	–
22.01.04	3850	–	–	2
23.01.04	3850	–	–	–
24.01.04	3850	2	–	–
Всего	26,675			

За период испытаний вышло из строя 14 резцов типа РШ 32-70/16 СК, потерь тангенциальных поворотных резцов при проведении испытания не зафиксировано.

Таким образом, удельный расход резцов РШ 32-70/16 СК составил

$$N_{\text{уд}} = \frac{14}{26675\text{т.}} = 0,52 \frac{\text{шт.}}{\text{тыс.т}} \quad (17.2)$$

## 2. Испытания резцов РШ 32-70/16.

Материал корпуса – сталь легированная конструкционная 35ХГСА (ГОСТ 4543-71), марка твердого сплава ВК8В (ГОСТ 880-75) [172]. Твердый сплав Г6704, цилиндрической формы.

За период испытаний было добыто 18,6 тысяч тонн угля и вышло из строя 17 резцов, т. е. удельный расход резцов составил 0.91 шт./тыс. тонн. Общий вид резца и его размеры изображены на рис. 17.4.

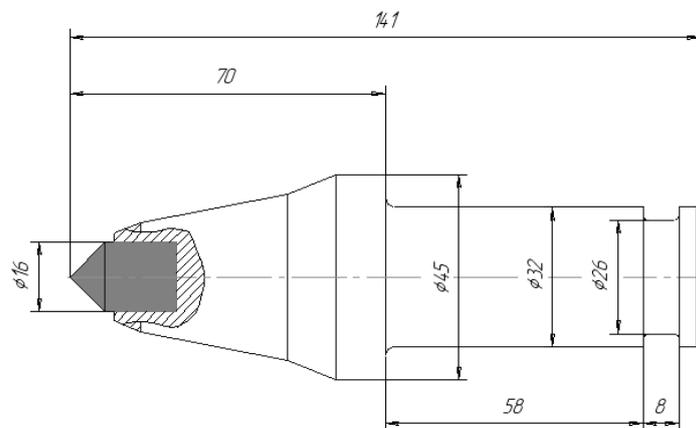


Рис. 17.4. Тангенциальный поворотный резец РШ 32-70/16

Выход резцов из строя происходил главным образом из-за вылома твердосплавных вставок после изнашивания корпуса резца вблизи вставок.

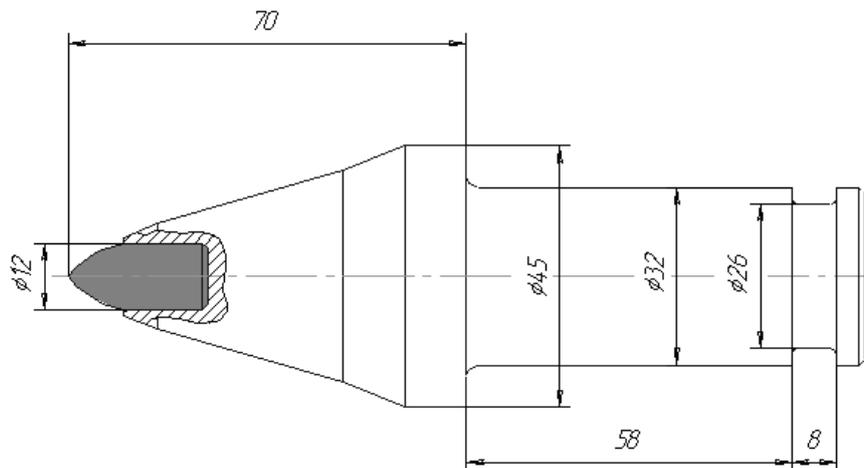
### 3. Испытание резцов РШ 32-70/12ВЛ.

Материал корпуса – сталь легированная конструкционная 35ХГСА (ГОСТ 4543-71), твердый сплав фирмы Voart Longyear Stift D12,0×23 BF T6. Общий вид резца и его размеры изображены на рис. 17.5.

За период испытаний было добыто 8 тысяч тонн угля и вышло из строя 16 резцов, т. е. удельный расход резцов составил 2 шт./тыс. тонн.

Причины выхода резцов из строя заключается в выломе твердосплавных вставок после абразивного износа корпусов вокруг вставок.

Анализ результатов первых двух этапов, становится, позволил установить, что грибковая форма твердого сплава является предпочтительнее в сравнении с цилиндрической формой (при отсутствии включений и невысокой крепости угля), это обуславливается тем, что поверхность закрепления твердосплавной вставки при работе резца не уменьшается.



*Рис. 17.5. Тангенциальный поворотный резец РШ 32-70/16 ВЛ с цилиндрической твердосплавной вставкой фирмы Voart Longyear Stift D12,0×23 BF T6*

Третий этап в целом можно охарактеризовать следующим образом: при применении меньшего диаметра твердосплавных вставок (Ø12 мм вместо Ø16 мм), был уменьшен радиальный размер торца корпуса головной части резца, что при абразивном износе корпуса привело к выламыванию вставки и выходу резца из строя.

Не всегда результаты испытаний являются критерием оценки конструкционной прочности и износостойкости резцов, вследствие присутствия иных причин выхода резцов из строя (потери, технологические недоработки).

### Испытание 2

Испытания резцов РШ 32-70/16 проводились на ОАО Шахта Октябрьская, на участке № 1, в лаве № 996. Отработка лавы производилась по челноковой схеме.

Пласт «Полысаевский – 1» состоит из угольной пачки крепостью  $f=1,2$ , с внедрением породного прослоя алеволита. Соппротивление угля резанию – 155 кг/см. В пласте встречаются включения «колчеданов», крепостью  $f=7-8$ , булкообразной формы, размерами до  $0,8 \times 0,5 \times 0,2$  м.

Отработка пласта «Полысаевский – 1» велась очистным узкозахватным комбайном «КУЗБАСС 500Ю».

За период испытания с 17.01.05 по 23.01.05 в лаве № 996 было добыто 48 тысяч тонн угля, при этом вышло из строя 98 резцов и было утеряно 45 резцов, удельный расход изношенных резцов составил 2 шт./тыс. тонн, а удельный расход утеранных резцов составил 0,9 шт./тыс. тонн. Для крепления резцов использовались стопора в виде резиновых колец.

Несомненно, зафиксированные результаты не могут достоверно охарактеризовать работоспособность ТПР, из-за высоких потерь, но являются ярким примером того, как некачественные или несовершенные замковые устройства влияют на работоспособность комбайна.

Поскольку отсутствие резцов в резцедержателях приводит как к значительному износу последних, увеличению нагрузки на остальные резцы, так и повышению энергоемкости разрушения угля в целом.

### **Испытание 3**

Испытания резцов РШ 32-70/16SK.M1 (рис. 17.6) проводились на ОАО Шахта им. Кирова, на участке № 2, в лаве № 25-86 пласта «Бреевский» с целью определения удельного расхода инструмента. Резцы в количестве 52 штук (22 резца в кутковой части шнека, и по 10 шт. на каждом витке трехзаходного шнека комбайна JOY 4LS5) были установлены на правый шнек 17.02.04г. в первую (ремонтную) смену.

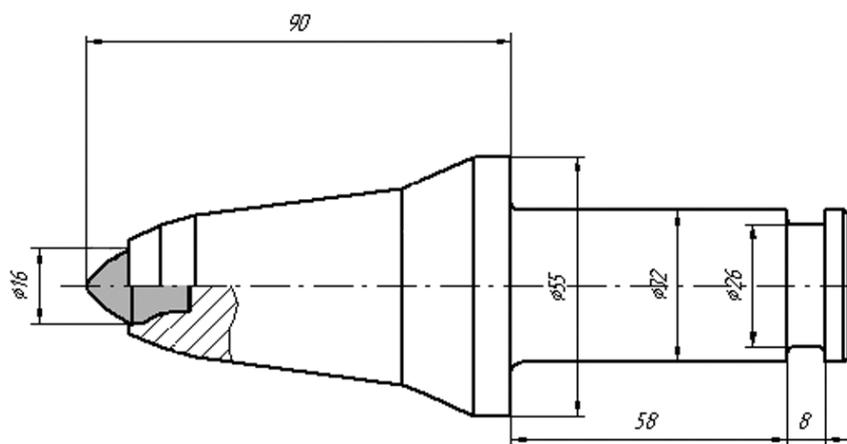


Рис. 17.6. Тангенциальный поворотный резец РШ 32-70/16SK.M1

В процессе испытаний каждые сутки проводился осмотр резцов. По данным осмотра велся журнал регистрации результатов испытаний резцов типа РШ 32-70/16SK.M1. Резцы, установленные на правом шнеке, отбивали 50 % угля добываемого комбайном.

В период с 18.02.04 по 24.02.04 в лаве № 2586 было добыто 40755 тонн угля. Соответственно правым шнеком, на котором были установлены испытываемые резцы, было отбито 20377 тонн угля (табл. 17.8).

За период испытаний вышло из строя 2 резца (износ корпуса резца в месте крепления твердосплавной вставки с ее последующим выломом) и 1 резец был утерян. За период испытаний разрушение твердого сплава не наблюдалось.

Таким образом, удельный расход резцов РШ 32-70/16SK.M1 составил 0,10 шт./т. тонн, что является весьма неплохим показателем, свидетельствующим о верном подборе типа резца (геометрии резца), марки корпуса и твердосплавной вставки.

Ниже приведены результаты испытаний тангенциального поворотного резца с вставкой из износостойкой стали.

Дата	Отбито угля, т	Количество резцов вышедших из строя	
		Износ корпуса резца	Вылет резца из резцедержателя
18.02.04	5000	–	1
19.02.04	5750	1	–
20.02.04	6250	–	–
21.02.04	5750	1	–
22.02.04	6250	–	–
23.02.04	5255	–	–
24.02.04	6500	–	–
Всего	40755		

#### **Испытание 4**

Данные о выходе резцов из строя свидетельствуют, что основными причинами являются разрушение твердого сплава и абразивный износ корпуса резца вокруг твердого сплава с последующим выламыванием последнего, т. е. абсолютно очевидна разница в скорости изнашивания твердого сплава (вольфрамокобальтовый сплав) и корпуса резца (30ХГСА, 35ХГСА, 40Х и т. д.).

Необходимо было подобрать материалы корпуса и режущего элемента (вставки) таким образом, чтобы интенсивность износа корпуса соответствовала интенсивности износа режущего элемента. Поэтому было предложено использовать в качестве режущего элемента ТПР вставку из износостойкой стали, например Х12МФ. Длина посадочной (запаиваемой) поверхности режущего элемента (вставки) при этом увеличена.

Опытная партия резцов РШ 32-70/16Х в количестве 6 шт. была установлена на комбайн К-500Ю в лаве № 1924 на ш. Комсомолец (геология лавы аналогична лаве № 1726). Изменения в геометрических размерах конструкции резца коснулись конструктивного вылета, принятого равным 83 мм, против 70 мм у резца РШ 32-70/16. Схема добычи – односторонняя. За время испытания было добыто 8000 тонн, при этом максимальное уменьшение конструктивного вылета резца составило 14 мм, но вследствие того, что износостойкость стали Х12МФ выше, чем стали 50ХФА, необходимое для резания угля заострение резца – сохранилось, т. е. все резцы остались в работоспособном состоянии, и отчетливо наблюдался эффект самозатачивания.

Можно утверждать, что замена дорогостоящего твердого сплава вставкой из износостойкой стали весьма перспективна при определении граничных условий применения.

Результаты испытаний резцов проведенных на угледобывающих предприятиях Кузбасса (в частности на шахтах объединения СУЭК – Комсомолец, Кирова, 7ноября, Егоровской, Октябрьской, а также шахтах Новой, Первомайской, Ленина и др.) в целом подтверждают данные, приведенные в работе [173], но имеют особенности, например: 45 % – износ корпуса односторонний с последующим выломом режущей вставки, 27 % – равномерный, 25 % – потери резцов, 3 % – излом корпуса ТПР.

#### **17.4. Анализ результатов промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов на шахтах ОАО «Воркутауголь»**

В данном разделе представлена информация промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов на предприятиях Воркутинского угольного бассейна.

В шахтах Воркуты [36, 37] были проведены промышленные испытания опытных партий тангенциальных поворотных резцов производства ООО «Горный инструмент», основные характеристики которых, заявленные изготовителем, представлены в табл. 17.9. Резцы армированы вставками, изготовленными из твердых сплавов марки ВК.

Испытания проходили в соответствии с программой и методикой, разработанными ООО «Горный инструмент» на основании ГОСТ Р 51047-97 [18].

Цель производственных испытаний: определение удельного расхода резцов, выявление причин отказов и интенсивности износа корпуса и армировки, целесообразности постановки на серийное производство.

Методикой предусматривалось испытание резцов в производственных условиях с представительной областью их использования в соответствии с назначением как по горно-геологическим условиям, так и по типам комбайнов: на проходческих – 1ГПКС, КСП43 и очистном – К-500Ю.

В процессе испытаний каждые сутки проводился осмотр резцов. Данные осмотра заносились в журнал учета выдачи и возврата инструмента, испытываемого на проходческом (очистном) комбайне. Общие данные по испытаниям сведены в табл. 17.10.

Удельный расход резцов очистных комбайнов (в шт./тыс. т), проходческих (в шт./м<sup>3</sup>) определяется на основании общего расхода резцов (шт) и объема добычи по горной массе (тыс. т) или объема проходки в плотном теле (м<sup>3</sup>) за время испытаний по формуле [32, 37]:

$$N_{уд} = \Sigma N / Q, \quad (17.3)$$

где  $\Sigma N$  – общий расход резцов за время испытаний, шт;  $Q$  – объем добычи (проходки) резцами данного типа за время испытаний, тыс. т добычи или 1 м<sup>3</sup> проходки.

Таблица 17.9

Основные параметры тангенциальных поворотных резцов

Параметры	Тип резцов		
	РШ25-65/12SK	РШ33-85/17,5	РШ32-70/16SK
	Условия применения		
	<u>Тяжелые:</u> уголь с прослойками пород (f=2–5) и твердыми включениями (f=5–8)	<u>Сверхтяжелые:</u> уголь с прослойками пород (f=2–7) и твердыми включениями (f=7–10) большая протяженность	<u>Средние:</u> уголь с прослойками пород (f=2–5)
Диаметр хвостовика, мм	25	33	32
Конструктивный вылет резца, мм	65	71	75
Длина хвостовика, мм	55	74	58
Отношение диаметра вставки к диаметру головки	16/44	17,5/55	16/47

Удельный расход резцов на тонну добычи или объем проходки в кубических метрах рассчитывается по формуле

$$n = \Sigma N / Q. \quad (17.4)$$

Таблица 17.10

## Условия проведения производственных испытаний

Параметры и условия применения	Тип резцов		
	РШ25-65/12SK	РШ33-85/17,5	РШ32-70/16SK
Комбайн	1ГПКС	КСП-43	К-500Ю
Шахта	Воргашорская	Заполярная	Заполярная
Выработка	Вентиляционный штрек 233-ю пласта «Мощный»	Магистральный конвейерный уклон № 1	Лава 834-ю пласта «Тройной»
Угол наклона выработки, град	0–1	3	±1
Средневзвешенная прочность горных пород по забою, МПа	18,2	62,9–66,8 (без включений)	14,1
Форма и площадь сечения выработки вчерне, м <sup>2</sup>	Трапецевидная, 13,44	Арочная, 20,6	–
Мощность пласта, м	–	–	3,08

Стоимость резцов на 1 м<sup>3</sup> проходки или на 1 тыс. т добычи определяется по формуле

$$c = \Sigma NC / Q, \quad (17.5)$$

где  $C$  – стоимость одного резца, руб.

Эксплуатационные испытания резцов РШ25-65/12SK на комбайне 1ГПКС (табл. 17.11, 17.12) проходили в период 30.05–08.08.2005 г. в шахте Воргашорская при проходке вентиляционного штока 233-ю пласта «Мощный».

Таблица 17.11

## Технические характеристики комбайнов

Параметры	1ГПКС	КСП43	К-500Ю
Тип исполнительного органа	Стреловидный с продольно-осевой коронкой	Стреловидный с продольно-осевой коронкой	Шнековый
Диаметр исполнительного органа, мм	415	950	1600
Производительность: – по проходке, м/мин (при прочности пород, МПа) – по добыче, т/мин	0,23 (≤ 70); 1,42 (≤ 20) –	0,2 (120); 0,5 (80) –	– 9,5
Суммарная номинальная мощность электродвигателей, кВт	110	350	605; 505
Мощность электродвигателя исполнительного органа, кВт	55	160	250×2; 200×2

Параметры	1ГПКС	КСП43	К-500Ю
Механизм подачи	Гидравлический	Гидравлический	Электрический, БСП
Максимальная скорость подачи, м/мин	6,5	1,1–4,6	0–5
Максимальное тяговое усилие, кН	–	380	450
Масса, кг	25 000	75 000	32 000
Срок эксплуатации	Прошел два капитальных ремонта	Новый	Новый

Таблица 17.12

## Результаты испытаний резцов типа РШ

Показатели	Тип резца		
	РШ25-65/12СК	РШ33-85/17,5	РШ32-70/16СК
	Сроки испытаний		
	30.05-08.08.2005 г.	12.03-16.03.2005 г.	15.10.2005–09.02.2006 г.
Длина пройденной выработки (отработки лавы), м	325	75	340
Количество установленных резцов, шт.	28	40	50
Состояние резцов к концу испытаний:			
– износ головки резца	–	28	16
– износ головки резца на уровне крепления вставки	3	4	12
– поломка вставки	16	–	11
– отрыв вставки	–	–	2
– утерьяны	9	8	9
Стоимость одного резца, руб.	95	140	125,8
Удельная стоимость режущего инструмента	1,22 руб./м <sup>3</sup>	29 руб./м <sup>3</sup>	56,85 руб./тыс. т
Удельный расход резцов	0,013 шт./м <sup>3</sup>	0,207 шт./м <sup>3</sup>	0,452 шт./м <sup>3</sup>

Форма сечения выработки прямоугольная, площадь сечения в черне 13,44 м<sup>2</sup>. Площадь угольной части забоя  $S_{\text{угля}} = 12,18 \text{ м}^2$ , породной  $S_{\text{пор}} = 1,26 \text{ м}^2$ . Породы представлены алевролитом мелкозернистым (предел прочности на сжатие  $\sigma_{\text{сж}} = 40 \text{ МПа}$ ) и аргиллитом с замещением алевролитом ( $\sigma_{\text{сж}} = 30 \text{ МПа}$ ). Средневзвешенная прочность горных пород по забою 18,2 МПа (см. табл. 17.10). Количество установленных резцов – 28.

За период 30.05–24.06.2005 г. комбайном пройдено 135 м выработки. Резцы на рабочем органе были обследованы. Утеряно 4 резца. Снято было 7 резцов, из них 2 резца (рабочих) с износом вставки из твердого сплава (рис. 17.7, а), пять резцов имели поломку вставки (см. рис. 17.7, б).

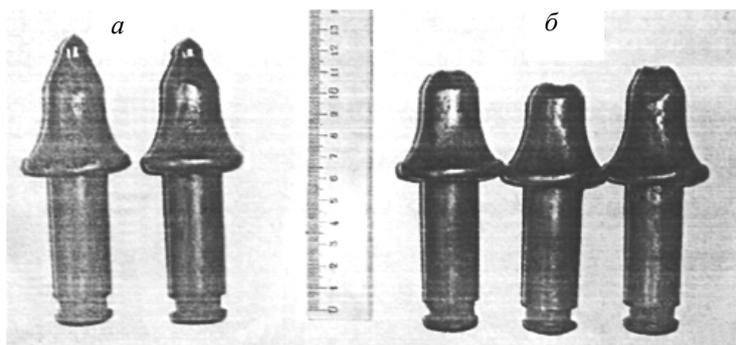


Рис. 17.7. Резцы РШ25-65/12SK после снятия с комбайновой коронки

По мере износа головки резца в зоне крепления твердого сплава ломалась вставка из твердого сплава, но ее отрыва не наблюдалось. Такой характер износа имели 16 резцов (57 %) из 28. Общие потери резцов РШ25-65/12SK за весь период промышленных испытаний составили 9 шт. (32 %). На место снятых и потерянных резцов РШ25-65/12SK устанавливались новые резцы РШ25-65/12.

Оставшиеся 11 резцов с поломкой вставки были сняты с комбайновой коронки 09.08.2005 г.

В ходе испытаний резцов РШ25-65/12SK на комбайне 1ГПКС было установлено, что по слабым горным породам (уголь, аргиллит, алевролит с крепостью  $f = 1,7-3,0$ ) износ режущего инструмента был незначителен, хотя испытания носили длительный характер. За этот период комбайном было пройдено 325 м выработки. Удельный расход резцов составил  $0,013 \text{ шт./м}^3$ , а удельная стоимость –  $1,22 \text{ руб./м}^3$ .

Условия испытаний соответствуют условиям применения данного типа резца, заявленным изготовителем.

Промышленные испытания партии поворотных резцов РШ33-85/17,5 на комбайне КСП-43 (табл. 17.11) проходили в шахте Заполярная ОАО «Воркутауголь» в период 12.03–16.03.2005 г. В результате было пройдено 7,5 м магистрального конвейерного уклона № 1 сечением  $20,6 \text{ м}^2$  по крепким породам ( $\sigma_{ср} = 62,9-66,8 \text{ МПа}$ ;  $f = 6-9$  по шкале проф. М.М. Протождьяконова, абразивность 18 мг и более). Испытания были осложнены встретившимися включениями конкреций с пределом прочности на сжатие до 200 МПа. При отбойке горных пород комбайном КСП-43 линзы конкреции сверху и снизу вырезались и откалывались исполнительным органом комбайна.

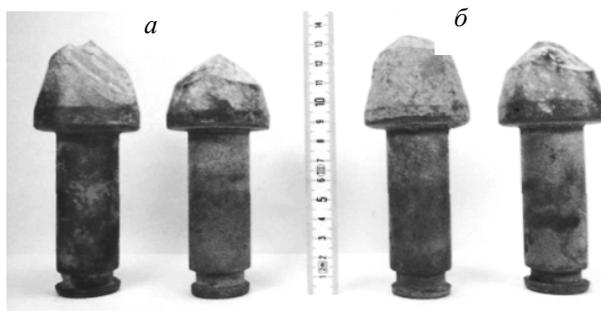


Рис. 17.8. Характер износа резцов РШ33-85/17,5

Основными видами износа резцов РШ33-85/17,5 явился износ головки резца (28 резцов – 87,5 %) на 30–40 мм (рис. 17.8, а) и износ головки резца на уровне крепления вставки 28 мм – 4 резца (12,5 %) (см. рис. 17.8, б). Как видно из рис. 17.8, большая часть резцов имеет неравномерный износ головки, что является следствием нестабиль-

ного вращения резцов или их заклинивания в резцедержателях. Утеряно было 8 резцов. Вышедшие из строя резцы заменялись резцами РШ32-85/16.

По результатам расчетов удельный расход резцов РШ33-85/17,5 составил 0,207 шт./м<sup>3</sup>, а удельная стоимость – 29 руб./м<sup>3</sup>.

Результаты испытаний показали, что резцы могут работать и в более тяжелых условиях, чем заявлены изготовителем.

Испытания резцов РШ32-70/16SK проходили в шахте Заполярная ОАО «Воркутауголь» в период 15.10.2005–09.02.2006 г. на очистном комбайне К-500Ю при отработке лавы 834-ю пласта «Тройной» мощностью 3,08 м.

Все резцы РШ32-70/16SK в количестве 50 шт. были установлены на один шнек. Кроме испытываемых резцов на обоих шнеках в работе находились резцы РКС2 и РГ-501. На каждом шнеке комбайна К-500Ю (табл. 17.11) установлено 64 кулака по окружности и 4 кулака на торце. Четыре лопасти на шнеке расположены по спирали. Угол установки резцов к касательной окружности шнека – 45°. При таких углах установки резцов в кулаках вращение резцов происходит за счет силы трения, обеспечивая тем самым равномерный износ режущего инструмента.

Износ резцов РШ32-70/16SK был неравномерен по окружности головки резца. Фактическая наработка на один резец к этому времени составила 1240 т. Четыре резца выданы с поломкой вставок, 3 резца потеряны и заменены на новые РКС2.

На период завершения промышленных испытаний (09.02.2006 г.) на комбайне К-500Ю в работе оставалось 18 экспериментальных резцов РШ32-70/16SK, в том числе 2 с оторванными вставками и изношенной головкой (рис. 17.9) и 16 экспериментальных резцов с изношенными головками, но не изношенными вставками, имеющими характерную сеть мелкой трещиноватости (рис. 17.10).



*Рис. 17.9. Износ резца РШ32-70/16SK: оторвана вставка и изношена головка*



*Рис. 17.10. Характерная сеть мелких трещин в армировке резца РШ32-70/16SK*

Стопорные шайбы резцов на комбайне К-500Ю расположены в корпусе резцедержателей, мало подвержены «заштыбовке» углем, что уменьшает вероятность поломки стопорной шайбы и потери резцов при эксплуатации.

В результате промышленных испытаний резцов РП32-70/16СК наработка на 1 резец составила более 2213 т. Удельный расход резцов РП32-70/16СК составил 0,4519 шт./тыс. т, а удельная стоимость – 56,85 руб./тыс. т.

По данным фирмы-производителя «Dosco», соотношение расходов резцов по углю и песчанику с  $\sigma_{сж} = 100$  МПа доходит до 100 раз (300 м<sup>3</sup>/резец для угля и 3 м<sup>3</sup>/резец для песчаника) [37].

Комбайновые резцы РП32-70/16СК соответствуют условиям ОАО Шахта Воргашорская и пластов «Тройной» и «Мощный» шахт ОАО «Воркутауголь».

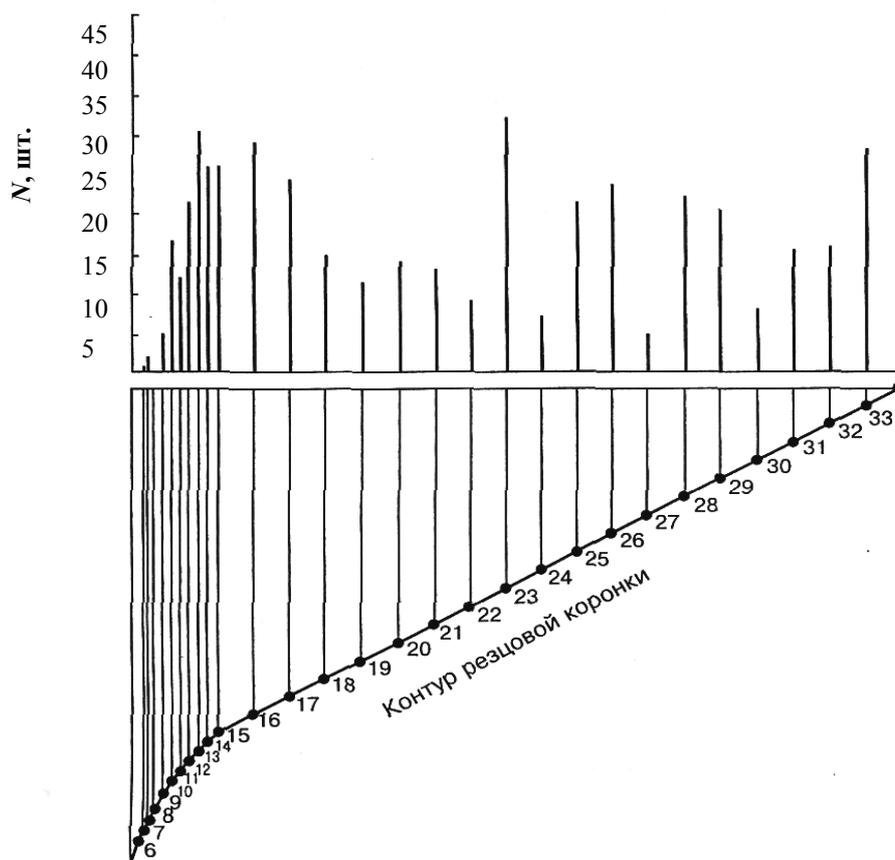


Рис. 17.11. Распределение вышедших из строя резцов по линиям резания

Из выше приведенных примеров можно отметить, что на износ режущего инструмента влияет множество факторов (технологических, конструктивных), в том числе и эксплуатация самого комбайна. А именно высокая динамика нагрузок на комбайн избирательного действия, что является следствием увеличения длины стрелы, неравномерного движения исполнительного органа по забою, неоднородности разрушаемого массива. Это приводит к случайным отклонениям толщины среза от ее среднего значения, соответствующего средней скорости подачи. В результате резцы даже при относительно малой средней скорости подачи, но при ее максимальной амплитуде, внедряются в массив до резцедержателей, что приводит к интенсивному их износу, затиранию форсунок, излому кернов. Скол вставок вызывает последующий прогрессивный износ резцов, образуются плоскости износа, что связано с неустойчивым вращением и закли-

ниванием резцов. Плоскости износа резко увеличивают нагрузки на резцах, что существенно влияет на динамические нагрузки исполнительного органа, выход из строя элементов трансмиссии, их электроприводов [36].

В качестве примера можно отметить работу комбайна 4ПП-2М на руднике Ангидрит в условиях «Норильского ГМК», при разрушении ангидрита использовались резцы РКС-2. В процессе работы фиксировался расход резцов при  $\sigma_{сж} = 60\text{--}70$  МПа (2–3 шт./м<sup>3</sup>) и более 90 МПа (5 шт./м<sup>3</sup>). При поломке первых резцов в заходе начинается так называемая «цепная реакция» выхода из строя резцов (рис. 17.11) [38].

В качестве примера в табл. 17.13 приведены некоторые результаты шахтных промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов производства ООО «Горный инструмент» (г. Новокузнецк) на предприятиях России, в том числе Кузбасса, позволившие установить причины износа, выхода из строя резцов и определить их удельный расход [17, 32, 34].

### 17.5. Анализ результатов промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов типа РШ на горных предприятиях Кузбасса, шахте Хакасская и ш/у Садкинское

Промышленные испытания ТПР типа РШ также проводились в период с 2002 по 2009 г. на шахтах: Егоровская, ш/у Анжерское, Котинская, Ленина, Полысаевская (табл. 17.13). В связи с ростом энерговооруженности горных комбайнов, эксплуатируемых в сложных горно-геологических условиях горных предприятий, следует особое внимание уделять прочности и надежности режущего инструмента, а также его закреплению в резцедержателях [32].

Таблица 17.13

*Результаты испытаний ТПР производства ООО «Горный инструмент»*

Предприятие	Год испытания	Комбайн	Резец	Удельный расход, шт./тыс. т
Хакасская	2009	K500Ю	РШ32-70/18SK	12,9
Хакасская	2008	K500Ю	РШ32-70/16SK	59,3
Хакасская	2008	SL300	РШ38-110/16SK	20,1
Романовская	2008	K500Ю	РШ32-70/17.5	16,7
Романовская	2008	K500Ю	РШ32-70/16S.M1	27,1
Романовская	2008	K500Ю	РШ32-70/18SK	89,1
Хакасская	2008	K500Ю	РШ32-70/17.5	9,3
Березовская	2004	KGS345	РШ32-78/18SK	0,85
Юбилейная	2005	SL300	РШ38-110/16.M2	0,7
Заречная	2006	MB12	РШ32-70/16	1,7
Чертинская-Коксовая	2006	KGS345	РШ32-85/18SK.M2	6,5
Листвяжная	2007	4LS20	РШ35-95/18SK	1,1
Комсомолец	2005	K500Ю	РШ32-70/12BL	2,0
Комсомолец	2004	K500Ю	РШ32-70/16.10	1,2
Комсомолец	2004	K500Ю	РШ32-70/12SK	0,52
Кирова	2004	4LS5	РШ32-70/16SK.M1	0,15
7 Ноября	2003	KGS445	РШ32-78/16.M4	0,7

Предприятие	Год испытания	Комбайн	Резец	Удельный расход, шт./тыс. т
Октябрьская	2006	К500Ю	РШ32-70/16	2,97
Первомайская	2005	ГПКС	РШ25-65/16SK	0,04*
7 Ноября	2004	ГПКС	РШ25-65/16SK	0,004*
Заречная	2005	П-110	РШ32-85/17.5	0,95*
ш/у Садкинское	2006	КПД	РШ32-85L61/16SK.M2	0,02*

Примечание: \* – удельный расход, шт./м<sup>3</sup>.

**Выводы по результатам промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов**

Результаты испытаний показали, что рациональный выбор режущего инструмента позволяет повысить производительность комбайна, за счет более высокой его износостойкости и соответственно, снижения времени простоя комбайна необходимого для замены резцов.

Применение замковых устройств с технологическим дефектом или несоответствующей конструкции сопровождается потерей инструмента, что существенно увеличивает его удельный расход.

Тангенциальные поворотные резцы, со вставкой из инструментальной стали – работоспособны.

Таким образом, использование в качестве формы твердосплавных вставок тел вращения – эллипсоидов, позволяет исключить с поверхности вставки концентраторы напряжений, приводящие к ее разрушению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рабочий инструмент, реализующий механический способ разрушения горных пород и углей, имеет широкую область применения на исполнительных органах очистных и проходческих комбайнов, буровых машин и струговых установок.

Механика процесса разрушения горных пород и механизм изнашивания рабочего инструмента достаточно хорошо изучены, что позволило обосновать рациональные параметры и схемы расстановки инструмента на исполнительных органах горных машин. Опыт эксплуатации отечественного и зарубежного инструмента позволил разработать стандарты на его классификацию, элементы и конструктивные параметры.

При выборе рабочего инструмента и его креплений на исполнительных органах горных машин заказчики и потребители все чаще выдвигают требования повышения его износостойкости, надежности в широком спектре условий эксплуатации. Высокий уровень современного материаловедения и технологии изготовления рабочего инструмента, его креплений позволяют успешно решить эту задачу путем применения улучшенных инструментальных легированных сталей, твердосплавных материалов, припоев, флюсов.

Многолетний опыт разработки мероприятий и средств по борьбе с пылью позволяет получить компактное конструктивное решение и эффективное сочетание процессов резания и пылеподавления.

Стратегической целью горного машиностроения является налаживание выпуска высокоресурсных, конкурентоспособных, экономичных рабочих инструментов на основе последних научных разработок и передового мирового опыта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов, В.И. Очистные комбайны / В.И. Морозов, В.И. Чуденков, Н.В. Сурина: справочник / под общ. ред. В.И. Морозова. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2006. – 650 с.
2. Струговая выемка угля. Каталог-справочник / А.Н. Аверкин [и др.] ; под общ. ред. В.М. Щадова. – Новочеркасск: «Оникс+», 2007. – 298 с.
3. Расчет и конструирование струговых установок / Б.Б. Луганцев [и др.]. – М.: Горная книга, 2011. – 291 с.
4. Оборудование для проведения наклонных и горизонтальных выработок угольных шахт. Каталог-справочник / А.В. Дуб, В.А. Чернов ; под общ. ред. В.М. Щадова. – М.: ЦП «Васиздаст», 2007. – 124 с.
5. Буялич, Г.Д. Направления совершенствования механизированных крепей для отработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях / Г.Д. Буялич // Горная техника: добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых: каталог-справочник, 2007. – СПб.: Славутич. – С. 10–16.
6. Арцер, А.С. Угли Кузбасса: происхождение, качество, использование. Кн. 1 / А.С. Арцер, С.И. Протасов. – Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т, 1999. – 177 с.
7. Арцер, А.С. Угли Кузбасса: происхождение, качество, использование. Кн. 2 / А.С. Арцер, С.И. Протасов. – Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т, 1999. – 168 с.
8. Голицын, М.В. Коксующиеся угли России / М.В. Голицын, А.М. Голицын. – М.: ИАЦ ГН, 1992. – 179 с.
9. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов, А.И. Петров. – М.: Недра, 1994. – 447 с.
10. Цехин, А.М. Анализ условий эксплуатации очистных комбайнов на шахтах Кузбасса / А.М. Цехин, А.Ю. Борисов, Д.А. Потапов // Перспектива развития Прокопьевско-Киселевского угольного района как составная часть комплексного инновационного плана моногородов: сб. тр. III Междунар. науч.-практ. конф., 30 марта 2011 г. – Прокопьевск: Изд-во филиала ГУ КузГТУ в г. Прокопьевске, 2011. – С. 204–206.
11. Цехин, А.М. Особенности эксплуатации рабочего инструмента очистных комбайнов на ш. Красноярская / А.М. Цехин, М.П. Григорьев, Д.Е. Гончаров // Инновации в угольной отрасли и экономике Кузбасса: сб. ст. участников IV межрегион. науч.-практ. конф. с междунар. участием (28–29 апреля 2011 г.): в 2 т. / Филиал ГУ КузГТУ в г. Белово. – Белово, 2011. – Ч. 1. – С. 32–36.
12. Разрушение угольных и рудных пластов с твердыми включениями шнековыми рабочими органами: монография / В.И. Нестеров [и др.] ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2001. – 125 с.
13. Полкунов, Ю.Г. Циклическое разрушение крепких пород инструментами горных машин, формирующими трещины нормального разрыва: дис. ... д-р техн. наук / Ю.Г. Полкунов. – Кемерово, 2000. – 515 с.
14. Механика разрушения горных пород дисковым инструментом: научное издание / В.И. Нестеров [и др.] ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2001. – 159 с.
15. Цехин, А.М. Исследование и выбор схем разрушения и режущего инструмента расширителей буро-сблочных машин для бурения скважин в условиях шахт Кузбасса: дис. ... канд. техн. наук / А.М. Цехин. – Кемерово, 1974. – 168 с.

16. Исследование механизма разрушения хрупкого горного массива дисковой ша-рошкой / А.Н. Коршунов [и др.]. – М., 1985, вып. № 2(160). – С. 151. – Деп. В ВИНТИ.
17. Крестовоздвиженский, П.Д. Повышение прочности тангенциальных поворотных резцов горных очистных комбайнов: дис. ...канд. техн. наук / П.Д. Крестовоздвиженский. – Кемерово, 2011. – 199 с.
18. ГОСТ Р 51047-97. Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие техни-ческие условия. – М.: Госстандарт России. – 1997. – 20 с.
19. ОСТ 12.44.165–80. Комбайны очистные узкозахватные. Резцы и гнезда для них. Типы и основные размеры.
20. Сафохин, М.С. Горные машины и оборудование: учеб. для вузов / М.С. Сафохин, Б.А. Александров, В.И. Нестеров. – М.: Недра, 1995. – 463 с.
21. Крапивин, М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1979. – 263 с.
22. Крапивин, М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я. Раков, Н.И. Сысоев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 256 с.
23. Яцких, В.Г. Горные машины и комплексы / В.Г. Яцких, Л.А. Спектор, А.Г. Кучерявый ; под ред. В.Г. Яцких: учеб. для техникумов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 400 с.
24. Каталог «Sandvik». Режущий инструмент для горных пород. Горное дело. 2008. – 52 с.
25. Каталог инструмента «Горный инструмент». 2006. – 44 с.
26. Каталог «Кировоградский завод твердых сплавов». Инструмент для горных ра-бот. – 32 с.
27. Каталог «Кировоградский завод твердых сплавов». Твердосплавные изделия для бурового инструмента. – 56 с.
28. Каталог «KENNAMETAL». Underground Mining. 2004. – 60 с.
29. РТМ 12.14.001–77. Машины очистные. Струговые установки. Расчет сил на ре-цах струга. Методика. – Введ. впервые с 23.02.1977. – М., 1977. – 49 с.
30. Резцы с круглым стержнем РКС-1 (Т-1) // Уголь. – 1976. – № 9. – С. 45.
31. Наблюдения за результатами работы резцов РКС-1. – Новочеркасск, 1981. – 124 с.
32. Крестовоздвиженский, П.Д. Некоторые результаты наблюдений за работой очи-стных комбайнов на шахтах Кузбасса / П.Д. Крестовоздвиженский // Горн. ин-форм.-аналит. бюл. – 2009. – № 6. – С. 120–123.
33. Дворников, Л.Т. Исследование напряженно-деформированного состояния инден-торов тангенциальных поворотных резцов очистных комбайнов / Л.Т. Дворников, П.Д. Крестовоздвиженский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сиб-ресурс 2010: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 28–29 окт. 2010 г. / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2010. – Т. 1. – С. 215–217.
34. Опыт эксплуатации рабочего инструмента исполнительных органов горных ма-шин на шахтах Кузбасса / А.А. Хорешок [и др.] // Горн. оборудование и электро-механика. – 2011. – № 4. – С. 8–11.
35. Мышляев, Б.К. Международная выставка-ярмарка «Уголь России-97» / Б.К. Мышляев // Уголь. – 1998. – № 2. – С. 69–72.
36. Особенности эксплуатации проходческих комбайнов на шахтах ОАО «Воркута-уголь» / В.В. Габов [и др.] // Горн. оборудование и электромеханика. – 2008. – № 12. – С. 2–6.
37. Испытание нового горно-режущего инструмента в шахтах Воркуты / Е.В. Белич, Л.М. Гусельников, Д.А. Задков, А.А. Подосенов // Горн. оборудование и электро-механика. – 2007. – № 8. – С. 2–5.

38. Аршавский, В.В. Промышленная проверка добычи ангидрита с применением проходческого комбайна 4ПП-2 в условиях рудника «Ангидрит» Норильского ГМК / В.В. Аршавский, С.Г. Зберовский // Горн. журнал. – 2000. – № 2. – С. 33–35.
39. Прокушенко, С.И. Ресурс – одно из основных условий эффективности / С.И. Прокушенко, Н.В. Мошкин // Горн. пром-сть. – 2006. – № 4. – С. 19–21.
40. Сысоев, Н.И. Методы повышения прочности и долговечности режущих инструментов очистных и проходческих машин: автореф. дис. ...д-р техн. наук / Н.И. Сысоев. – Новочеркасск, 1992. – 38 с.
41. Пат. 2212535 РФ, МПК E21C35/18. Тангенциальный поворотный резец / Л.Т. Дворников, С.И. Прокушенко, П.Д. Крестовоздвиженский, Н.А. Полынцев; – № 2001134315/03 ; заявл. 17.12.2001 ; опубл. 20.09.2003.
42. Пат. 44744 РФ, МПК E21C35/18. Тангенциальный поворотный резец / Л.Т. Дворников, С.И. Прокушенко, П.Д. Кресто-воздвиженский; – № 2004123541/22; заявл. 04.08.2004 ; опубл. 27.03.2005.
43. Пат. 54628 РФ, МПК E21C35/18. Резец добычного комбайна / Л.Т. Дворников, С.И. Прокушенко, П.Д. Крестовоздвиженский. – № 2006100399/22; Заявл. 10.01.2006 ; Оpubл. 10.07.2006.
44. Захаров, Ю.Н. Исследование эффективности работы шнекового исполнительного органа очистного комбайна / Ю.Н. Захаров, Т.П. Щерба // Горн. оборудование и электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 55–56.
45. Солод, В.И. Горные машины и автоматизированные комплексы: учеб. для вузов / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов. – М.: Недра, 1981. – 503 с.
46. Горные машины и оборудование подземных горных работ: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования / А.А. Хорешок [и др.] ; КузГТУ. – Кемерово, 2012. – 170 с.
47. Малашенко, В.А. Исследование и совершенствование исполнительных органов проходческих комбайнов с конусной режущей головкой в условиях Львовско-Волынского угольного бассейна: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В.А. Малыш-енко. – Киев, 1975. – 30 с.
48. Гидроструйные технологии в промышленности. Гидромеханическое разрушение горных пород / В.А. Бреннер, А.Б. Жабин, А.Е. Пушкарев, М.М. Щеголевский. – М.: Изд-во Академии горн. наук, 2000. – 343 с.
49. Король, В.В. Обоснование параметров и определение нагруженности гидромеханических резцов струговой установки: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В.В. Король. – Тула, 2011. – 17 с.
50. Пушкарев, А.Е. Исследование влияния гидравлических параметров гидромеханических резцов струговых установок на усилие резания / А.Е. Пушкарев, В.В. Король // Горн. оборудование и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 10–13.
51. Мерзляков, В.Г. Научные основы создания гидромеханических исполнительных органов для очистных и проходческих комбайнов: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В.Г. Мерзляков. – М., 2000. – 40 с.
52. ГОСТ 880-75. Изделия твердосплавные для горного инструмента. Формы и размеры.
53. Крапивин, М.Г. Основные закономерности изнашивания и стойкость инструментов проходческих и выемочных машин: автореф. дис. ... д-р техн. наук / М.Г. Крапивин. – М., 1973. – 45 с.
54. Леванковский, И.А. Научные основы создания высокоэффективных инструментов для разрушения горных пород и породосодержащих композитов: автореф. дис. ... д-р техн. наук / И.А. Леванковский. – М., 2000. – 34 с.

55. Садко, В.И. Новая технология производства горного инструмента / В.И. Садко // Горн. пром-сть. – 2003. – № 2. – С. 64–66.
56. Прокопенко, С.А. Применение инновационных комбайновых резцов в шахтах / С.А. Прокопенко, В.С. Лудзиш // Горн. пром-сть. – 2012. – № 1. – С. 56–60.
57. Сафохин, М.С. Машинист бурового станка: учеб. для учащихся профтехобразования и рабочих на производстве / М.С. Сафохин, И.Д. Богомолов, Н.М. Скорняков. – М.: Недра, 1990. – 272 с.
58. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.
59. ГОСТ 8479-70. Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. Общие технические условия.
60. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски.
61. ГОСТ 3882-74. Сплавы твердые спеченные. Марки.
62. Мультианов, А.С. Твердые сплавы для армирования резцов горных и дорожных машин / А.С. Мультианов, В.А. Фальковский, В.А. Чистякова // Техника и технология открытой и подземной разработки месторождений: науч. сообщ. / ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: 2000. Вып. 317. – С. 79–92.
63. Мультианов, А.С. Перспективы использования особо-крупнозернистых твердых сплавов для оснащения инструмента горных машин // Техника и технология открытой и подземной разработки месторождений: науч. сообщ. / ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: 2001. Вып. 318. – С. 189–196.
64. Мультианов, А.С. Крупнозернистые сплавы WC-Co для армирования резцов горных машин / А.С. Мультианов // Горн. машины и автоматика. – 2002. – № 10. – С. 38–40.
65. Плюм, Д. Разработка конструкций шнеков и совершенствование шнековых комбайнов / Д. Плюм // Глюкауф. – 1987. – № 17. – С. 25–32.
66. Дриш, С. Новые материалы режущих вставок резцов проходческих комбайнов избирательного действия / С. Дриш, Х.-В. Кляйнерт, Е. Хаф // Глюкауф. – 1992. – № 5. – С. 85–91.
67. Лайдерс, К. Международная выставка горного оборудования в Стокгольме в 1987 г. / К. Лайдерс, Ф. Велленкамп // Глюкауф. – 1987. – № 16. – С. 9–19.
68. Кубица, Г. Производственные испытания новых резцов со вставками из ПКА на шахте «Проспер-Ханиель» / Г. Кубица, Д. Плюм, Р. Витек // Глюкауф. – 1989. – № 3/4. – С. 27–31.
69. Жафто, Г.Р. Поликристаллические композиционные алмазные материалы в качестве режущих вставок для бурового инструмента в горном деле / Г.Р. Жафто, П.Н. Томлинсон, К. Штайнмец // Глюкауф. – 1988. – № 2. – С. 29–37.
70. Брук, М.Л. Анализ возможных путей развития горного машиностроения [Текст] / М.Л. Брук, Л.Н. Федоров // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 15–18.
71. Боярских, Г.А. Регламентация конструкционной прочности с учетом технологической и эксплуатационной наследственности бурового твердосплавного инструмента [Текст] / Г.А. Боярских, И.Г. Боярских // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 7. – С. 47–51.
72. Боярских, Г.А. Феноменология и модель неравновесного напряженно-деформированного состояния элементов армирования ударного бурового инструмента [Текст] / Г.А. Боярских, И.Г. Боярских // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 11. – С. 12–14.

73. Бурков, П.В. Исследование влияния технологии изготовления твердосплавных вставок на качество горного инструмента [Текст] / П.В. Бурков, В.П. Бурков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – ОВ № 3. – С. 125–130.
74. Третьяков, В.И. Основы металловедения и технологии в производстве спеченных твердых сплавов. [Текст] – М.: Metallurgia. – 1976. – 528 с.
75. Креймер, Г.С. Прочность твердых сплавов [Текст] / Г.С. Креймер. – М.: Metallurgia, 1971. – 268 с.
76. Киффер, Р. Твердые сплавы [Текст] / Р. Киффер, Ф. Бенезовский. – М.: Metallurgia, 1971. – 278 с.
77. Кульков, С.Н. Структурные превращения и проблема повышения механических свойств композитов [Текст] / С.Н. Кульков // Автореф. Дис. ... Док. физ.-мат. наук. – Томск, 1990. – 33 с.
78. Кушталова, И.П. Роль прочности и пластичности тугоплавких соединений в создании абразивов и твердых сплавов [Текст] / И.П. Кушталова, Д.П. Ускович, М.М. Ристич // Гласн. хем. друштва, Белград. – 1983. – Т. 43. – № 3. – С. 63–69.
79. Almond, E.A. Deformation characteristics and mechanical properties of hard metals [Текст] / E.A. Almond // Int. Conf. Sci. Of Hard Materials. New-York, London. – 1983. – P. 517–561.
80. Dawinl, O. Untersuchungen in Bindelegierungen von System TiC-Ni-Mo [Текст] / O. Dawinl // Techn. Mitteilungen. – 1971. – V. 32. – P. 64–67.
81. Suzuki, H. Binder phase transformations in WC-Co cemented carbides [Текст] / H. Suzuki, T. Yamamoto, H. Sakanoue // Inst. Met. – 1968. – V. 32. – P. 993.
82. Порошковая металлургия и композиционные материалы [Текст] / под ред. Шатта. – М.: Metallurgia, 1983. – 520 с.
83. Иванова, В.С. Управление структурообразованием и оптимизация механических свойств металлов на основе принципов синергетики [Текст] / В.С. Иванова // Перспективные материалы. – 1995. – № 3. – С. 5–12.
84. Браутман, Л. Композиционные материалы. Разрушение и усталость [Текст] / Л. Браутман. – М.: Мир. – 1978. – Т. 5. – 483 с.
85. Горбачева, Т.Б. Твердые сплавы [Текст] / Т.Б. Горбачева, И.Н. Чапорова // Науч. тр. ВНИИТС. – М.: Metallurgia. – 1978. – № 18. – С. 51–54.
86. Андреевский, А.Р. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе (справочник). [Текст] / А.Р. Андреевский, И.И. Спивак. – Челябинск.: Metallurgia, 1989. – 368 с.
87. Твердые сплавы [Текст] / И.Н. Чапорова, Т.Б. Горбачева, В.А. Ивенсен и др. // Науч.-тр. ВНИИТС. – М.: Metallurgia. – 1976. – № 16. – С. 163–172.
88. Самсонов, Г.В. Тугоплавные соединения (справочник). [Текст] / Г.В. Самсонов, И.М. Веницкий. – М.: Metallurgia, 1967. – 560 с.
89. Рентгеновское исследование порошков вольфрама и молибдена, полученных плазменным восстановлением [Текст] / Богомолов А.М. и др. // Порошковая металлургия. – 1981. – № 1. – С. 93–98.
90. Пикунов, Д.В. Исследование формы кристаллов карбида вольфрама и условий образования текстуры фазы WC в спеченных твердых сплавах [Текст] / Автореф. канд. дис. – М.: 1978.
91. Твердые сплавы: Науч. тр. [Текст] / ВНИИТС. – М.: Metallurgia, 1973. – № 14. – 303 с.
92. Almond, E. Hard metals [Текст] // E. Almond // Materials and Design. – 1986. – V. 7. – N 6. – P. 324–329.

93. He, X.M. Modern Developments in Powder Metallurgy [Текст] / X.M. He, W.Z. Li, H.D. Li // J. Mater. Res. – 1994. – № 9. – P. 2355–2361.
94. Yukawa, M. Progress and Future Expectations of cutting tools [Текст] / M. Yukawa, N. Kato // J. Soc. Autan. Eng. Jap. – 1984. – V. 38. – № 7. – P. 895–901.
95. Hard Metal Production – 40 Years [Текст] // MPR: Metal Powder Report. – 1986. – V. 41. – N 1. – P. 25–26, 29–31, 33.
96. Лошак, М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов [Текст] / М.Г. Лошак. – Киев: Наукова думка, 1984. – 328 с.
97. Suzuki, H. Binder phase transformations in WC-Co cemented carbides [Текст] / H. Suzuki, T. Yamamoto, H. Sakanoue // Inst. Met. – 1968. – V. 32. – P. 993.
98. Johansson, T. The analysis dislocation structures in weby electron microscopy [Текст] / T. Johansson, B. Hehtinen // Phys. Stat. Sol. A. – 1973. – V. 10. – P. 615–622.
99. Brabyn, S.M. Effects substitution of nikel for cobalt in WC besed hard metal. [Текст] / S.M. Brabyn, R. Cooper, C.T. Peters // Proc. Pransee-Seminar. – 1981. – N 2. – P. 675.
100. Отчет ВНИИТС по теме № 19-80п-112. [Текст].
101. Arndt, R. The structure and the mechanical behavior of WC-Co cemented carbides [Текст] / R. Arndt // Z. Metallkunde. – 1972. – V. 63. – N 5. – P. 274–285.
102. Изменение ближнего порядка в твердых растворах (Ti, W)C в зависимости от состава [Текст] / Т.Б. Горбачева, Р.В. Рыбальченко, Н.П. Нечаева, А.А. Кацнельсон // ФММ. – 1975. – Т. 39. – С. 768–773.
103. Свойства материалов с ультрадисперсной структурой [Текст] / В.Б. Федоров, М.Х. Шоршоров, И.Д. Морохов и др. // Поверхность. Физика, химия и механика. – 1983. – № 4. – С. 123–130.
104. Рентгеновское исследование порошков вольфрама и молибдена, полученных плазменным восстановлением [Текст] / Богомолов А.М. и др. // Порошковая металлургия. – 1981. – № 1. – С. 93–98.
105. Кацнельсон, А.А. Особенности строения карбида титана и твердых растворов на его основе [Текст] / А.А. Кацнельсон, Т.Е. Горбачева // ФММ. – 1971. – Т. 32. – № 4. – С. 742–746.
106. Кацнельсон, А.А. Влияние некоторых факторов на ближний порядок в твердом растворе TiC-WC (краткое сообщение) [Текст] / А.А. Кацнельсон, Т.Б. Горбачева, Р.В. Рыбальченко // ФММ. – 1972. – Т. 34. – С. 211–213.
107. Твердые сплавы: Науч. тр. [Текст] / ВНИИТС. – М.: Металлургия, 1973. – № 14. – 303 с.
108. Изменение ближнего порядка в твердых растворах (Ti, W)C в зависимости от состава [Текст] / Т.Б. Горбачева, Р.В. Рыбальченко, Н.П. Нечаева, А.А. Кацнельсон // ФММ. – 1975. – Т. 39. – С. 768–773.
109. Горбачева, Т.Б. Рентгенография твердых сплавов. [Текст] / Т.Б. Горбачева. – М.: Металлургия, 1985. – 203 с.
110. Горбачева, Т.Б. Твердые сплавы [Текст] / Т.Б. Горбачева, И.Н. Чапорова // Науч. тр. ВНИИТС. – М.: Металлургия. – 1978. – № 18. – С. 51–54.
111. Горбачева, Т.Б. Особенности формирования свойств тонкодисперсных смесей при размоле в зависимости от характеристик исходных порошков WC и Co. [Текст] / Т.Б. Горбачева, Р.В. Рыбальченко, Р.Ф. Чубураева // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1979. – Т. 15. – № 10. – С. 1885–1887.
112. Чапорова, И.Н., Чернявский К.С. Структура спеченных твердых сплавов. [Текст]. – М.: Металлургия. – 248 с.
113. Бабич, М.М. Неоднородность твердосплавных сплавов по содержанию углерода и ее устранение. [Текст]. – Киев. – Наукова думка. – 1975. – 174 с.

114. Пивоваров Д.А. Получение порошков металлов и их оксидов термическим разложением оксалатов Cu, Ni, Co [текст] / Д.А. Пивоваров, Ю.Ю. Голубчикова, А.П. Ильин // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321. – № 3. – С. 11–16.
115. Бурков П.В. Фазовый состав, структура и свойства композиционного материала TiC-NiTi. [Текст] / Бурков П.В. // Автореф. Дис. ... Канд. техн. наук. – Томск, 1988. – 24 с.
116. Трефилов, В.И. Физические основы прочности тугоплавких металлов [Текст] / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. – Киев: Наук, думка, 1975. – 315 с.
117. Козлов, Э.В. Физическая природа стадийности пластической деформации. [Текст] / Э.В. Козлов, Н.А. Конева // Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука. – 1990. – С. 123–186.
118. Warren, R. The fracture toughness of hard metals [Текст] / Warren R., Johannesson B. // Int. J. Refractory and Hard Metal. – 1984. – N 12. – P. 187–191.
119. Еремина, Л.В. Исследование структурных особенностей мартенситного превращения в кобальте и некоторых сплавах. [Текст] / Автореф. канд. дис. – М.: 1972.
120. К распределению микроструктуры по длине породоразрушающих резцов / В.И. Болобов, В.Л. Бобров, М.П. Талеров, В.В. Мишин // Горн. оборудование и электромеханика. – 2010. – № 10. – С. 26–28.
121. Коган, Б.И. Основы пайки. Технология пайки буровых резцов: учеб. пособие / Б.И. Коган ; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2006. – 58 с.
122. ГОСТ 617-90. Трубы медные. Технические условия.
123. Ляв А. Математическая теория упругости. – М. – Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. – 612 с.
124. Рекач В.Г. Руководство к решению задач по теории упругости. – М., Высшая школа, 1966.
125. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, В.А. Тимирязев, и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
126. Справочник технолога-машиностроителя. В 2т. / под ред. А.Г. Косиловой. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
127. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода и др.; под общ. ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
128. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1986. – 607 с.
129. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 642 с.
130. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 254 с.
131. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: справ. пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
132. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
133. Зенкевич О.М. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 473 с.
134. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютерпресс, 2002. – 187 с.
135. Красковский Д.Г. Ansys в примерах и задачах. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
136. Хечумов Р.А., Кеплер Х., Прокофьев В.И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1994. – 352 с.

137. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Алферьева М.А. Ansys в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
138. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
139. Кинасошвили Р.С. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1975. – 384 с.
140. Наседкин А.В. Конечно-элементное моделирование на основе ANSYS / Сб. Ansys 5.5ED, 1999.
141. Горшков А.Г., Трошин В.Н. Сопротивление материалов. – М.: Физмалит, 2000. – 544 с.
142. Жабин А.Б. Разрушение крепких горных пород гидромеханическими резцами проходческих комбайнов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н. по специальности 05.05.06. – Тула, 1995.
143. Каталог продукции ОАО «Кузнецкий машиностроительный завод».
144. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с.
145. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / К.А. Семендяев, И.Н. Бронштейн. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
146. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 373 с.
147. Об осевом вращении тангенциальных резцов при работе исполнительного органа / А.В. Логинов, А.Н. Коршунов // Вопросы механизации горных работ: сб. науч. тр. / Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1969. – № 14. – С. 153–157.
148. Степин П.А. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
149. Федоренков А.П., Басов К.А. AutoCAD 2000/ Практический курс. – М.: ДЕССКОМ, 2000. – 432 с.
150. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1977. – 872 с.
151. ГОСТ 6086-75. Коронки буровые для перфораторов. Технические требования.
152. ОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
153. Разработка и постановка на производство изделий угольного машиностроения. ОСТ 12.47.008-74. М., МУП СССР, 1974.
154. ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия.
155. ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. Технические условия.
156. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования.
157. ГОСТ 2875-88. Меры плоского угла призматические. Общие технические условия
158. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.
159. ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования.
160. Красников, Ю.Д. Повышение надежности горных выемочных машин / Ю.Д. Красников, С.В. Солод, Х.И. Хазанов. – М.: Недра, 1989. – 215 с.
161. Разработка и первое применение «оптимизированной комбинированной системы безопасности» для проходческого комбайна избирательного действия на шахте «Нидерберг» / М. Юнкер, В. Низен, И. Гастберг, В. Теббе // Глюкауф. – 2001. – июнь № 1(2). – С. 24–27.
162. Байдинов, В.Н. Обоснование параметров и разработка средств формирования водяных струй для систем высоконапорного орошения горных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Байдинов. – М., 2010. – 28 с.
163. Липин, Ю.Н. Фрикционное воспламенение пылеметано-воздушных смесей и его предупреждение в угольных шахтах: дис. ... д-р техн. наук. – Кемерово, 2001. – 268 с.

164. Миничев, В.И. Угледобывающие комбайны. Конструирование и расчет. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
165. Лихачев, Л.Я. Создать типовой комплекс оборудования для высоконапорных оросительных систем выемочных комбайнов, работающих на пластах пологого и наклонного падения, на давление 80–100 кгс/см<sup>2</sup> и производительностью до 200 л/мин / Л.Я. Лихачев, И.П. Белоногов, Е.Г. Зырянов ; отчет: ВостНИИ. – Кемерово, 1976. – 75 с.
166. Дриш, С. Шахтные испытания системы орошения высоконапорными водяными струями на проходческих комбайнах избирательного действия / С. Дриш, Х. Гуче // Глюкауф. – 1994. – № 4. – С. 43–46.
167. Хорешок, А.А. О системах орошения на проходческих комбайнах избирательного действия / А.А. Хорешок, А.Ю. Борисов, В.Г. Внуков // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. / Науч.-техн. центр «Кузбассуглетехнология». – Кемерово, 2002. – № 19. – С. 135–139.
168. Уголь СССР / Справочник под редакцией Самойлова Н.А. – М.: Недра 1979. – 237 с.
169. Единая методика и алгоритм расчета норм расхода и потребности в горнорезущем инструменте для угледобывающих машин. – М., ИГД им. А.А. Скочинского, 1974.
170. ТУ 3147-007-16721859-2004.
171. Кочура М.Е. Твердые сплавы и припои. – М.: Машиностроение, 1996. – 212 с.
172. Баженов М.Ф. Твердые сплавы. – М.: Металлургия, 1978. – 119 с.
173. Мельников А.Н., Курбатов В.М., Кекелидзе З.Ш. Виды и причины выхода из строя поворотных резцов // Технология, механизация и автоматизация проведения горных выработок: Науч. сообщения. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1978. – С. 20–23.

## ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

### Твердые сплавы, режущие инструменты и приспособления

1. ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов»  
<http://www.kzts.ru>
2. ОАО «Твердосплав»  
<http://tverdospлав.ru>
3. ООО «Горный инструмент»  
<http://www.grins.ru>
4. ОАО «Завод Гидромаш»  
<http://www.gidromash.ru>
5. ООО «Кузнецкий машиностроительный завод»  
<http://www.nvkz.kuzbass.net/M-Plant>
6. ОАО «Копейский машиностроительный завод»  
<http://www.kopemash.ru>
7. ЗАО «Белтехнология и М»  
<http://www.beltechnologia.com/product/cutters>  
[http://www.beltechnologia.com/cutters/cutters\\_gor.htm](http://www.beltechnologia.com/cutters/cutters_gor.htm)  
<http://www.beltechnologia.com/product/rezec.php>  
[http://www.beltechnologia.com/cutters/cutters\\_technology.doc](http://www.beltechnologia.com/cutters/cutters_technology.doc)

8. «Kennametal Inc.»  
<http://www.kennametal.com>  
<http://www.kennametal.ru>
9. «Sandvik»  
<http://www.sandvik.com>
10. «KRUMMENAUER»  
<http://www.krummenauer.de>  
<http://anlagenbau.krummenauer.de>
11. «BETEK GmbH & Co.KG»  
<http://www.betek.de>
12. ООО «Компания РИТС»  
<http://www.ritscomp.ru>
13. ЗАО «НПП имени М.И. Платова»  
<http://www.zaoplatov.ru/equipment/miner?n = 127>
14. НТС «Украина»  
<http://www.nts-service.com.ua>
15. ООО «Техпоставка»  
<http://www.tehpostavka.com>
16. МЧП фирма «Апрель»  
<http://aprilgri.dp.ua>
17. Резцы и ГШО  
<http://rezec.com.ua>
18. ЗАО «СИПРсОП»  
[http://www.sipr.by/product/t\\_cut\\_tools.html](http://www.sipr.by/product/t_cut_tools.html)
19. ООО «Техмашсервис»  
<http://www.techmash.ru>
20. ООО НПП «Сибирские горнопромышленники»  
[http://sibgp.ucoz.ru/index/rezcy\\_dlja\\_shakhtnykh\\_kombajnov/0-5](http://sibgp.ucoz.ru/index/rezcy_dlja_shakhtnykh_kombajnov/0-5)  
[http://sibgp.ucoz.ru/index/universalnyj\\_rezec/0-7](http://sibgp.ucoz.ru/index/universalnyj_rezec/0-7)
21. «BOART LONGYEAR»  
<http://www.boartlongyear.com>
22. «Bauer»  
<http://www.bauer.de>

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Тангенциальные поворотные резцы серии РШ ООО «Горный инструмент» (вылет резцов от 46,5 до 102 мм; диаметры хвостовиков – 20, 25, 30, 32, 33, 35, 38 мм; условия работы: легкие  $f=0,8-2$ , средние  $f=2-5$ , тяжелые  $f=5-8$ , сверхтяжелые  $f=7-10$ ).



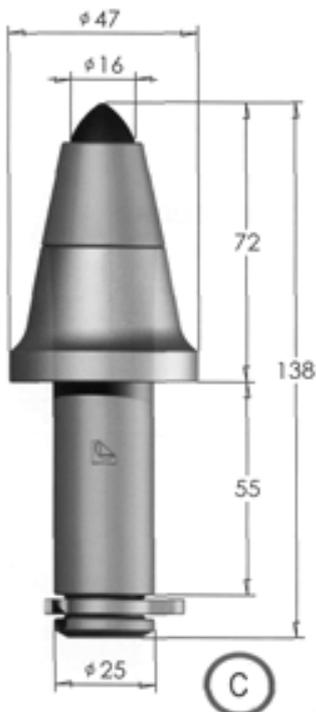
РШ 20-39/8



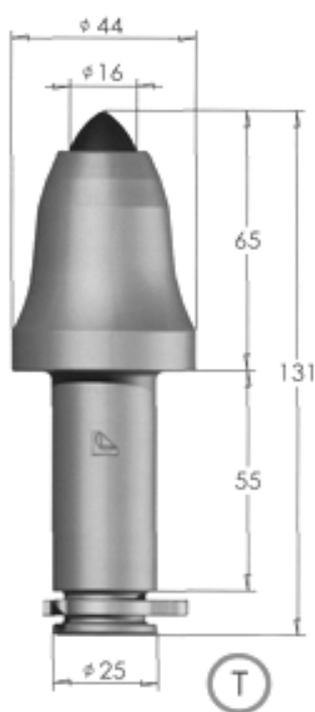
РШ 25-65/12



РШ С-25-65L70/13



РШ С-25-65L72/16SK



РШ 25-65/16SK



РШ С-25-65L68/16SK



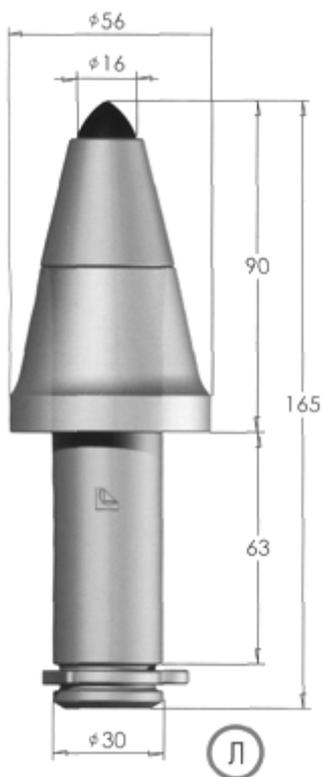
ПШ 30-72L85/16SK



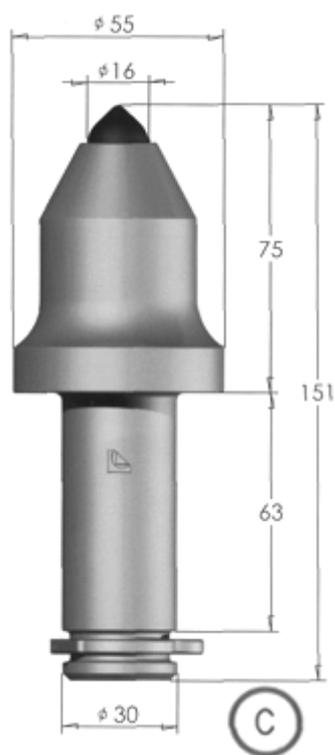
ПШ 30-72L80/16SK



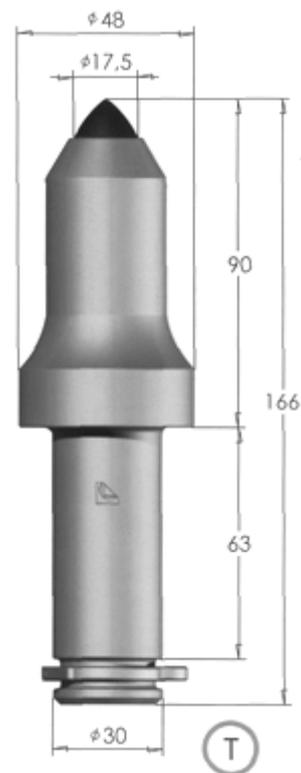
ПШ 30-72L90/17,5



ПШ С-30-75L90/16SK



ПШ 30-75/16



ПШ 30-75/17,5



ПШ 30-75/25



ПШ С-30-78L90/16SK



ПШ 30-78/16SK



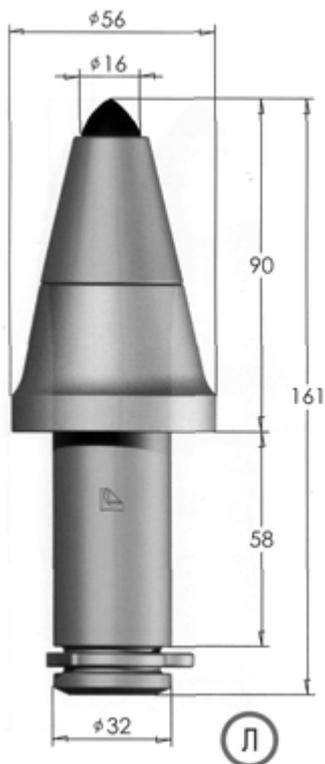
ПШ 30-80L85/16SK



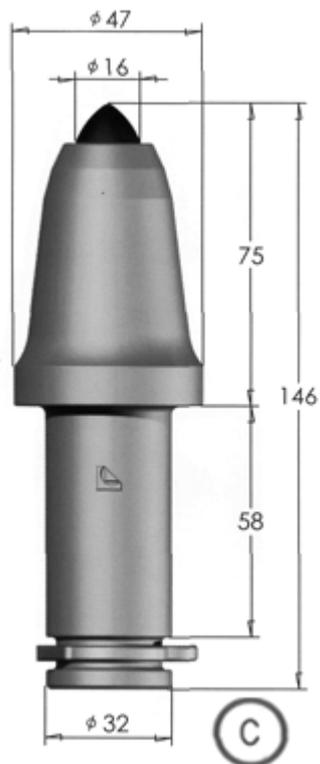
ПШ 30-80/16



ПШ 32-70-L90/16SK



РШ С-32-70L90/16СК



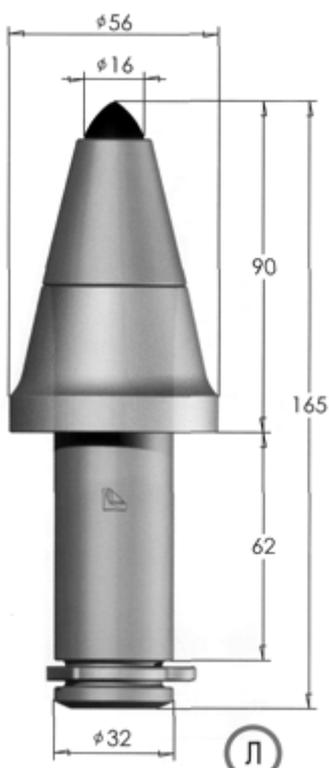
РШ 32-70/16СК



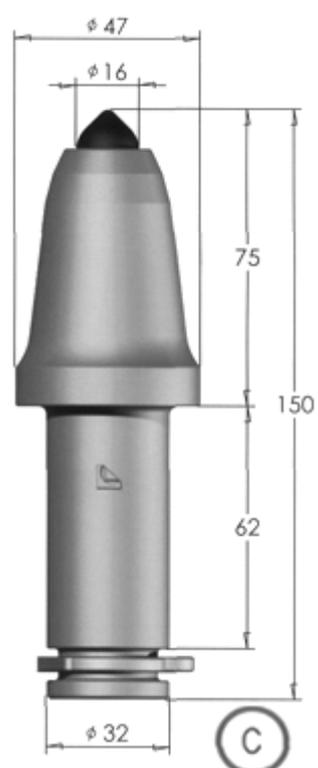
РШ 32-70/16.M1



РШ 32-75-L90/16СК



РШ С-32-75L90/16СК



РШ 32-75/16



PIII C-32-78L90/16SK



PIII 32-78/16



PIII 32-80L90/16SK



PIII C-32-80L90/16SK



PIII 32-80/16



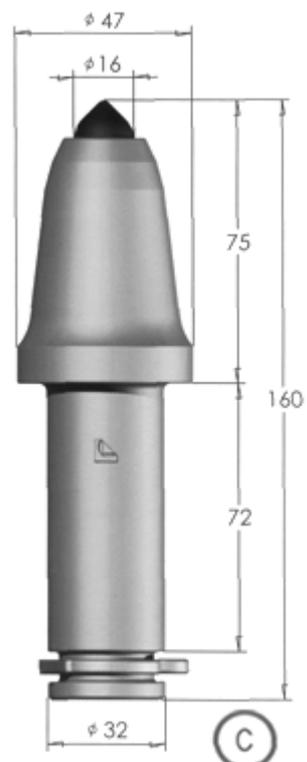
PIII 32-85L90/12SK



PИИ 32-85L90/16SK



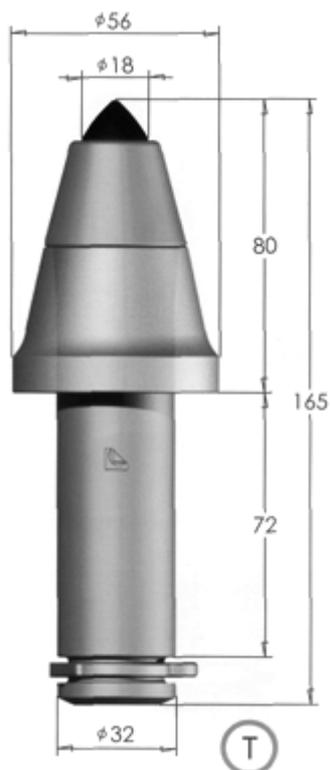
PИИ C-32-85L90/16SK



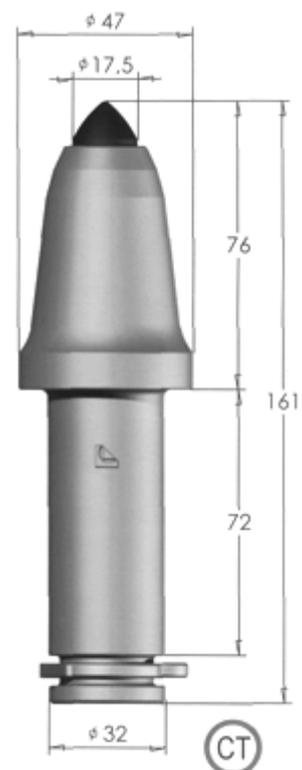
PИИ 32-85/16



PИИ 32-85/18SK



PИИ C-32-85L80/18SK



PИИ 32-85/17,5



PII 32-85/18SK.M2



PII 33-85/16



PII C-33-85L90/18SK



PII C-33-85L80/18SK



PII 33-85/17,5



PII 35-95/16



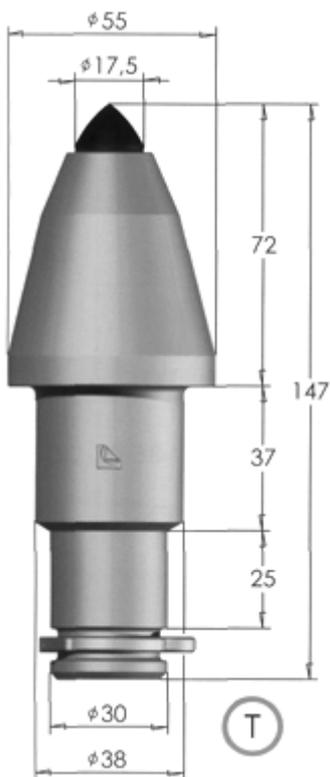
РШ 38-75/12,5



РШ С-38-75L102/16SK



РШ 38-75/17,5.M1



РШ 38-75/17,5



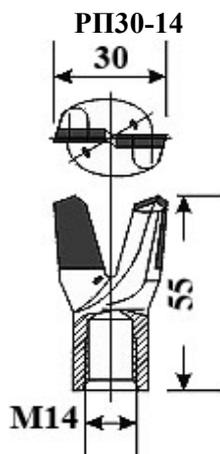
РШ 38-75/19.M2



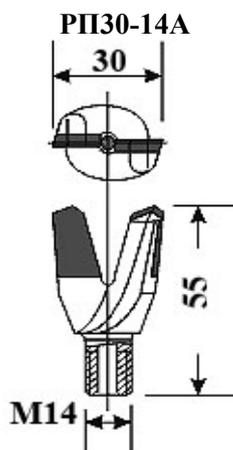
РШ 38-75/19.M1

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

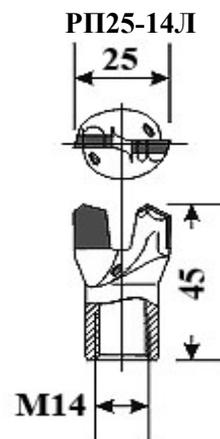
**Буровые резцы ООО «Кузнецкий машиностроительный завод»**  
(диаметром – 25, 27, 30, 42, 43, 44, 46, 50 мм)



МОДИФИКАЦИИ
РП30-16
РП28-14
РП27-14

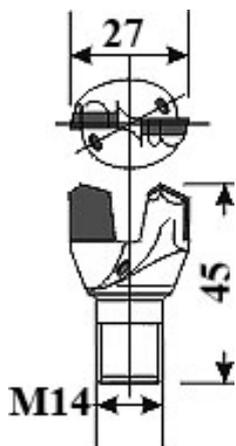


МОДИФИКАЦИИ
РП28-14А
РП27-14А



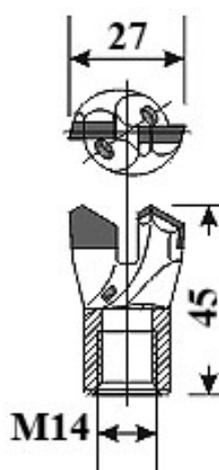
МОДИФИКАЦИИ
РП30-14Л
РП28-14Л
РП27-14Л

**РП27-14ЛА**



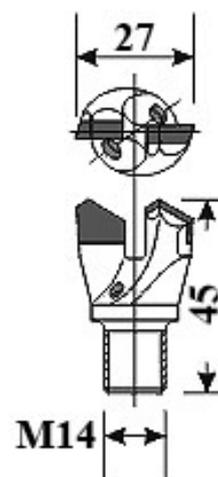
МОДИФИКАЦИИ
РП30-14ЛА
РП28-14ЛА
РП25-14ЛА

**РП27-14Т**



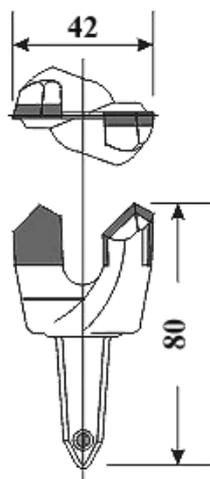
МОДИФИКАЦИИ
РП30-14Т
РП28-14Т

**РП27-14ТА**

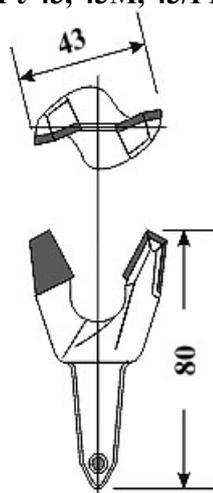


МОДИФИКАЦИИ
РП30-14ТА
РП28-14ТА

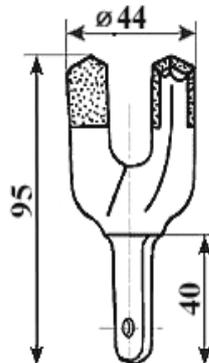
Резец угольный  
РУ13, 13/ГИ



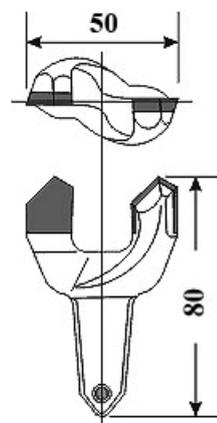
Резец угольный  
РУ43, 43М, 43/ГИ



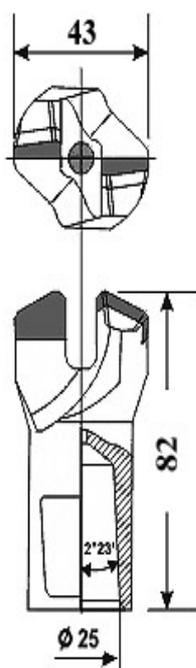
Резец  
угольный РУ6



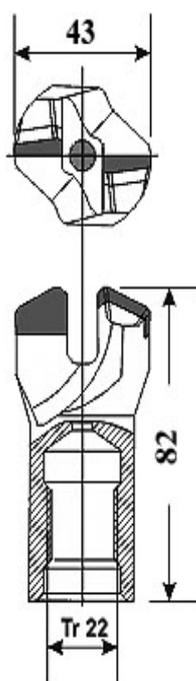
Резец  
гипсовый  
РГ-50



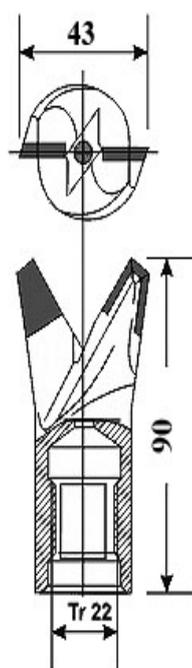
БИ741-25



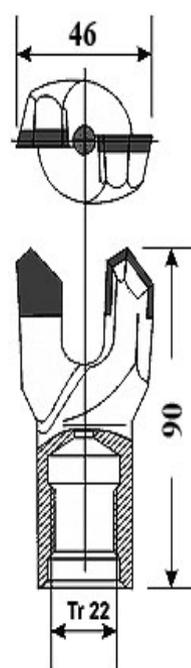
БИ741-25



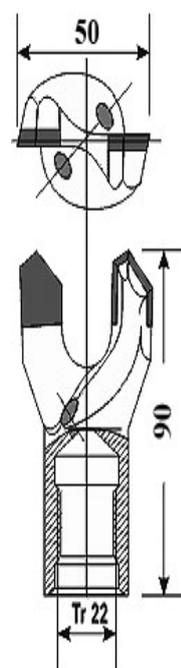
БИ741-25



БИ746-22Т



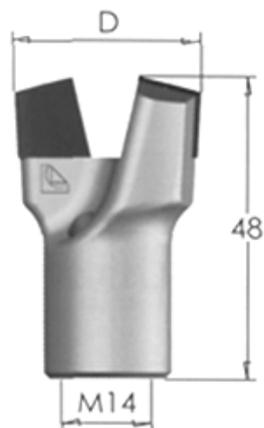
БИ750-22Т



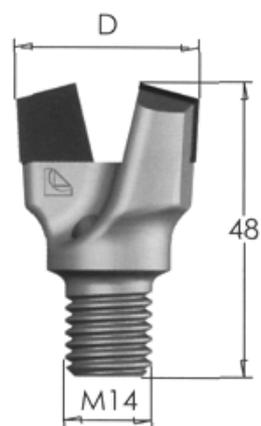
### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Буровые резцы «ООО Горный инструмент»

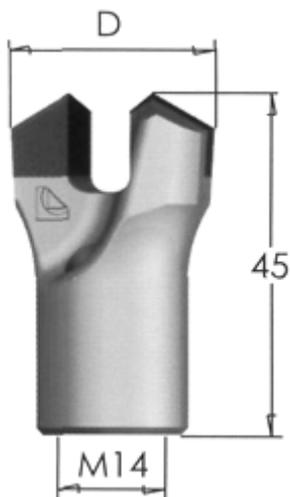
(диаметром – 25, 27, 28 30, 42, 43 мм; условия работы: легкие f=1-2, средние f=3-7, тяжелые f=6-11 и сверхтяжелые f=12-13)



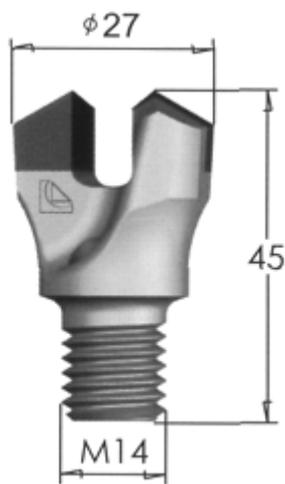
Исполнение	D, мм
<b>РП-30Б</b>	30
<b>РП-27Б</b>	27



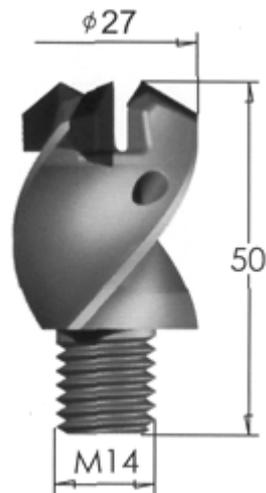
Исполнение	D, мм
<b>РП-30/14Б</b>	30
<b>РП-27/14Б</b>	27



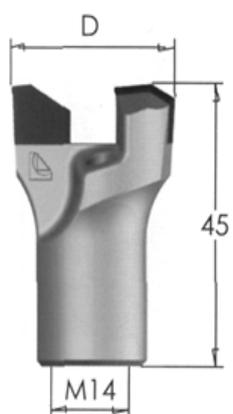
Исполнение	D, мм
<b>РП А-27</b>	27
<b>РП А-25</b>	25



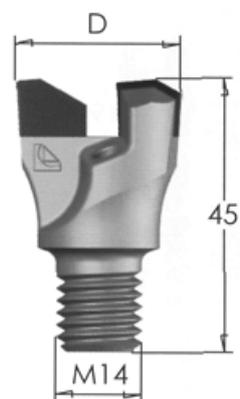
**РП А-27/14**



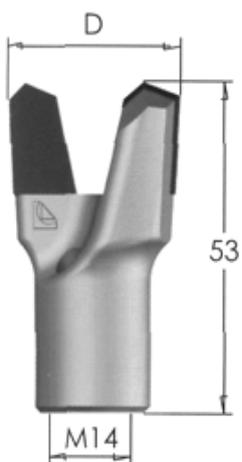
Исполнение	D, мм
<b>РП А-27-3/14</b>	27
Три лезвия	



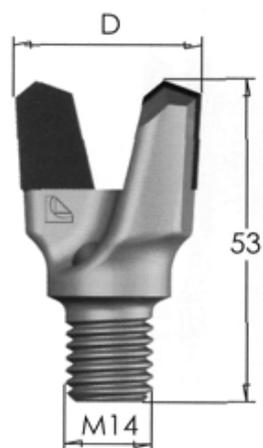
Исполнение	D, мм
<b>РП П-30</b>	30
<b>РП П-28</b>	28



Исполнение	D, мм
<b>РП П-28/14</b>	28
<b>РП П-25/14</b>	25

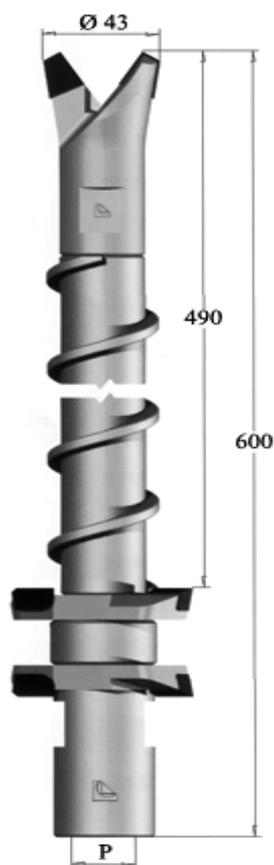


Исполнение	D, мм
<b>РП -30М</b>	30
<b>РП -27М</b>	27

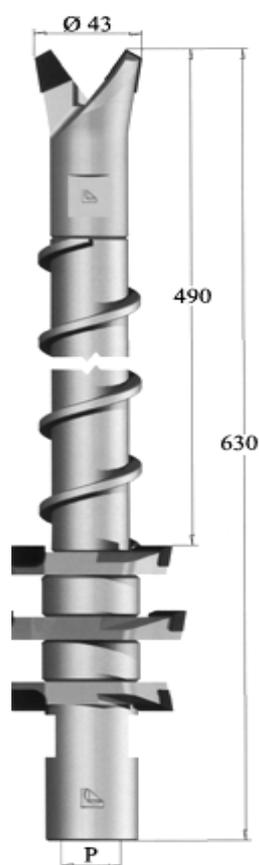


Исполнение	D, мм
<b>РП -30/14М</b>	30
<b>РП -27/14М</b>	27

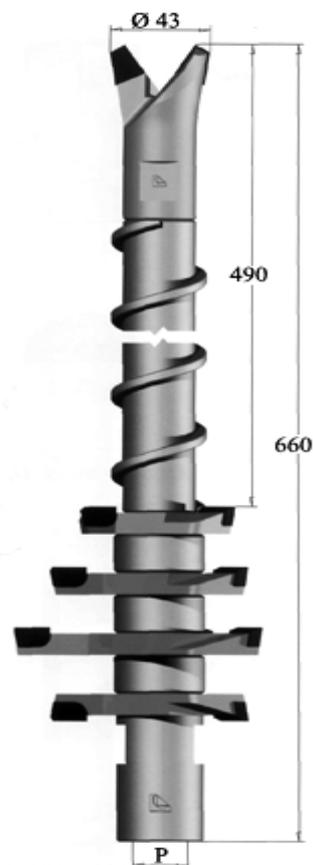
## Коронки КДС ООО «Горный инструмент»



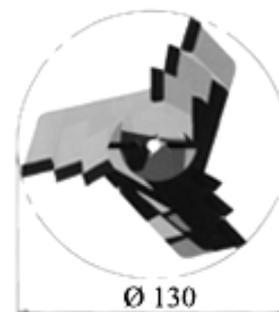
**КДС-76**



**КДС-100**



**КДС-130**



Исполнение <b>КДС-76</b>	Резьба <i>P</i>
КДС-76/Т22	Тг 2x10(P5)
КДС-76/П28	Прямоуг. 28
КДС-76/П33	Прямоуг. 33

Исполнение <b>КДС-100</b>	Резьба <i>P</i>
КДС-100/Т22	Тг 2x10(P5)
КДС-100/П28	Прямоуг. 28
КДС-100/П33	Прямоуг. 33

Исполнение <b>КДС-130</b>	Резьба <i>P</i>
КДС-130/Т22	Тг 2x10(P5)
КДС-130/П28	Прямоуг. 28
КДС-130/П33	Прямоуг. 33

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. НАЗНАЧЕНИЕ РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ .....	5
2. УСЛОВИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГОРНОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА .....	6
3. МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД РАБОЧИМ ИНСТРУМЕНТОМ ГОРНЫХ МАШИН .....	10
3.1. Моделирование методами разрывных смещений и фотоупругости .....	10
3.2. Моделирование методом теории упругости .....	17
4. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА .....	19
4.1. Определения, обозначения по конструкциям резцов .....	19
4.2. Классификация, основные параметры и размеры резцов .....	20
4.3. Элементы и параметры резцов .....	21
4.4. Основные типы и конструктивные особенности резцов .....	24
5. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ .....	26
6. РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ СТРУГОВЫХ СТАНОВОК .....	30
7. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ .....	36
7.1. История развития тангенциального инструмента .....	36
7.2. Конструктивные особенности гидромеханических тангенциальных резцов, область их применения, параметры .....	52
7.3. Формы и параметры головных частей тангенциальных поворотных резцов .....	54
7.4. Формы и параметры твердосплавных вставок тангенциальных поворотных резцов .....	57
8. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БУРОВЫХ РЕЗЦОВ .....	65
8.1. Определения, обозначения по конструкции буровых резцов .....	65
8.2. Твердосплавные вставки для армирования резцов вращательного бурения .....	67
9. ИЗНОС РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА .....	70
9.1. Терминология и критерии износа .....	70
9.2. Механизм изнашивания режущих твердосплавных инструментов .....	71

9.2.1. Влияние формы передней грани радиальных резцов на износ .....	76
9.2.2. Влияние пути резания на износ радиальных резцов .....	77
9.2.3. Влияние структуры твердого сплава на износ радиальных резцов .....	78
9.2.4. Влияние контактных температур на износ радиальных резцов .....	79
9.2.5. Влияние скорости резания на износ радиальных резцов .....	80
9.2.6. Виды поломок радиальных резцов .....	80
9.3. Износ тангенциального режущего инструмента .....	82
9.3.1. Формы износа тангенциальных поворотных резцов .....	83
9.4. Износ буровых резцов .....	86
10. КОНСТРУКЦИИ КРЕПЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ .....	88
10.1. Способы крепления радиальных резцов .....	88
10.2. Способы крепления тангенциальных резцов .....	90
10.3. Анализ напряженного состояния крепежных устройств тангенциальных поворотных резцов .....	93
11. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЦОВ .....	96
11.1. Материалы корпусов резцов .....	96
11.2. Материалы для твердосплавных вставок резцов .....	96
11.2.1. Вольфрамокобальтовые твердые сплавы .....	96
11.2.2. Физические свойства твердых сплавов .....	98
11.2.3. Механические свойства твердых сплавов .....	99
11.2.5. Влияние размера карбидной составляющей WC на прочность твердосплавных вставок и пластин .....	101
11.2.6. Алмазы и сверхтвердые материалы для армирования режущих инструментов .....	104
11.2.7. Применение сверхтвердых материалов для изготовления радиальных и тангенциальных резцов .....	105
11.2.8. Вставки буровых резцов из сверхтвердых материалов .....	109
11.2.8.1. Режущие вставки синдит – твердый сплав .....	109
11.2.8.2. Режущие вставки синдрил – твердый сплав .....	110
11.2.8.3. Режущие вставки синдакс-3 – твердый сплав .....	111
12. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ТВЕРДОСПЛАВНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА .....	113
12.1. Рентгенографические исследования внутризеренной структуры порошков твердосплавного производства и влияния на нее технологических параметров изготовления порошков .....	113
12.1.1. Влияние состава и структуры исходных компонентов и условий восстановления и карбидизации на структуру вольфрама, карбида вольфрама и WC-фазы в сплавах .....	113

12.1.2.	Некоторые вопросы кристаллохимии соединений вольфрама .....	124
12.1.3.	Влияние условий изготовления на структуру и свойства порошков кобальта .....	128
12.2.	Дефекты кристаллической решетки и пластическая деформация фазовых составляющих твердых сплавов .....	130
12.2.1.	Кристаллическая структура и особенности пластической деформации карбида вольфрама .....	131
12.2.2.	Особенности строения карбида титана и твердых растворов на его основе .....	134
12.2.3.	Структура кобальта и твердых растворов на его основе .....	139
12.3.	Рентгенографические исследования дефектов кристаллической структуры карбидов и кобальта, формирующихся при размоле .....	142
12.3.1.	Влияние размола на тонкую структуру карбида вольфрама .....	143
12.3.2.	Влияние размола на тонкую структуру карбидов переходных металлов .....	148
12.3.3.	Влияние размола на фазовый состав и особенности кристаллического строения кобальта .....	154
12.4.	Рентгенографические исследования структурных изменений фазовых составляющих твердых сплавов в процессе спекания .....	155
12.4.1.	Процессы возврата и рекристаллизации при нагреве в карбидных фазах твердых сплавов .....	156
12.4.2.	Структура и состав кобальтовой фазы в твердых сплавах, особенности фазовых переходов $\alpha \leftrightarrow \beta$ при нагреве и охлаждении .....	162
12.4.3.	Межфазовые микронапряжения в спеченных сплавах .....	168
12.4.4.	Особенности структуры поверхностных слоев спеченных твердых сплавов .....	170
13.	ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЦОВ .....	175
13.1.	Виды пазов при армировке .....	175
13.2.	Припой и флюсы .....	177
13.3.	Особенности технологии изготовления тангенциальных поворотных резцов .....	178
13.4.	Особенности технологии изготовления буровых резцов .....	187
13.4.1.	Припой для пайки бурового инструмента .....	187
13.4.2.	Флюсы для пайки буровых резцов .....	189
13.4.3.	Технологический процесс пайки буровых резцов .....	191
13.4.4.	Контроль качества паяного соединения .....	197
13.4.5.	Перспективы совершенствования технологии пайки буровых резцов .....	198
13.4.6.	Пайка пластин из твердого сплава .....	198

14. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ .....	202
14.1. Напряженно–деформированное состояние конуса нагруженного поперечной силой .....	203
14.2. Определение напряженно-деформированного состояния тангенциального поворотного резца с применением метода конечных элементов .....	218
14.3. Определение напряженного состояния твердосплавных вставок тангенциальных поворотных резцов различных форм .....	221
15. ОСНОВЫ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ И РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА .....	225
15.1. Правила приемки .....	225
15.2. Цели приемочных испытаний .....	226
15.3. Виды приемочных испытаний .....	227
15.4. Объект испытаний .....	227
15.5. Условия и объем испытаний .....	229
15.6. Организация и порядок проведения приемочных испытаний .....	230
15.7. Методы контроля при испытаниях .....	234
15.7.1. Контролируемые показатели .....	234
15.7.2. Испытание резцов на усталость .....	235
15.8. Определение прочности соединения резцедержателей с корпусом исполнительного органа .....	238
16. СПОСОБЫ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ГОРНЫХ МАШИН .....	240
16.1. Мероприятия и средства по борьбе с пылью .....	240
16.2. Опыт эксплуатации средств пылеподавления на горных машинах .....	241
16.2.1. Средства пылеподавления буровой установки .....	242
16.2.2. Средства пылеподавления очистных комбайнов .....	242
16.2.3. Средства пылеподавления проходческих комбайнов .....	243
17. РЕЗУЛЬТАТЫ ШАХТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НОВЫХ ВИДОВ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ПОВОРОТНЫХ РЕЗЦОВ .....	248
17.1. Горно-геологические условия шахтных испытаний тангенциальных поворотных резцов .....	248
17.2. Методика промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов производства ООО «Горный инструмент» .....	250
17.3. Анализ результатов испытаний тангенциальных поворотных резцов на угледобывающих предприятиях Кузбасса .....	252

17.4. Анализ результатов промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов на шахтах ОАО «Воркутауголь» .....	258
17.5. Анализ результатов промышленных испытаний тангенциальных поворотных резцов типа РШ на горных предприятиях Кузбасса, шахте Хакасская и ш/у Садкинское .....	265
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	267
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	268
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	278
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	286
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	288

Научное издание

ХОРЕШОК Алексей Алексеевич  
МАМЕТЬЕВ Леонид Евгеньевич  
ЦЕХИН Александр Михайлович  
БОРИСОВ Андрей Юрьевич  
БУРКОВ Петр Владимирович  
БУРКОВА Светлана Петровна  
КРЕСТОВОЗДВИЖЕНСКИЙ Павел Дмитриевич

**ПРОИЗВОДСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
РАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
ГОРНЫХ МАШИН**

Монография

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор *доктор технических наук,  
профессор Л.Е. Маметьев*

Компьютерная верстка *А.М. Цехин, А.Ю. Борисов*  
Дизайн обложки *А.Ю. Борисов*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 01.10.13. Формат 60×84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 34,55. Уч.-изд. л. 31,24.  
Заказ 568-13. Тираж 100 экз.

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)