

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

На правах рукописи

ЧУПИН СТАНИСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВОРОТНЫХ РЕЗЦОВ
ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫРАБОТОК
ПО ПОРОДАМ СРЕДНЕЙ КРЕПОСТИ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Болобов Виктор Иванович

Санкт-Петербург – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 Аналитический обзор.....	11
1.1 Анализ способов разрушения горных пород	11
1.2 Условия применения проходческих комбайнов и их рабочих инструментов.....	15
1.3 История развития тангенциальных резцов.....	22
1.4 Конструкции тангенциальных резцов	25
1.5 Материалы, применяемые при производстве резцов.....	32
1.6 Технология производства тангенциальных поворотных резцов	34
1.6.1 Общие сведения	34
1.6.2 Анализ временных показателей основных операций производства резцов	36
1.7 Способы повышения прочности и износостойкости деталей горных машин	41
1.7.1 Основные сведения о способах повышения прочности и износостойкости деталей горных машин	41
1.7.2 Влияние термомеханической обработки на механические свойства и износостойкость деталей горных машин	43
1.9 Существующие методы оценки удельного расхода и износостойкости поворотных резцов.....	46
1.10 Выводы по Главе 1	50
Глава 2. Анализ условий работы поворотных резцов и их отказов при разрушении горных пород. Разработка имитационной модели процесса изнашивания державки поворотного резца.....	52
2.1 Условия работы поворотных резцов проходческих комбайнов и виды их отказов.....	52
2.2 Анализ причин отказа поворотных резцов при их эксплуатации....	69

2.3 Разработка имитационной модели процесса изнашивания поворотного резца проходческого комбайна при разрушении горных пород различной прочности.....	77
2.5 Выводы по главе 2.....	90
Глава 3 Разработка методики и экспериментального стенда по изучению закономерностей изнашивания фрагментов локальных зон державок поворотных резцов.....	91
3.1 Анализ существующих методик испытаний металлических материалов на износостойкость	91
3.2 Методика повышения износостойкости локальных зон фрагментов державок резцов термомеханической обработкой	96
3.3.2 Анализ напряженно-деформированного состояния фрагментов после осадки	100
3.3.3 Результаты компьютерного моделирования.....	103
3.4 Методика испытаний на изнашивание локальных зон фрагментов державок поворотных резцов подвергнутых термомеханической обработке	106
3.5 Выводы по Главе 3.....	108
Глава 4 Экспериментальное исследование влияния твердости в локальных зонах наибольшего износа державок поворотных резцов на их износостойкость	110
4.1 Влияние термомеханической обработки на твердость фрагментов.....	110
4.2 Влияние твердости фрагментов локальных зон на их износостойкость	113
4.4 Выводы по Главе 4.....	118
Глава 5 Разработка технологии создания локальных зон повышенной твердости державок поворотных резцов с целью повышения их износостойкости	120
5.1 Компьютерное моделирование процесса деформирования при формообразовании державок резцов	120

5.1.1 Оценка интенсивности деформации в поверхностном слое державки резца при существующем производстве	121
5.1.2 Повышение интенсивности деформации рабочей части державки изменением геометрии заготовки	123
5.2 Предлагаемое усовершенствование технологического процесса производства резцов	128
5.3 Предельный путь резания усовершенствованного поворотного резца.....	131
5.4 Выводы по Главе 5	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	138
Список литературы	143
ПРИЛОЖЕНИЕ А	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ В	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В настоящее время на подземных горных работах наиболее прогрессивными техническими средствами проведения выработок являются проходческие комбайны, а добычи полезного ископаемого – очистные комбайны, разрушающие массив резцовыми исполнительными органами. Чем большее количество энергии подводится к резцам, тем выше интенсивность процесса отделения пород от массива, следовательно, производительность комбайнов и эффективность их использования. В таких условиях основным ограничивающим фактором интенсивности процессов проведения выработок и добычи полезного ископаемого является стойкость резцов, определяющаяся высокими динамическими и тепловыми нагрузками, трением и др.

Значительный вклад в решении вопросов, связанных с механическим разрушением угля и горных пород режущими инструментами, а также повышения ресурса резцов, внесли: Барон Л.И., Берон А.И., Бреннер В.А., Глатман Л.Б., Картавый Н.Г., Крапивин М.Г., Позин Е.З., Мультианов С.И., Солод В.И., Сысоев Н.И., Цыпин Я.Л., Леванковский И.А., Тененбаум М.М. и др.

Несмотря на изученность вопроса, дальнейшее повышение ресурса режущего инструмента зависит от проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований. Поэтому исследования отдельных зон наибольшего износа державок резцов являются актуальными.

Цель работы

Повышение износостойкости поворотных резцов стреловидного исполнительного органа проходческих комбайнов для проведения выработок по породам средней крепости.

Идея работы

Повышение износостойкости поворотных резцов стреловидного исполнительного органа проходческих комбайнов при работе по породам средней крепости достигается путем создания в местах интенсивного износа зон повышенной твердости в технологическом процессе формообразования державки резца.

Задачи исследования:

1. Провести анализ условий работы проходческих комбайнов с корончатыми исполнительными органами с установленными на них поворотными резцами.
2. Установить причины и характер отказов поворотных резцов проходческих комбайнов при работе по горным породам.
3. Разработать экспериментальный стенд и методику исследования влияния твердости поверхностного слоя державок поворотных резцов на их износостойкость в условиях, моделирующих изнашивание отдельных локальных зон державок при работе проходческого комбайна.
4. Провести экспериментальное исследование влияния твердости отдельных локальных зон державок поворотных резцов на их износостойкость при изнашивании по породам средней крепости.
5. На примере резца РШ 32-70/16.М1 разработать имитационную модель процесса изнашивания поворотного резца проходческого комбайна в процессе его эксплуатации.
6. Оценить с использованием разработанной имитационной модели наработку поворотных резцов с локальными зонами повышенной твердости, полученными в результате совершенствования технологического процесса изготовления резца.
7. Разработать рекомендации по технологии повышения твердости отдельных зон державок поворотных резцов проходческих комбайнов с учетом специфики их работы при проведении горных выработок.

Методы исследования

В работе использован комплексный подход в исследовании износостойкости поворотных резцов, включающий анализ закономерностей их изнашивания, технологию повышения твердости в локальных зонах, компьютерное и имитационное моделирование, экспериментальные исследования, проведенные на разработанном экспериментальном стенде с обработкой полученных результатов методами математической статистики.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует п.5 и п.6 области исследований: «Повышение долговечности и надежности горных машин и оборудования» и «Разработка и совершенствование технологических процессов с целью обеспечения высокого качества горных машин на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации с учетом специфики работы на горных предприятиях», соответственно.

Научная новизна:

Разработана имитационная модель процесса изнашивания поворотного резца в отдельных локальных зонах его поверхности с учетом специфики установки резца на исполнительном органе проходческого комбайна, позволяющая оценивать характер, форму и интенсивность изнашивания отдельных зон рабочей части резца во времени для повышения достоверности оценки его физического состояния и величины остаточного ресурса в процессе эксплуатации.

Защищаемые положения:

1. Имитационная модель процесса изнашивания поворотного резца РШ 32-70/16.М1 при его работе в составе осевой коронки проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом, учитывающая угол атаки, радиус и шаг закрепления резца на исполнительном органе, а также физико-механические свойства пород, с которыми он взаимодействует, представляющая собой систему линейных уравнений, характеризующих

интенсивность изнашивания отдельных зон резца, при этом коэффициенты пропорциональности уравнений определяются статистической обработкой величин износа соответствующих зон резцов находящихся в эксплуатации.

2. Повышение интегральной износостойкости головной части державок резцов РШ 32-70/16.М1, устанавливаемых на стреловидном исполнительном органе проходческого комбайна, до 1,9 раза в сравнении с серийными, при разрушении пород средней крепости, достигается увеличением твердости в зонах наибольшего износа до 1,25 раза, путем совершенствования конструкции заготовки и технологического процесса формообразования державки резца.

Практическая значимость работы:

- разработаны методика и экспериментальный стенд для исследования закономерностей абразивного изнашивания по горным породам отдельных зон державок поворотных резцов с различной твердостью;
- разработаны рекомендации по технологии повышения твердости отдельных зон державок поворотных резцов проходческих комбайнов с учетом специфики их работы при проведении горных выработок;
- результаты исследований рекомендуются к внедрению на предприятиях ООО «Горный инструмент», ОАО «Копейский машиностроительный завод».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами экспериментов, их сходимостью с результатами общепризнанных исследований в области обработки материалов и законами течения металла при горячей обработке давлением, а также наблюдений за работой поворотных резцов проходческих комбайнов.

Апробация работы

Основные положения в результате работы докладывались на:

- 53-ей международной научной конференции, Горно-металлургическая академия им. Станислава Сташица, г. Краков, Польша, 2012 г.;
- международной конференции «Ресурсы будущего» Фрайбергская горная академия, г. Фрайберг, Германия, 2013 г.;
- всероссийской конференции с международным участием «Нанозифика и Наноматериалы», Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 2013 г.;
- IV Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий», Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 2013 г.;
- II Международной научно-практической конференции «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении», Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 2014 г.;
- Международном семинаре-симпозиуме «Нанозифика и Наноматериалы», г. Санкт-Петербург, Россия, 2015 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 6 в изданиях из перечня рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, трех приложений на 7 страницах, общим объемом 162 страниц печатного текста, содержит 9 таблиц и 74 рисунка, список литературы из 109 наименований.

Личный вклад соискателя

Сформулированы задачи исследований и научные положения. С учетом анализа статистических данных по эксплуатации поворотных резцов разработана имитационная модель их изнашивания при разрушении горных пород исполнительными органами проходческих комбайнов. С

использованием метода конечных элементов в программном комплексе *DEFORM-3D* проведено моделирование процесса формообразования державки резца. Разработан экспериментальный стенд, проведены экспериментальные исследования изнашивания отдельных зон поворотных резцов по горным породам. Предложены рекомендации по технологии повышения твердости отдельных зон державок поворотных резцов и изготовления поворотных резцов, обладающих повышенной износостойкостью в условиях их работы при проведении горных выработок.

Глава 1 Аналитический обзор

1.1 Анализ способов разрушения горных пород

Отделение горной породы от массива является весьма сложным процессом, требующим значительных энергетических, материальных и трудовых ресурсов. Сокращение их потребления всегда являлось актуальной задачей и сейчас остается одной из главных в горном машиностроении.

Традиционно, способы разрушения горных пород по общему признаку классифицируются на механические, гидравлические, взрывные, физические, химические и комбинированные [1]. Огромный вклад в изучение процесса разрушения горных пород применительно к работе проходческих комбайнов был привнесен Л.И. Бароном, Б.М. Логунцовым и др. [2, 3].

Под *механическим способом* понимают процесс, при котором рабочие органы непосредственно отделяют породу от массива. При *гидравлическом* – порода разрушается при помощи напора струи воды, подаваемой из гидромонитора, или, когда она вместе с водой всасывается земснарядом со дна водоема. *Взрывной способ* характеризует разрушение породы давлением газов, выделяемых взрывчатыми веществами при взрыве. При применении *физического способа* используется принцип разрушения или уменьшения прочности горных пород при помощи ультразвука, тока высокой частоты, теплового воздействия. Отделение пород от массива, сопровождающееся их переводом в жидкое или газообразное состояние, является *химическим способом*. Физические и химические способы добычи сводятся к тому, что полезные ископаемые переводятся в жидкое или газообразное состояние непосредственно в местах их залегания и транспортируются в таком состоянии на поверхность. Эти способы реализованы при подземном выщелачивании меди, золота, калийных солей, газификации углей и горючих сланцев, выплавке серы [4]. *Комбинированный способ* представляет собой

применение нескольких способов разрушения одновременно, например, гидравлического и механического.

В настоящее время основным, наиболее часто встречающимся способом разрушения горных пород является механический. Но в определенных горно-геологических условиях по техническим, технологическим и экономическим показателям целесообразно применять другие методы воздействия на породу с целью ее разрушения, такие как электротермические, термические, лазерные, ультразвуковые, инфразвуковые, электромагнитные, напором струи воды под большим давлением, механическими клиньями [5], гидравлическими клиньями [6, 7], при помощи гидроксплиттеров, электрогидравлическими установками [8], ориентированного флюидоразрыва [9].

Механический способ разрушения осуществляется с различными скоростями силового воздействия. Принято считать, что при скоростях воздействия до 2,5 м/с способ называется статическим, а при скоростях выше 2,5 м/с – динамическим.

К динамическим способам разрушения, относятся: вибрационный, ударный, высокоскоростной, импульсный [1].

Вибрационный способ, основан на принудительной вибрации рабочего органа, что приводит к уменьшению сил внутренних связей пород и, соответственно, к снижению тягового сопротивления перемещению машины.

Ударный способ, когда разрушение породы производится с помощью ударника, обладающего определенной массой и скоростью, т.е. энергией удара.

Высокоскоростной способ, когда разрушение прочных пород производится с помощью высокоскоростных рабочих органов (скорость резания выше 5 м/с).

Импульсный способ, когда разрушение пород производится с помощью импульсной техники, основанной на применении энергии взрыва в машинах и механизмах. При этом разрушение может производиться жидкими,

твердыми и газообразными передающими средами, непосредственно воздействующими на горную породу и реализующими в импульсной форме энергию взрыва.

Несмотря на значительный выбор способов разрушения горных пород, механический способ остается наиболее широко используемым и в данное время ввиду малой изученности альтернативных способов добычи полезных ископаемых и больших затрат при их использовании. По данным [1] механический способ занимает до 85% всего объема горных и земляных работ.

В зависимости от типа рабочего инструмента, вида исполнительного органа и режимов отбойки различают следующие виды механического способа разрушения породы [10, 11]:

- *резание* – рабочий инструмент (резец), воздействуя на обрабатываемую поверхность, отделяет пограничные слои полезного ископаемого или породы от массива;
- *ударное разрушение* – рабочий инструмент (коронки перфораторов, долота станков ударного бурения) внедряется в горную породу под воздействием ударной нагрузки. Он характеризуется высокими скоростями передачи разрушаемому массиву ударных сил рабочим инструментом, что обеспечивает появление больших разрушающих нагрузок и делает ударный способ приемлемым для пород любой крепости;
- *раздавливание* – рабочий инструмент (шарошки, дробовые коронки) воздействует на горную породу статическим приложением нагрузки;
- *комбинированный* – рабочий инструмент (коронки), воздействует на породу посредством сочетания в себе свойств ударного способа и резания.

Указанные виды механического способа разрушения применяются при проведении различных видов выработок и имеют ряд преимуществ и недостатков.

Так, способ разрушения – *резание* обладает высокой производительностью, режущий инструмент относительно прост в конструкции и дешев. Но удельный вес трения при резании значителен, в процессе работы инструмент затупляется, вследствие чего снижается производительность машины или возрастает потребляемая мощность. По этой причине даже твердосплавный инструмент не пригоден для отделения от массива крепких пород. Принято считать, что применять данный инструмент целесообразно на породах с коэффициентом крепости не более $5\div 6$ по шкале проф. М.М. Протоdjяконова.

Для разрушения более крепких пород применяют *ударный* вид механического способа разрушения. При работе ударный инструмент внедряется в горную породу под действием ударной нагрузки, при этом под лезвиями инструмента порода дробится в пыль и образуется лунка. После каждого удара инструмент перемещается в новое положение. Затраты энергии на трение при работе данного инструмента ниже, чем у режущего и процесс его затупления идет медленнее. Но сам способ разрушения более энергоемок, чем резание, процесс работы прерывен, что обуславливает меньшую его эффективность.

Раздавливающий инструмент имеет ряд преимуществ: непрерывность процесса разрушения; низкие затраты энергии на трение (позволяет применять его по крепким и абразивным породам); самозатачиваемость, то есть сохранение при изнашивании первоначальной формы рабочей части или изменение ее в таких пределах, при которых, нагрузки на инструмент и его производительность мало зависят от износа. Шарошечный инструмент широко применяют для бурения скважин, а в настоящее время его все чаще используют и на проходческих комбайнах (дисковые шарошки) [12]. Дисковые шарошки на проходческих комбайнах по породам крепостью $4\div 8$ и более показали высокую износостойкость при относительно низкой энергоемкости разрушения, к тому же, разрушение полезного ископаемого происходит крупным сколом, что обеспечивает лучшие сортность продуктов

разрушения и экологической обстановки [12]. Как показали исследования [13], удельная энергоемкость и потребляемая мощность экспериментальных шнеков очистных комбайнов с дисковыми инструментами оказались на 30-40% ниже, чем для серийных шнеков оснащенных резцами. Однако статическое вдавливание требует значительных осевых усилий, поэтому машины с таким инструментом имеют большую массу и габариты. Также шарошки имеют существенные недостатки: сложную конструкцию, большую массу, значительную стоимость. Слабым местом шарошек являются их опоры, которые нередко изнашиваются быстрее, чем их рабочая часть [10].

Таким образом, выбор способа разрушения главным образом зависит от физико-механических свойств разрушаемого массива. Именно, исходя из этого параметра, следует руководствоваться выбором способа добычи полезного ископаемого. Как показывает практика, в настоящее время на породах средней крепости и абразивности наименее энергоемким и наиболее эффективным способом разрушения массива является резание. По этой причине на проходческих и очистных комбайнах наиболее часто используется именно этот вид механического разрушения. На принципе резания основана работа исполнительных органов большинства проходческих комбайнов, используемых в горнодобывающей промышленности Российской Федерации при проведении выработок различного назначения, как по полезному ископаемому, так и по пустой породе. Научные исследования в области разрушения горных пород и практика создания проходческих комбайнов позволяют сделать вывод, что и в ближайшее время механический способ с использованием режущего инструмента будет оставаться основным видом разрушения [14].

1.2 Условия применения проходческих комбайнов и их рабочих инструментов

В настоящее время на подземных горных работах для механизации проведения вспомогательных выработок наиболее прогрессивным

техническим средством являются проходческие комбайны, использующие режущий исполнительный орган. Разрушение горной породы происходит рабочим инструментом – резцом, закрепленном на исполнительном органе.

Комбайновый способ проведения выработок позволяет совместить во времени наиболее тяжелые и трудоемкие операции по разрушению забоя и уборке из него горной массы. Кроме того, при комбайновом способе проведения существенно повышается устойчивость выработок, так как монолитность пород в массиве нарушается в меньшей степени, чем при буровзрывных породах. Последнее обстоятельство позволяет снизить расходы на поддержание выработок [15].

Проходческие комбайны по основным классификационным признакам подразделяются [15]:

1. По способу обработки забоя исполнительным органом:
 - избирательного (циклического) действия с последовательной обработкой поверхности забоя;
 - бурового (непрерывного) действия с одновременной обработкой всей поверхности забоя.
2. По крепости пород разрушаемого массива:
 - для работы по углю и слабой руде с прослойками и присечками слабых пород (крепость по шкале проф. М.М. Протоdjяконова f до 4);
 - для работы по породам средней крепости ($f = 4 \div 8$);
 - для работы по крепким породам (f свыше 8).
3. По области применения:
 - для проведения основных и вспомогательных подготовительных выработок по полезному ископаемому и смешанным забоем;
 - для проведения основных и капитальных выработок и тоннелей по породе;
 - для осуществления нарезных работ по полезному ископаемому.

Парк машин, используемых в настоящее время на шахтах Российской Федерации, представлен рядом отечественных и зарубежных производителей. Основными отечественными производителями проходческих комбайнов избирательного и непрерывного действия являются:

- ОАО «Копейский машиностроительный завод» (комбайны КП-21, 1ГПКС);
- ООО «Ясиноватский машиностроительный завод» (комбайны КСП-22, КСП-32, КСП-42 и др.);
- ООО «Юргинский машиностроительный завод» (комбайн КПЮ-50). Зарубежные производители в основном представлены фирмами:
 - ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (комбайн П110);
 - *Joy Global Inc.* (комбайны *Joy 12CM30*, *Joy 12CM18*, *Joy 12CM15*);
 - *Sandvik* (комбайны *Sandvik MR340*, *Sandvik MH620*, *Sandvik MB200*);
 - *Caterpillar* (комбайны *Caterpillar CM240*, *Caterpillar CM230*);
 - *Alpine* (комбайны *Alpine AM-50*) и др. [16, 17].

При этом происходит постепенная замена ранее разработанных конструкций указанных проходческих комбайнов на более современные. Так, например, с 2007 по 2012 года количество используемых на шахтах Кузбасса комбайнов 1ГПКС уменьшилось в 12,5 раз, при увеличении доли комбайнов КП-21 с 14,5% до 52% [17]. Такая замена, прежде всего, обуславливается более широким диапазоном применения таких комбайнов.

Исполнительные органы современных проходческих комбайнов изготавливаются в корончатом, дисковом и комбинированном исполнении. Наибольшую популярность на комбайнах избирательного действия со стреловидным исполнительным органом (рисунок 1.1 а) получили

конические коронки (рисунок 1.1 б), устанавливаемые на комбайнах КП-21, ПКЗР, 1ГПКС, *Dosco LH-1300* и др. [18, 19]. Рабочий инструмент, устанавливаемый на исполнительном органе, выбирается в соответствии с проходческим комбайном и предполагаемыми условиями его эксплуатации.

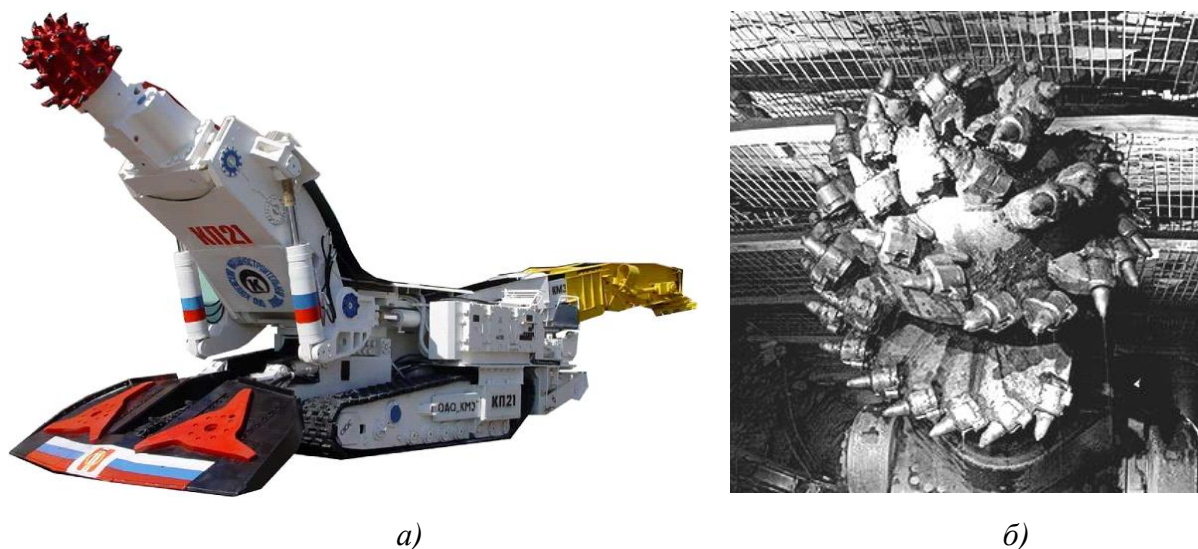


Рисунок 1.1 – Общий вид проходческого комбайна КП21 (а) и конической коронки (б)

Большинство производителей резцов [20, 21, 22, 23] разделяют резцы по собственной классификации.

Так ООО «Горный инструмент» [20] выпускаемые поворотные резцы классифицирует по условиям в соответствии с крепостью пород f по шкале проф. М.М. Протодяконова: легкие (уголь $f = 0,8 \div 2$); средние (уголь с прослойками породы $f = 2 \div 5$); тяжелые (уголь с прослойками породы $f = 2 \div 5$ и твердыми включениями $f = 5 \div 8$); сверхтяжелые (уголь с прослойками породы $f = 2 \div 7$ и твердыми включениями $f = 7 \div 10$ большой протяженности). Помимо крепости пород, этот производитель классифицирует резцы и по используемому проходческому или очистному комбайну.

Компания же *Kennametal* [21], разделяет выпускаемые резцы на 4 категории без расшифровки этих категорий. Другие производители [22, 23] представляют в своих каталогах только номенклатуру производимой продукции без конкретизации условий применения.

В соответствии с отечественным стандартом требований к применению резцов очистных и проходческих комбайнов [24] выбор резцов при

разрушении пород определяется следующими свойствами разрушаемой среды:

- прочностью при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$;
- контактной прочностью p_k ;
- абразивностью a .

Кроме того, эффективность применения поворотных резцов, наряду с представленными выше свойствами, зависит [25] от:

- наличия в массиве твердых включений;
- их размера и процентного содержания;
- хрупкопластических свойств породы.

Как показали исследования [26], крепость по шкале проф. М.М. Протодьяконова и предел прочности при одноосном сжатии не могут использоваться в качестве критерия оценки сопротивляемости породы разрушению. По этой причине показатель контактной прочности p_k был выделен как наиболее точный и введен [27] в расчетные зависимости для определения усилий, действующих на резцовые инструменты. По этому показателю все горные породы делятся на VI категорий (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация пород по контактной прочности [27]

Категории и классы пород по контактной прочности	Характеристика породы	Значение показателей контактной прочности, кгс/мм ²	Порода
I, $\frac{I}{II}$	Слабые	$\frac{\text{Менее } 30}{30 - 40}$	Глинистые сланцы, аргиллиты, филлитовые сланцы, слабые песчаники, алевролиты, каиниты, сильвиниты
II, $\frac{III}{IV}$	Ниже средней крепости	$\frac{40 - 50}{50 - 65}$	Песчанистые сланцы, песчаники крупнозернистые, известняки, алевролиты, аргиллиты
III, $\frac{V}{VI}$	Средней крепости	$\frac{65 - 90}{90 - 125}$	Крепкие сланцы, песчаники средние и мелкозернистые, мрамор, крепкие известняки
IV, $\frac{VII}{VIII}$	Крепкие	$\frac{125 - 175}{175 - 245}$	Многие металлические руды, апатитовые руды, диабазы, сидериты, скарированные породы, джеспилиты, березиты
V, $\frac{IX}{X}$	Очень крепкие	$\frac{245 - 340}{340 - 450}$	Граниты, кварциты, скарны, гранодиориты, пироксениты, альбиты, эгириниты
VI, $\frac{IX}{X}$	Крепчайшие	$\frac{450 - 565}{\text{более } 565}$	Монзониты, крепчайшие скарны и гранодиориты, роговики, железисто-карбонатные породы

Наряду с контактной прочностью, важным свойством горных пород является их абразивность – физико-механическое свойство породы, выражающееся в способности изнашивать контактирующий инструмент в процессе трения. От интенсивности изнашивания резцов во многом зависят производительность проходческих машин, потребляемая ими мощность, расход энергии и затрат на инструмент, что, в конечном счете, во многом определяет эффективность использования резцов в конкретных горно-геологических условиях [28]. Для определения характеристик абразивных свойств горных пород наибольшее распространение получил метод Барона-Кузнецова [28, 29], согласно которому все горные породы по показателю абразивности разделены на 8 классов (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация горных пород по абразивности [28, 29, 30]

Класс	Характеристика пород	Абразивность а, мг	Порода
I	Весьма малоабразивные	Менее 5	Известняки, мрамор, мягкие сульфиды без кварца, (галенит, сфалерит, пирротонит), апатит, каменная соль
II	Малоабразивные	5-10	Сульфидные руды, барито-сульфидные руды, аргиллиты, мягкие сланцы: углистые, глинистые, хлоритовые, хлорито-аспидные
III	Ниже средней абразивности	10-18	Джеспилиты, роговики (рудные и нерудные), магматические тонкозернистые породы, песчаники кварцевые и аркозове тонкозернистые, руды железные, известняки окремненные
IV	Среднеабразивные	18-30	Песчаники кварцевые и аркозовые, мелкозернистые диабазы, крупнозернистый пирит, арсенопирит, жильный кварц, кварцево-сульфидные руды
V	Выше средней абразивности	30-45	Песчаники кварцевые и аркозовые средне и крупнозернистые, плагиограниты, нефелиновые сиениты, мелкозернистые диориты, порфириды, грейзены, габро-гнейсы, скарны (рудные и нерудные)
VI	Повышенной абразивности	45-65	Средне- и крупнозернистые граниты, диориты, гранодиориты, порфириды, нефелиновые сиениты, кератофиры, пироксениты, монзониты, амфиболиты, сланцы кварцевые и окварцованные, гнейсы
VII	Высокоабразивные	65-90	Порфириды, диориты, граниты, гранитоидные нефелиновые сиениты
VIII	В высшей степени абразивные	Более 90	Корундосодержащие породы

Твердые включения характеризуются двумя показателями: размерами и процентным содержанием. Условно твердые включения по размерам разделяют на мелкие (размером до 20÷30 мм) и крупные (свыше 30 мм). При прочности пород до 30÷40 МПа мелкие включения вырываются или вдавливаются рабочим инструментом. На более прочных породах, они существенно оказывают влияние на стойкость инструмента. Наличие крупных включений большой прочности при резании пород приводит к резкому повышению вероятности поломки инструмента. При наличии в

массиве менее 5% мелких и 1–1,5% крупных включений указанный фактор мало влияет на разрушаемость пород [31].

1.3 История развития тангенциальных резцов

В настоящее время проходческие комбайны применяют механический способ разрушения горной породы, используя в качестве рабочего инструмента резцы или шарошки, а также комбинированное воздействие на породу резца и струи воды [4, 10, 12, 32].

Резцы проходческих и очистных комбайнов по виду их установки на исполнительных органах разделяются на радиальные и тангенциальные [10]. *Радиальный резец* – инструмент, державка которого установлена перпендикулярно к поверхности резания. В *тангенциальных резцах* державка устанавливается наклонно к поверхности резания. Тангенциальные резцы изготавливаются в двух исполнениях: тангенциальные поворотные и тангенциальные неповоротные [24].

Исполнительные органы большинства проходческих комбайнов, выпускаемые в настоящее время отечественными и зарубежными производителями, оснащаются *тангенциальными поворотными резцами*. Такие же инструменты часто используют в очистных комбайнах и дорожно-строительной технике.

Тангенциальные поворотные резцы впервые стали производиться в 1970-х гг. за рубежом. Во второй половине 1970-х гг. их производство было налажено и в России: на Копейском, а затем и на Краснолучском машиностроительных заводах [25]. Преимуществом резцов такой конструкции является их самовращение при контакте с разрушаемой средой, благодаря чему происходит равномерное изнашивание всей рабочей поверхности головки, самозатачивание и тем самым снижение общего расхода разрушающего инструмента. Следует отметить, что тангенциальная установка резца, приводит к уменьшению отклонений равнодействующих усилий от продольной оси его державки. Это приводит к повышению

прочности и долговечности инструмента, так как твердосплавная вставка и державка подвергаются преимущественно сжимающим воздействиям, которым их материалы противостоят значительно лучше, чем любым другим. Проведенные испытания резцов такой конструкции на ряде шахт показали сокращении удельного их расхода в $5\div 10$ раз по сравнению с серийно выпускающимися радиальными резцами [33, 34, 35].

Первыми отечественными тангенциальными поворотными резцами, применявшимися в конце 1970-х гг. на 90% проходческих комбайнов, используемых в горной промышленности, были резцы РКС-1 [36, 37] (рисунок 1.2). Их применением не удалось охватить весь спектр условий работ проходческих комбайнов, вследствие этого возник вопрос создания инструментов для более тяжелых условий работы – с державками и кернами больших размеров, а также резцов с разными вылетами. По этой причине в 1980-х гг. начинается серийный выпуск резцов типа РКС-2 и РКС-3 [38].



Рисунок 1.2 – Общий вид тангенциального резца РКС-1

Большой вклад в изучение закономерностей работы резцов данного типа привнесли ученые научно-исследовательского института ИГД им. А.А. Скочинского. В лабораториях института было проведено значительное число опытов по исследованию процесса разрушения горных пород при механическом воздействии на них тангенциальными резцами. Все эти работы в основном были направлены на изучение силовых показателей резания и изнашивания режущего инструмента. Итогом проделанной работы стала методика по расчету загруженности и износостойкости резцов типа РКС [39, 40, 41, 42].

В процессе эксплуатации резцов данного типа был выявлен ряд недостатков:

- попадание мелких фракций разрушенной породы в зазор между хвостовиком и отверстием резцедержателя, приводящее к прекращению прокручивания резца;
- совместимость резцов типа РКС только с определенным типом проходческого комбайна;
- недостаточная прочность резцов;
- недостаточная прочность и эффективность средств крепления инструмента на исполнительном органе и др. [25].

Выявление указанных недостатков привело к созданию резцов нового поколения, существенно отличающихся по форме от резцов типа РКС. Впервые, резцы с измененной формой и размерами головки державки появились на Западе в конце 1970-х – начале 1980-х гг. Эти инструменты, в отличие от резцов типа РКС, имели специальный упорный выступ (упорный бурт) в месте перехода головной части в хвостовую (рисунок 1.3). Такая форма резцов позволила перенести всю нагрузку при работе на сам резцедержатель (в предыдущих моделях инструмента, нагрузка приходилась на специальный выступ резцедержателя, который усложнял его конструкцию [30, 41]).



Рисунок 1.3 – Резец РШ 32-70/16.М1 производства ОАО «Горный инструмент» со специальным упорным выступом

На сегодняшнем этапе развития промышленности большое количество, как зарубежных, так и отечественных фирм по производству горнорезущего инструмента («Sandvik» [22], «Kennametal» [121], «Betek» [23], ОАО «Копейский машиностроительный завод» [19], «Горный инструмент» [20] и др.) выпускают широкую номенклатуру резцов с усиленной головной

частью. Такое количество выпускаемых резцов обусловлено возрастанием производственных требований, связанных с совершенствованием и созданием новых машин, расширением их области применения, а также с техническими и конструкторскими идеями, направленными на улучшение качества продукции. Все это приводит к появлению выбора инструмента при проведении работ в различных горно-геологических условиях. Выбору рациональных геометрических параметров резцов для тех или иных горно-геологических условий посвящено комплексное исследование [44].

Работы, производимые конструкторами и технологами по усовершенствованию резцов, направлены, как правило, в двух направлениях: изменению геометрических и конструктивных параметров инструмента, в зависимости от условий его применения, и применению более прочных и износостойких материалов в производстве резцового инструмента [44, 45, 46]. Результаты этих работ позволяют повысить ресурс инструмента и расширить область его применения.

Применение материалов, обладающих повышенными эксплуатационными и механическими характеристиками, такими как износостойкость и прочность, является важным моментом на этапе проектирования резцов. По этой причине в последнее время как отечественными, так и зарубежными материаловедами был найден ряд материалов, обладающих более высокими указанными показателями. К сожалению, эти материалы внедряются в промышленность очень медленно, и производители резцов используют, как правило, те же стали и твердые сплавы, которые использовались еще при производстве резцов типа РКС. В этой связи улучшение показателей износостойкости и прочности материалов, используемых при производстве резцов, является весьма актуальной задачей.

1.4 Конструкции тангенциальных резцов

В настоящее время производителями резцов [19, 20, 21, 23] предлагается широкая номенклатура инструментов для разрушения горных

пород механическим способом. Такой широкий выбор объясняется их применением на разных комбайнах и породах различной крепости.

На данный момент практически все производители выпускают тангенциальные поворотные резцы с массивной головной частью 2 (рисунок 1.4).

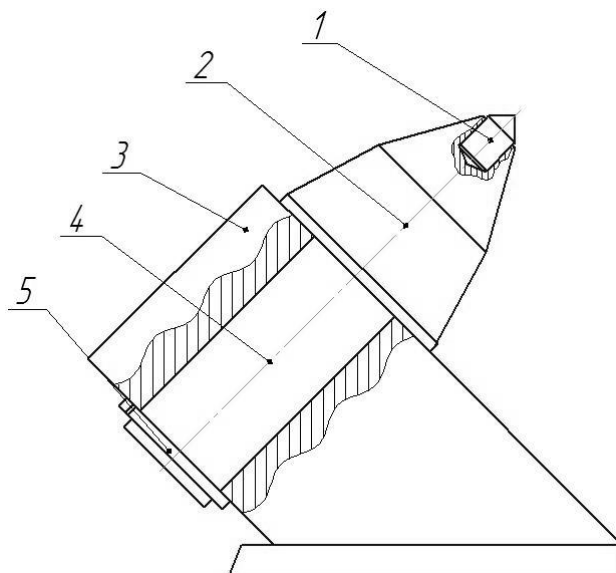


Рисунок 1.4 – Тангенциальный поворотный резец новой конструкции в резцедержателе

Резцы данной конструкции, вне зависимости от фирмы изготовителя, имеют общие конструктивные особенности, которые характерны для этого типа. Они симметричны относительно продольной оси и состоят из головки 2 и хвостовика 4, образующих тело резца (державку). Твердосплавная вставка 1 (керн) жестко при помощи пайки или запрессовки закреплена на конце головки. Резец, свободно вращается в кулаке 3 и при помощи замкового устройства 5 закрепляется в нем. Наличие замкового устройства позволяет резцу не выпадать во время работы исполнительного органа. В виду особенностей формирования нагрузок в процессе резания породы, резец получает вращающий момент. Свободное вращение резца вокруг оси во время работы происходит из-за его свободного размещения в кулаке. Такая конструкция способствует сохранению геометрических размеров резца достаточно долгое время, увеличивая срок его службы.

Различия в размерах и форме головной части резцов такой конструкции (рисунок 1.4) обосновываются горно-геологическими условиями их применения и конструкцией горной машины. Так для проходческого комбайна КП-21 изготовителя ОАО «Копейский машиностроительный завод» существует широкая номенклатура применяемых резцов, начиная от ПС2 (рисунок 1.5 а) этого же производителя до целого спектра резцов завода ОАО «Горный инструмент» (рисунок 1.5 б, в, г, д). Согласно каталогу выпускаемой продукции [19] резец ПС2 способен разрушать породу крепостью до $f = 10$. Резцы РШ 32-70-L90/16SK, РШ 32-70/16SK устанавливаются на проходческих комбайнах при максимальной крепости разрушаемой породы до $f = 2$, РШ 32-70/16 – до $f = 5$, РШ 32-70/16М.1 – до $f = 8$ [20]. Как видно из рисунка 1.5, все резцы различаются величиной радиального вылета, определяемой мощностью исполнительного органа.

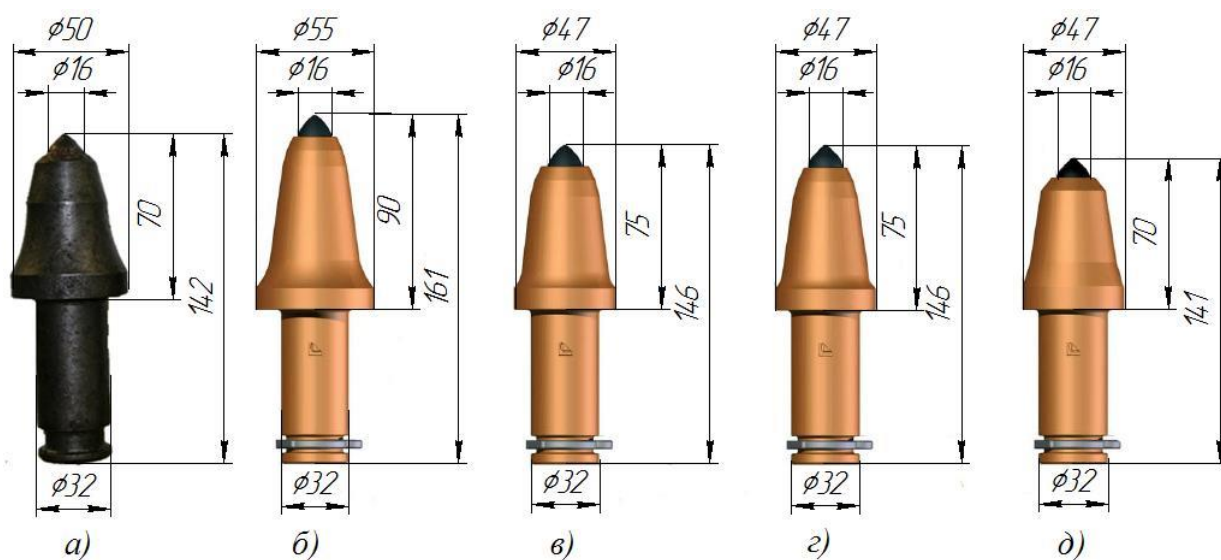


Рисунок 1.5 – Резцы, используемые на проходческом комбайне КП-21: а) ПС2; б) РШ 32-70-L90/16SK; в) РШ 32-70/16SK; г) РШ 32-70/16; д) РШ 32-70/16М.1

Помимо приведенных конструкций отечественных резцов на проходческом комбайне КП-21 возможна установка резцов и различных зарубежных производителей (рисунок 1.6).

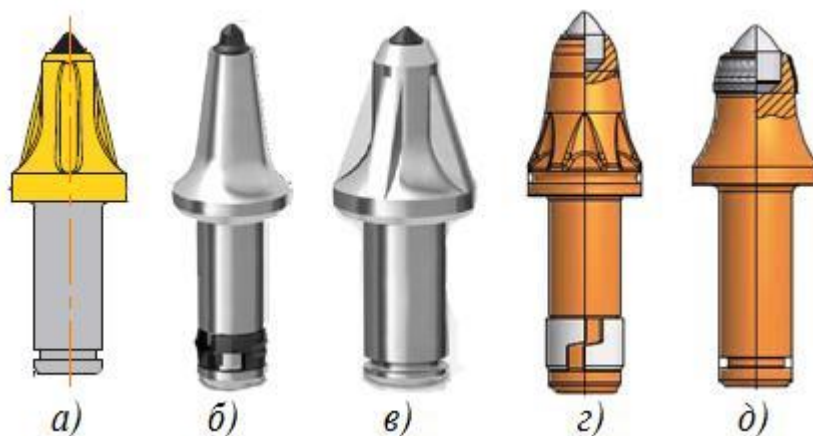


Рисунок 1.6 – Резцы, используемые на проходческом комбайне КП-21, зарубежных производителей: а) AM510FG (*Kennametal*); б) Q8AX-3084-5762 (*Sandvik*); в) Q8KF-3084-5762 (*Sandvik*); г) BSR111 (*Betek*); д) BSR274 (*Betek*).

Первые тангенциальные поворотные резцы типа РКС (рисунок 1.2) в настоящее время используются редко, ввиду проблем, возникающих при их эксплуатации (см. п. 1.2). Но некоторые производители горного инструмента, такие как «Горный Инструмент» [20], «Копейский машиностроительный завод» [19], «*Kennametal*» [21], до сих пор продолжают их выпуск.

В последнее время на горнопроходческих машинах иностранного производства резец располагается не непосредственно в кулаке, а во втулке 3 (рисунок 1.7). Ее наличие позволяет расширить номенклатуру применения резцов на конкретной машине и уменьшить износ кулака. Практически все производители горного инструмента [20, 21, 22, 23] предлагают огромный выбор втулок для закрепления резцов в кулаках исполнительного органа.

Важным элементом резца является твердосплавная вставка, параметры которой (механические свойства, износостойкость используемого материала, размеры) зачастую определяют усилие резания и основные качественные показатели всего инструмента – его режущую способность, износостойкость, прочность. Выбор твердосплавной вставки влияет на форму, размеры и материал державки резца.

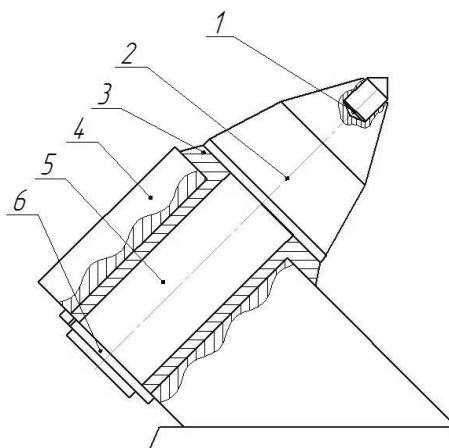


Рисунок 1.7 – Резец новой конструкции с втулкой в резцедержателе: 1 – твердосплавная вставка; 2 – головка с опорным буртом; 3 – втулка; 4 – резцедержатель (кулак); 5 – хвостовик; 6 – фиксатор.

Производители резцов [19, 20, 21, 22, 23] используют большое количество видов твердосплавных вставок. Такое разнообразие, в основном, определяется физико-механическими свойствами горной породы, применительно к которым они будут применяться.

Все производимые твердосплавные вставки [19, 20, 21, 22, 23] условно можно разделить на два типа цилиндрические и грибовидные (ступенчатые) (рисунок 1.8). Грибовидная форма (рисунок 1.8, б), по сравнению с цилиндрической (рисунок 1.8, а), имеет широкий пояс в нижней части, защищающий головную часть державки от контакта с разрушаемой породой. Его наличие снижает интенсивность изнашивания вставки. Кроме того, вставка такого вида имеет меньшую массу при прочих равных условиях [25].

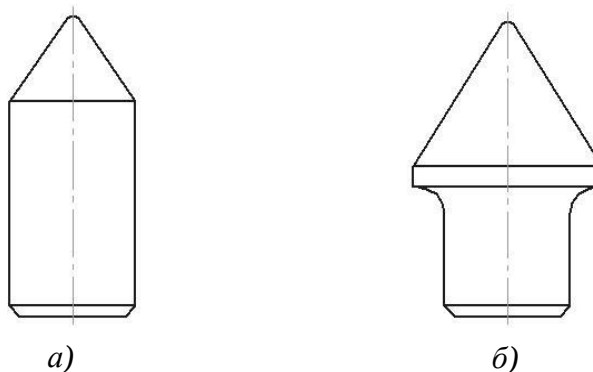


Рисунок 1.8 – Твердосплавная вставка цилиндрической (а) и грибовидной (б) (ступенчатой) формы

Другим составляющим компонентом резца является его державка (корпус). Она предназначена для фиксации твердосплавной вставки и крепления всего инструмента на исполнительном органе проходческого или очистного комбайна.

Как показывает практика, при использовании тангенциальных поворотных резцов на проходческих комбайнах, в большинстве случаев, толщина срезаемой стружки превышает размер вылета твердосплавной вставки и, по этой причине, в резании породы участвует и головная часть державки. Вследствие этого на величину усилий, износостойкость и прочностные показатели резца влияют и конструктивные особенности державки, а также эксплуатационные и прочностные свойства ее материала.

Размеры державки и твердосплавной вставки различны при конической (РКС-1, РКС-2, РШ 38-75/19.М2, РШ 38-75/19.М1, *АМ941*, *АМ943DB* и др.) или биконической (РКС-3, РКС-1И) [19, 20, 21, 22, 23] форме державки.

В настоящее время производители начали изготавливать инструмент с более сложной конусообразной формой державки (рисунок 1.9) [21, 22, 23]. При этом изготовитель сам подбирает формы его головной части под конкретные горно-геологические условия.

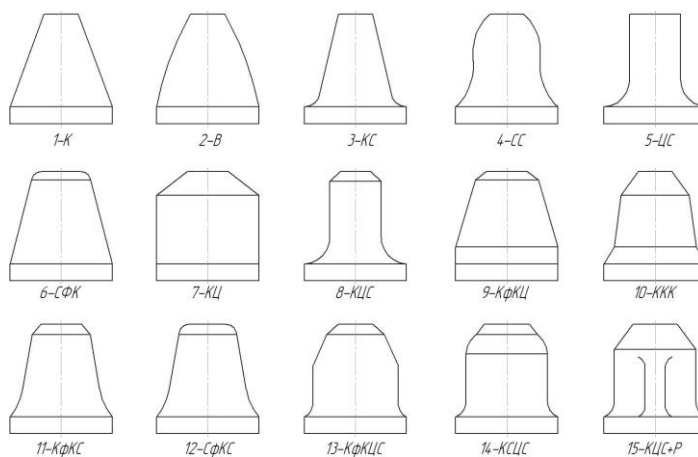


Рисунок 1.9 – Формы головной части державок тангенциальных поворотных резцов: С – скругление или криволинейный участок размером более 3-4 мм; С_ф – фаска в виде скругления или кривой линии размером менее 3-4 мм; К – конусный участок; К_ф – коническая фаска; Ц – цилиндрический участок; В – выпуклый коноид; Р – ребро жесткости.

Большую работу по классификации форм головок державок тангенциальных поворотных резцов проделали авторы работы [25].

Опорный бурт (рисунки 1.3, 1.4) – специальный конструктивный элемент державки, предназначен для защиты от частиц зазора между отверстием в кулаке (втулке) и хвостовиком резца. Его наличие так же способствует упрощению конструкции резцедержателя. Очень часто, на опорном бурте выполняется кольцевая канавка, предназначенная для облегчения съема резца.

Помимо классических монолитных корпусов, производители [20] предлагают составные резцы (рисунок 1.10). Эта конструкция позволяет уменьшить расход материала при производстве резцов, путем включения в его состав съемной втулки 4, которая выполняет роль опорной зоны (опорного бурта).

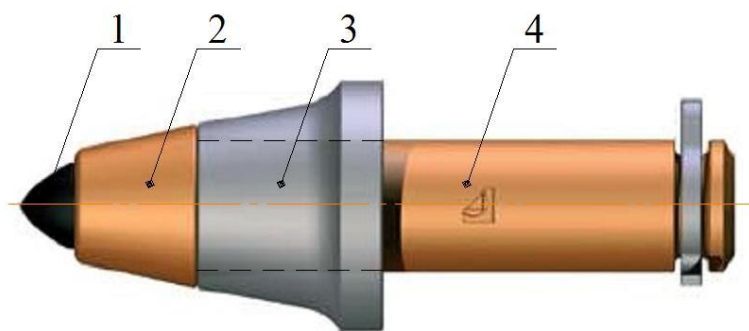


Рисунок 1.10 – Составной резец РШ С-25-65L72/16SK: 1 – твердосплавная вставка; 2 – головка корпуса; 3 – съемная втулка (опорная зона резца); 4 – хвостовик.

Авторами [47] предлагается конструкция составного резца (рисунок 1.11), в котором сменным элементом является непосредственно головная часть резца 2 вместе с твердосплавной вставкой 1. При достижении предельного износа головной части 2 производят ее замену, при этом хвостовик 3, закрепленный в резцедержателе 4 при помощи фиксатора 5, не претерпевающий износа, оставляют. Применение такой технологии позволяет многократно использовать хвостовик, что приводит к экономии металла при производстве резцов и уменьшению их стоимости.

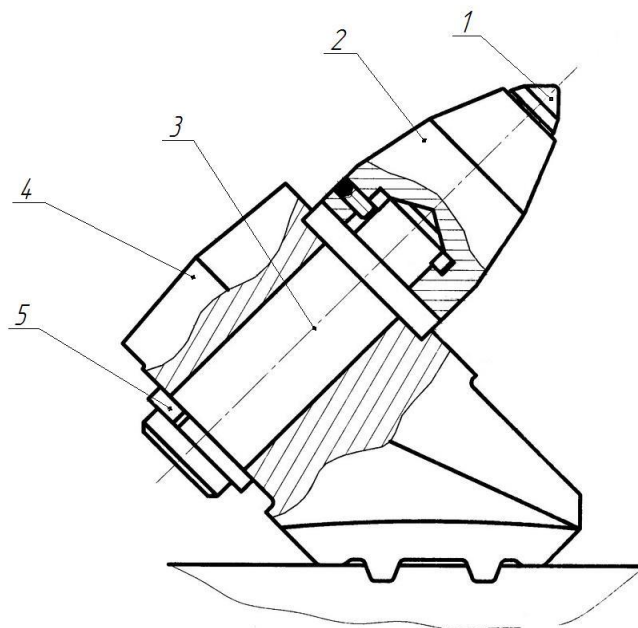


Рисунок 1.11 – Составной резец авторов [47]: 1 – твердосплавная вставка; 2 – съемная головка державки; 3 – хвостовик; 4 – резцедержатель; 5 – фиксатор.

Некоторые изготовители [21, 22, 23] дополнительно повышают износостойкость той части державки резца, которая взаимодействует с породой вместе с твердосплавной вставкой. Это производится путем прикрепления к ней специального износостойкого материала.

1.5 Материалы, применяемые при производстве резцов

Согласно [10] в отечественной практике державки резцов изготавливают, за небольшим исключением, из легированных сталей: хромоникелевых, хромоникельмолибденованадиевых, хромокремнемарганцевых и др. Применение этих сталей в сочетании с соответствующими технологическими операциями при производстве резцов способствует снижению напряжений в вставках из твердого сплава, которыми армируют державки, и повышению прочностных показателей. Наиболее широко применяемые марки сталей для различных видов инструмента:

- резцы угледобывающих и проходческих комбайнов – 30ХГСА, 35ХГСА;

- коронки для ударно-поворотного, ударно-вращательного и вращательно-ударного бурения – 35ХГСА, 30ХГТ, 45ХН, 38ХНЗМФА, 40ХН2МА, 18Х2Н4МА, 18Х2Н4ВА;
- резцы вращательного бурения шпуров и скважин – У7, 45Г2, 35ХГСА;
- шарошечные долота – 20ХНЗА, 17НЗМА;
- пики отбойных молотков – сталь 45, сталь 50;
- буровые штанги – У7, У8, К32П-55С2, Ш22-55СА, 30ХМА.

Для снижения в паяном соединении напряжений, возникающих при резком охлаждении при закалке, рекомендуется применять стали мартенситного класса 38ХНЗМФА и 45ХНЗМФА, закаливающиеся на воздухе. При температуре $200 \div 350$ °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 [10].

Помимо сталей 30ХГСА и 35ХГСА ГОСТ Р 51047-97 «Резцы для проходческих и очистных комбайнов. Общие технические условия» предусматривает и применение стали 40Х. Использование других материалов, должно быть оговорено в соответствующей документации.

В целях повышения износостойкости горных инструментов их режущую часть оснащают металлокерамическими или наплавочными твердыми сплавами [10].

Согласно ГОСТ Р 51047-97 в качестве армирующей вставки должны быть применены твердые сплавы марок ВК8В, ВК11ВК, ВК10КС, ВК12КС по ГОСТ 3882, ГОСТ 20559. Использование других материалов должно быть оговорено в соответствующей документации.

По структуре твердые сплавы разделяют [10] на мелкозернистые (индекс М, размер зерен до 1 мкм), среднезернистые (размер зерен 12 мкм) и крупнозернистые (индекс В, размер зерен 12÷15 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 [10]. Авторы [48, 49] приводят пример иностранных производителей, которым удалось получить особо крупнозернистые сплавы с размером зерен от 50 до 30 мкм. Применение этих сплавов привело к снижению интенсивности изнашивания и увеличению срока службы поворотных резцов.

1.6 Технология производства тангенциальных поворотных резцов

1.6.1 Общие сведения

Существующая на отечественных заводах-производителях технология изготовления резца включает в себя изготовление державки и твердосплавной вставки, армирование державки вставкой, термическую обработку, контроль и приемку.

Как правило, державки резцов изготавливают методом горячей объемной штамповки, реже – механической обработкой. Объемная штамповка проводится на горизонтально-ковочных машинах при температурах, соответствующих горячей обработке металлов давлением, что составляет для наиболее часто используемого материала державки – стали 30ХГСА 1140÷830 °С. После проведения штамповки заготовка охлаждается до комнатной температуры и подвергается механической обработке (сверление закрытого паза и проточка кольцевого паза в хвостовике резца). Затем происходит крепление твердосплавной вставки (керна) в пазе головки державки. В отечественной практике эту операцию, обычно, проводят методом пайки [10], в зарубежной – запрессовкой [50]. Последней

технологической операцией является термическая обработка резца (закалка плюс низкий отпуск), предназначенная для увеличения прочностных показателей и износостойкости материала его державки. После пайки твердосплавной вставки резец подстуживают до температуры $850^{\circ}\div 880^{\circ}\text{C}$ и, погружая в специальные растворы, производят закалку. Как показано в работе [45], отклонение от необходимых температур при проведении операции подстуживания на заводе изготовителе резцов может явиться причиной получения структуры материала державки, отличающееся низкой твердостью и износостойкостью.

Пайка, применяемая при производстве резцов в настоящее время, делится на ручную – с нагревом ТВЧ в многоместных кондукторах и полуавтоматическую – на установке с использованием метода погружения в расплавленный припой.

Первой операцией при *ручной пайке* является насыпка флюса в закрытый паз державки. В качестве материала флюса, обычно, применяют техническую буру [10]. Затем на слой флюса укладывается прокатанная и обезжиренная сетка или пластинка пермаллоя, пластинка припоя и твердосплавная вставка. Следующим шагом является нагрев изделия в индукторе до температуры плавления припоя. После расплавки припоя резец выводят из нагревателя, подстуживают до заданной температуры и производят термообработку. Инструменты, изготавливаемые из стали 30ХГСА (35ХГСА), подвергают изотермической закалке - выдержке стали при температуре на $30\div 50^{\circ}\text{C}$ выше интервала ее структурных превращений и охлаждение с заданной скоростью в охлаждающей среде с температурой на $30\text{--}100^{\circ}\text{C}$ ниже начала мартенситного превращения аустенита [51]. В качестве охлаждающей среды используют, как правило, смесь калиевой и натриевой селитры при температуре $280\div 310^{\circ}\text{C}$.

Полуавтоматический метод заключается в том, что резцы последовательно подвергаются всем операциям ручной пайки, но в автоматическом режиме. Первым этапом является нагрев корпуса до

температуры $1070 \div 1100$ °С, затем в закрытый паз заливается расплавленный флюс и припой и уже после этого твердосплавная вставка. Затем производится подстуживание инструмента на воздухе до температуры $850 \div 880$ °С. Охладившись, резец освобождается от держателя и попадает по конвейеру в ванну, состоящую из калиевой и натриевой селитры при температуре $280 \div 310$ °С.

Согласно ГОСТ Р 51047-97 «Резцы для проходческих и очистных комбайнов. Общие технические условия» твердость материала в зоне закалки должна составлять $35 \div 45$ HRC с допустимым ее увеличением до 55 HRC в зоне армирующей вставки.

В настоящее время большинство производителей резцов не придают огласке технологию производства своего инструмента.

Некоторые производители резцов («Белттехнология», «Техпоставка») [52] производят державки резцов по технологии, отличающейся от классической. В ней вместо горизонтально-ковочной машины используется стан поперечно-клиновой прокатки. В результате, как утверждают производители, в изделии формируется макроструктура, в которой волокна металла непрерывны, расположены симметрично вокруг оси, уплотнены у поверхности. Такая макроструктура позволяет повысить эксплуатационные характеристики изделий, в особенности усталостную прочность. После проведения прокатки резец подвергают механической обработке и, как и в классической схеме производства резцов, производят пайку и термообработку.

1.6.2 Анализ временных показателей основных операций производства резцов

Схема основных операций, используемых на отечественных предприятиях в технологии [10] изготовления тангенциальных поворотных резцов для проходческих комбайнов представлена на рисунке 1.12.

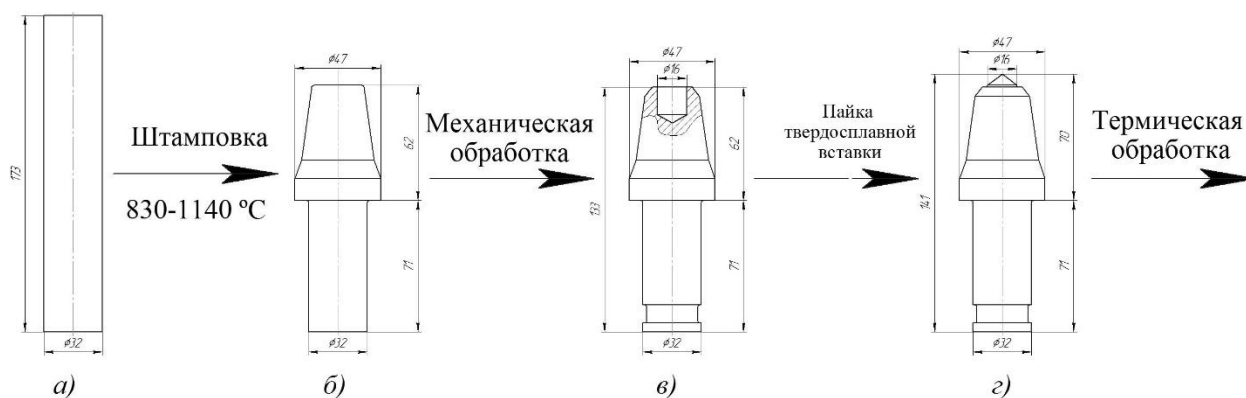


Рисунок 1.12 – Основные технологические операции существующего производства поворотных резцов на заводе «Горный инструмент» (на примере резца РШ 32-70/16.М1)

Технология изготовления включает:

- штамповку цилиндрической заготовки (рисунок 1.12, а) на горизонтально-ковочной машине в интервале температур $830^{\circ}\div 1140^{\circ}\text{C}$ с получением поковки державки (рисунок 1.12, б);
- охлаждение поковки на спокойном воздухе и механическую обработку с целью получения кольцевой проточки и закрытого паза для твердосплавной вставки (рисунок 1.12, в);
- укладку в закрытый паз флюса с припоем и твердосплавной вставки из сплава типа ВК11В, индукционный нагрев до температуры расплавления припоя (для припоя ПЛНКоМц49-9-0,2-0,2 – 955°C), (рисунок 1.12, г);
- изотермическую закалку в расплавленной калиевой или натриевой селитре при температуре $\sim 300^{\circ}\text{C}$;
- охлаждение до комнатной температуры на спокойном воздухе;
- отпуск в печи при температуре 230°C для уменьшения остаточных закалочных напряжений;
- охлаждение резца до комнатной температуры на спокойном воздухе.

Штамповка державок поворотных резцов производится на универсальной горизонтально-ковочной машине ВВ1136.01 с номинальным усилием высадочного пуансона 4000 кН и максимальным диаметром

высаживаемой заготовки 35 мм. Усилие необходимое для штамповки державки $P = 3000$ кН [53]. Механическая обработка производится на токарно-винторезном станке 16Б16КП. Режимы резания, инструмент указан в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Основные операции и режимы резания

Операция	Инструмент	Подача S , мм/об	Скорость резания V , м/мин	Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹
Проточка кольцевого паза	Отрезной резец $b = 10$ мм	0,2	50	300
Сверление отверстия	Сверло Ø16 Р6М5	0,2	25	500

Термограмма основных технологических операций производства резцов представлена на рисунке 1.13.

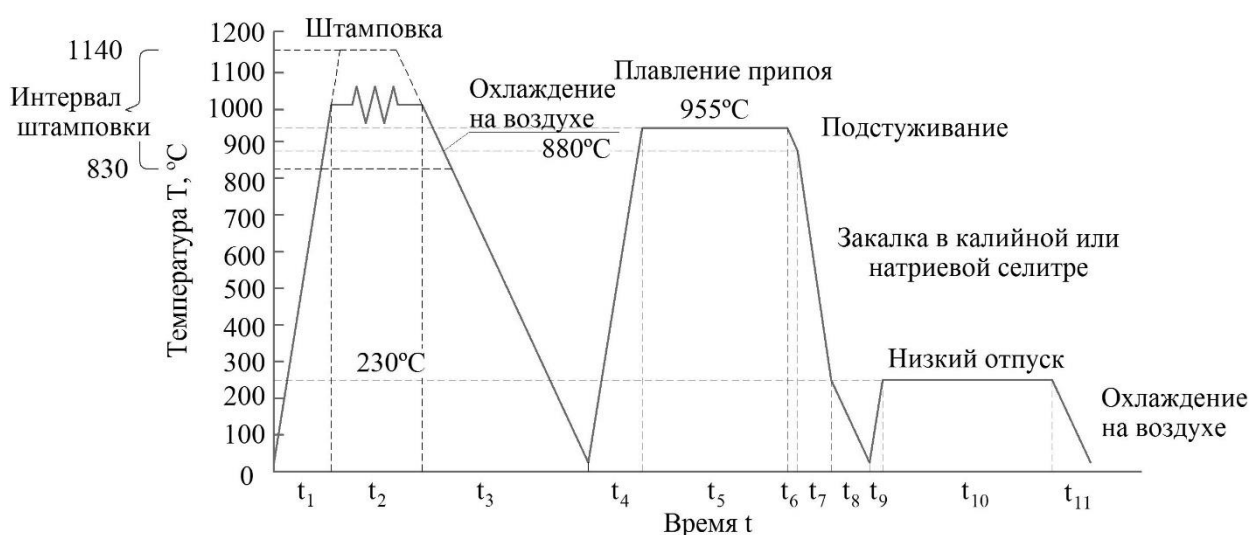


Рисунок 1.13 – Термограмма существующей технологии производства резцов

Общее время цикла производства резца $t_{\text{ц}}$ без учета производства твердосплавной вставки может быть оценено, как:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{ТО}} + t_{\text{МО}}, \quad (1.1)$$

где, $t_{\text{ТО}}$ – время на термические операции, с; $t_{\text{МО}}$ – время на операции механической обработки, с.

Время на термические операции

$$t_{\text{ТО}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11}, \quad (1.2)$$

где, t_1 – время нагрева заготовки под ковку, с; t_2 – время выдержки при температурековки и процессаковки заготовки под ковку, с; t_3 – время охлаждения поковки, с; t_4 – время нагрев поковки перед пайкой и закалкой, с; t_5 – время выдержки державки с припоем и аустенизации, с; t_6 – время подстуживания державки и твердосплавной вставки перед закалкой, с; t_7 – время закалки, с; t_8 – время охлаждения на воздухе до комнатной температуры, с; t_9 – время нагрева под отпуск стали, с; t_{10} – время выдержки при температуре отпуска, с; t_{11} – время охлаждения на воздухе после отпуска, с.

Согласно [54] время нагрева под ковку t_1 :

$$t_1 = 1200 D_3 \sqrt{D_3}, \quad (1.3)$$

где, D_3 – диаметр заготовки ($D_3 = 0,032$ м).

$$t_1 = 360 \text{ с.}$$

Время выдержки при температурековки и процессаковки заготовки под ковку t_2 [55]:

$$t_2 = t_e + t_k, \quad (1.4)$$

где t_e – время выдержки заготовки при температурековки, с;

t_k – времяковки, с; $t_k \sim 10$ с.

$$t_e = t_1 = 360 \text{ с,} \quad (1.5)$$

$$t_2 = 370 \text{ с.}$$

Время охлаждения поковки t_3 [56]:

$$t_3 = \frac{T_n - T_k}{V_o}, \quad (1.6)$$

где, T_n – начальная температура поковки, °С. $T_n = 1000$ °С; T_k – начальная температура поковки, °С. $T_k = 20$ °С; V_o – скорость охлаждения, С/с; В зависимости от охлаждающей среды $V_o = 3$ °С/с – охлаждение на воздухе, 1100 °С/с – охлаждение в калиевой селитре.

40

$$t_3 = 326 \text{ с},$$

$$t_6 = 50 \text{ с},$$

$$t_7 = 1 \text{ с},$$

$$t_8 = 70 \text{ с},$$

$$t_{11} = 70 \text{ с}.$$

Время нагрева поковки перед пайкой и закалкой в индукторе при частоте $f = 8 \text{ кГц}$ [54] $t_4 = 50 \text{ с}$.

Время выдержки державки с припоем и аустенизации t_5 [54]:

$$t_5 = KD_n, \quad (1.7)$$

где, K – коэффициент, с/мм; Для низколегированных сталей $K = 55 \text{ с/мм}$; D_n – максимальный диаметр поковки, мм.

$$t_5 = 2585 \text{ с}.$$

Время нагрева под отпуск стали t_9 [55]:

$$t_9 = GD_n, \quad (1.8)$$

где, G – коэффициент нагрева, с/мм; Для электрических печей $G = 75 \text{ с/мм}$.

$$t_9 = 3525 \text{ с}.$$

Время выдержки при температуре отпуска t_{10} [56]:

$$t_{10} = 60BD_n, \quad (1.9)$$

где, B – коэффициент выдержки, с/мм; Для электрических печей $B = 3 \text{ мин/мм}$.

$$T_{10} = 8460 \text{ с}.$$

Таким образом общее время термических операций при изготовлении резца $t_{\text{ТО}} = 15866 \text{ с}$.

Время на операции механической обработки t_{MO} зависит от режима резания. Для механической обработки стали 30ХГСА основное время механической обработки t_{MO} можно оценить в ~ 12 с.

Таким образом общее время цикла t_c без учета подготовительно заключительных операций составляет ~ 15878 с или 4,4 часа.

Как можно заключить из представленной на рисунке 1.13 схемы, поверхностная твердость материала державки резцов, достигаемая при существующей технологии производства, обеспечивается только мартенситным превращением аустенита использованной среднеуглеродистой стали и не достигает по этой причине значительной величины (По ГОСТ Р 51047-97 35÷45 HRC). Как следствие, и износостойкость державки резца, как показывает практика эксплуатации, так же не отличается высокими показателями.

1.7 Способы повышения прочности и износостойкости деталей горных машин

1.7.1 Основные сведения о способах повышения прочности и износостойкости деталей горных машин

Для повышения механических и эксплуатационных показателей металлических конструкционных материалов, применяемых в горном машиностроении, используют различные способы их обработки [51, 55, 57, 58]: термические, механические, химико-термические, газотермического напыления, комбинированные и др., которые могут приводить, как к поверхностному, так и объемному упрочнению детали.

Термический способ является наиболее часто используемым при улучшении механических свойств сталей. К этому способу следует в первую очередь отнести закалку (объемную и поверхностную) и последующие виды отпуска, направленные для получения требуемых свойств. В случае если требуется изменить только свойства поверхностного слоя материала,

применяют специальный способ закалки – поверхностный, который основан на нагревании верхнего слоя металла до температуры закалки и быстром охлаждении. Наибольшее распространение получили электротермическая закалка с нагревом изделий токами высокой частоты (ТВЧ), газоплазменная закалка с нагревом газовой-кислородной или кислородно-керосиновой пламенем, а также нагрев лазером [57].

Механический способ можно разделить на слесарный и обработкой давлением. Слесарная обработка применяется для устранения задигов, рисок, наработки и других дефектов поверхности, а также получения необходимой ее шероховатости. Данная обработка приводит к незначительному увеличению износостойкости материала [58]. Обработка давлением используется для повышения прочностных свойств материала и получения необходимой шероховатости его поверхности. Процесс поверхностного упрочнения деталей пластической деформацией получил название *наклепа*. Основными методами осуществления наклепа являются дробеструйная обработка поверхности, обработка ее роликами, виброобкатывание, ультразвуковое виброобкатывание, гидроструйная обработка и др. [51, 55].

В последнее время начинают получать применение методы интенсивной пластической деформации, позволяющие упрочнять материалы по всему их объему изделия. Повышение прочности материала заготовки осуществляется за счет формирования субмикро- и нанокристаллической структуры. К таким методам можно отнести кручение под гидростатическим давлением, равноканальное угловое прессование, мультиосевая деформация, знакопеременный изгиб, аккумулируемая прокатка с соединением, винтовое прессование [59, 60, 61, 62].

Химико-термическим способом (*поверхностным легированием*) называют обработку, заключающуюся в сочетании термического и химического воздействия на металлы и сплавы для изменения химического состава структуры и свойств в поверхностных слоях [58]. Обработка

включает в себя азотирование, фосфатирование, цианирование, сульфидирование, борирование, цементацию и др.

При *газотермическом напылении* газовой струей, на поверхность материала наносится тонкий слой материала, обладающего определенными свойствами (металла, металлокерамики, керамики, сплава). К нему относятся высокоскоростное газопламенное, плазменное, детонационное напыление и др. [63].

К *комбинированному* способу можно отнести термомеханическую обработку, сочетание химико-термической и механической обработки и другие. Существуют методы наплавки, которые основаны на нанесении на изделие слоя металла посредством сварки плавлением [58]. В связи с широким развитием нанотехнологий, набирает популярность *PVD*-процесс [64]. Он основан на напылении покрытий (тонких пленок) в вакууме.

1.7.2 Влияние термомеханической обработки на механические свойства и износостойкость деталей горных машин

В процессе производства металлических изделий помимо термической обработки (ТО), применяют метод термомеханической обработки (ТМО), сочетающий в себе пластическую деформацию стали при повышенной температуре и термическую обработку. Формирование структуры, закаленной стали при ТМО происходит в условиях повышенной плотности дислокаций, обусловленных условиями горячей деформации. Различают два основных способа ТМО: высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) и низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО).

При высокотемпературной ТМО аустенит деформируют выше температуры A_{c3} стали, после чего сразу закаливают (рисунок 1.14) и подвергают низкому отпуску. Степень деформации ε обычно составляет 20÷30%, так как при большей деформации успевает пройти процесс рекристаллизации.

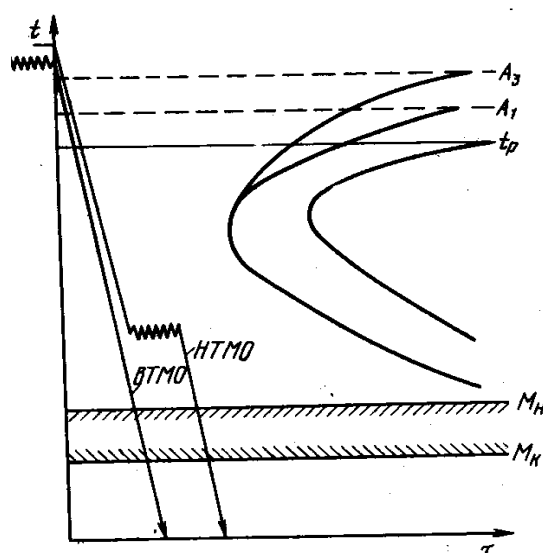


Рисунок 1.14 – Классификационная схема ТМО.

При низкотемпературной ТМО аустенит деформируют при $\varepsilon = 75 \div 95\%$ и температуре ($400 \div 600$ °С) выше начала мартенситного превращения (M_H), но ниже температуры рекристаллизации стали, а затем закаливают.

В результате обработки сталь упрочняется, как вследствие мартенситной реакции, так и из-за дефектов строения, унаследованных мартенситом от деформированного аустенита.

При обоих способах ТМО наблюдается резкое увеличение как прочностных, так и пластических свойств обрабатываемой стали [51, 65, 66]. Как утверждает В.Д. Садовский [65], максимальное термомеханическое упрочнение для стали 30ХГСА можно достичь в интервале температур $900 \div 1000$ °С.

Как показывают исследования [67] (рисунок 1.15), увеличение степени деформации металлических материалов при холодном деформировании, в том числе и основного материала державок резцов – стали 30ХГСА, приводит к постоянному росту их прочностных характеристик и снижению пластических.

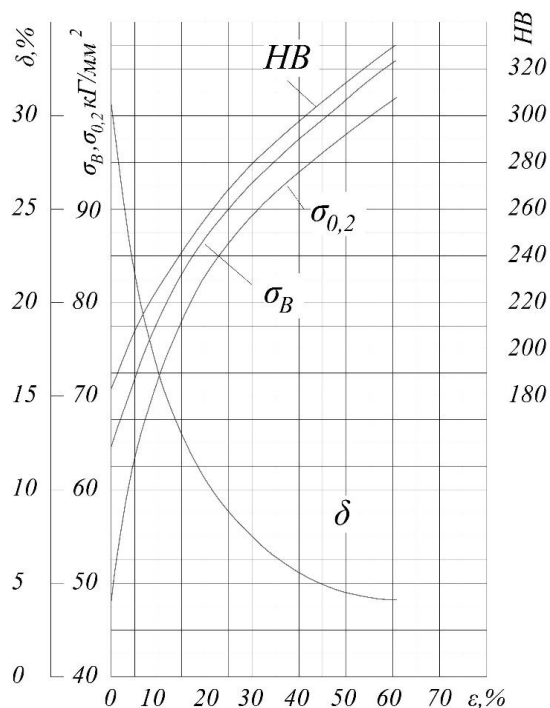


Рисунок 1.15 – Зависимость механических свойств стали 30ХГСА от степени деформации ε при прокатке

Этими же авторами [67] предложены эмпирические формулы для расчета механических свойств материалов в зависимости от степени деформации ε при прокатке

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2\text{исх}} + A\varepsilon^{n_1}, \quad (1.10)$$

$$\sigma_B = \sigma_{B\text{исх}} + B\varepsilon^{n_2}, \quad (1.11)$$

$$HB = HB_{\text{исх}} + C\varepsilon^{n_3}, \quad (1.12)$$

где A , B , C , n_1 , n_2 , n_3 – постоянные коэффициенты, зависящие от материала.

Для стали 30ХГСА: $A = 8,6 \text{ кг/мм}^2$ (86 МПа), $B = 3,4 \text{ кг/мм}^2$ (34 МПа), $C = 8,5 \text{ кг/мм}^2$ (85 МПа), $n_1 = 0,45$, $n_2 = 0,61$, $n_3 = 0,7$.

Сведения о влиянии ТМО на износостойкость материалов весьма ограничены.

В работе [68], образцы стали 47Х8, 03Х8 и 55ХГР подвергали изнашиванию по серому чугуна. Перед испытаниями образцы сталей были подвергнуты обычной термической обработке на высокую твердость и ВТМО при разных степенях деформации. Как показали эти исследования,

при степенях деформации 75% износостойкость сталей увеличивается в $1,8 \div 1,9$ раз по сравнению с износостойкостью этих сталей, прошедших термическую обработку.

Авторы [65] производили абразивное изнашивание образцов стали 45, 45X, 45X3, 45X5 после ВТМО при степенях деформации до 45% и обычной термической обработки. После закалки образцы в обоих случаях подвергали отпускам при различных температурах. Авторы выявили, что образцы, подвергнутые ВТМО и низкому отпуску, имеет такую же ударную вязкость, что и образцы после обычной закалки и высокого отпуска, при этом износостойкость деформированных образцов оказалась выше на 60%.

В этой связи можно было ожидать, что использование метода термомеханической обработки в технологии производства тангенциальных поворотных резцов способно повысить износостойкость и прочностные характеристики материала их державки.

1.9 Существующие методы оценки удельного расхода и износостойкости поворотных резцов

Эффективность применения поворотных резцов горных машин, как и другого горно-режущего инструмента, определяется рядом критериев, одним из которых, является их надежность, а точнее ее свойство – долговечность, то есть способность инструмента длительно сохранять свою работоспособность до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации [44, 70].

Согласно [24] в качестве показателя надежности приняты твердость в зоне закалки и наработка до отказа, выраженная в единицах добычи при выемке или разрушенной горной массы при проходке, либо обратная ей величина – удельный расход резцов в штуках на 1000 т горной массы (Q , шт./1000 т) или в штуках на кубический метр объема проходки (q , шт./м³). Допустимо применять удельный путь трения (резания) одним резцом (L , км/шт). Нарботка на отказ определяется по результатам типовых

приемочных испытаний опытных образцов в реальных условиях эксплуатации [44, 72, 73].

В работах [14, 70] приводится методика расчета удельного расхода резцов и их износостойкости, утвержденная Министерством топлива и энергетики Российской Федерации [14]. Достоверность результатов расчета по этой методике подтверждена шахтными испытаниями на предприятиях Донецкого, Челябинского, Карагандинского угольных бассейнов. Отклонение расчетных значений интенсивности изнашивания от фактических находились в диапазоне $2,2 \div 13\%$.

Согласно [14, 70] удельный расход резцов Z при работе проходческих комбайнов может быть определен по формуле:

$$Z = \frac{1}{L_{\text{пд}} t h}, \quad (1.13)$$

где Z – удельный расход резцов, шт/м³; t – шаг резания, м; h – средняя толщина стружки, м; $L_{\text{пд}}$ – длина пути инструмента в контакте с породой до выхода его из строя, км. Для случая, когда изнашиванием твердосплавной вставки можно пренебречь, величина $L_{\text{пд}}$ может быть рассчитана из выражения

$$L_{\text{пд}} = \frac{11,37 \Delta_{\text{пд}}}{\psi_{\Delta\sigma}}, \quad (1.14)$$

$$\psi_{\Delta\sigma} = K_v K_o K_{t/h} K_d K_m a^{0,69} \sigma_{\text{сж}}^{0,12}, \quad (1.15)$$

где $\Delta_{\text{пд}}$ – предельно допустимая величина оголения твердосплавной вставки, после достижения которой происходит ее поломка, мм; $\psi_{\Delta\sigma}$ – интенсивность изнашивания головки державки резца, мм/км; K_v – коэффициент, учитывающий влияние скорости резания; K_o – коэффициент, учитывающий влияние подачи воды или водных растворов в зону взаимодействия резца с породой; $K_{t/h}$ – коэффициент, учитывающий влияние соотношения шага резания t и толщины стружки h ; K_d – коэффициент, учитывающий влияние диаметра твердосплавной вставки; K_m – коэффициент,

учитывающий влияние твердости державки; a – абразивность горной породы, мг; $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы при одноосевом сжатии, МПа.

$$\Delta_{пл} = (0,0001 \cdot \sigma_{сж} - 0,0175) \cdot d^2 + (-0,0058 \cdot \sigma_{сж} + 1,19) \cdot d, \quad (1.16)$$

где d – диаметр твердосплавной вставки, мм.

Для продольно-осевых режущих коронок

$$K_v = 0,24 \cdot V + 0,754, \quad (1.17)$$

где V – скорость резания, м/с.

$$K_{t/h} = \frac{0,27t}{K_{\Gamma} \operatorname{tg} \phi h^{0,5}}, \quad (1.18)$$

где K_{Γ} – коэффициент, учитывающий влияние геометрии резца; $\operatorname{tg} \phi$ – показатель хрупко-пластических свойств горной породы.

$$K_m = -0,0012 \cdot T^2 + 0,066 \cdot T + 0,55, \quad (1.19)$$

где T – твердость HRC державки резца.

$$K_{\Gamma} = K_d K_{\alpha} K_r K_{\gamma}, \quad (1.20)$$

где K_{α} – коэффициент, учитывающий влияние угла при вершине твердосплавной вставки; K_r – коэффициент, учитывающий влияние радиуса скругления вершины вставки; K_{γ} – коэффициент, учитывающий влияние формы головки державки.

$$K_d = 0,07d + 0,38, \quad (1.21)$$

$$K_{\alpha} = 0,00036 \alpha^2 - 0,043 \alpha + 2, \quad (1.22)$$

где α – угол при вершине твердосплавной вставки, град.

$$K_r = 0,115r + 0,98, \quad (1.23)$$

где r – радиус скругления вершины твердосплавной вставки, мм.

$$K_{\gamma} = 0,0033 \gamma + 0,8, \quad (1.24)$$

где γ – угол при вершине головки державки, град.

$$h = \frac{P_z - 4,9 K_{\Gamma} K_{хп} K_{тр} K_{об} \sigma_{сж}^{0,94}}{0,353 K_{\Gamma} K_{хп} K_{тр} K_{об} \sigma_{сж}^{0,94} t}, \quad (1.25)$$

где P_z – усилие резания, Н; $K_{хп}$ – коэффициент, учитывающий влияние хрупкопластических свойства пород; $K_{тр}$ – коэффициент, учитывающий

влияние трещиноватости пород; $K_{об}$ – коэффициент, учитывающий влияние обнажения забоя.

$$P_z = \frac{2M_{уст}}{Dn_z}, \quad (1.26)$$

где $M_{уст}$ – устойчивый момент асинхронного двигателя, приведенный к исполнительному органу (коронке), Нм; D – средний диаметр коронки, м; n_z – число резцов активной части коронки, одновременно контактирующей с забоем.

$$M_{уст} = \frac{M_{\max} K_{см} i \eta}{1 + 2\nu_{дв}}, \quad (1.27)$$

где $M_{\max}$ – максимальный момент, развиваемый электродвигателем, указанный в его технической характеристике, Нм; $K_{см}$ – коэффициент снижения момента, учитывающий сопротивление шахтной сети и отношение номинальных мощностей двигателя и трансформатора; i – передаточное число редуктора; η – к.п.д. редуктора; $\nu_{дв}$ – коэффициент вариации нагрузки двигателя.

Для случая, когда интенсивности изнашивания державки и твердосплавной вставки соизмеримы, на величину $L_{пд}$ начинает влиять и изменение высоты вставки в процессе изнашивания, что необходимо учитывать при расчете длины пути резца до выхода его из строя и удельного расхода резцов Z . В работах [14, 70] способ учета данного влияния не описан, но приводится зависимость отношения интенсивностей изнашивания твердосплавной вставки $\psi_{\Delta\sigma}$ и державки $\psi_{\Delta\delta}$ от абразивности разрушаемой породы (рисунок 1.16)

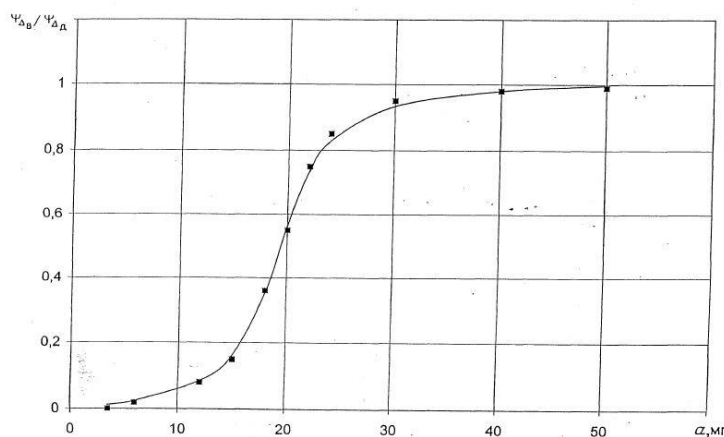


Рисунок 1.16 – График зависимости $\psi_{\Delta в} / \psi_{\Delta д} = \varphi(\alpha)$

Использование методики [14, 70] позволяет производить расчет удельного расхода поворотных резцов определенного типа, используемых на конкретном проходческом комбайне в различных горно-геологических условиях.

Необходимо отметить, что формулы (1.15 – 1.27), используемые для расчета интенсивности изнашивания головки державки резца ($\psi_{\Delta д}$), мм/км, не позволяют оценить форму изношенного резца после его работы определенный промежуток времени, например, смену, что необходимо для диагностирования состояния резца и определения его дальнейшего ресурса.

1.10 Выводы по Главе 1

1. На основании анализа литературных данных сделан вывод, что наиболее эффективным из существующих способов разрушения пород продолжает оставаться способ резания. Ограничивающим фактором более широкого использования данного способа являются высокие прочность и абразивность разрушаемых пород.

2. Рассмотрены основные конструкции тангенциальных поворотных резцов, применяемых на проходческих и очистных комбайнах.

3. Проанализированы технология производства поворотных резцов и используемые материалы. Произведен расчет времени, затрачиваемого на основные технологические операции изготовления державки резца.

4. Обобщены основные способы повышения прочностных свойств и износостойкости материалов, применяемые в горном машиностроении.

5. Отмечено, что поверхностная твердость державки резцов, достигаемая при существующей технологии производства, обеспечивается только мартенситным превращением аустенита использованной среднеуглеродистой стали и не достигает по этой причине значительной величины, что является причиной ее недостаточной износостойкости.

6. Высказано предположение, что применение операции термомеханической обработки в технологии производства резцов приведет к повышению износостойкости их державок, увеличив тем самым срок службы резцов.

7. Проанализирован существующий метод оценки удельного расхода резцов и их износостойкости при разрушении горных пород.

8. Отмечено, что формулы, использованные в указанном методе, позволяют определить вылет оголенной части твердосплавной вставки над головкой державки в момент, непосредственно предшествующий поломке вставки, но не дают возможности оценить форму изношенного резца после работы определенный промежуток времени, что необходимо для диагностирования текущего состояния резца и определения его дальнейшего ресурса.

Глава 2. Анализ условий работы поворотных резцов и их отказов при разрушении горных пород. Разработка имитационной модели процесса изнашивания державки поворотного резца.

2.1 Условия работы поворотных резцов проходческих комбайнов и виды их отказов

Во время эксплуатации, резцы проходческих комбайнов воспринимают значительные нагрузки сжимающего и изгибающего характера, имеющие циклический характер действия, а также подвергаются интенсивному абразивному износу. Совокупное действие этих факторов приводит к постепенному исчерпыванию ресурса работы резцов и, в последующем, к их поломке. Во время работы резцов могут возникать как постепенные отказы (достижение предельной величины износа), так и внезапные (аварийные – поломки твердосплавной вставки и державки резца). Внезапные отказы появляются в двух случаях – возникновение пиковых нагрузок, превышающих допустимый уровень прочности резца, и в результате накопления повреждений усталостного характера и изнашивания, которые приводят к снижению прочностных характеристик инструмента [30, 44, 76, 77, 78].

При разрушении горной породы резцовым инструментом 4 (рисунок 2.1) образуется уплотненное ядро 1, взаимодействующее с зоной упругих деформаций 3 краевой части горного массива через зону смятия 2. Давление на грани резца имеет максимум вблизи режущей кромки (твердосплавной вставки) и резко убывает при удалении от нее по кривым гиперболического вида [77]. Процесс резания – это постоянное чередование контактного измельчения (дробления) с образованием ядра уплотнения и отделения (отрывов) мелких и крупных элементов разрушаемого материала. Процесс дробления на весьма мелкие фракции с образованием ядра в виде измельченных объемно сжатых угля или породы начинается при достижении

контактными напряжениями, сконцентрированными в малом объеме, предельных значений [77].

По мере перемещения резца происходят отрывы небольших элементов угля или породы, сопровождающиеся частичным выдавливанием мелкоизмельченного ядра вдоль передней грани. дальнейшее расширение области дробления, увеличение площади контакта резца с ядром приводит к отделению крупного элемента стружки (рисунок 2.1 – штриховая линия). При этом ядро действует как клин. Этапы отделения крупных элементов носят характер своеобразного взрыва: кусочки материала разлетаются, ядро разрушается, образуя пылевое облако.

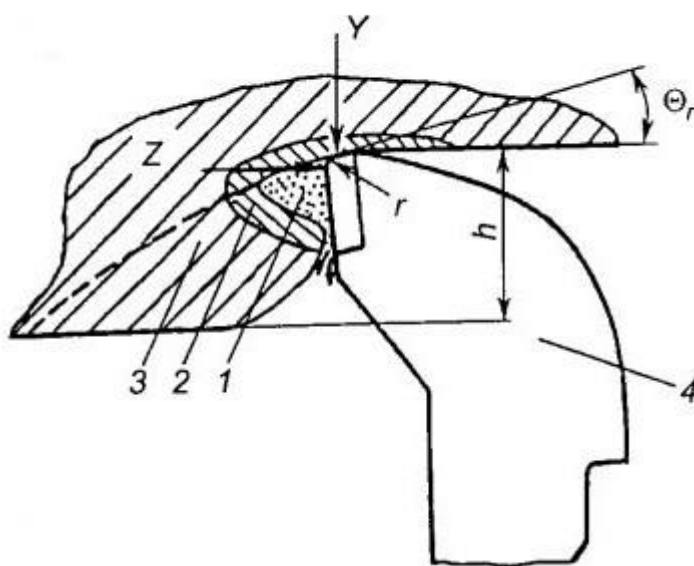


Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия неповоротного резца с массивом: 1 – уплотненное ядро (мелкодробленные фракции) в условиях объемного сжатия; 2 – зона смятия; 3 – зона упругого деформирования окружающих участков массива; 4 – неповоротный резец; Y – сила подачи; Z – сила резания.

Согласно [78], нарастание силы резания не носит плавного характера, а отличается случайными спадами. Таким образом, схема резания условно может быть представлена графиком рисунок 2.2.

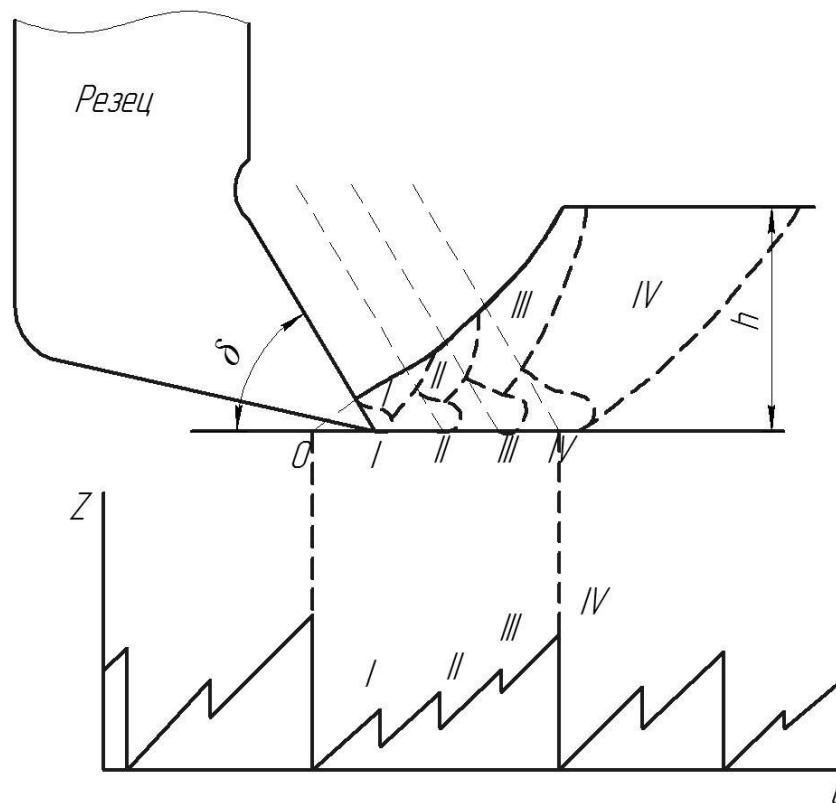


Рисунок 2.2 – Условная схема процесса резания угля и пород

Местные отрывы элементов *I*, *II* и *III* предшествуют отделению крупного элемента *IV*. В промежутках между местными отрывами элементов *I*, *II* и *III* продвижение резца в направлении скорости резания сопровождается одновременным развитием процесса дробления и удаления продуктов разрушения из ядра. Процесс сопровождается непрерывным увеличением площади контакта резца с массивом, ростом размера ядра и силы резания. Отрывы небольших элементов у вершины углового контура сопровождаются бурным выбросом мелкораздробленного угля (породы) ядра и быстрым уменьшением силы резания до величины, определяемой площадью контакта передней грани резца с разрушаемым массивом после отрыва. Сила резания в этом случае не уменьшается до нуля [78].

В настоящее время большая часть исполнительных органов проходческих комбайнов снабжается поворотными резцами, которые ввиду своей конструкции, не имеют четко выраженной режущей грани. Считается [79], что резание пород такими резцами происходит по аналогичной схеме,

только образующееся уплотненное ядро имеет меньшие размеры (рисунок 2.3).

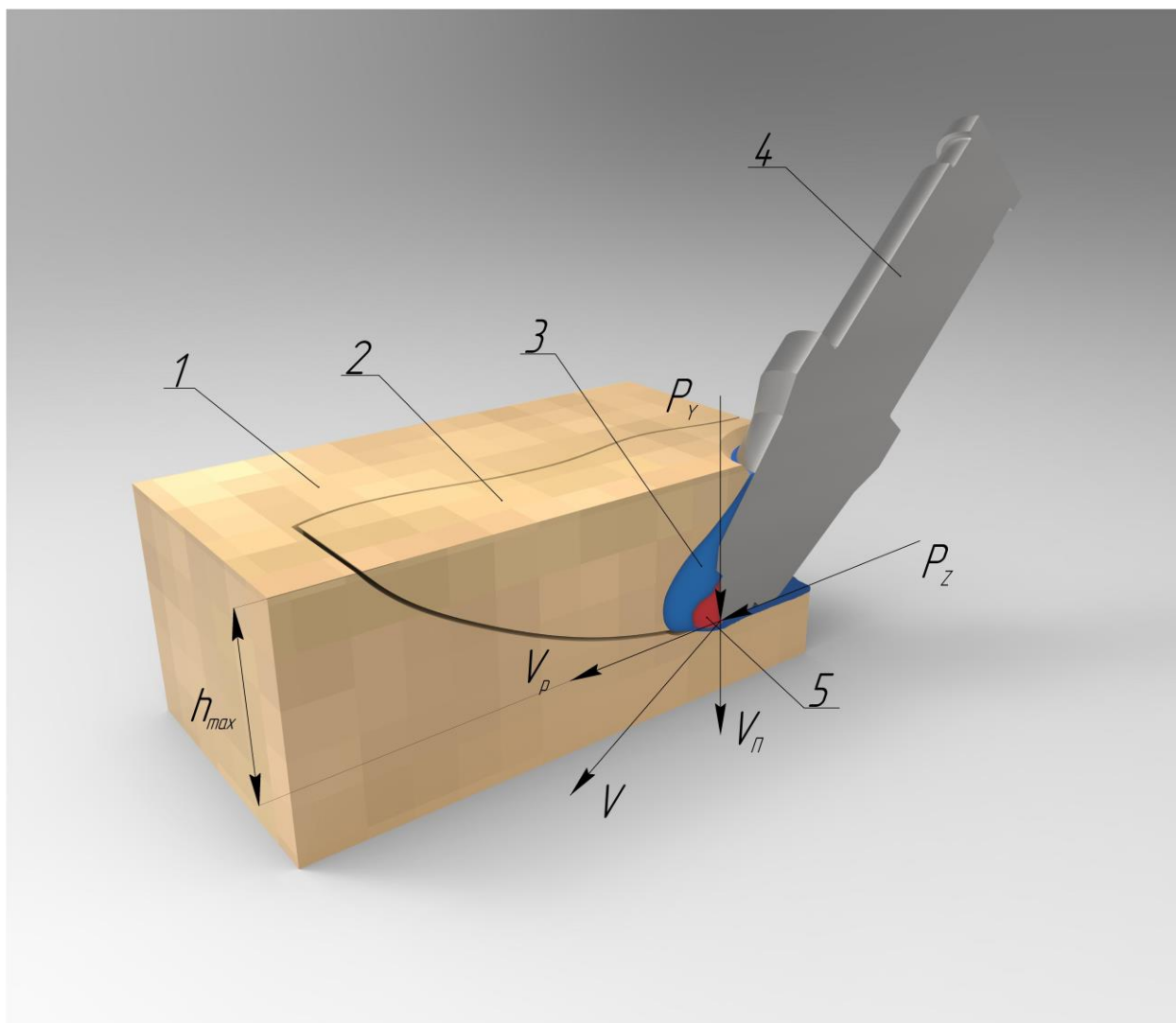


Рисунок 2.3 – Схема разрушения поворотным резцом породного массива: 1 – разрушаемый массив; 2 – зона упругого деформирования окружающих участков массива (крупный скол); 3 – зона смятия; 4 – поворотный резец; 5 – уплотненное ядро (мелкодробленные фракции) в условиях объемного сжатия; P_Y – сила подачи; P_Z – сила резания; V_P – вектор скорости резания; $V_П$ – вектор скорости подачи.

Взаимодействие горного массива и инструмента неизбежно приводит к изнашиванию последнего, механизм которого в литературе описан недостаточно. Авторами [79] отмечается, что при воздействии резца на массив породы (уголь), оказывающаяся перед острием инструмента, уплотняется, сминается и затем отрывается. Образуются в большом количестве мелкодисперсные частицы, пыль, а также сравнительно крупные

(10-50 мм и более) бесформенные фракции. Разрывающе-выкалывающее воздействие инструмента на массив ведет и к активной обратной реакции, вследствие чего наблюдается ускоренное разрушение головки державки, сопровождаемое фрикционным искрением.

Предполагается [78], что процесс износа державок поворотных резцов происходит аналогично изнашиванию резцов с плоской гранью. Образовавшееся в зоне контакта режущего инструмента с углем ядро мелкораздробленного, объемно сжатого угля (породы), препятствует дальнейшему продвижению резца. Поскольку процесс движения резца не прекращается, а пористость и трещиноватость массива недостаточны для обеспечения непрерывного продвижения резца в сторону массива без эвакуации продуктов дробления, часть этого сжатого ядра с большой скоростью «истекает» вдоль передней поверхности резца в сторону обнаженной поверхности забоя. Высокое напряжение, под которым находится раздробленный уголь (порода) ядра, приводит к тому, что его «истечение» через узкую щель сопровождается значительным трением как о неразрушенный уголь (породу), так и о резец (рисунок 2.4, в). Из рисунка 2.4 видно, что большую часть времени, с породой взаимодействует твердосплавная вставка и буртик поворотного резца. Таким образом, резание породы поворотным резцом сопровождается мгновенным появлением и разрушением ядра уплотнения, что вызывает износ инструмента.

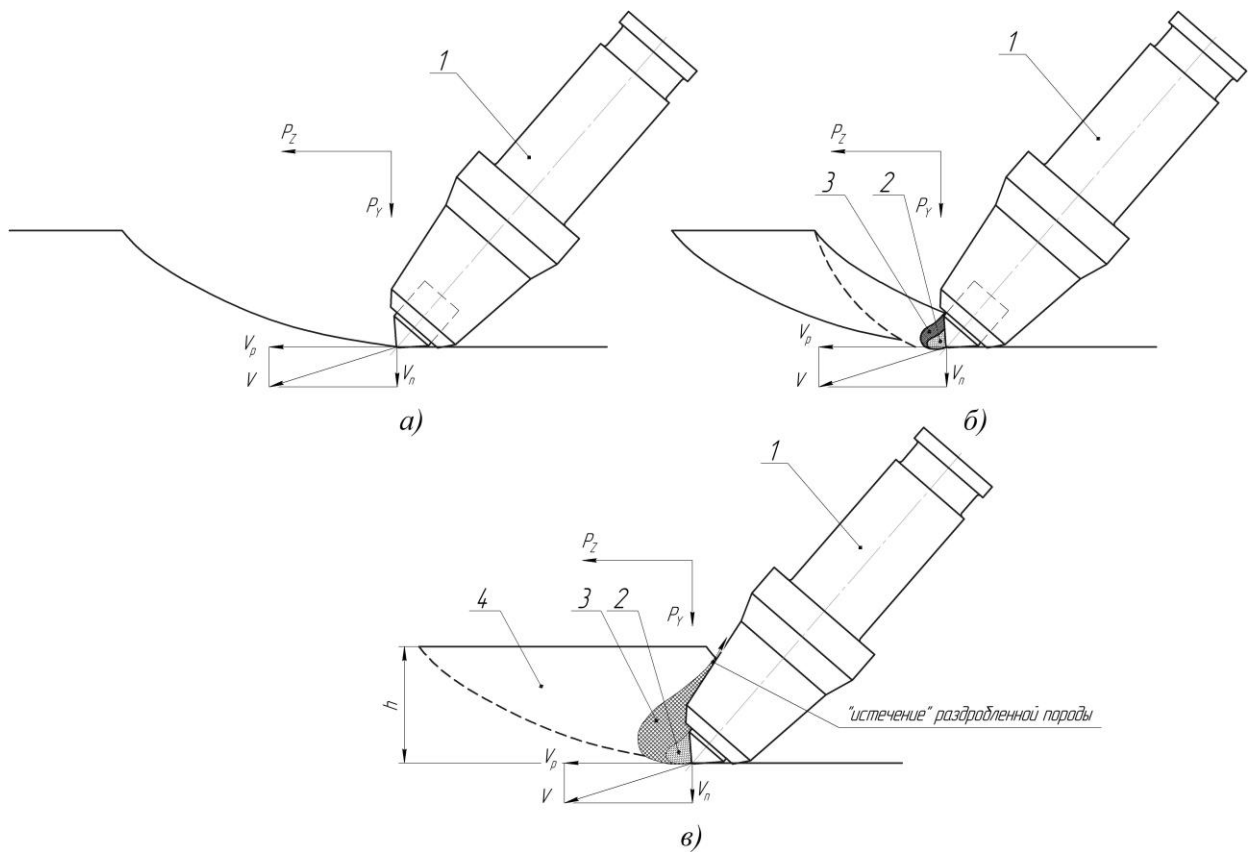


Рисунок 2.4 – Схема резания горного массива поворотным резцом в различные моменты времени при одном крупном сколе: 1 – поворотный резец; 2 – уплотненное ядро (мелкодробленные фракции) в условиях объемного сжатия; 3 – зона смятия; 4 – зона упругого деформирования окружающих участков массива (крупный скол); P_Y – сила подачи; P_Z – сила резания; V_p – вектор скорости резания; V_n – вектор скорости подачи.

К другой причине изнашивания инструмента можно отнести явление, происходящее в момент отрыва куска породы, после чего происходит поворот резца вокруг своей оси с износом вследствие трения скольжения. Реакция породы в различных точках резца не одинакова, что вызывает неравномерную интенсивность изнашивания (рисунок 2.5). На рисунке 2.5 приведены условные значения зон смятия и уплотнения в различных сечениях поворотного резца. Очевидно, что максимальные значения будут в центре осевой симметрии резца и в зоне образования уплотненного ядра. С увеличением износа головки державки зона ядра уплотнения расширяется в направлении вдоль оголенной части вставки, увеличивая тем самым в этом месте интенсивность изнашивания державки.

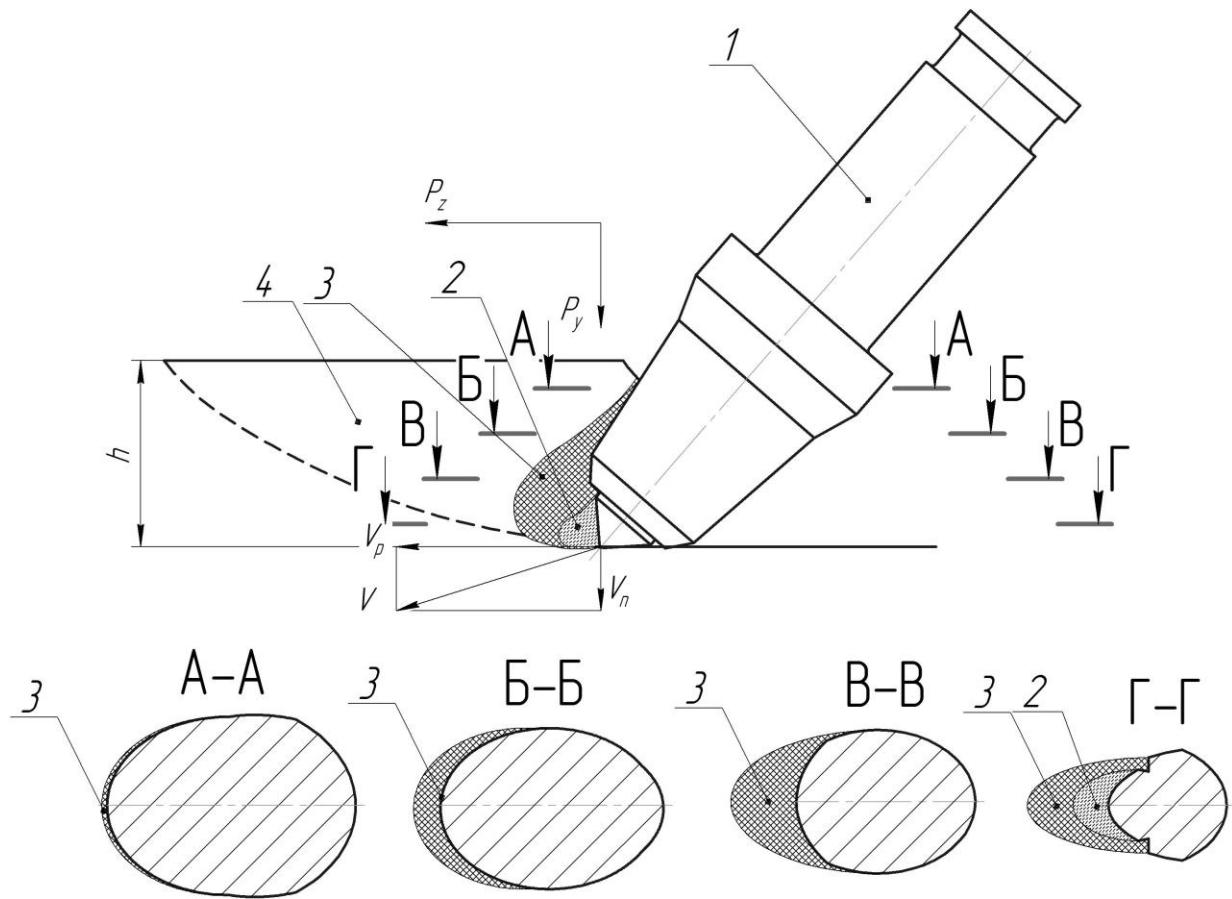


Рисунок 2.5 – Схема зон смятия 3 и уплотненного ядра 2 в момент крупного скола: 1 – поворотный резец; 2 – уплотненное ядро (мелкодробленные фракции) в условиях объемного сжатия; 3 – зона смятия; 4 – зона упругого деформирования окружающих участков массива (крупный скол); P_y – сила подачи; P_z – сила резания; V_p – вектор скорости резания; V_n – вектор скорости подачи.

Авторы [10] предполагают, что все горные породы, как изнашивающие среды, можно разделить на две группы. К первой относятся породы, состоящие из твердых зерен, связанных между собой мягким цементом, например, аргиллиты, алевролиты, каменные угли и известняки с примесью кварцевых зерен. При резании таких пород происходит вдавливание твердых зерен в цемент, его разрушение и уплотнение в подрезцовой зоне. Вторая группа пород состоит из зерен, расположенных вплотную друг к другу и связанных цементом. Характерными представителями таких пород являются прочные песчаники, кварциты и др. Их разрушение осуществляют в основном путем дробления твердых зерен. Соответственно, можно выделить три механизма изнашивания твердосплавной вставки:

- усталостный, когда твердость кобальтовой фазы твердосплавной вставки выше контактного давления твердых зерен породы;
- усталостно-абразивный, когда контактное давление зерен породы выше твердости кобальтовой фазы, но ниже твердости карбида вольфрама;
- абразивный (микрорезание), когда контактные давления зерен породы выше твердости зерен карбида вольфрама.

Исходя из вида резцов после эксплуатации, авторы [79] выделяют семь типов отказа поворотных резцов:

- износ твердосплавной вставки (рисунок 2.6 б);
- односторонний износ поворотного резца (рисунок 2.6 в);
- износ стальной державки (рисунок 2.6 г);
- поломка твердосплавной вставки (рисунок 2.6 д);
- выпадение твердосплавной вставки (рисунок 2.6 е);
- полный износ резца (рисунок 2.6 ж);
- поломка хвостовика (рисунок 2.6 з).

Такое разнообразие поломок резцов обуславливается условием их применения и зависит, в большинстве случаев, от горно-геологических свойств породы и конструктивных особенностей инструмента.

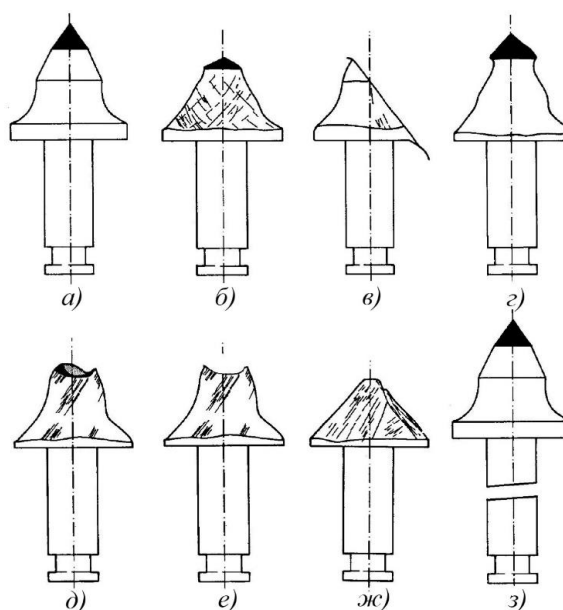


Рисунок 2.6 – Вид поворотного резца в исходном состоянии (а) и после различных видов отказа (б, в, г, д, е, ж, з)

В процессе эксплуатации нередко случаи потери резцов. Их причиной является несовершенство конструкции, технологии изготовления инструмента и средства крепления. Но в подавляющем большинстве случаев при нормальных условиях эксплуатации резцы выходят из строя в результате износа, который, по мнению [70], может принимать 4 основные формы (рисунок 2.7).

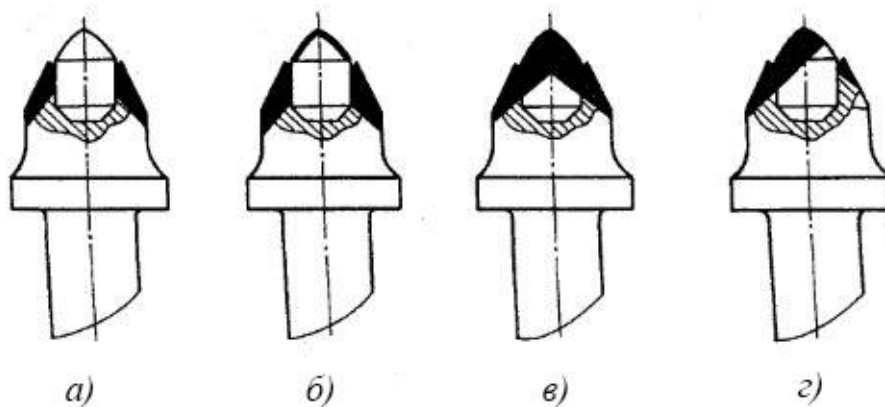


Рисунок 2.7 – Формы износа поворотных резцов: а) износ головки державки; б) неравномерный износ головки державки и твердосплавной вставки; в) равномерный износ головки державки и твердосплавной вставки; з) односторонний износ.

Характерная особенность первого вида износа (рисунок 2.7, а) заключается в том, что в процессе взаимодействия инструмента с горной породой изнашивается только головка державки, а износ твердосплавной вставки настолько незначителен, что им практически можно пренебречь. В результате изнашивания державки происходит постепенное обнажение («оголение») твердосплавной вставки. После достижения определенной высоты, величина которой зависит от параметров режима резания, наличия твердых включений, размеров твердосплавной вставки, происходит ее поломка (скол). Такая форма износа резцов наиболее характерна [70] при разрушении пород с небольшой прочностью (до $30\div 40$ МПа) и абразивностью (до $5\div 6$ мг).

Вторая форма износа (рисунок 2.7, б) отличается от первой тем, что в процессе разрушения пород происходит изнашивание не только головки

державки, но и твердосплавной вставки, однако с разной интенсивностью: головка державки изнашивается быстрее. Разница в интенсивности изнашивания может быть значительной, так как она зависит от прочности и абразивности разрушаемых пород. Такая форма износа характерна для пород с широким диапазоном прочности ($30 \div 90$ МПа) и абразивности (ориентировочно $6 \div 20$ мг). В этом случае наработка инструмента на отказ наиболее часто определяется поломкой твердосплавной вставки.

Характерная особенность третьей формы износа (рисунок 2.7, в) заключается в примерно одинаковой интенсивности изнашивания головки державки и твердосплавной вставки. В результате головка резца приобретает коническую форму, причем угол при вершине во многих случаях больше угла при вершине вставки в ее первоначальном виде. Резец выходит из строя при почти полном износе твердосплавной вставки. Эта форма износа наиболее часто встречается при разрушении пород с повышенной прочностью и абразивностью проходческими комбайнами тяжелого типа с высокой энерговооруженностью исполнительного органа.

На практике встречается и четвертая форма износа – односторонняя (рисунок 2.7, г). Ее образование обусловлено независимо от горно-геологических условий проходки заклиниванием хвостовика резца в отверстии резцедержателя. Обычно это происходит в результате попадания породной мелочи в зазор между отверстием в резцедержателе и хвостовиком инструмента. Возможны и другие причины, например, несоблюдение регламентированных допусков при изготовлении резцов и резцедержателей [70].

Автор [44] выделяет три типовых случая отказа поворотных резцов:

- достижение предельной величины износа режущей части резца, соответствующей тому моменту времени, когда в результате изнашивания головки державки резца полностью оголится твердосплавная вставка и произойдет ее выпадение (вымывание) (рисунок 2.8, а);
- поломка наиболее слабого элемента резца в результате действия пиковой нагрузки, превышающей прочностные показатели материала

(рисунок 2.8, б). Такие отказы обычно являются следствием допущенных ошибок при проектировании инструмента либо эксплуатации резцов в более тяжелых условиях, для которых они не предназначены;

– поломка режущей части резца в результате изнашивания, а также действия переменных нагрузок и накопления в материале усталостных повреждений (рисунок 2.8, в). По этой схеме формирования отказа начальный уровень прочности наиболее слабого элемента резца превосходит возможные пиковые нагрузки. Однако по мере накопления усталостных повреждений и изнашивания через определенный промежуток времени (или пути резания) прочностные характеристики резца станут соизмеримы с действующими нагрузками. Тогда поломка инструмента может произойти при любом крупном сколе породы.

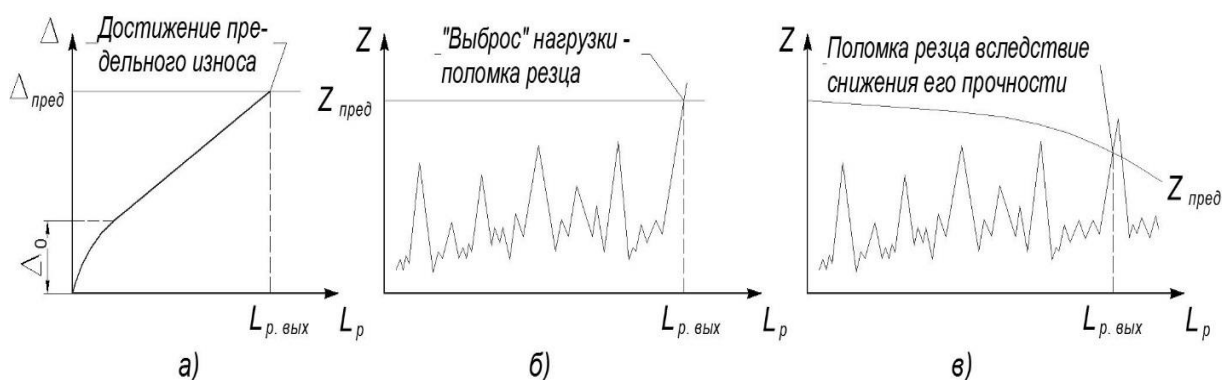


Рисунок 2.8 – Схема типовых случаев отказа: а) достижение предельной величины износа режущей части резца; б) поломка наиболее слабого элемента резца в результате действия пиковой нагрузки; в) поломка режущей части резца в результате изнашивания. Δ – величина износа, Z – действующая нагрузка, L_p – пройденный путь резания.

При большой глубине резания, характерной для разрушения пород небольшой прочности и абразивности, интенсивно изнашивается материал именно головной части резца (рисунок 2.9) [16].



Рисунок 2.9 – Вид поворотных резцов после эксплуатации: а) зарубежный производитель (*Alpine*); б) отечественный производитель (ОАО «Горный инструмент» резец РШ 32-70/16SK).

Дальнейшая эксплуатация резцов с износом такой формы приводит к выламыванию (выпадению) твердосплавной вставки и дальнейшему одностороннему или равномерному износу головной части державки резца (рисунок 2.10) [81].

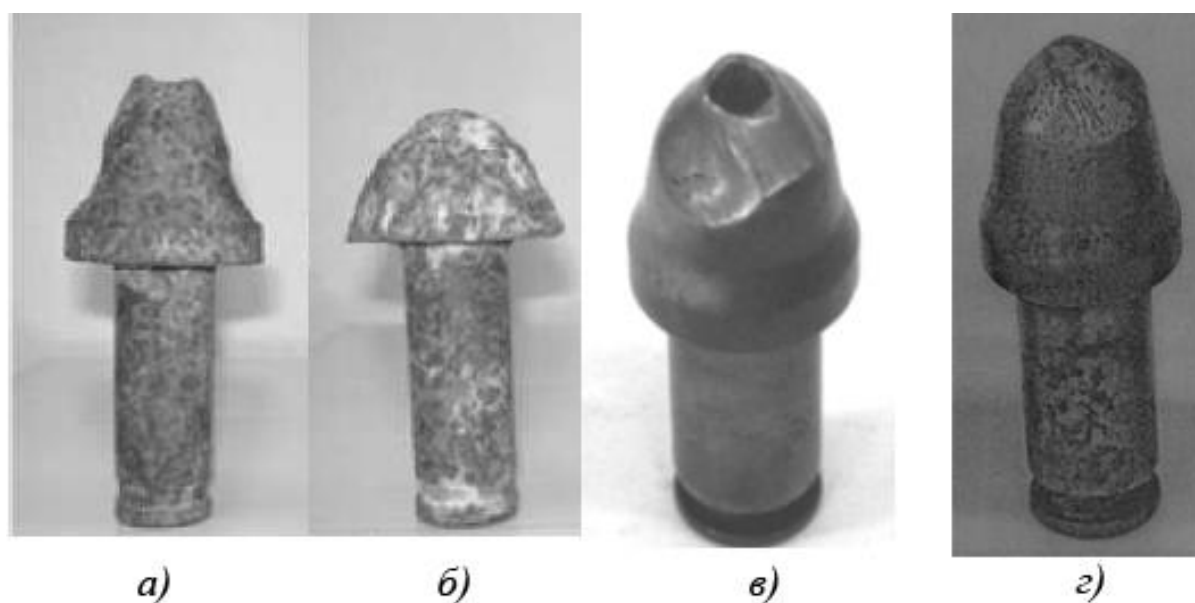


Рисунок 2.10 – Вид поворотных резцов после отрыва твердосплавной вставки: а, б) зарубежный производитель (*Alpine*); в, г) отечественный производитель (ОАО «Горный инструмент» резец РШ 32-70/16SK).

При высокой прочности и абразивности пород, а также высокой энерговооруженности проходческих комбайнов износу подвергается как

твердосплавная вставка, так и головная часть державки примерно с одинаковой скоростью (рисунок 2.11) [81].

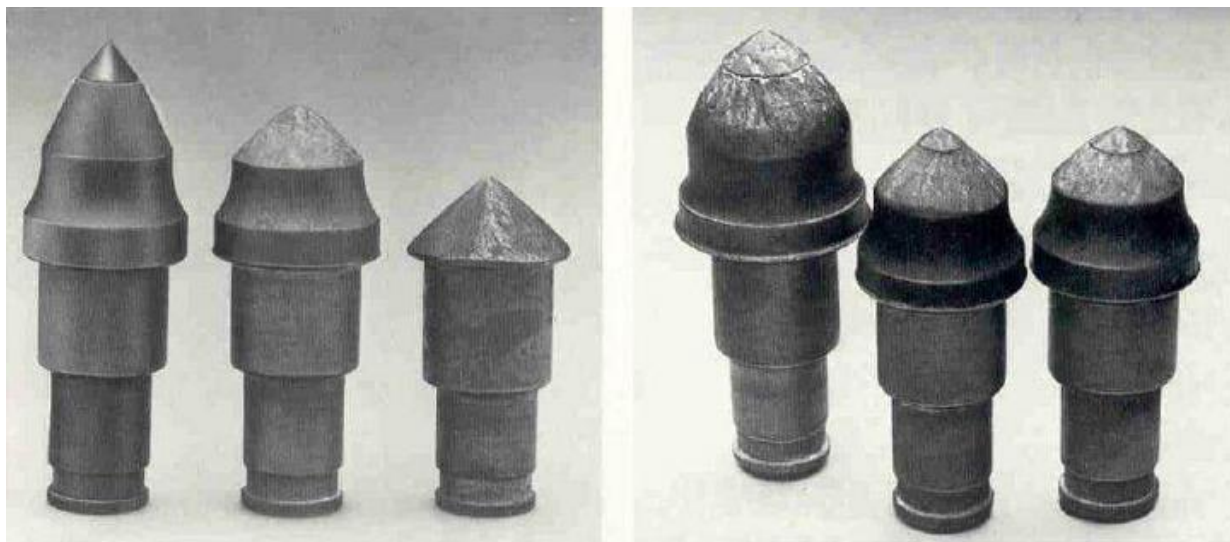


Рисунок 2.11 – Вид поворотных резцов после эксплуатации по породам высокой прочности и абразивности на комбайнах высокой энерговооруженности

При разрушении пород возможно попадание мелких фракций горной породы в зазор между хвостовиком резца и его резцедержателем, в результате чего происходит нарушение вращения резца вокруг оси и последующий его односторонний износ (рисунок 2.12) [81].



Рисунок 2.12 – Вид поворотных резцов с односторонним износом

При несоблюдении режимов эксплуатации поворотных резцов могут происходить поломки наиболее слабых элементов резца в результате

внезапных пиковых нагрузок, вызванных различными прочными включениями (линзы, прослойки). К ним могут относиться как поломки твердосплавных вставок (рисунок 2.13, *а*) так и хвостовиков в месте сопряжения с головной частью (рисунок 2.13, *б*) [16, 44].



Рисунок 2.13 – Общий вид поворотных резцов после действия пиковых нагрузок:
а) поломка твердосплавной вставки (совместно со сколом в головной части державки);
б) поломка хвостовика в месте сопряжения с головной частью.

По мнению [82] одной из причин отказа резцов являются повреждения в твердосплавной вставке и державке резца, возникающие в результате малоцикловых нагрузок при повышенных температурах, развивающихся в месте контакта резца и массива в результате трения. При этом ввиду непостоянного контакта резца с массивом создаются перепады температур, приводящие к изменениям внутренних напряжений в поверхностном слое сплава и создающие предпосылки для развития усталостных явлений. Дополнительным фактором является образование на поверхности твердых пленок окислов, имеющих сравнительно невысокие прочностные характеристики. Совмещение образования и разрушения таких пленок в определенных условиях работы резцов вызывает протекание специфического коррозионно-механического процесса изнашивания. Все эти параметры

вызывают процесс выкрашивания твердосплавного сплава (рисунок 2.14) [16].

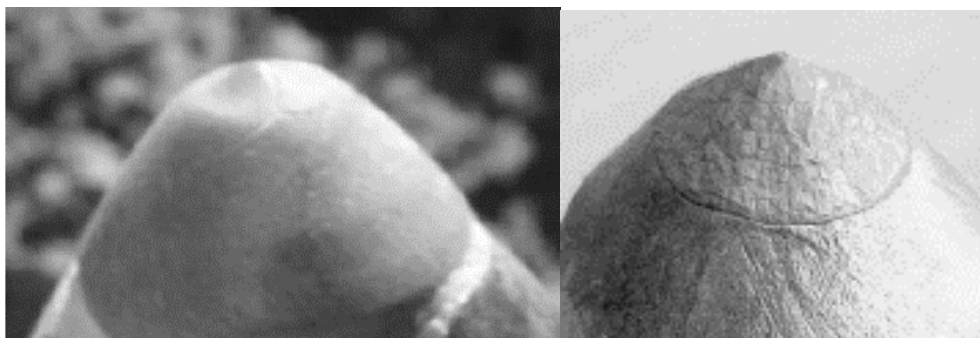


Рисунок 2.14 – Вершина режущей вставки резца со следами выкрашивания

Немаловажную роль на причину отказа поворотных резцов оказывает режим эксплуатации самого комбайна. Так при работе проходческих комбайнов избирательного действия возможны значительные по амплитуде колебания скорости подачи исполнительного органа, возрастающие с увеличением длины стрелы комбайна. Они могут быть вызваны как неравномерностью движения исполнительного органа по забою, так и неоднородностью разрушаемого массива. Это, в свою очередь, приводит к случайным отклонениям толщины среза от ее значения, соответствующего средней скорости подачи. В результате резцы исполнительного органа даже при относительно малой средней скорости подачи, но при ее максимальной амплитуде, внедряются в массив до резцедержателей, что приводит к интенсивному износу кулаков, затиранию форсунок, излому твердосплавных вставок при встрече резцов с твердыми включениями. Поломка твердосплавных вставок в таком случае носит случайный характер во времени и не всегда является следствием износа головки резца.

Любая поломка вставок вызывает последующий прогрессивный износ державок, как правило, с образованием одной, двух, трех, реже пяти плоскостей (рисунок 2.15), что связано с неустойчивым вращением и заклиниванием резцов. Образование плоскостей износа в свою очередь резко увеличивает нагрузки на резцах, динамику нагрузок стреловидного

исполнительного органа, приводящих в дальнейшем к выходу из строя трансмиссии их электроприводов, а, следовательно, и скорость выработки ресурса комбайна в целом [83]. Как отмечают авторы [16, 84], при поломке первых резцов в заходе начинается так называемая «цепная реакция» выхода из строя резцов. Такой эффект был запечатлен и описан в работе [84] при промышленном испытании комбайна 4ПП-2М на руднике «Ангидрит» Заполярного филиала ГМК «Норильский никель».



Рисунок 2.15 – Общий вид резцов РШ33-85/17,5 с образовавшейся плоскостью износа после поломки твердосплавной вставки

Соблюдение скоростного режима резания горного массива также является актуальной проблемой в вопросах изнашивания инструмента. Работы по установлению влияния скорости резания на изнашивание резцов проводились в ИГД им. Скочинского, научно-исследовательском центре *DMT* (Германия), компании «*First Alpine*» (Австрия), Новочеркасском политехническом институте и других организациях [10, 13, 14, 30, 39, 40, 70, 82]. В них, в частности, было установлено, что изменение скорости резания V в диапазонах, определяемых существующими конструкциями комбайнов, практически не оказывает прямого влияния на силовые показатели процесса разрушения пород, но существенно сказывается на интенсивности изнашивания инструмента ψ_{Δ} (рисунок 2.16): до определенной скорости резания (критической) интенсивность изнашивания возрастает прямо

пропорционально ей, а затем гораздо быстрее с катастрофической стадией износа резца. Такой вид кривой изнашивания обусловлен тем, что в процессе резания в результате трения о породу температура в рабочей части твердосплавной вставки достигает критической величины, величина которой зависит от абразивности и прочности породы, параметров резца и резцедержателя, подачи охлаждающей жидкости в зону взаимодействия инструмента с разрушающей средой и др., превышение которой приводит к значительному снижению прочности твердого сплава и его разрушению. Для вольфрамокобальтовых сплавов, применяемых в поворотных резцах, величина критической температуры составляет $600 \div 700$ °C [1].

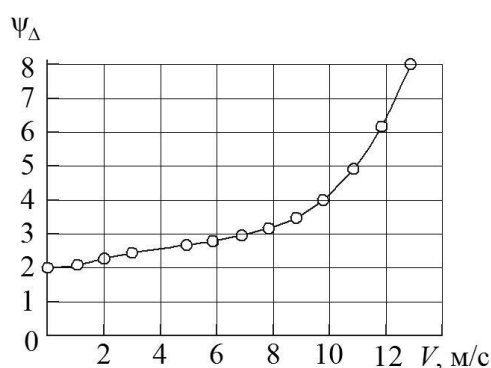


Рисунок 2.16 – Зависимость интенсивности изнашивания инструмента ψ_{Δ} от скорости резания V

Зачастую, при проведении проходческих работ продолжается дальнейшая эксплуатация изношенных резцов, когда поломана или вообще отсутствует твердосплавная вставка [74]. При этом резание осуществляется державкой резца, вследствие чего действующие на инструмент усилия возрастают до двух раз [75]. В свою очередь это приводит к таким негативным явлениям, как повышение энергоемкости процесса отбойки породы, усиление динамики работы исполнительного органа, снижение производительности и ресурса проходческой машины. Поэтому резцы, достигшие такого состояния, считаются уже вышедшими из строя и требуют незамедлительной замены.

2.2 Анализ причин отказа поворотных резцов при их эксплуатации

Вопросы определения долговечности резцов рассматривались в ряде работ [14, 39, 40 и др.]. Так, в одной из последних [44], на основе анализа геометрических параметров резцов, характера взаимодействия резца и массива, горно-геологических условий была разработана математическая модель, описывающая процесс выхода поворотного резца из строя в результате одновременного действия на инструмент циклических сжимающее-изгибающих нагрузок и изнашивания составных частей резца, которая положена в основу методики расчета долговечности резцов и установления причины выхода их из строя. Выведены формулы для расчета напряжений, действующих в опасных сечениях твердосплавной вставки и державки резца, на основании которых разработаны методы расчета статической и усталостной прочности. Высказано и обосновано предположение, что усталостные поломки поворотных резцов связаны с накоплением в его составных частях усталостных микрповреждений, интенсивность появления которых соразмерна действующим в сечениях напряжениям.

С использованием разработанной методики на примере 3 марок поворотных резцов, различающихся диаметром твердосплавной вставки ($d = 12$ мм, 15 мм и 19 мм, соответственно) и геометрическими параметрами режущей части, в [44, 85] проанализировано влияние контактной прочности P_k и показателя абразивности a разрушаемой породы на наработку резцов до отказа (пройденный путь резания L). Расчеты проведены с режимными и установочными параметрами, характерными для работы проходческих комбайнов [80]:

- скорость резания $V_p = 1$ м/с,
- средняя толщина срезаемой стружки $h = 20$ мм,
- угол установки резца в резцедержателе $\theta = 45^\circ$.

Шаг резания для каждого случая выбирался таким, что бы процесс разрушения породы осуществлялся в оптимальном режиме (с наименьшими удельными энергозатратами). Интенсивность изнашивания по высоте головки державки резца, как функция от крепости и абразивности разрушаемой породы, рассчитывалась по формуле из [70].

В результате расчетов для анализируемых типоразмеров резцов были получены близкие по внешнему виду графические зависимости $L = f(P_k, a)$ (рисунок 2.17).

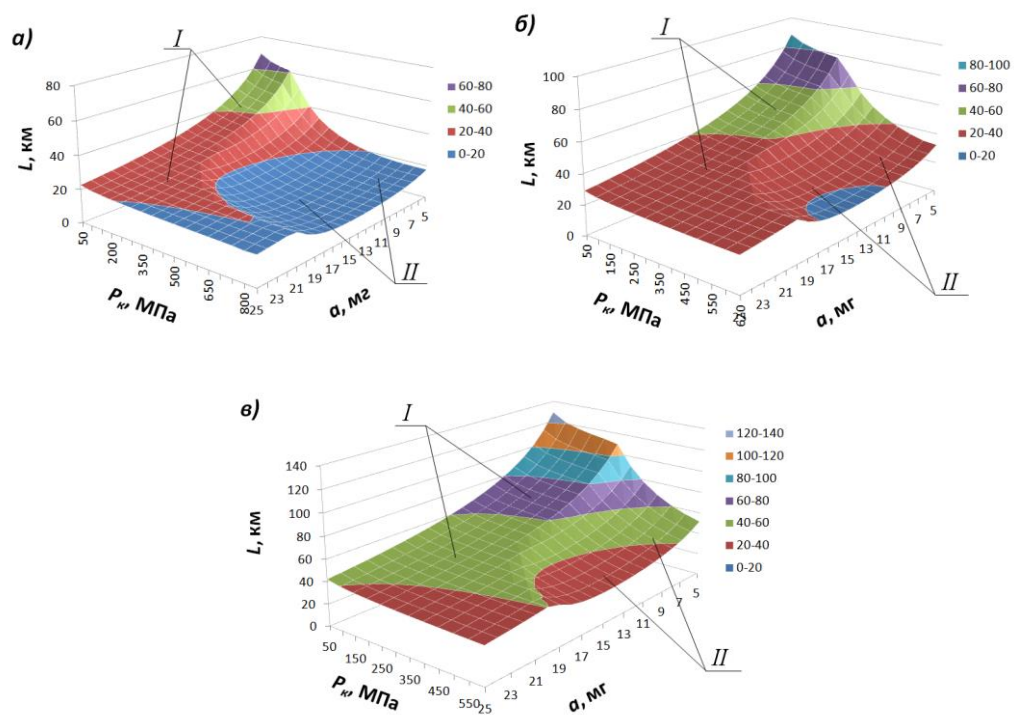


Рисунок 2.17 – Зависимость пройденного пути резания от контактной прочности P_k и показателя абразивности a породы при работе тангенциальных поворотных резцов с диаметром вставки 12 мм (а), 15 мм (б) и 19 мм (в).

На графиках авторы [44, 85] отмечает две характерные зоны. В зоне I выход резца из строя обусловлен достижением предельной величины износа стальной головки державки, сопровождаемым полным оголением твердосплавной вставки и ее выламыванием по месту контакта торца вставки с державкой. Как следует из вида графиков рисунка 2.17, такой вид отказа соответствует работе резца при разрушении слабых пород ($P_k < 200 \div 300$ МПа)

независимо от абразивности, прочности которых недостаточно для возникновения усилий, способных вызвать поломку составных частей резца, либо при разрушении более прочных с абразивностью a , превышающей $15 \div 17$ мг, т. к. в этом случае более интенсивно начинает изнашиваться твердосплавная вставка резца и ее вылет над головкой державки за время эксплуатации инструмента не достигает критической величины $l'_{пред}$.

В зоне II выход резца из строя обусловлен поломкой твердосплавной вставки в результате ее оголения на некую критическую величину $l'_{пред}$, при которой напряжения, возникающие во вставке под действием пиковых усилий, превысят предел прочности твердого сплава. При этом происходит резкое снижение долговечности инструмента (уменьшение величины L).

Наличия зоны, соответствующей разрушению вставки в результате циклических напряжений (усталости), результаты расчета [44] не показали.

Из анализа результатов расчетов авторы [44, 84] намечают возможные меры совершенствования поворотных резцов. Одной из наиболее эффективных таких мер является повышение износостойкости головки державки. Это позволит увеличить долговечность инструмента, работающего в условиях I и II зон, кроме того, приведет к уменьшению зоны II, т. е. поломка вставки будет происходить при работе на более крепких породах. Это можно достичь, например, применением взамен традиционных материалов державок (сталей 30ХГСА, 35ХГСА) более износостойких сплавов, нанесением на поверхность головки державки износостойких покрытий, размещением в верхней части головки державки твердосплавных элементов. По такому пути пошли ведущие производители горно-режущего инструмента, расширив в последние годы номенклатуру выпускаемых поворотных резцов за счет типоразмеров с подобными улучшениями.

Долговечность резцов, выходящих из строя по причине поломки их армировки (т. е. работающих в условиях зоны II) может быть увеличена путем повышения прочности твердосплавной вставки [44, 85].

Результаты расчетного анализа подтверждаются результатами [16, 83] промышленных испытаний опытных партий тангенциальных поворотных резцов типа РШ производства ООО «Горный инструмент» с геометрическими параметрами близкими к анализируемым, проведенными на шахтах ОАО «Воркутауголь». В Таблице 2.1 указаны условия испытания резцов, на рисунке 2.18 – их результаты.

Таблица 2.1 – Техническое вооружение и горно-геологические условия испытания поворотных резцов на шахтах ОАО «Воркутауголь»

Шахта	Выработка	Вмещающие породы	Комбайн	Резец	Уд. расход, шт./м ³
Воргашорская	Вентиляционный штрек 233-го пласта «Мощный»	Уголь с прослойками мелкозернистого авлевролита и аргиллита $f = 2 \div 7$ и твердыми включениями $f = 5 \div 8$	1ГПКС	РШ25-65/12SK	0,013
Заполярная	Магистральный конвеерный уклон №1	Уголь с прослойками пород $f = 2 \div 7$ абразивностью до 18 мг и твердыми включениями $f = 7 \div 10$ большой протяженности	КСП-43	РШ33-85/17,5	0,207
Заполярная	Лава 834-ю пласта «Тройной»	Уголь с прослойками пород $f = 2 \div 5$	К500Ю	РШ32-70/12SK	0,452*

* – шт/т.т.

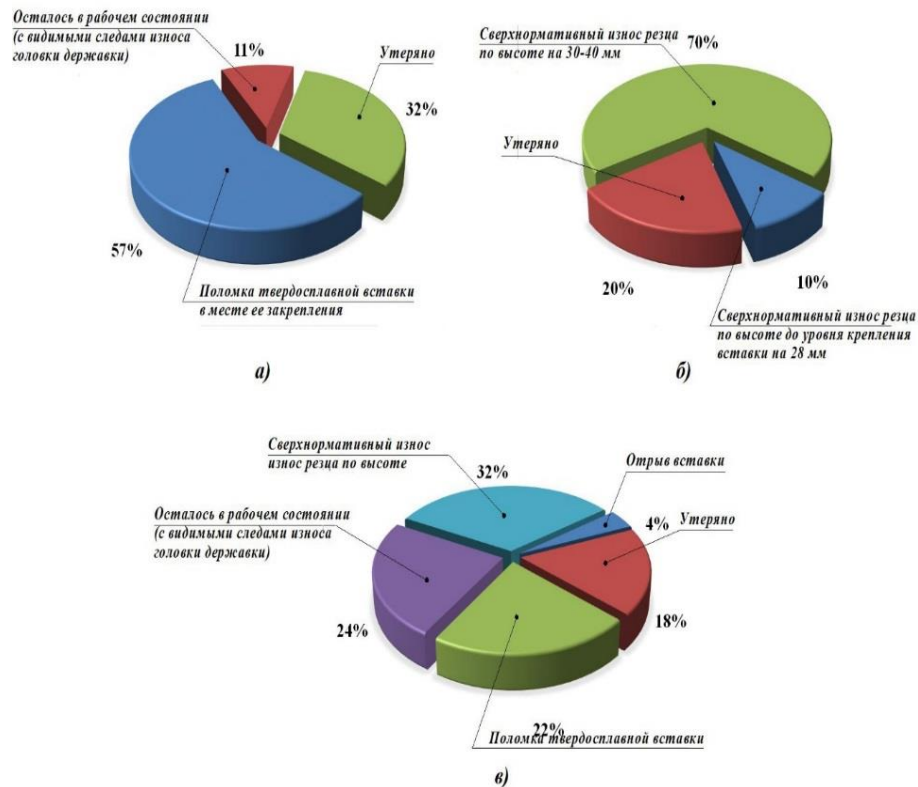


Рисунок 2.18 – Результаты промышленных испытаний опытных партий поворотных резцов:

а) РШ25-65/12SK ($d = 12$ мм), f до 4, a до 15 мг; б) РШ33-85/17,5 ($d = 17,5$ мм), $f = 6 \div 9$, a свыше 18 мг; в) РШ32-70/16SK ($d = 16$ мм), уголь $\sigma_{сж} = 14,1$ МПа, попутные породы $\sigma_{сж} = 43,0$ МПа.

Анализ актов испытаний позволил заключить, что наиболее вероятными причинами отказов резцов являлись:

- при работе по породам средней крепости и абразивности – поломка оголенной твердосплавной вставки в месте ее закрепления в державке (рисунок 2.18, а);

- при работе по породам повышенной крепости и абразивности – достижение предельно допустимого уровня износа головки державки (рисунок 2.18, б);

- при работе по углю прочностью $\sigma_{сж} = 14,1$ МПа с присечкой более прочных пород ($\sigma_{сж} = 43,0$ МПа) – достижение предельно допустимого уровня износа головки державки и поломка твердосплавной вставки (рисунок 2.18, в).

Подобные результаты были получены авторами [87, 88] и при испытании поворотных резцов на шахтах Кузнецкого угольного бассейна, где основную долю вмещающих пород составляют породы средней крепости ($\sigma_{сж} \sim 40 \div 70$ МПа). Сведения о горно-геологических условиях выемочных участков и удельном расходе резцов в процессе испытаний [86] представлены в таблице 1.4. И в этом случае, согласно [88, 88], основной причиной выхода резцов из строя являлся износ державки с последующим выламыванием твердосплавной вставки (рисунок 2.19). В работе [16] так же отмечается, что на резцах с изношенными державками, но не изношенными вставками, на вставках наблюдается сеть мелких трещин, свидетельствующих об накопленных усталостных повреждениях.

Таблица 2.2 – Горно-геологические условия выемочных участков, техническое вооружение и расход резцов при испытаниях [16]

Предприятие	Пласт, лава	Вмещающие породы	Комбайн	Резец	Уд. расход, шт./т.т.
Комсомольская	«Бреевский» №1726	Угольные пачки $f = 1,2$ мощностью 2,72 м, мелкозернистые алевролиты $f = 2 \div 3$	К500Ю	РШ32-70/16SK	0,52
Комсомольская	«Бреевский» №1726	Угольные пачки $f = 1,2$ мощностью 2,72 м, мелкозернистые алевролиты $f = 2 \div 3$	К500Ю	РШ32-70/16	0,92
Комсомольская	«Бреевский» №1726	Угольные пачки $f = 1,2$ мощностью 2,72 м, мелкозернистые алевролиты $f = 2 \div 3$	К500Ю	РШ32-70/12BL	1,86
Октябрьская	«Полысаевский 1» № 996	Угольные пачки $f = 1,2$, алевролиты $f = 2 \div 3$, «колчеданы» $f = 8$	К500Ю	РШ32-70/16	1,23 (0,6 – утеряно)

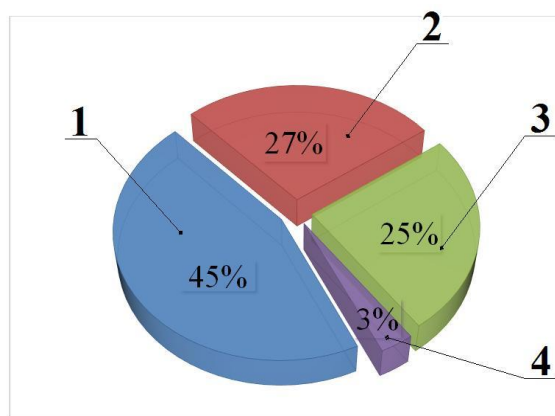


Рисунок 2.19 – Диаграмма распределения отказов поворотных резцов по данным [16]: 1 – износ державки односторонний с последующим выломом режущей вставки; 2 – износ державки равномерный; 3 – потери резцов; 4 – излом державки.

В таблице 2.3 приведены сведения [16] о горно-геологических условиях, техническом вооружении и расходе резцов при работе проходческих комбайнов на других шахтах Кузнецкого угольного бассейна (сведения о причинах выхода резцов из строя в [16] не приводятся).

Таблица 2.3 – Техническое вооружение и горно-геологические условия выемочных участков угледобывающих предприятий

Предприятие	Пласт, лава	Вмещающие породы	Комбайн	Резец	Уд. расход, шт./т.т.
1	2	3	4	5	6
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
Романовская -1	«Абрамовский» №2	Мощность 1,8 м, крепость $f = 1-1,5$, 21% песчаника $f = 4-5$	K500Ю	РШ32-70/18SK	89,1
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
Комсомолец	«Бреевский» № 1726	Мощность 2,72 м, уголь крепость $f = 1,5$, прослойки алевролита $f = 2-3$	K500Ю	РШ32-70/16SK	0,52
Заречная	«Полысаевский 2» № 804	Мощность 4,0 м, уголь крепость $f = 1,5$, включение породы $f = 2$	MB12	РШ32-70/16	1,7

продолжение таблицы 2.3					
1	2	3	4	5	6
Октябрьская	«Полысаевский 1» № 996	Мощность 2,15-2,36 м, уголь крепость $f = 1,2$, «колчеданы» $f = 8$	K500Ю	РШ32-70/16	2,97

Видно (таблица 2.3), что с увеличением процентного содержания и крепости вмещающих прослоек удельный расход резцов повышается.

Как указывается в работе [44, 85] при переходе к крепким породам возрастает доля отказов, обусловленных износом и поломкой твердосплавной вставки резца. Такой вывод находится в соответствии со статистикой [80] выхода из строя резцов, установленных на проходческом комбайне *Atlas Copco Eickhoff ET 120*, при строительстве тоннеля *Zeulenroda* через массив, состоящий из кварцитов и песчаника с пределом прочности до 140 МПа и 70 МПа, соответственно (рисунок 2.20).

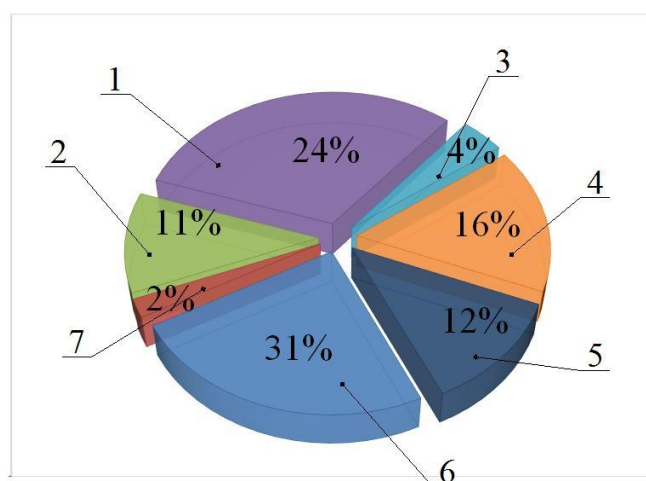


Рисунок 2.20 – Характерные поломки поворотных резцов, наблюдавшиеся при строительстве тоннеля *Zeulenroda*: 1 – полный износ резца; 2 – износ вставки; 3 – износ державки; 4 – поломка вставки; 5 – выпадение вставки; 6 – односторонний износ; 7 – поломка хвостовика.

Таким образом, как свидетельствуют результаты расчетов, подкрепленные результатами промышленных испытаний, при работе проходческих комбайнов по породам малой и средней крепости и абразивности основной причиной выхода их поворотных резцов из строя

является износ стальной державки резца, приводящий к оголению твердосплавной вставки и ее выламыванию или поломке.

2.3 Разработка имитационной модели процесса изнашивания поворотного резца проходческого комбайна при разрушении горных пород различной прочности

В главе 1 проанализирован существующий метод оценки удельного расхода резцов и их износостойкости при разрушении горных пород. Отмечено, что формулы, использованные в указанном методе, не позволяют оценить форму изношенного резца после его работы определенный промежуток времени, что необходимо для диагностирования текущего состояния резца и определения его дальнейшего ресурса. Для решения этой задачи была разработана представленная ниже имитационная модель процесса изнашивания резца.

На основании визуального осмотра тангенциальных поворотных резцов, проработавших по породам средней крепости и абразивности до момента, непосредственно предшествующего выламыванию их твердосплавной вставки, сделан вывод, что изношенная часть резца, вне зависимости от породы, имеет практически один и тот же вид, представленный на рисунках 2.9, 2.21.



Рисунок 2.21 – Вид резца РШ 32-70/16.М1 после работы по породам средней крепости и абразивности

Указанный вывод был положен в основу имитационной модели, разработанной для разрушения поворотным резцом горных пород прочностью до 90 МПа и абразивностью до 20 мг.

Исходные данные:

- объект анализа поворотный резец РШ 32-70/16.М1, проработавший в составе исполнительного органа проходческого комбайна КП-21 (продольно-осевая коронка) в кулаке №9 [89] до момента, непосредственно предшествующего выламыванию твердосплавной вставки, и имеющий вид, аналогичный представленному на рисунке 2.21;
- координаты расположения поворотного резца на коронке: радиус $r = 0,25$ м, центральный угол $\phi_i = 80^\circ$, шаг резания $t = 14$ мм, угол атаки $\theta = 45^\circ$;
- скорость резания V_p с учетом частоты вращения исполнительного органа – 1 м/с;
- средняя толщина стружки $h = 35$ мм;
- разрушаемая порода – алевролит, как материал попутной породы, наиболее часто встречающейся при проведении проходческих работ (предел прочности на одноосевое сжатие $\sigma_{сж} \sim 52$ МПа, абразивность $a = 10$ мг);
- предельный путь $L_{ПД}^{Стат}$ пройденный резцом – 13,5 км (рассчитан по формуле (1.14)).

Принятые допущения:

- разрушаемый массив монолитен (отсутствует трещиноватость) и однороден;
- твердость державки резца 44 HRC (значение твердости материала державки – стали 30ХГСА по ГОСТ Р 51047-97);
- условия работы резца - нормальные, т.е. без заклинивания вращения вокруг своей оси, что обеспечивает симметричную форму износа.

Принятые обозначения (рисунок 2.22):

h_j – координата определяемой точки по высоте, мм;

X_j – координата определяемой точки по сечению резца, мм;

S_j – координата точки расположенной на высоте h_j , определяющая износ поворотного резца РШ 32-70/16М.1 в момент поломки его твердосплавной вставки, мм (определялась из вида поворотных резцов);

b_j – координата точки расположенной на высоте h_j , определяющая положение образующей твердосплавной вставки, мм;

a_j – координата точки расположенной на высоте h_j , определяющая геометрию поворотного резца, мм;

e_j – величина износа поворотного резца РШ 32-70/16М.1 в точке расположенной на высоте h_j , мм;

$\Delta_{ВД}$ – величина износа твердосплавной вставки, мм;

$\Delta_{ПД}$ – предельно допустимая величина оголения твердосплавной вставки, определяющая ее поломку, мм;

$\Delta l_{ВС}$ – разница длины твердосплавной вставки и ее части, выступающей от торца головной части державки резца, мм.

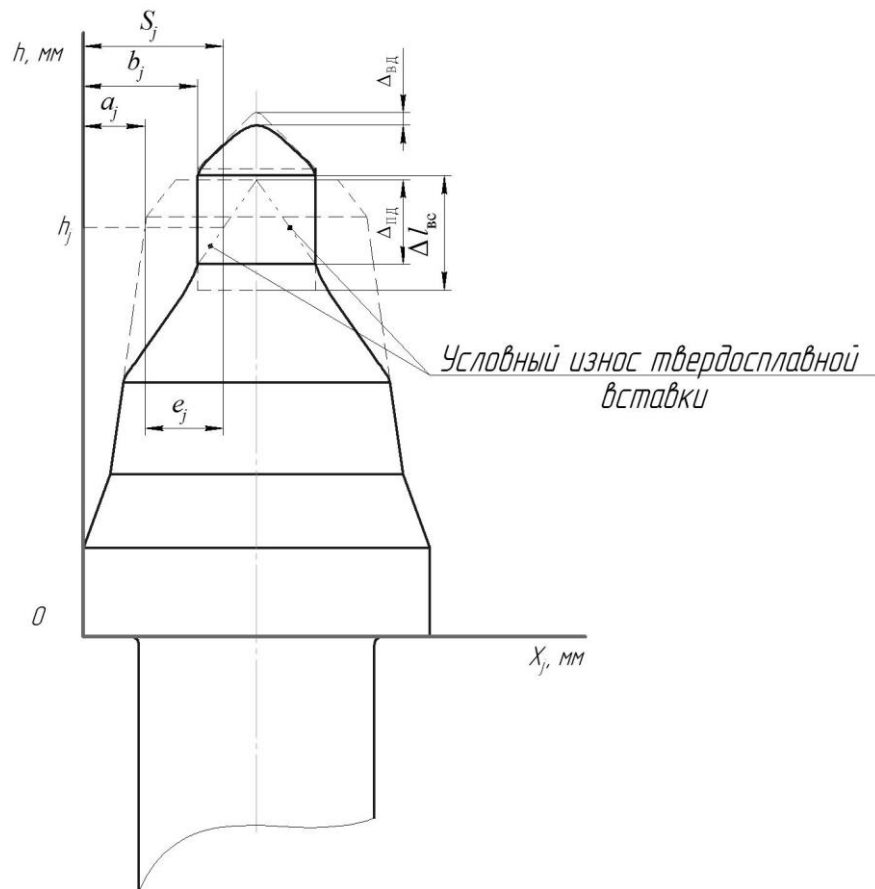


Рисунок 2.22 – Форма резца РШ 32-70/16.М1 до (пунктирная линия) и после эксплуатации

Для оценки геометрических параметров изношенной части резца после его работы определенный промежуток времени необходимы сведения о величине износа e_j и интенсивности изнашивания i_j в каждой точке j в момент, предшествующий поломке резца. Под интенсивностью изнашивания i_j автор понимает отношение толщины изношенной части державки (величины износа) в каждом сечении резца к пройденному пути, т.е.:

$$i_j = \frac{e_j}{L_{\text{ПД}}^{\text{Стат}}}, \quad (2.1)$$

где, e_j – величина износа, мм; $L_{\text{ПД}}^{\text{Стат}}$ – предельный путь износа, предшествующий поломке твердосплавной вставки, км.

В рамках разработанной модели эти параметры предлагается вычислять геометрическим путем из сопоставления формы головной части резца до и после эксплуатации (рисунок 2.22).

Ввиду того, что большую часть времени с породой взаимодействует твердосплавная вставка и торцевая часть державки поворотного резца (рисунок 2.4) именно эта часть подвергается наиболее интенсивному изнашиванию и имеет зоны наибольшего износа, значение i_j для нее должно быть максимальным. Но поскольку ее износ ограничивается твердосплавной вставкой и действительная величина e_j мала, для устранения этого противоречия было решено распространить геометрию износа для основной части державки на ее торцевую часть (штрихпунктирная линия на рисунке 2.22).

Интенсивность изнашивания державки определялась в точках h_j при шаге расположения точек – 0,5 мм.

$$e_j = S_j^A - a_j, \quad (2.2)$$

где, S_j^A – координата точки j в изношенной части державки резца в момент поломки твердосплавной вставки на высоте h_j , мм; a_j – координата точки j державки резца до эксплуатации на высоте h_j , мм.

Исходя из формы твердосплавной вставки до и после эксплуатации, аналогичным образом автор предлагает рассчитывать значения e_j , i_j и для этого компонента резца.

Имитационная модель процесса изнашивания резца при резании алевролита представляет собой систему уравнений, определяющих геометрию резца в каждом j -ом сечении резца f_j^L на расчетном пройденном пути $L_{\text{расч}}$:

$$f_j^L = \begin{cases} a_j + \begin{cases} \frac{e_j}{L_{\text{ПД}}^{\text{Стат}}} L_{\text{расч}} & \text{при } V_p = 1 \text{ м/с} \\ \frac{e_j K_{\text{ск}}}{L_{\text{ПД}}^{\text{Стат}}} L_{\text{расч}} & \text{при } V_p \neq 1 \text{ м/с} \end{cases} & \text{при } e_j^L > (b_j - a_j) \\ b_j & \text{при } e_j^L \leq (b_j - a_j) \end{cases} \quad (2.3)$$

Так как, скорость резания резцов определяется радиусом их закрепления r , то необходимо было внести соответствующий коэффициент $K_{\text{ск}}$ (выбирается в соответствии с «Метод расчета износостойкости и удельного расхода резцов при работе проходческих комбайнов»).

Величина износа в точке на высоте h_j , мм при расчетном $L_{\text{расч}}$:

$$e_j^L = \frac{e_j}{L_{\text{ПД}}^{\text{Стат}}} L_{\text{расч}} = i_j^{\text{Стат}} L_{\text{расч}} \quad (2.4)$$

где $L_{\text{расч}}$ – путь, пройденный этой точкой, км; $i_j^{\text{Стат}}$ – интенсивность изнашивания, мм/км.

Проведенные расчеты e_j , i_j позволили построить номограмму (рисунок 2.23) изменения интенсивности изнашивания державки и твердосплавной вставки резца РШ 32-70/16.М1 по его сечению.

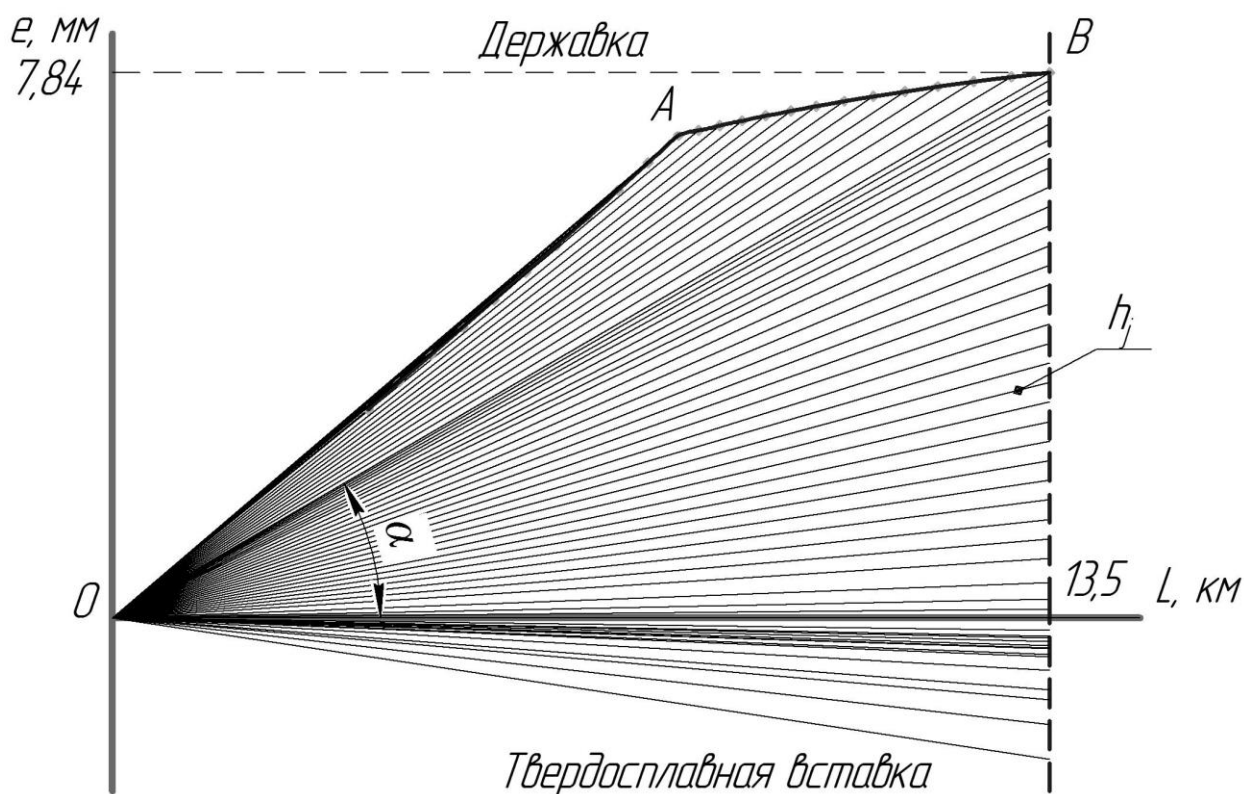


Рисунок 2.23 – Номограмма интенсивности износа державки и твердосплавной вставки резца РШ 32-70/16.М1 при разрушении алевролита

Здесь, каждой точке сечения h_j соответствует своя линия, тангенс угла наклона которой соответствует интенсивности изнашивания в этой точке. Линия ОАВ – линия ограничения величины износа державки из-за наличия твердосплавной вставки (без учета штрихпунктирной линии на рисунке 2.22).

Подставляя в данную номограмму любой путь в диапазоне от 0 до предельной величины 13,5 км, можно определить для этого пути величину износа e_j в любой точке сечения резца и оценить, таким образом, его форму.

Указанное решение было смоделировано в программной среде *Microsoft Excel*, алгоритм решения которой представлен на рисунке 2.24.

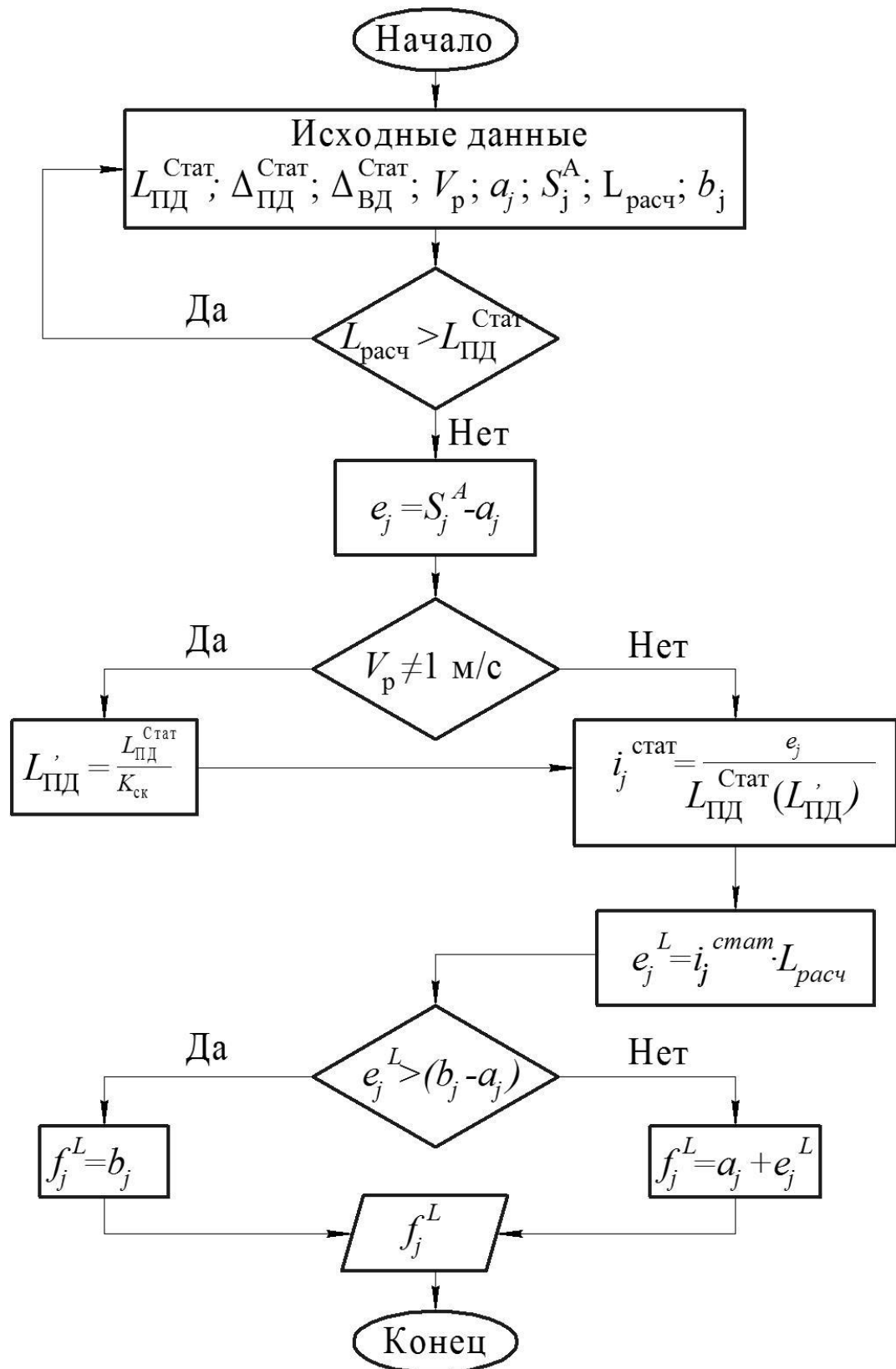


Рисунок 2.24 – Блок-схема алгоритма подпрограммы для определения формы износа поворотного резца РШ 32-70/16.М1 при разрушении алевролита в зависимости от пройденного пути

Программа позволяет рассчитывать форму износа резцов, установленных и в других точках исполнительного органа, что учитывается путем введения в предельный путь резания $L_{\text{ПД}}^{\text{Стат}}$ соответствующего коэффициента скорости.

$$L'_{\text{ПД}} = \frac{L_{\text{ПД}}^{\text{Стат}}}{K_{\text{ск}}} \quad (2.5)$$

где, $L'_{\text{ПД}}$ – предельный путь до отказа, пройденный поворотным n -ым резцом, км; $K_{\text{ск}}$ – коэффициент скорости резания [14].

$$K_{\text{ск}} = 0,24 \cdot V_{\text{pn}} + 0,754, \quad (2.6)$$

где, V_{pn} – скорость резания n -го резца, определяемая его местоположением на коронке, м/с.

При этом, величина износа в точке на высоте h_j , мм рассчитывается из равенства

$$e_j^L = i_j^{\text{Стат}} L_{\text{расч}} \quad (2.7)$$

где $L_{\text{расч}}$ – путь, пройденный этой точкой, км.; $i_j^{\text{Стат}}$ – интенсивность изнашивания, определяемая по алгоритму (рисунок 2.24), мм/км.

Окончательная координата f_j^L изношенной части в j -той точке на высоте h_j рассчитывается из условий, указанных в алгоритме.

Рассчитанное изменение формы головной части резца в процессе резания иллюстрирует рисунок 2.25 и 2.26.

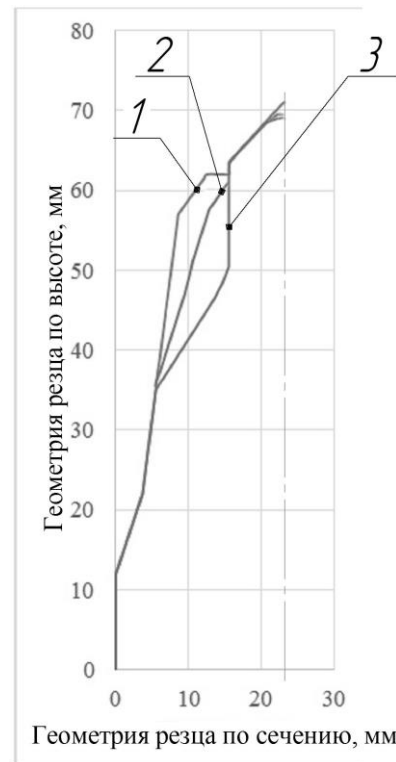


Рисунок 2.25 – Диаграмма износа резца РШ 32-70/16.M1 по высоте при разрушении алевролита на пройденном пути $L_{\text{расч}} = 0$ км (1), $L_{\text{расч}} = 5$ км (2), $L_{\text{расч}} = 13,5$ км (3)

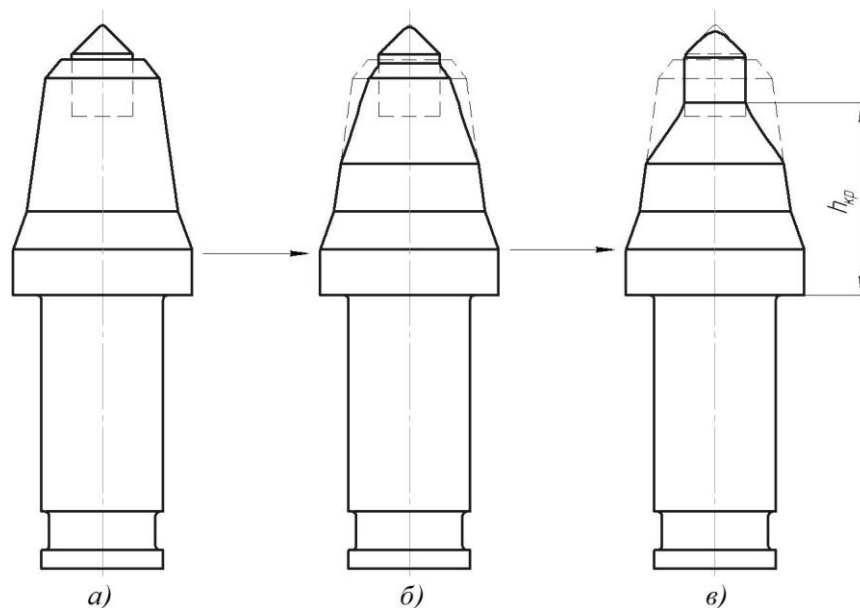


Рисунок 2.26– Формы износа поворотного резца РШ 32-70/16.M1 на пройденном пути при разрушении алевролита прочностью 52 МПа и абразивностью 10 мг: $L_{\text{расч}} = 0$ км (а), $L_{\text{расч}} = 5$ км (б), $L_{\text{ПД}} = 13,5$ км (в) – в момент выламывания вставки

Модели резца после различного пути резания, построенные в компьютерной программе твердотельного моделирования Компас – 3D с визуализацией в программе Keyshot 5, представлены на рисунке 2.27.



Рисунок 2.27 – Модели поворотного резца РШ 32-70/16.M1 при разрушении алевролита на пройденном пути $L_{\text{расч}} = 0$ км, $L_{\text{расч}} = 5$ км, $L_{\text{расч}} = 13,5$ км.

При переходе к другим породам, отличающихся прочностью и абразивностью от алевролита, меняется путь, пройденный резцом до разрушения $L_{\text{ПД}}^{\text{Теор}}$, величина оголения твердосплавной вставки $\Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}}$, при которой она выламывается из державки, величина износа твердосплавной вставки $\Delta_{\text{ВД}}^{\text{ГП}}$, которые рассчитываются по методике [14] и учитываются в имитационной модели.

Имитационная модель процесса изнашивания резца при резании пород различной прочности и абразивности, а также изменяющихся параметров резания представляет собой систему уравнений (2.8), (2.9), (2.10), определяющих геометрию резца в каждом j -ом сечении резца f_j^L на расчетном пройденном пути $L_{\text{расч}}$:

$$f_j^L = \begin{cases} a_j + e_j^L & \text{при } e_j^L > (b_j - a_j) \\ b_j & \text{при } e_j^L \leq (b_j - a_j) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$e_j^L = \begin{cases} \frac{e_j}{L_{\text{ПД}}^{\text{Теор}}} L_{\text{расч}} & \text{при } \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}} + \Delta_{\text{ВД}}^{\text{ГП}} < \Delta l_{\text{вс}} \text{ и } V_p = 1 \text{ м/с} \\ \frac{e_j K_{\text{ск}}}{L_{\text{ПД}}^{\text{Теор}}} L_{\text{расч}} & \text{при } \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}} + \Delta_{\text{ВД}}^{\text{ГП}} < \Delta l_{\text{вс}} \text{ и } V_p \neq 1 \text{ м/с} \\ \frac{e_j \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}}}{L_{\text{ПД}}^{\text{Теор}} \cdot \Delta l_{\text{вс}}} L_{\text{расч}} & \text{при } \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}} + \Delta_{\text{ВД}}^{\text{ГП}} > \Delta l_{\text{вс}} \text{ и } V_p = 1 \text{ м/с} \\ \frac{e_j \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}} K_{\text{ск}}}{L_{\text{ПД}}^{\text{Теор}} \Delta l_{\text{вс}}} L_{\text{расч}} & \text{при } \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}} + \Delta_{\text{ВД}}^{\text{ГП}} < \Delta l_{\text{вс}} \text{ и } V_p \neq 1 \text{ м/с} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$e_j = \begin{cases} S_{j+\lambda}^A - a_j & \text{при } \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}} + \Delta_{\text{ВД}}^{\text{ГП}} > \Delta_{\text{ПД}}^{\text{Стат}} \\ S_{j-\lambda}^A - a_j & \text{при } \Delta_{\text{ПД}}^{\text{ГП}} + \Delta_{\text{ВД}}^{\text{ГП}} < \Delta_{\text{ПД}}^{\text{Стат}} \end{cases} \quad (2.10)$$

Алгоритм имитационной модели представлен на рисунке 2.28.

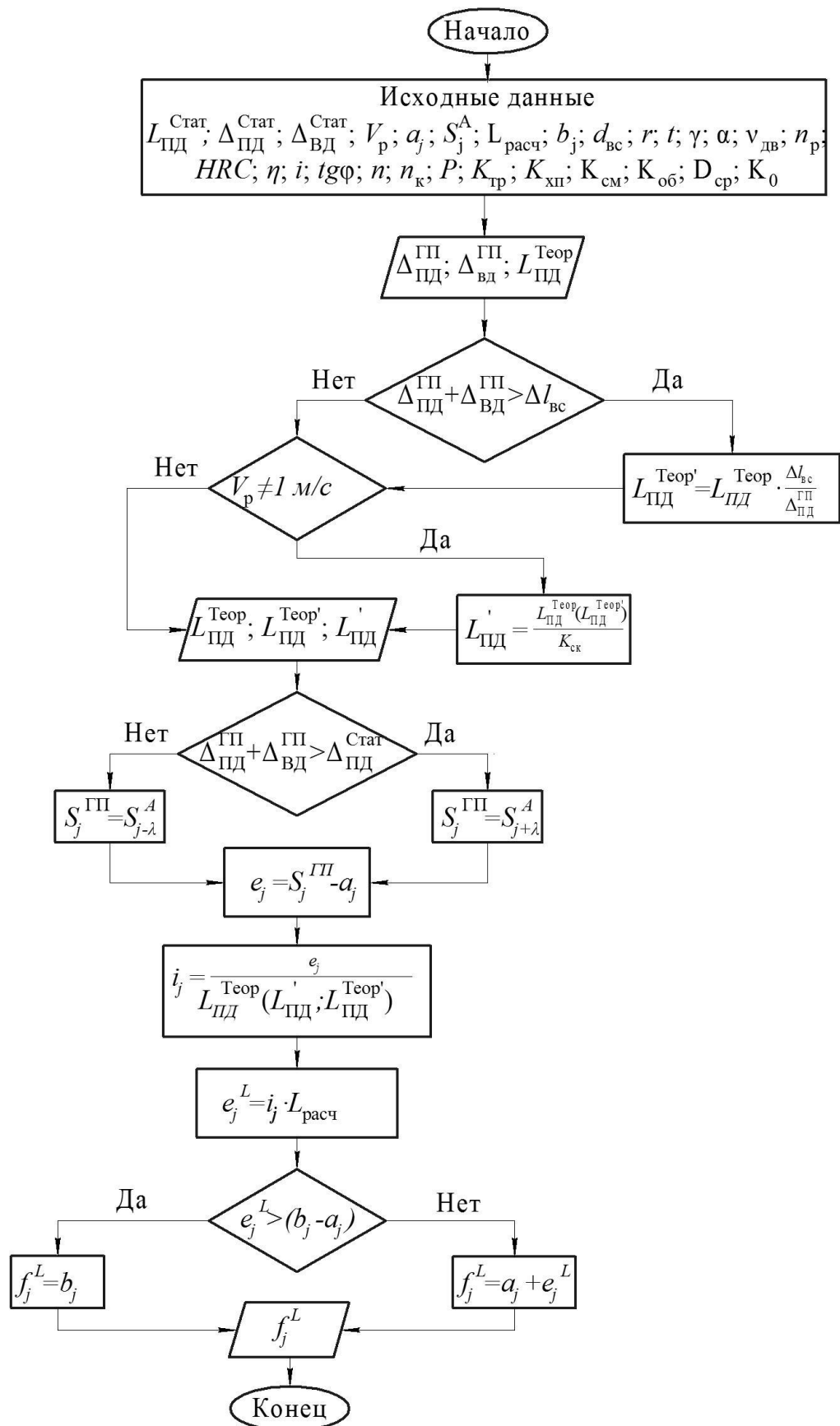


Рисунок 2.28 – Блок-схема алгоритма подпрограммы для построения формы износа поворотного резца РШ 32-70/16.М1 в зависимости от пройденного пути на породах различной прочности

Разработанный алгоритм позволяет рассчитать форму износа резца РШ 32-70/16.М1 при разрушении пород прочностью до 90 МПа и абразивностью до 20 мг, то есть при виде износа, при котором твердосплавная вставка изнашивается значительно медленнее державки и резец выходит из строя, вследствие поломки или выпадения твердосплавной вставки [14].

Изменение формы износа резца при разрушении песчаника, рассчитанное в программе Microsoft Excel, представлено на рисунке 2.29.

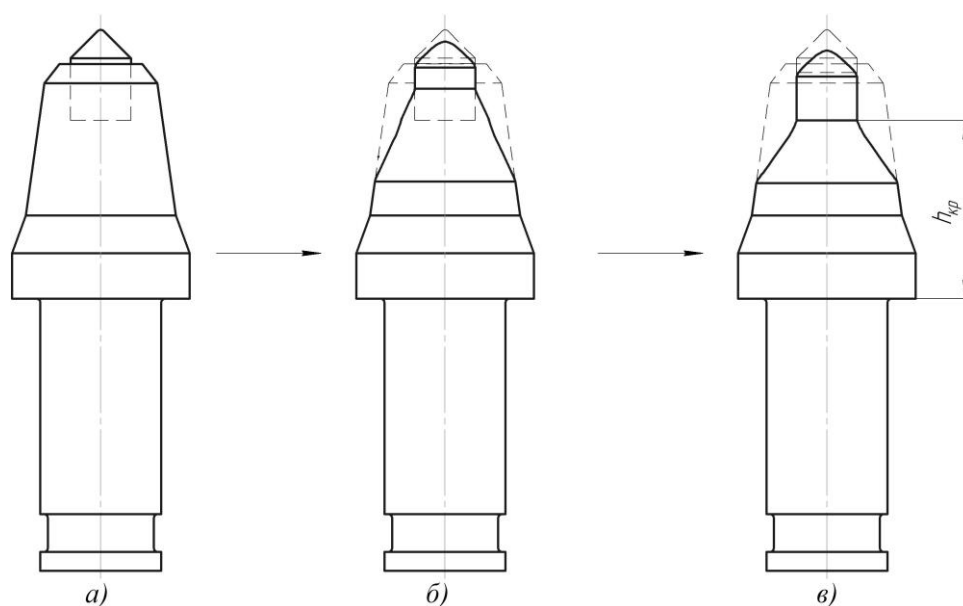


Рисунок 2.29 – Формы износа поворотного резца РШ 32-70/16.М1 на пройденном пути при разрушении песчаника прочностью 70 МПа и абразивностью 20 мг: $L_{\text{расч}} = 0$ км (а), $L_{\text{расч}} = 5$ км (б), $L_{\text{ПД}} = 8,6$ км (в) – в момент выламывания вставки

Из сопоставления рисунков 2.26, 2.29 видно, что при разрушении песчаника – более прочного материала по сравнению с алевролитом, твердосплавная вставка изнашивается более интенсивно, что обеспечивает увеличение величины оголения твердосплавной вставки $\Delta_{\text{ПД}}^{\text{П}}$ до момента ее выламывания из державки.

Эта имитационная модель разработана на основе предыдущей и позволяет определять геометрию резца на пройденном пути при различных параметрах резания и физико-механических свойств пород, что в свою

очередь позволяет определить остаточный ресурс используемого поворотного резца.

2.5 Выводы по главе 2

1. Проанализированы условия работы поворотных резцов и виды отказов, возникающих при их эксплуатации.

2. Проанализированы причины и частота возникновения отказов поворотных резцов при их эксплуатации в условиях различных горно-рудных предприятий России.

3. В результате обобщения данных и исследований, установлено, что при работе проходческих комбайнов по породам малой и средней крепости и абразивности основной причиной выхода их поворотных резцов из строя является износ головной части стальной державки резца, приводящий к оголению твердосплавной вставки и ее выламыванию из державки или поломке, при этом затраты на замену инструмента достигают от 10 до 30% от общей стоимости проходческих работ.

4. Разработана имитационная модель процесса изнашивания поворотного резца РШ 32-70/16.М1 при его работе в составе осевой коронки проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом, учитывающая угол атаки, радиус и шаг закрепления резца на исполнительном органе, а также физико-механические свойства пород, с которыми он взаимодействует, представляющая собой систему линейных уравнений, характеризующих интенсивность изнашивания отдельных зон резца.

Глава 3 Разработка методики и экспериментального стенда по изучению закономерностей изнашивания фрагментов локальных зон державок поворотных резцов

В литературе посвященной термомеханической обработке не обнаружено сведений об аппаратном оформлении и методиках испытаний, применяемых для изучения влияния ТМО на износостойкость материалов. Специфика таких испытаний заключается в использовании образцов, деформированных в различных точках их объема с различной интенсивностью деформации и, как следствие, отличающихся износостойкостью. По этой причине потребовалось разработать специальные методики и экспериментальный стенд, как для получения заданной интенсивности пластической деформации в определенной части испытуемого фрагмента державки, так и по абразивному изнашиванию именно этой его части.

3.1 Анализ существующих методик испытаний металлических материалов на износостойкость

Лабораторные испытания материалов на износостойкость проводятся на специальных образцах и предназначены, главным образом, для исследования характера и скорости разрушения материалов в условиях близких к эксплуатационным. Так как точно воспроизвести условия эксплуатации материалов в реальной конструкции невозможно, практически все лабораторные исследования носят сравнительный характер и требуют проведения дополнительных производственных испытаний на готовом изделии. Но лабораторные испытания являются наиболее простыми и менее трудоемкими, позволяют исследовать большое количество материалов и способов повышения их эксплуатационных характеристик и по этой причине широко используются в инженерной практике.

В условиях эксплуатации на динамику изнашивания того или иного элемента конструкции влияет множество факторов, определяющих характер разрушения, таких как температура, скорость движения элемента, действующая нагрузка, свойства абразивного материала и др., которые при проведении лабораторных испытаний все учесть невозможно. Поэтому, в большинстве случаев, при разработке методик выявляют и воспроизводят один основной фактор, определяющий характер изнашивания материала. Во время испытания этот фактор изменяют, например, нагрузку или абразивный материал, а остальные оставляют без изменения. Главным требованием при постановке эксперимента является то, чтобы механизм изнашивания экспериментальных образцов совпадал с механизмом, изнашивания при эксплуатации анализируемого элемента изделия.

Интенсивность абразивного изнашивания державки резца зависит от ряда показателей, зависящих от свойств материала державки и абразивных частиц, состояния абразивной массы, характера ее воздействия на истирающуюся поверхность и др. В свою очередь, абразивность зерен породы зависит от их твердости, прочности, размеров и формы. Такие зерна могут находиться в монолитном или закрепленном состоянии, во взвешенном состоянии в потоке жидкости или газа, а также в виде сыпучей массы.

Все эти условия влияют на выбор метода определения износостойкости материалов.

Перечень методик по испытанию металлических материалов на изнашивание достаточно велик, но их характер имеет много общего [89].

Одной из первых отечественных методик по изнашиванию, широко используемой и в настоящее время, является методика М.М. Хрущева, М.А. Бабичева [91] по трению образцов об абразивную поверхность шлифовальной шкурки с использованием установки Х4-Б (рисунок 3.1).

На вертикальном валу 1 закреплен диск 2, на плоской поверхности которого устанавливают и закрепляют ободом абразивную шкурку. Испытуемый цилиндрический образец 14 диаметром 2 мм и длиной 15-20 мм закрепляют в цанговом патроне 3 державки 4, которая свободно вставляется в направляющие головки штока 13. Образец нагружают съемными грузами 5 (при определении величины нагрузки учитывают также вес державки 4). Вращение диска 2 с частотой 60 мин⁻¹ осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу, шкив 7, горизонтальный вал 6 и червячную передачу. Левый конец вала 6 соединен с суммарным счетчиком оборотов. Шток 13 установлен в направляющих втулках, в его средней части имеется резьба 12, при ввертывании которой в гайку 11 шток получает радиальное перемещение в одну сторону, а при вывертывании – в другую сторону с подачей 1 мм на оборот диска. Гайке 11 передается вращение от горизонтального вала 6 через вторую червячную передачу, вертикальный вал 8 и пару конических шестерен 9 и 10.

Для снятия или установки испытуемого образца державку 4 вынимают из головки. При смене шлифовальной шкурки штوك 13 отводят в сторону путем поворота его вокруг оси вертикального вала 8.

Цилиндрический образец во время испытания прижимается торцовой частью к абразивной поверхности шлифовальной шкурки. При вращении диска 2 и одновременной подаче штока 13 движение образца происходит по спирали таким образом, что в каждый момент времени 50% его рабочей поверхности трется о свежую поверхность абразивной шкурки, это позволяет обеспечить однородность и одинаковые абразивные свойства истирающей поверхности трения. Наибольшее перемещение образца в радиальном направлении 100 мм. Движение образца реверсивное [92].

Испытания проводят при относительно небольших нагрузках ($P = 3 \text{ Н}$). Результаты выражают в виде отношения величины износа эталона к величине износа исследуемого материала.

Износ характеризуется изменением линейного размера образца (в данном случае высоты) за время испытания и определяется путем измерения высоты образца до и после испытания. Износ также можно определять по уменьшению веса путем взвешивания образцов до и после испытания на аналитических весах [92].

При обосновании принятого метода испытаний авторы [90] отмечают, что механизм разрушения материалов при абразивном изнашивании может быть различным, но царапание металла, сопровождающееся отделением стружки, является частым и наиболее типовым механизмом изнашивания. В связи с этим метод испытаний материалов при трении их о шкурку, воспроизводящий механизм царапания при взаимодействии поверхности образца с множеством абразивных зерен, может быть принят в качестве основного лабораторного метода оценки износостойкости материалов при абразивном изнашивании [82].

При всех преимуществах данной методики она не могла быть использована для определения износостойкости неравномерно деформированных образцов.

Другим методом изучения процесса изнашивания металлов применительно к условиям режущих органов почвообрабатывающих и

землеройных машин является метод изнашивания образца в уплотненной абразивной массе, например, с применением шнековой машины (рисунок 3.2) [92].

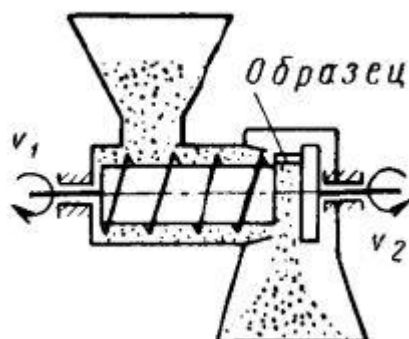


Рисунок 3.2 – Шнековая машина для изнашивания образцов при резании уплотненной абразивной массы

Абразивную массу загружают в бункер, откуда она подается в цилиндрическую камеру и, уплотняясь шнеком, выдавливается навстречу вращающемуся образцу. Испытуемый образец, имеющий форму лезвия, устанавливают на планшайбе, которая во время испытания вращается с заданным числом оборотов. Форму образца выбирают таким образом, чтобы при опытах максимально приблизиться к реальным условиям взаимодействия режущего органа с абразивной средой. При работе установки выдавливаемая шнеком навстречу вращающемуся образцу абразивная масса срезается в металлический ящик. Износ определяют измерением линейных размеров образцов до и после испытаний.

Еще одним методом определения износостойкости материалов, является метод изнашивания образца о незакрепленные абразивные частицы (рисунок 3.3) [93].

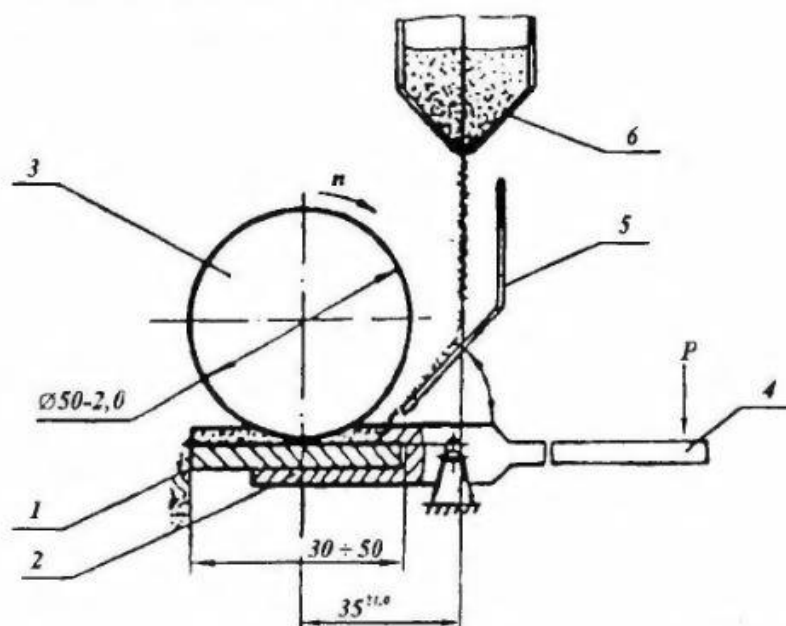


Рисунок 3.3 – Схема испытаний при трении образца о незакрепленную абразивную прослойку

Испытуемый образец 1, закрепленный в держателе 2, с использованием рычага 4 прижимается с силой $F = 44,1$ Н к вращающемуся со скоростью 1 с^{-1} резиновому ролику 3. Из дозатора 6 по направляющему лотку 5 в зону трения подается абразив. Продолжительность испытаний может варьироваться от 600 до 3600 оборотов ролика.

Данные методики так же не могли быть использованы для решения поставленной в настоящей работе задачи, как рассчитанные на испытание образцов материалов с постоянной по их высоте абразивной износостойкостью.

3.2 Методика повышения износостойкости локальных зон фрагментов державок резцов термомеханической обработкой

Для проведения экспериментальных исследований влияния ТМО на твердость и износостойкость локальных зон державок поворотных резцов из державок тангенциальных резцов РШ 32-70/16.М1 (материал сталь 30ХГСА) вырезались фрагменты цилиндрической формы (диаметр $D_0 = 8$ мм, высота

$H_0 = 15$ мм), которые подвергались термомеханической обработке по следующей схеме:

- нагрев в термостате до температуры $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 10 минут для протекания процесса аустенизации стали;
- осадка фрагмента параллельно его оси на пневматическом кузнечном молоте (рисунок 3.4) при температуре $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ до различных значений высоты H_i ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура деформации, при которой сталь 30ХГСА в результате термомеханической обработки получает максимальное упрочнение [65]), величина $H_i = 13 \div 6,1$ мм определялась высотой подкладных колец);
- закалка фрагмента в масле;
- низкий отпуск при температуре $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 3.4 – Кузнечный молот марки МА-4129А, использованный для осадки фрагментов

Затем путем токарной обработки фрагменты обрабатывали до исходного диаметра, оставляя на средней части ступень, шириной $a = 3$ мм (рисунок 3.5), материал которой в результате вышеуказанной ТМО получил

устанавливаемую по результатам компьютерного моделирования (п. 3.3), интенсивность деформации ε_{pi} . Эту рабочую часть фрагментов после замера твердости HRC ее поверхности (рисунок 3.6) подвергали изнашиванию.



Рисунок 3.5 - Вид фрагментов с рабочей частью, подвергнутой деформации с различной интенсивностью, для испытаний на износостойкость



Рисунок 3.6 – Универсальный твердомер Zwick ZHU187,5, использованный для замера твердости рабочей части (поверхности ступени) фрагментов

Для сопоставления с имеющимися литературными данными полученные величины твердости (HRC) пересчитывали [94] в соответствующие им значения по Бринеллю (HB).

3.3 Компьютерное моделирование процесса деформирования фрагментов поворотных резцов

3.3.1 Выбор необходимой компьютерной программы

В настоящее время, для получения сведений о напряженно-деформированном состоянии (НДС) материала заготовки, подвергающейся обработке давлением, все большую популярность набирают компьютерные программы, основывающиеся на методе конечных элементов (МКЭ). Суть метода заключается в том, что сплошная среда (объем деформируемого тела) разбивается на множество простых геометрических элементов (плоские и объемные элементы: прямолинейные и криволинейные, правильные и произвольные треугольники и четырехугольники). При этом каждому элементу придаются определенные степени свободы, и он обладает свойствами материала деформируемой среды. Для упругопластических материалов, это, прежде всего, его механические свойства. Основные соотношения МКЭ, применительно к процессам ОМД, основаны на теории пластического течения, либо на деформационной теории пластичности [95].

Наиболее известными программами являются: *ANSYS*, *DEFORM-3D*, *Qform*, *SIMULIA Abaqus*. В связи с более удобным интерфейсом по сравнению с программами *ANSYS* и *SIMULIA Abaqus* наибольшее распространение для получения информации о напряженно-деформированном состоянии материалов, подвергающихся обработке давлением, получил программный комплекс *DEFORM-3D*.

Положительным аспектом программы *DEFORM-3D* является и то, что геометрию инструмента и заготовки можно импортировать из *CAD (CAE)* программ (систем автоматического проектирования - Компас, *SolidWorks*, *Autodesk Inventor*, *CATIA* и др.), что существенно облегчает построение объектов, имеющих сложную конфигурацию. Также программа дает

возможность моделировать весь технологический процесс производства изделия, включая термическую и механические обработки.

Структурно программный комплекс *DEFORM-3D* имеет три модуля: *Preprocessor*, *Simulator*, *Post Processor*. Модуль *Preprocessor* предназначен для ввода данных (задания граничных условий), *Simulator* производит расчет процесса, *Post Processor* позволяет произвести анализ результатов.

3.3.2 Анализ напряженно-деформированного состояния фрагментов после осадки

Анализ НДС цилиндрических фрагментов диаметром $D_0 = 8$ мм, высотой $H_0 = 15$ мм из стали 30ХГСА после их осадки на кузнечном молоте до той или иной высоты H_i производился методом конечных элементов в программном комплексе *DEFORM-3D*.

Задача о распределении интенсивности пластической деформации по объему фрагмента в процессе его деформации решалась при следующих допущениях:

1. Так как продолжительность процесса деформации фрагмента не превышала 1 секунды теплообменом фрагмента с рабочими элементами молота можно пренебречь, вследствие чего фрагмент деформируется в изотермических условиях.
2. Деформация проводится при постоянной температуре фрагмента (900°C).
3. Исходя из более чем десятикратной разницы в значениях предела текучести материалов «холодного» оборудования молота (для материала штампов из стали 4Х5МФС при 20°C $\sigma_{0,2} = 1570$ МПа) и «горячего» фрагмента (для стали 30ХГСА при 900°C $\sigma_{0,2} \sim 90$ МПа), верхняя и нижняя направляющие молота принимаются абсолютно жесткими (недеформируемыми).
4. Деформация фрагмента описывается кривой упрочнения, установленной автором экспериментальным путем.

5. Разбивка на 5000 конечных элементов является достаточной для объективного описания процесса деформации фрагмента.

Результатом расчета являлось определение *интенсивности пластической деформации* ε (*эффективной деформации*) каждого конечного элемента, накопленной к i -му моменту обработки давлением, рассчитываемой по формуле Мезиса [95]:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}, \quad (3.1)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – главные деформации, соответствующие напряжениям по осям x, y, z .

При этом:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{dx}{x_0} \\ \varepsilon_y = \frac{dy}{y_0} \\ \varepsilon_z = \frac{dz}{z_0} \end{cases}, \quad (3.2)$$

где x_0, y_0, z_0 – проекции исходной длины на оси координат, соответственно; dx, dy, dz – приращения проекций длины на координатные оси с учетом закона несжимаемости твердого тела:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (3.3)$$

Поскольку в литературе не удалось обнаружить сведений о величине напряжений, необходимых для пластического деформирования стали 30ХГСА при температуре деформации (900 °С), автором была проведена серия необходимых экспериментов с использованием комплекса *Gleeble-3800* по методике, описанной в [97, 98].

В качестве исследуемого объекта были использованы образцы (рисунок 3.7) из стали 30ХГСА, изготовленные из державок тех же поворотных резцов, что и фрагменты, предназначенные для термомеханической обработки и последующего изнашивания. Для получения

структуры близкой к структуре заготовок перед штамповкой державок образцы перед деформированием подвергались полному отжигу.

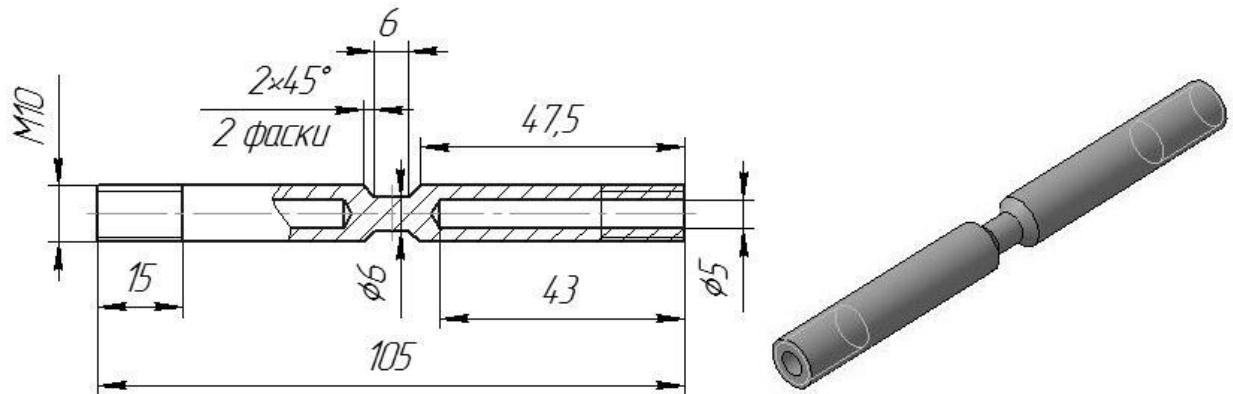


Рисунок 3.7 – Образец для проведения испытаний на комплексе *Gleeble-3800* по определению напряжений деформации при высоких температурах

Образцы подвергали сжатию при скорости деформации ($\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1}$), близкой к скорости деформации фрагментов молотом, с записью зависимости «напряжение сжатия $\sigma_{\text{сж}}$ » – «истинная деформации ϵ » средней рабочей части образца.

В результате проведенных экспериментально-расчетных исследований была получена зависимость напряжения, необходимого для сжатия образца стали в нагретом состоянии, от истинной деформации его материала, использованная в программе *DEFORM-3D* (рисунок 3.8).

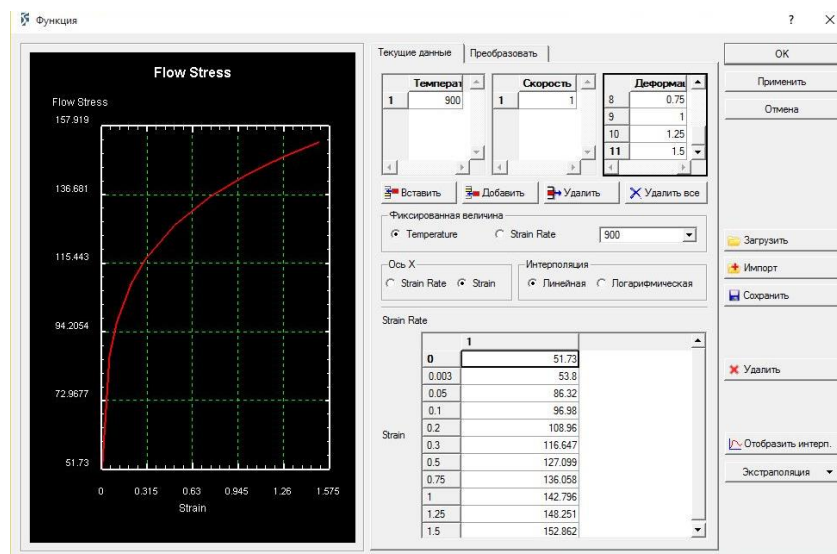


Рисунок 3.8 – Экспериментальная зависимость $\sigma_{\text{сж}}$ - ϵ и окно построения программы компьютерного комплекса *DEFORM-3D*

3.3.3 Результаты компьютерного моделирования

Известно [99, 100], что при высокотемпературной осадке образцов цилиндрической формы деформация по объему образца распределяется неравномерно и в ней можно выделить три характерные зоны деформирования (рисунок 3.9).

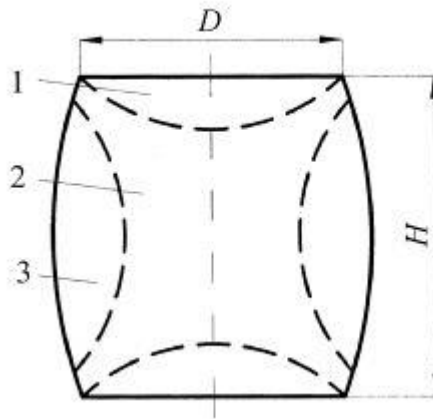


Рисунок 3.9 – Зоны распределения деформаций в цилиндре при одноосном сжатии

Зона 1 – затрудненной деформации – образуется в результате сил трения между бойками и торцами заготовки, а также подхолаживания этих торцов. В этой зоне напряженное состояние реализуется, как всестороннее неравномерное сжатие. Зона 1 расклинивает зону 2, которая интенсивно деформируется в осевом и радиальном направлениях. В кольцевой зоне 3 материал подвергается растяжению и деформируется менее интенсивно, чем в зоне 2 [100].

В полученном компьютерном изображении деформированных образцов (рисунок 3.10, б), подтверждаемом видом металлографических шлифов получаемых поковок (рисунок 3.10, а), эти зоны отчетливо просматриваются.

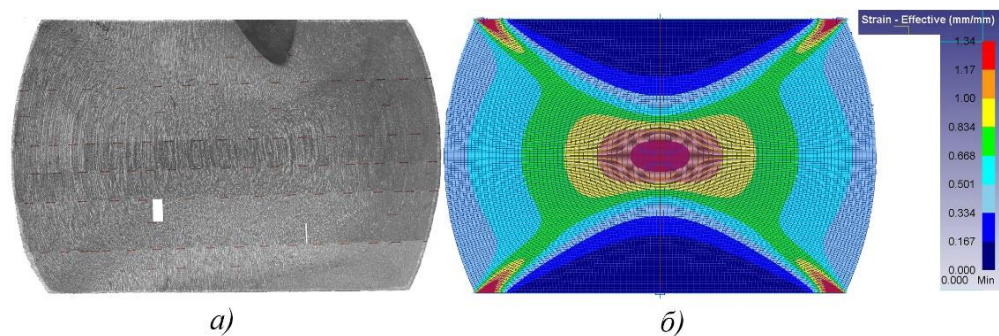


Рисунок 3.10 – Распределение волокон на шлифе (а) и деформаций на компьютерном изображении (б) заготовки после одноосного сжатия

Из компьютерного изображения распределения интенсивности пластической деформаций по сечению фрагментов, подвергнутых сжатию до различной высоты H_i , для их средней части ($a = 3$ мм, $h = 2$ мм рисунок 3.11, б) рассчитывалась (3.5) усредненная величина интенсивности пластической деформации ε_p конечных элементов, составляющих поверхностный слой фрагмента. Установленная величина ε_p принималась за интенсивность деформации ε_{pi} рабочей части соответствующего фрагмента (рисунок 3.5), предназначенной для дальнейших испытаний на износостойкость.

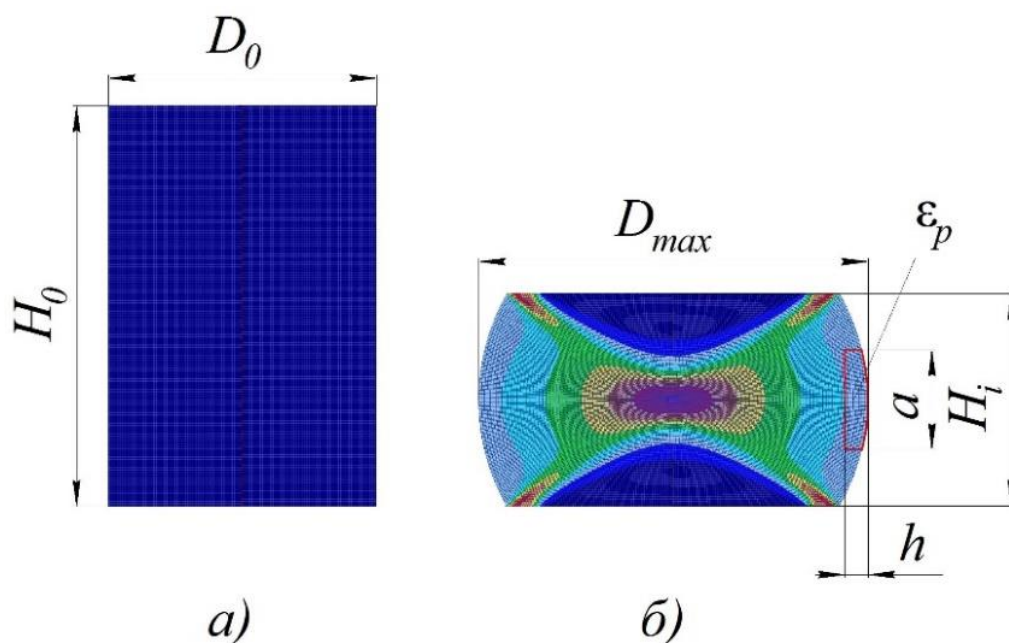


Рисунок 3.11 – Компьютерное изображение интенсивностей деформации цилиндрического фрагмента до (а) и после (б) одноосного сжатия

В таблице 3.1 представлены высоты H_i деформированных фрагментов и соответствующие им значения интенсивности деформации ε_p металла в средней их части. Там же, для сравнения, приведены значения степени деформации, традиционно рассчитываемой в литературе [94, 101] по представленным ниже формулам для случая осадки цилиндрического образца:

$$e_1 = \ln \frac{H_0}{H_i}, \quad (3.4)$$

$$e_2 = \ln \left(\frac{D_{\max}}{D_0} \right)^2, \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{H_0 - H_i}{H_0}, \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{F - F_0}{F} = \frac{D_{\max}^2 - D_0^2}{D_0^2} \quad (3.7)$$

где H_0, H_i – исходная и конечная высота фрагмента;

F_0, F – исходная и конечная (максимальная) площадь сечения фрагмента;

$D_0, D_{\max}$ – исходный и конечный (максимальный) диаметр.

Таблица 3.1 – Соотношение между значениями интенсивности и степени деформации

Образец	H_i , мм	$D_{\max}$, мм	Интенсивность деформации ε_p	Степень деформации			
				e_1	e_2	ε_1	ε_2
1	13	8,78	0,17	0,14	0,19	0,13	0,17
2	12,3	9,3	0,22	0,20	0,30	0,18	0,26
3	11,1	9,64	0,32	0,30	0,37	0,26	0,31
4	9,6	10,6	0,44	0,44	0,56	0,36	0,43
5	8,9	10,92	0,49	0,52	0,62	0,41	0,46
6	6,1	12,2	0,69	0,89	0,84	0,59	0,57

Из данных таблицы видно, что в наибольшей степени значения ε_p и ε совпадают при выражении степени деформации в виде (3.5) $\varepsilon = \varepsilon_2$, как отношение разницы между наибольшей площадью сечения

деформированного образца и исходной площадью к исходной площади сечения.

3.4 Методика испытаний на изнашивание локальных зон фрагментов державок поворотных резцов подвергнутых термомеханической обработке

Для моделирования процесса изнашивания державок поворотных резцов испытания проводили при выполнении следующих требований:

- доминирующий вид изнашивания – абразивный;
- объект изнашивания – фрагмент локальной зоны державки резца из стали 30ХГСА;
- минералогический состав абразива в экспериментах – материалы попутной породы средней крепости и абразивности, наиболее часто встречающиеся при проведении вспомогательных выработок проходческими комбайнами [44, 45]: песчаник ($\sigma_{сж} = 70$ МПа, абразивность $a = 20$ мг) и алевролит ($\sigma_{сж} = 52$ МПа, абразивность $a = 10$ мг);

Из фрагментов указанной породы изготавливали пластины 20х100х100 мм (рисунок 3.12).

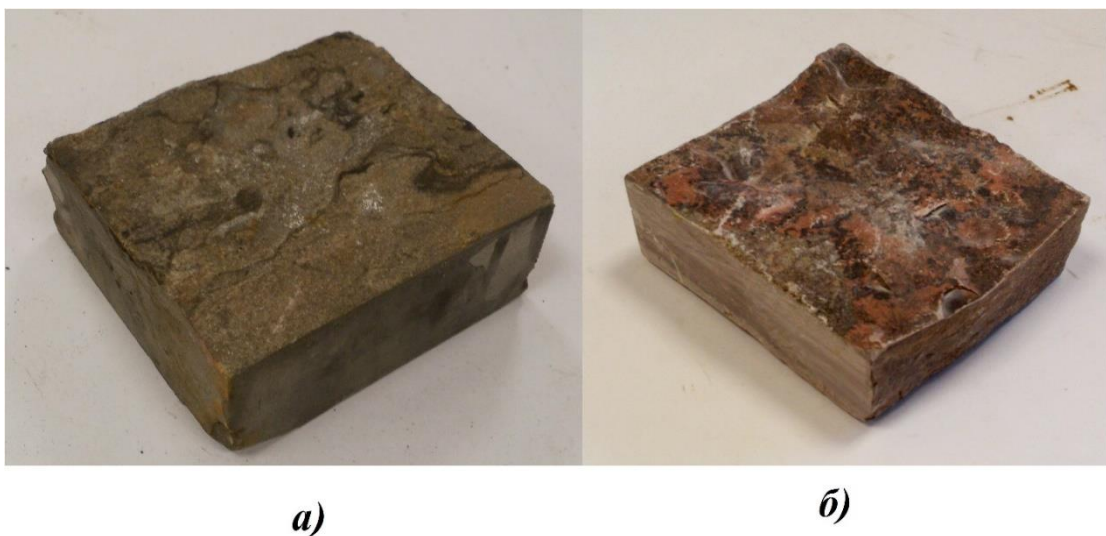


Рисунок 3.12 – Вид пластин песчаника (а) и алевролита (б), подготовленных к использованию в качестве абразивной среды

Испытания проводили по модифицированной методике [102] на установке, собранной на основе вертикального сверлильного станка (рисунок 3.13).

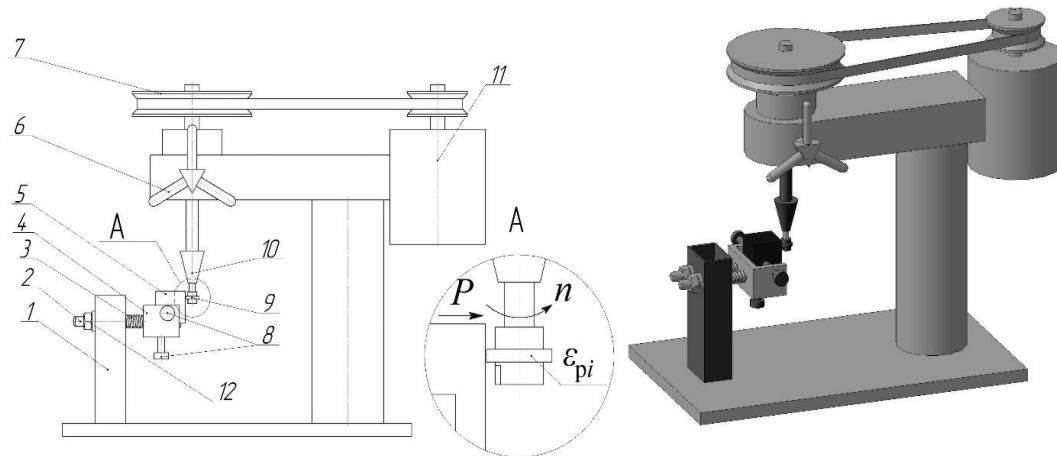


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема и вид экспериментальной установки по абразивному изнашиванию металлических материалов после термомеханической обработки

1-стойка, 2 – направляющая крепления, 3 – пружина, 4 – кожух, 5 – пластина абразивного материала, 6 – рукоять подачи шпинделя станка, 7 – клиноременная передача, 8 – зажимные винты, 9 – образец испытываемого материала, 10 – патрон для крепления образца, 11 – электродвигатель

Предварительно взвешенный на аналитических весах (точность замера $\pm 0,0001$) образец 9 (рисунок 3.13), представляющий собой фрагмент державки (рисунок 3.5), прошедший ТМО, фиксировали в патроне 10 шпинделя станка рабочей частью в горизонтальном положении. На стойке 1 установки крепили направляющие 2 с пружинами 3, обеспечивающими постоянное прижатие кожуха 4 с закрепленной пластиной абразива 5 к поверхности рабочей части образца 9 с заданным усилием. Перед началом испытаний с использованием динамометра установку тарировали по усилию прижатия P , как функцию от степени сжатия пружины 3 направляющими 2.

Линейная скорость перемещения поверхности рабочей части образца $V_{\text{обр}}$ устанавливалась в соответствии с частотой вращения шпинделя ($n = 13,3 \text{ c}^{-1}$):

$$V_{\text{обр}} = \pi D_{\text{max}} n, \quad (3.8)$$

где D_{max} – средняя величина диаметра рабочей части образцов ($D_{\text{max}} = 0,0086$ м);

При постоянной нагрузке P (в соответствии с методикой абразивного изнашивания Л.И. Барона устанавливали равной 20 Н) и частоте вращения шпинделя n изнашивали о поверхность абразива рабочую, деформированную с интенсивностью ε_{pi} , часть фрагмента в течение $t = 10$ с. По окончании испытания фрагмент очищали от продуктов разрушения, повторно взвешивали и определяли убыль массы Δm в кг. Опыт повторяли 5 раз. Перед каждым испытанием пластину абразива в кожухе 4 с помощью винтов 8 передвигали для обеспечения контакта образца с породой в новом месте. Для одной и той же ε_{pi} указанный цикл испытаний проводили на 3-х образцах. Следующую серию экспериментов проводили на фрагментах, деформированных с другой интенсивностью ε_{pi} .

По результатам экспериментов для каждой серии испытаний строили график зависимости суммарной убыли массы $\Sigma \Delta m$ фрагментов от продолжительности абразивного воздействия среды t . Через экспериментальные точки проводили экстраполяционную прямую, тангенс угла наклона которой принимали за интенсивность изнашивания K в кг/с материала, подвергнутого деформации ε_p заданной интенсивности. Величину обратную K принимали за износостойкость I материала, деформированного с данной интенсивностью.

3.5 Выводы по Главе 3

1. С учетом существующих методов исследования сконструирован экспериментальный стенд, позволяющий исследовать закономерности абразивного изнашивания о горные породы фрагменты локальных зон наибольшего износа державок поворотных резцов, подвергнутых термомеханической обработке.

2. Разработана методика термомеханической обработки фрагментов поворотных резцов, деформированных с заданной интенсивностью пластической деформации.

3. С использованием программного комплекса *DEFORM-3D* проведено компьютерное моделирование процесса одноосного сжатия цилиндрических заготовок на ковочном молоте.

4. Разработана методика изнашивания фрагментов локальных зон наибольшего износа, подвергнутых ТМО с различной интенсивностью пластической деформации, в условиях, моделирующих изнашивание державки поворотного резца проходческих комбайнов при его работе по горным породам.

Глава 4 Экспериментальное исследование влияния твердости в локальных зонах наибольшего износа державок поворотных резцов на их износостойкость

4.1 Влияние термомеханической обработки на твердость фрагментов

Таблица 4.1 иллюстрирует результаты измерения твердости поверхности рабочей части исходных фрагментов (образцы №1), т.е. прошедших, как часть державки, типовую термическую обработку (закалка и низкий отпуск), и подвергнутых термомеханической обработке с различной интенсивностью деформации (образцы № 2 – 7). Там же (в скобках) для сравнения, приведены сведения о твердости головной части державок резцов по ГОСТ Р 51047-97 «Резцы для проходческих и очистных комбайнов. Общие технические условия», которая должна быть достигнут в результате ТТО.

Таблица 4.1 – Твердость рабочей части фрагментов, подвергнутых термической и термомеханической обработке с различной интенсивностью деформации

№ образцов	Интенсивность деформации ε_p	Твердость,	
		HRC*	HB, МПа
1	0	44 (35÷45)	4090 (3270÷4210)
2	0,17	48	4550
3	0,22	49	4690
4	0,32	52	5120
5	0,44	53	5250
6	0,49	54	5430
7	0,69	55	5600

* – средняя величина из замеров 3-х образцов

Из таблицы видно, что предварительная деформация фрагментов перед закалкой, то есть применение способа ТМО, приводит к повышению их твердости, возрастающей с повышением ε_p : для образцов, деформированных с максимальной интенсивностью ($\varepsilon_p \approx 0,7$) значения твердости материала

возрастают от 44 *HRC* (значения твердости державок, изготовленных по существующей технологии) до 55 *HRC*.

Кривая 1 рисунка 4.1 иллюстрирует зависимость твердости рабочей части фрагментов после ТМО, выраженной в единицах *HB*, от интенсивности пластической деформации ε_p , которой была подвергнута эта зона перед закалкой.

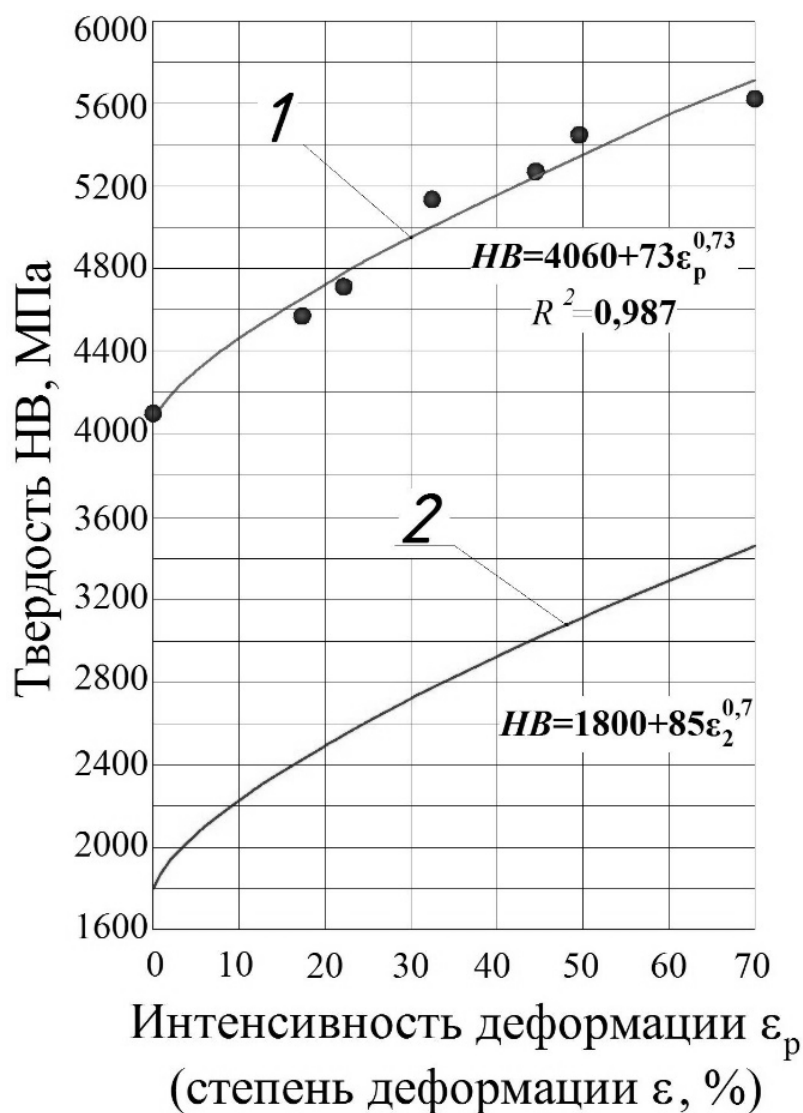


Рисунок 4.1 – Зависимость твердости стали 30ХГСА от интенсивности (степени) деформации при ВТМО (1) и холодном деформировании прокаткой (2)

Как показала математическая обработка экспериментальных данных, указанная зависимость удовлетворительно описывается степенным уравнением вида

$$HB = HB_0 + \Delta HB = HB_0 + A\varepsilon^x, \quad (4.1)$$

где HB_0 – твердость материала (стали 30ХГСА), не подвергнутого деформированию перед закалкой ($\varepsilon_p = 0$); ΔHB – приращение твердости вследствие деформирования в процессе ТМО; A , x коэффициенты, постоянные для данного материала ($A = 73$ МПа, $x = 0,73$)

На этом же рисунке (кривая 2) приведена зависимость HB от степени пластической деформации e_2 этой же стали, установленная в [67] для деформирования отожженного материала при холодной прокатке. (Как было показано в п. 3.3.3 (таблица 3.1), разница между интенсивностью ε_p и степенью e_2 пластической деформации при выражении e_2 по формуле (3.4), практикуемой при прокатке, несущественна).

Как можно заключить из вида кривых 1, 2 рисунка 4.1 и сравнения значений постоянных A , x их аналитических выражений, при существенной разнице в твердости исходных материалов (1800 МПа для стали в отожженном состоянии и 4060 – после закалки) влияние пластической деформации при высокотемпературной термомеханической обработке и холодном деформировании характеризуется зависимостями практически одинакового вида со значениями постоянных A , x , весьма близкими для двух указанных видов воздействия на металл. При этом твердость, приобретаемая сталью 30ХГСА в результате ТМО, при всех анализируемых интенсивностях (степенях) деформации примерно в 2 раза превышает величину HB для этого материала, деформируемого холодной обработкой давлением.

Такие результаты сравнения позволили предположить, что и для других прочностных показателей этой стали, таких как предел прочности σ_B и текучести $\sigma_{0,2}$, их зависимости от величины ε_p при ВТМО близки к виду аналогичных зависимостей от e_2 , установленных при холодном деформировании материала и описанных в литературе [67].

С учетом того, что после закалки и низкого отпуска сталь 35ХГСА характеризуется значениями условного предела текучести $\sigma_{0,2исх} = 1270$ МПа

(127 кгс/мм²) и прочности $\sigma_{\text{Висх}} = 1470$ МПа (147 кгс/мм²) [102], величины этих параметров после придания материалу при ВТМО интенсивности деформации $\varepsilon_p \approx 0,7$ равны в соответствии с формулами (2.1, 2.2) из [67] 1850 МПа и 1920 МПа, соответственно, что отвечает увеличению $\sigma_{0,2}$ на 30%, а σ_B на 23%.

4.2 Влияние твердости фрагментов локальных зон на их износостойкость

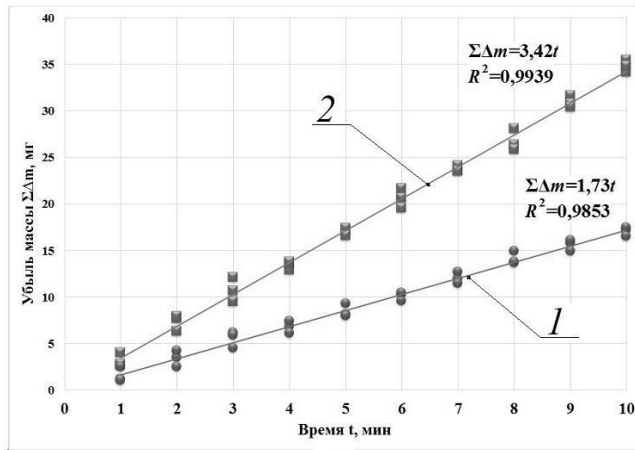
В таблицах В1, В2 (Приложение В) приведены экспериментальные данные по изнашиванию по двум, отличающимся крепостью и абразивностью, породам фрагментов локальных зон державок резцов, подвергнутых типовой (образцы №1) и высокотемпературной термомеханической обработкам (образцы № 2 – 7).

На рисунках В3, В4 (Приложение В) полученные соотношения между убылью массы фрагментов $\Sigma\Delta m$ и продолжительностью испытаний t аппроксимируются соответствующими аналитическими зависимостями.

Результаты экспериментов показали, что для всех анализируемых значений ε_p материала и обеих абразивных сред процесс изнашивания фрагментов с начального момента испытаний описывается линейной зависимостью (рисунки В3, В4)

$$\Sigma\Delta m = Kt, \quad (4.2)$$

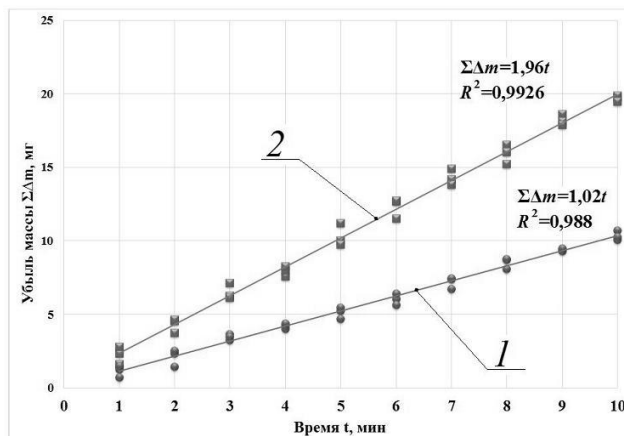
где K – интенсивность изнашивания, зависящая от вида абразивной среды и интенсивности пластической деформации ε_p материала фрагмента, убывающая с возрастанием ε_p (рисунки 4.2, 4.3).



ε_p	K , кг/с (мг/мин)	I , с/кг (мин/мг)
0	$5,7 \cdot 10^{-8}$ (3,42)	$1,75 \cdot 10^7$ (0,29)
0,17	$5,17 \cdot 10^{-8}$ (3,10)	$1,94 \cdot 10^7$ (0,32)
0,22	$4,37 \cdot 10^{-8}$ (2,62)	$2,29 \cdot 10^7$ (0,38)
0,32	$3,55 \cdot 10^{-8}$ (2,13)	$2,82 \cdot 10^7$ (0,47)
0,44	$2,97 \cdot 10^{-8}$ (1,78)	$3,37 \cdot 10^7$ (0,56)
0,49	$2,93 \cdot 10^{-8}$ (1,76)	$3,41 \cdot 10^7$ (0,57)
0,69	$2,88 \cdot 10^{-8}$ (1,73)	$3,47 \cdot 10^7$ (0,58)

б)

Рисунок 4.2 – Аппроксимирующие кривые зависимости $\Sigma\Delta m = f(t)$ для фрагментов, подвергнутых термомеханической обработке при $\varepsilon_p = 0,69$ (1) и закаленных без предварительного деформирования (2), при изнашивании о песчаник (а), а также интенсивность изнашивания K и износостойкость стали в зависимости от интенсивности пластической деформации фрагмента перед закалкой (б).



ε_p	K , кг/с (мг/мин)	I , с/кг (мин/мг)
0	$3,27 \cdot 10^{-8}$ (1,96)	$3,06 \cdot 10^7$ (0,51)
0,17	$3,03 \cdot 10^{-8}$ (1,82)	$3,29 \cdot 10^7$ (0,56)
0,22	$2,80 \cdot 10^{-8}$ (1,68)	$3,57 \cdot 10^7$ (0,58)
0,32	$2,03 \cdot 10^{-8}$ (1,22)	$4,92 \cdot 10^7$ (0,82)
0,44	$1,85 \cdot 10^{-8}$ (1,11)	$5,41 \cdot 10^7$ (0,90)
0,49	$1,72 \cdot 10^{-8}$ (1,03)	$5,83 \cdot 10^7$ (0,97)
0,69	$1,70 \cdot 10^{-8}$ (1,02)	$5,88 \cdot 10^7$ (0,98)

б)

Рисунок 4.3 – Аппроксимирующие кривые зависимости $\Sigma\Delta m = f(t)$ для фрагментов, подвергнутых термомеханической обработке при $\varepsilon_p = 0,69$ (1) и закаленных без предварительного деформирования (2), при изнашивании об алевролит (а), а также интенсивность изнашивания K и износостойкость стали в зависимости от интенсивности пластической деформации фрагмента перед закалкой (б).

По результатам статистической обработки экспериментальных данных для изнашивания фрагментов по песчанику среднеквадратическое отклонение составило $0,43 \div 0,98$ мг, для алевролита – $0,4 \div 0,62$ мг, что соответствует коэффициенту вариации 20-28% и 30-38%, соответственно.

Сопоставление величин K и $HВ$ показало, что для обеих пород интенсивность изнашивания фрагментов державки убывает с увеличением их твердости, достигаемой в результате термомеханической обработки (рисунок 4.4), в соответствии с уравнением

$$K = K_0 - C\Delta HВ \quad (4.3)$$

где K_0 – интенсивность изнашивания фрагмента, подвергнутого типовой термической обработке; $\Delta HВ$ – приращение твердости фрагмента вследствие ТМО; C – постоянная для каждой абразивной среды.

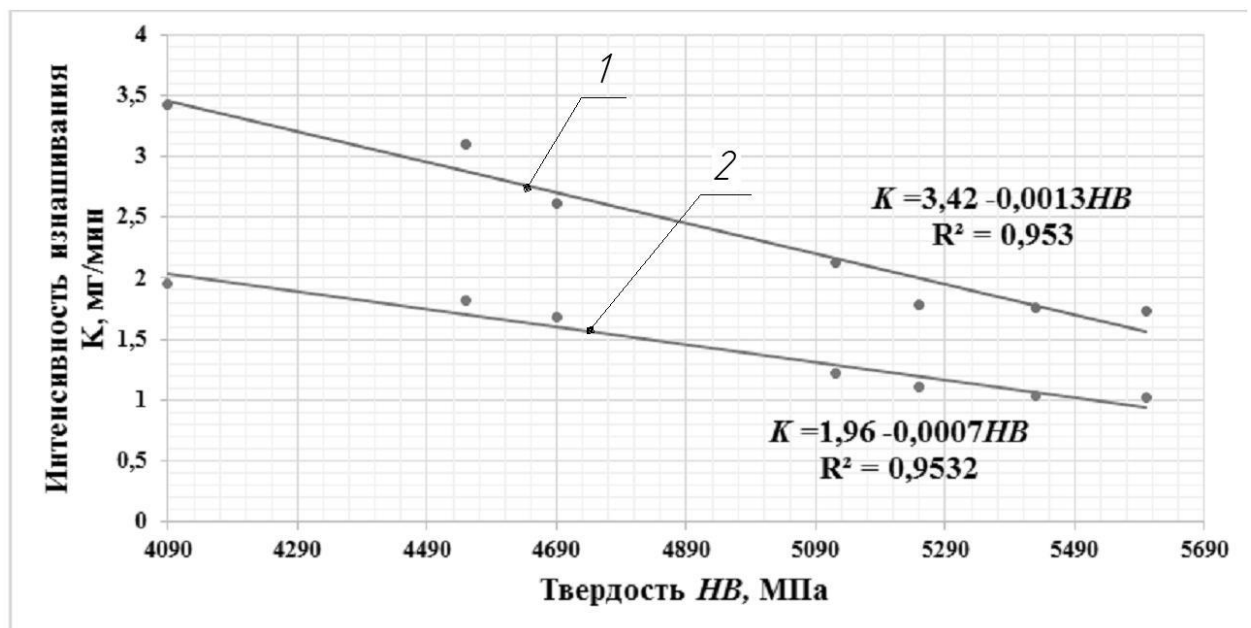


Рисунок 4.4 – Зависимость интенсивности изнашивания фрагментов державок резцов от их твердости, достигаемой в результате термомеханической обработки, при абразивном изнашивании о песчаник (1) и алевролит (2)

Установленные значения постоянных оказались равными:

- $C = -0,0013$ мг/(мин·МПа) = $2 \cdot 10^{-11}$ кг/(с·МПа) – для песчаника;
- $C = -0,0007$ мг/(мин·МПа) = $1 \cdot 10^{-11}$ кг/(с·МПа) – для алевролита.

Для максимальной твердости, достигаемой вследствие деформирования в процессе ТМО (5600 МПа), интенсивность изнашивания фрагментов, как по алевролиту, так и по песчанику по сравнению с исходным значением $HВ$ (4090 МПа) снижается примерно в 1,9 раза.

Как показала математическая обработка данных (рисунок 4.5), зависимость износостойкости I фрагмента державки от интенсивности его пластической деформации ε_p перед закалкой, как и в случае зависимости $HB = f(\varepsilon_p)$ (рисунок 4.1), также описывается степенным уравнением

$$I = I_0 + \Delta I = I_0 + B\varepsilon_p^y, \quad (4.4)$$

где I_0 – износостойкость фрагмента, не подвергнутого деформированию перед закалкой ($\varepsilon_p = 0$); ΔI – приращение износостойкости вследствие деформирования в процессе ТМО; B, y – постоянные для каждой абразивной среды.

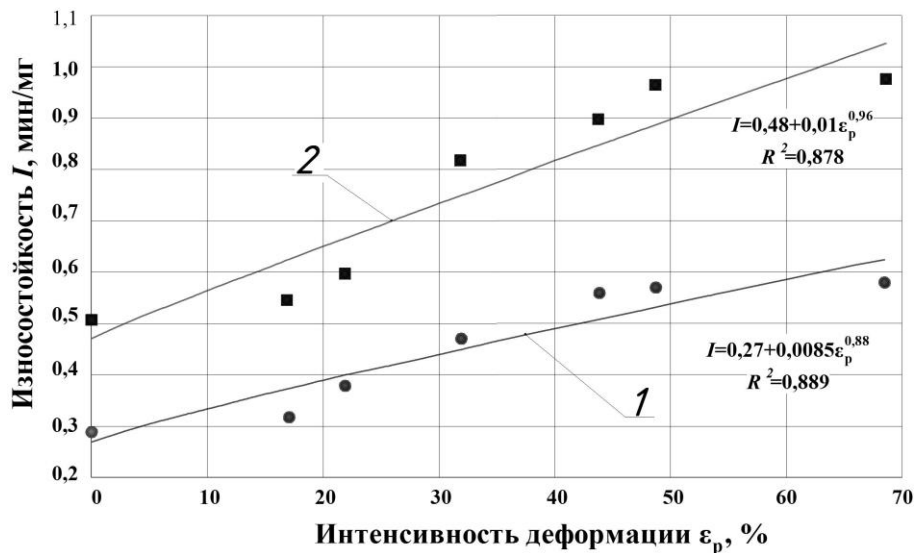


Рисунок 4.5 – Зависимость износостойкости фрагментов державок резцов от интенсивности их пластической деформации в процессе ТМО при абразивном изнашивании о песчаник (1) и алевролит (2)

Установленные значения постоянных оказались равными:

– $I_0 = 0,27$ мин/мг = $1,62 \cdot 10^7$ с/кг, $B = 0,0085$ мин/мг = $5,1 \cdot 10^5$ с/кг, $y = 0,88$ для песчаника;

– $I_0 = 0,48$ мин/мг = $2,88 \cdot 10^7$ с/кг, $B = 0,010$ мин/мг = $6 \cdot 10^5$ с/кг, $y = 0,96$ для алевролита.

Видно (рисунок 4.5), что при всех значениях ε_p износостойкость фрагментов при изнашивании по алевролиту (кривая 2) выше, чем по

песчанику (кривая 1), что объясняется меньшей абразивностью алевролита (10 мг по сравнению с 20 мг для песчаника).

Вид зависимости относительной износостойкости $I^* = I/I_0$ (где I_0 – износостойкость фрагмента, не подвергнутого деформированию перед закалкой) материала державки от приращения твердости ΔHB , получаемой в результате пластической деформации при ТМО (рисунок 4.6), удовлетворительно описывается линейным уравнением вида

$$I^* = 1 + C\Delta HB, \quad (4.5)$$

с коэффициентом C , практически одинаковым для обеих анализируемых пород ($C_{\text{ср}} = 0,0063$ мин / мг).

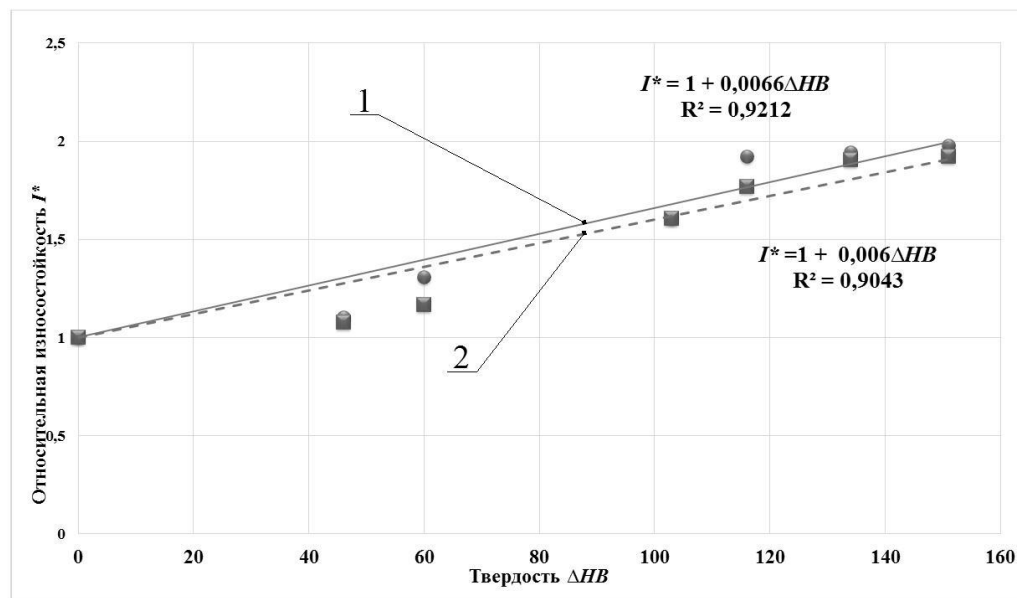


Рисунок 4.6 – Зависимость относительной износостойкости фрагментов державок резцов после ТМО от приращения твердости их поверхности, достигаемой при горячем пластическом деформировании, при изнашивании по песчанику (1) и алевролиту (2)

Вид установленной зависимости $I^* = 1 + C\Delta HB$, оказался близким к зависимостям $I^* = f(\Delta HB)$ [91, 102, 104], полученным для термически обработанных образцов сталей (закалка и отпуск при различной температуре), что может свидетельствовать о близости механизмов процессов закалки предварительно недеформированных и деформированных при высокой температуре стальных образцов. То обстоятельство, что для

двух различных пород – песчаника и алевролита коэффициент пропорциональности C между величинами I^* и ΔHB имеет практически одинаковое значение объясняется тем обстоятельством, что основу обеих указанных пород составляет один и тот же минерал – кварц [105].

4.4 Выводы по Главе 4

1. Установлено, что твердость поверхности фрагментов локальных зон державок из стали 30ХГСА поворотного резца возрастает с повышением интенсивности их пластической деформации ε_p , достигаемой в процессе ТМО, в соответствии со степенным уравнением

$$HB = HB_0 + \Delta HB = HB_0 + A \cdot \varepsilon^x,$$

где HB_0 – поверхностная твердость фрагмента, не подвергнутого деформированию перед закалкой ($\varepsilon_p = 0$); ΔHB – приращение твердости вследствие деформирования в процессе ТМО; A , x коэффициенты, постоянные для данного материала державки ($A = 73$ МПа, $x = 0,73$).

2. Для фрагментов, деформированных с максимальной интенсивностью ($\varepsilon_p \approx 0,7$), значение поверхностной твердости возрастает от 44 HRC (4090 МПа) – твердости поверхности державок из стали 30ХГСА при их изготовлении по существующей технологии – до 55 HRC (5600 МПа).

3. В условиях, моделирующих условия работы поворотных резцов, проведены испытания на абразивное изнашивание по материалам попутной породы средней крепости, наиболее часто встречающимся при работе проходческих комбайнов, фрагментов локальных зон державок, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке с различной интенсивностью ε_p пластической деформации.

4. Обнаружено, что для обеих пород интенсивность изнашивания фрагментов убывает с увеличением их твердости, достигаемой в результате термомеханической обработки, в соответствии с уравнением

$$K = K_0 - C \Delta HB$$

где K_0 – интенсивность изнашивания фрагмента, подвергнутого типовой термической обработке без пластического деформирования; ΔHB – приращение твердости фрагмента за счет ТМО; C – постоянная для каждой абразивной среды.

5. Для максимальной твердости, достигаемой в результате деформирования при ТМО (5600 МПа), интенсивность изнашивания фрагментов, как по алевролиту, так и по песчанику по сравнению с исходным значением HB (4090 МПа) снижается примерно в 1,9 раза.

6. Показано, что зависимость износостойкости I фрагментов державок резца от интенсивности их пластической деформации ε_p перед закалкой описывается степенным уравнением

$$I = I_0 + \Delta I = I_0 + B\varepsilon_p^y,$$

где I_0 – износостойкость фрагмента, не подвергнутого деформированию перед закалкой ($\varepsilon_p = 0$); ΔI – приращение износостойкости вследствие деформирования фрагмента в процессе ТМО; B, y – постоянные для каждой абразивной среды.

7. Обнаружено, что при всех анализируемых значениях ε_p (от 0,16 до 0,69) износостойкость стали 30ХГСА при изнашивании по алевролиту выше, чем по песчанику, что объясняется меньшей абразивностью алевролита.

8. Установлено, что зависимость относительной износостойкости фрагментов державки от приращения твердости ΔHB , получаемого в результате пластической деформации при ВТМО, удовлетворительно описывается линейным уравнением вида

$$I^* = 1 + C\Delta HB$$

с коэффициентом $C = 0,0063$ мин / мг, практически совпадающим для обеих анализируемых пород.

Глава 5 Разработка технологии создания локальных зон повышенной твердости державок поворотных резцов с целью повышения их износостойкости

Как следует из результатов, представленных выше результатов, износостойкость державок тангенциальных поворотных резцов может быть существенно повышена созданием локальных зон повышенной твердости, путем внедрения в технологию изготовления резцов операции высокотемпературной термомеханической обработки, т. е. проведением операции заковки непосредственно после изготовления державки горячим деформированием. В этой связи представлялось необходимым оценить, какую интенсивность пластической деформации получает державка резца в процессе ее формообразования на горизонтально ковочной машине (ГКМ) и достаточно ли этой деформации для эффективного повышения твердости (износостойкости) ее поверхности в результате последующей термической обработки. Анализ проводился на примере процесса изготовления державки резца РШ 32-70/16.М1.

5.1 Компьютерное моделирование процесса деформирования при формообразовании державок резцов

Как указывалось, в п. 1.6.2, изготовление державок резцов осуществляется методом горячей штамповки на горизонтально ковочной машине при использовании заготовок цилиндрической формы (для резца РШ 32-70/16.М1 длина заготовки 178 мм, диаметр 32 мм). Задача о распределении интенсивности пластической деформации по объему заготовки в процессе ее деформации в полости штампа с превращением в поковку решалась при допущениях, принятых при решении аналогичной задачи для осадки фрагмента из этой же стали на молоте (п. 3.3.2). При этом принималось, что:

1. Коэффициент трения между заготовкой и поверхностью пуансона близок к 0,7 (значению, принимаемому в программе *DEFORM-3D* для трения без смазки при горячем деформировании металлов).

2. Перемещение инструмента (пуансона) относительно неподвижного штампа осуществляется с постоянной скоростью (исходя из типичных режимов работы горизонтально-ковочных машин, принималась равной 90 мм/с).

Для проведения анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки при ее штамповке на ГKM в программе компьютерного моделирования Компас-3D были построены модели штампа и пуансона. После чего был произведен расчет НДС методом конечных элементов в программном комплексе *DEFORM-3D*.

5.1.1 Оценка интенсивности деформации в поверхностном слое державки резца при существующем производстве

Результаты компьютерного моделирования интенсивности пластической деформации, получаемой различными частями заготовки в процессе ее превращения в поковку державки, представлены на рисунке 5.1.

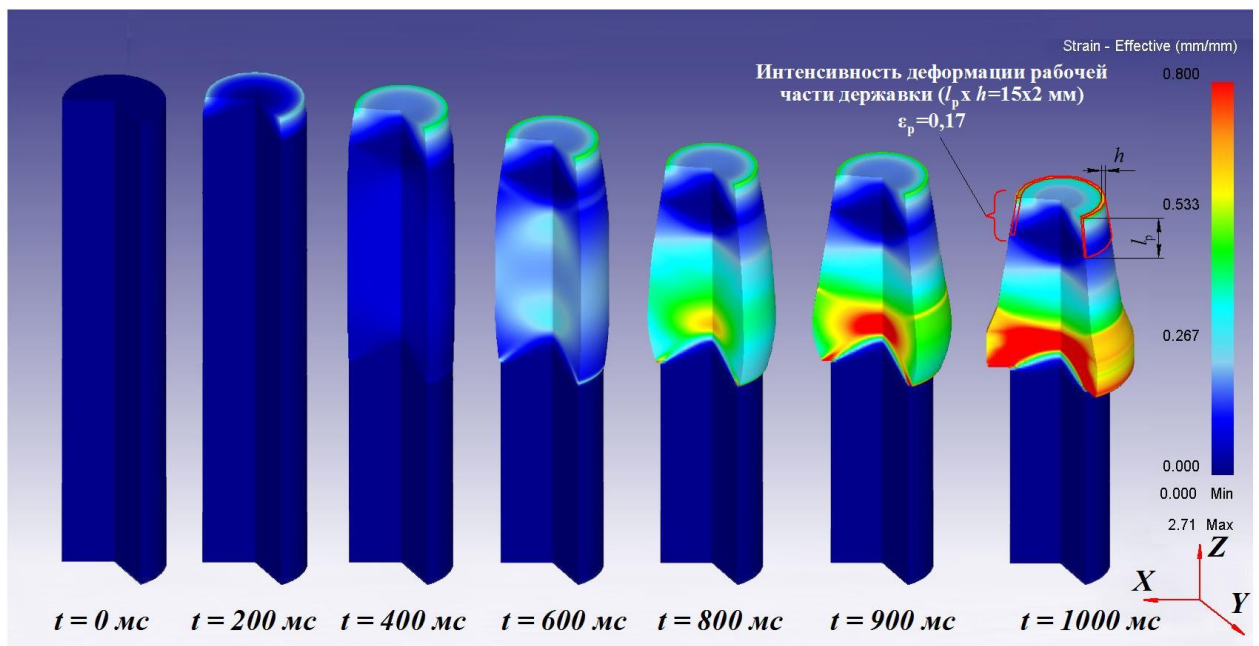


Рисунок 5.1 – Планограмма изменения формы заготовки и распределения интенсивности пластической деформации по ее объему в процессе изготовления державки

Как показало моделирование (рисунок 5.1), при использовании цилиндрических заготовок, применяемых при штамповке державок по существующей технологии изготовления резцов, интенсивность деформации ε_i , накопленная элементами державки в процессе штамповки, заметно различается для отдельных ее частей: максимальная величина ε (до 2,71) – в месте сопряжения хвостовой и головной частей державки; минимальная, близкая к 0, – в торцевой области головной части. Для зон наибольшего износа, части державки длиной $l_p = 15$ мм среднее значение интенсивности пластической деформации ε_p всех i -ых элементов поверхностного слоя (толщиной $h = 2$ мм), определяемое по правилу аддитивности Неймана

$$\varepsilon_p = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \frac{V_i}{\sum_{i=0}^n V_i}, \quad (5.1)$$

где ε_i , V_i – интенсивность деформации и объем i -го элемента, оказалось, равным 0,17.

В соответствии с результатами [65], подтвержденными нашими экспериментальными данными (кривая 1 рисунка 4.1), такая незначительная интенсивность деформации стали не может привести к существенному увеличению ее твердости в результате последующей закалки и, как следствие, износостойкости материала.

Следует отметить, что даже это незначительное упрочнение рабочей части державки, получаемое в результате деформирования заготовки при штамповке, снимается при существующей технологии изготовления резцов: поковка после ГKM подвергается самопроизвольному охлаждению на спокойном воздухе в течение времени, достаточном для протекания процесса рекристаллизации деформированного металла.

5.1.2 Повышение интенсивности деформации рабочей части державки изменением геометрии заготовки

Как показали оценочные расчеты, интенсивность деформации рабочей части державки может быть повышена следующими путями:

- изменением формы полости штампа;
- увеличением коэффициента трения со стенкой штампа;
- изменением формы заготовки.

Изменение формы полости штампа приведет к отклонению формы поковки от необходимой формы державки, для устранения чего потребуются дополнительная механическая обработка.

При увеличении силы трения на осуществление деформации потребуется затратить дополнительную работу, кроме того будет наблюдаться повышенный износ рабочего инструмента ГKM.

По этой причине, в качестве способа повышения интенсивности деформации головной части державки, как наиболее приемлемого, был выбран способ изменения формы исходной заготовки, что можно осуществить как путем предварительной механической обработки, так и предварительной обработкой давлением.

Как показывают результаты компьютерного моделирования процесса деформации используемой цилиндрической заготовки (рисунок 5.2), течение металла в ее головной части изменяет свое направление со временем: на начальной стадии (до 200 мс) металл движется в сторону действия силы (пуансона) – в верх, заполняя зазор между заготовкой и торцевой частью полости матрицы, при этом, не полностью заполняя этот зазор. В последующем (до 800 мс) металл движется вдоль боковой поверхности полости. На конечной стадии процесса (до ~ 1000 мс) происходит изменение направления течения в сторону торца поковки, и металл заполняет оставшуюся пустоту между поковкой и торцевой частью матрицы.

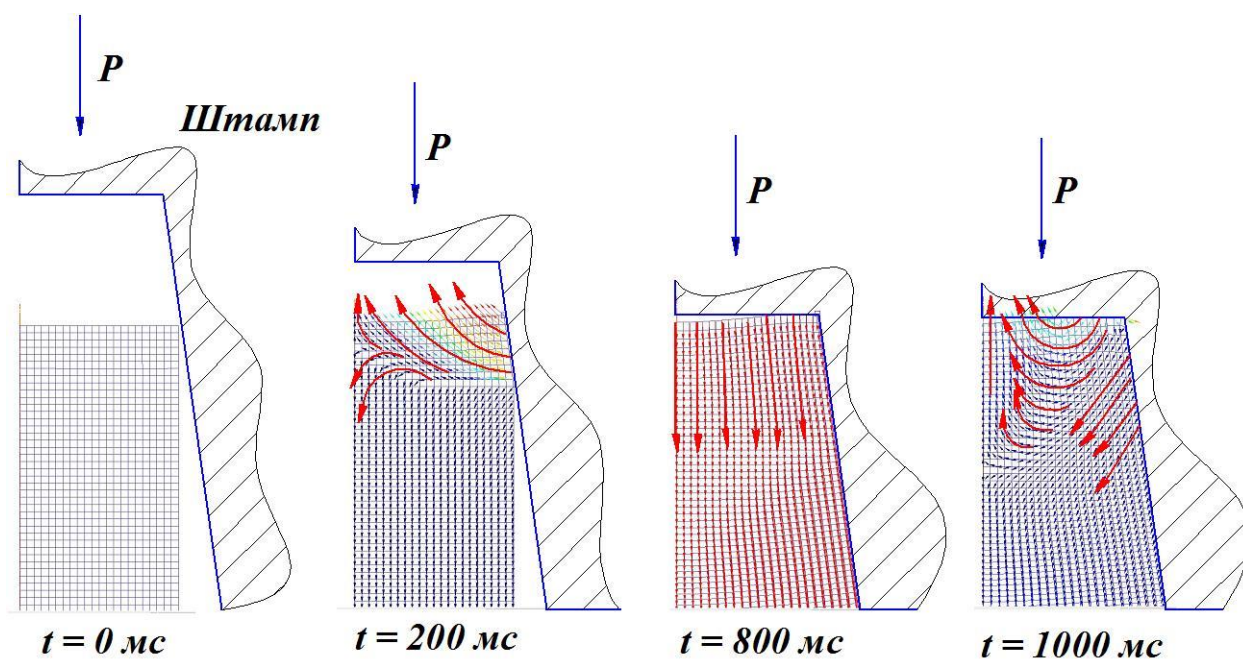


Рисунок 5.2 – Планограмма течения металла при штамповке заготовки цилиндрической формы

Анализ закономерностей движения различных i -ых элементов объема заготовки при штамповке показал, что интенсивность пластической деформации металла в рабочей части державки можно повысить образованием полости между головной частью заготовки и штампом, заполняемой металлом на конечной стадии деформирования. Это достигается выполнением в торцевой части заготовки фаски длиной b под углом α к оси заготовки (рисунок 5.3).

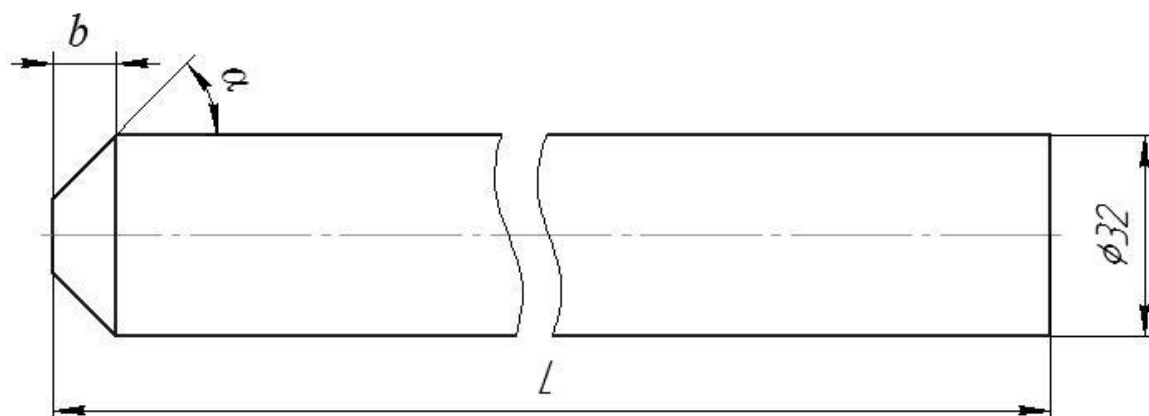


Рисунок 5.3 – Заготовка с измененной формой головной части

Компьютерным моделированием определяли рациональные геометрические параметры (b , α) фаски на заготовке (с сохранением геометрических параметров существующего штампа), при которых при штамповке достигается максимальная интенсивность пластической деформации ε_p материала поверхностного слоя рабочей части державки.

Угол выполнения фаски изменяли от 5 до 80° с шагом 5° при постоянном значении длины фаски $b = 12$ мм. Сохранение объемов заготовки до и после выполнения фаски достигали соответственным увеличением исходной длины l заготовки.

В соответствии с результатами компьютерного моделирования процесса деформации цилиндрической заготовки с фаской (рисунок 5.4) на начальных этапах штамповки (до 200 мс) головная часть заготовки деформируется в направлении торцевой части полости матрицы. В последующие промежутки времени (от 200 до 975 мс) форма головной части заготовки не претерпевает изменений - деформируется утолщенная часть поковки. На конечном этапе штамповки (от 975 до 1000 мс) заполняется оставшееся свободное пространство в верхней части матрицы, образовавшееся из-за разницы между углом нанесения фаски на заготовку и углом наклона боковой поверхности полости матрицы.

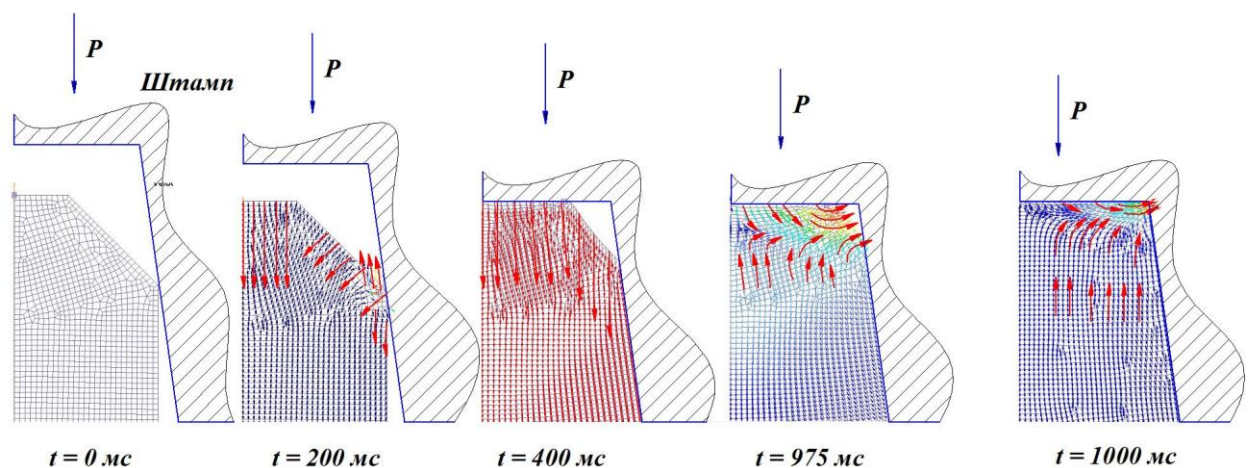


Рисунок 5.4 – Направление течения металла при штамповке заготовки с фаской ($\alpha=45^\circ$ и $b=10$ мм)

Диаграммы интенсивности деформации в поковках при различных углах нанесения фаски на заготовку представлены в Приложении А рисунок А1.

При этом было установлено (рисунок 5.5), что интенсивность пластической деформации металла в поверхностном слое рабочей части державки (ε_p) с увеличением угла фаски, выполненной на заготовке, вначале возрастает, достигает своего максимального значения в диапазоне углов 45° – 55° , превышая исходное значение ε_p для заготовки без фаски (0,17) в 2,9 раза, а затем убывает. (Малая величина ε_p для заготовок с малыми углами фаски ($\alpha < 10^\circ$) объясняется тем, что эти углы близки к углу наклона боковой поверхности полости штампа $\beta = 8^\circ$).

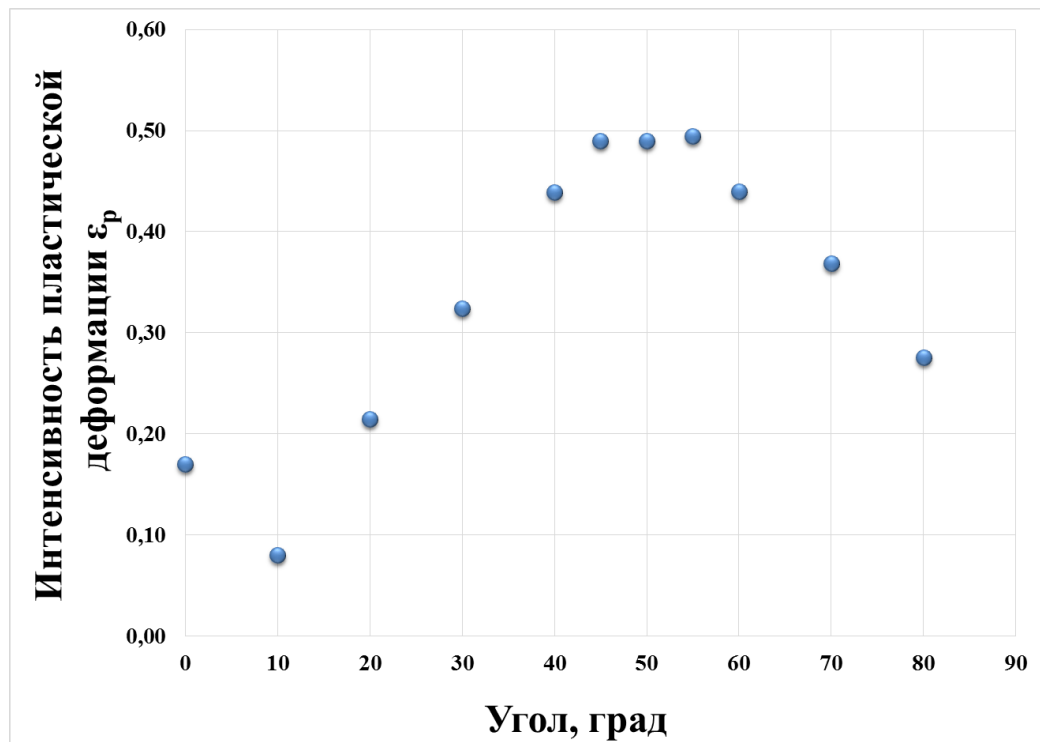


Рисунок 5.5 – Зависимость интенсивности пластической деформации металла на рабочей части державки резца ε_p от угла выполненной фаски на заготовке

Длину фаски b изменяли от 2 до 20 мм с шагом 2 – 3 мм при постоянном значении угла α ($\alpha = 45^\circ$).

Диаграммы интенсивности пластической деформации в поковках при различных длинах фаски на заготовке представлены в Приложении А рисунок А2.

Оказалось, (рисунок 5.6), что интенсивность пластической деформации рабочей части державки, как и в случае влияния величины α , с увеличением длины фаски вначале возрастает, достигает своего максимального значения в диапазоне длин 12÷14 мм, превышая исходное значение ε_p для заготовки без фаски в 4,1 раза, а затем убывает.

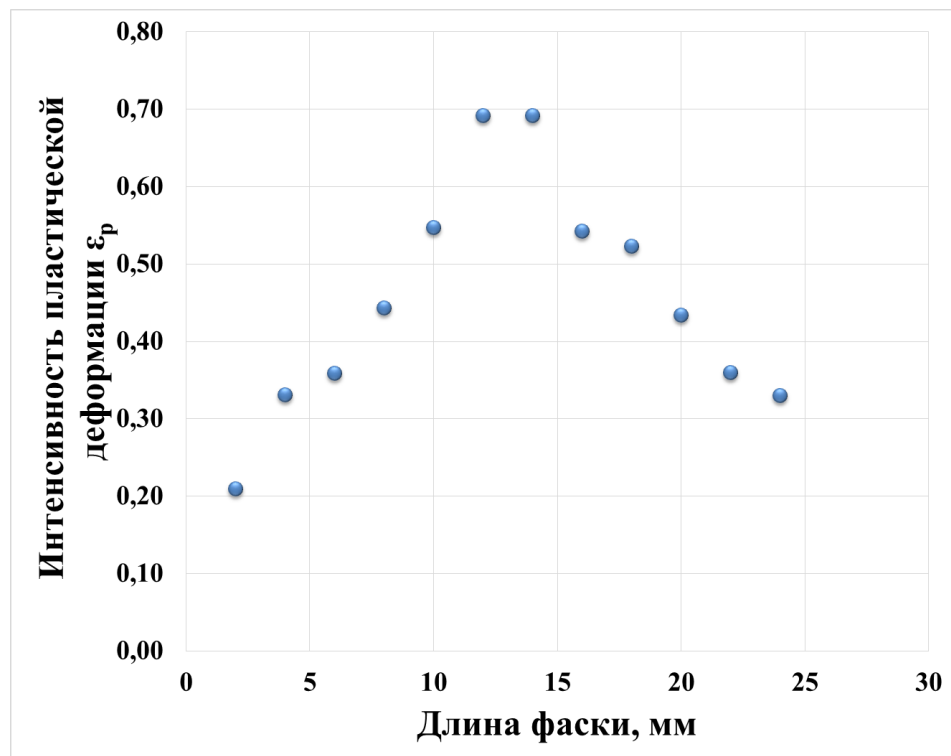


Рисунок 5.6 – Зависимость интенсивности пластической деформации металла на рабочем части державки резца ε_p от длины фаски, выполненной на заготовке

Для заготовки с фаской с размерами $\alpha = 45\div 55^\circ$, $b = 12\div 14$ мм наблюдается наибольшее повышение интенсивности пластической деформации ε_p в локальных зонах наибольшего износа (рабочей части) державки и среднее ее значение достигает величины ($\sim 0,7$), практически совпадающей со значением ε_p фрагментов в Главе 4, деформированных с максимальной интенсивностью.

5.2 Предлагаемое усовершенствование технологического процесса производства резцов

Как следует из представленных выше результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, износостойкость рабочей части державок тангенциальных поворотных резцов, может быть существенно (до 1,9 раз) повышена созданием локальных зон повышенной твердости путем внедрения в технологию изготовления резцов операции высокотемпературной термомеханической обработки. Предлагаемая усовершенствованная технология резцов включает следующие основные операции (рисунки 5.7, 5.8):

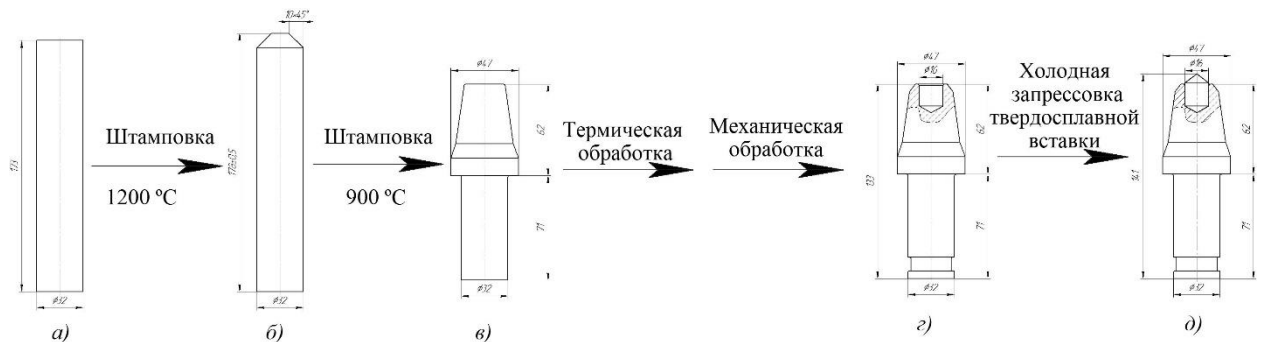


Рисунок 5.7 – Основные технологические операции усовершенствованной технологии производства резцов (на примере резца РШ 32-70/16.М1)

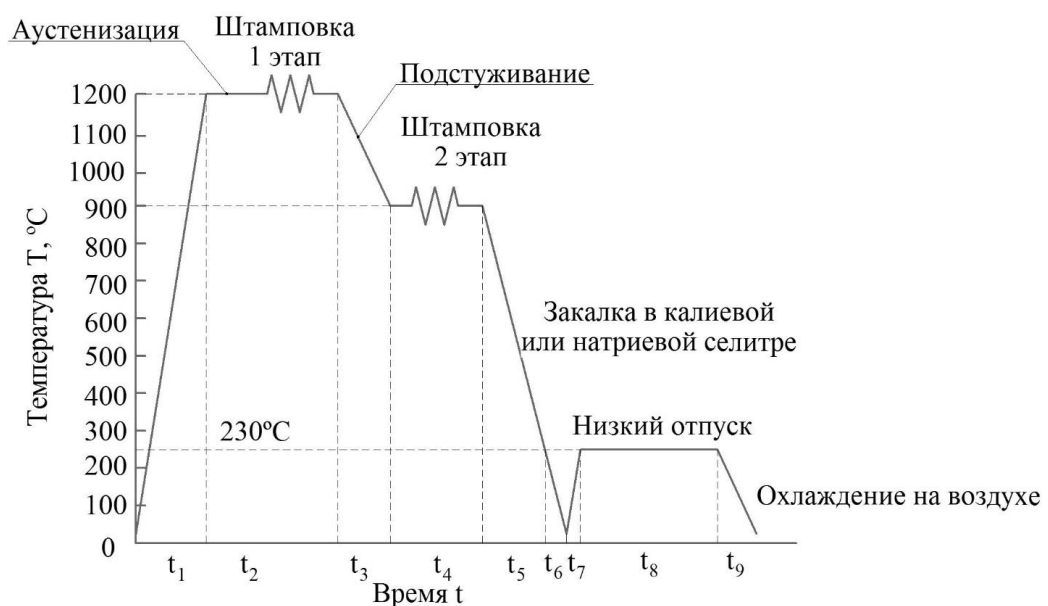


Рисунок 5.8 – Термограмма предлагаемой технологии производства резцов

- нагрев цилиндрической заготовки (рисунок 5.7, а) до температуры аустенизации ($1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) и выполнение штамповкой в ее головной части фаски геометрических параметров, установленных в результате компьютерного моделирования ($\alpha = 45\div 55^{\circ}$, $b = 12\div 14\text{ мм}$);
- подстуживание заготовки с фаской (рисунок 5.7, б) до температуры 900°C , штамповка на горизонтально-ковочной машине с получением поковки (рисунок 5.7, в);
- закалка поковки в расплавленной селитре или в масле;
- низкий отпуск поковки в печи при температуре $230\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- механическая обработка поковки с целью получения кольцевой проточки и закрытого паза для твердосплавной вставки (рисунок 5.7, г);
- запрессовка в полученную державку твердосплавной вставки, проводимая по технологии холодной посадки [106, 107, 108] (рисунок 5.7, д).

Механическая обработка, как и в случае существующей технологии производства резцов, производится на токарно-винторезном станке 16Б16КП с учетом повышенной твердости материала поковки (до 55 HRC). Режимы резания и предлагаемый инструмент указаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Основные операции и режимы резания

Операция	Инструмент	Подача S , мм/об	Скорость резания V , м/мин	Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹
Проточка кольцевого паза	Отрезной резец ВК 8 $b = 5\text{ мм}$	0,08	20	200
Сверление отверстия	Сверло Ø16 ВК8	0,025	45	900

Время на термические операции:

$$t_{TO} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9, \quad (5.2)$$

где, t_1 – время нагрева заготовки под ковку, с ($t_1 = 360\text{ с}$); t_2 – суммарное время аустенизации материала заготовки и времени штамповки на I этапе, с ($t_2 = 1770\text{ с}$); t_3 – время подстуживания поковки, с ($t_3 = 100\text{ с}$); t_4 – время штамповки II этап, с ($t_4 = 10\text{ с}$); t_5 – время закалки, с ($t_5 = 1\text{ с}$); t_6 – время охлаждения поковки на воздухе, с ($t_6 = 70\text{ с}$); t_7 – время нагрева под отпуск

стали, ($t_7 = 3525$ с); t_8 – время выдержки при температуре отпуска, с ($t_8 = 8460$ с); t_9 – время охлаждения на воздухе после отпуска, ($t_9 = 70$ с).

Как показывает оценочный расчет, общее время термических операций $t_{ТО}$ составляет 14366 с.

Для осуществления операции холодной запрессовки в закрытом пазу державки, предназначенном для установки вставки, снимается заходная фаска (1,5 мм х 30°), а паз выполняется диаметром, несколько меньшим диаметра твердосплавной вставки. Например, для диаметра вставки резца РШ 32-70/16.М1 $D = 16$ мм, изготавливаемого с допуском от +0 до -0,011, допуск на диаметр отверстия в державке составляет от -0,015 до -0,023 (посадка в системе вала с натягом $\varnothing 16 P6/h7$) [109]. При сборке элементов с таким соотношением диаметров в сопряжении создается необходимый натяг, надежно удерживающий вставку в закрытом пазе. Высокая эффективность такого способа закрепления вставки в державку подтверждается длительным опытом эксплуатации резцов зарубежных заводов-изготовителей.

Время на операции механической обработки $t_{МО}$ зависит от режима резания. Для механической обработки стали 35ХГСА основное время механической обработки $t_{МО}$ может быть оценено в ~ 130 с.

Таким образом общее время цикла $t_{ц}$ с учетом запрессовки твердосплавной вставки ($t = 60$ с), без учета подготовительно заключительных операций, составляет ~ 14555 с или 4 часа, что на 0,4 часа (10%) меньше времени, затрачиваемого на производство резца по существующей технологии.

Кроме этого, усовершенствованная технология изготовления резцов является и менее энергозатратной. Как видно из сравнения рисунков 1.12 и 5.8, нагрев заготовок до высокой температуры по существующей технологии производится 2 раза (один раз под штамповку и еще раз под впаивание вставки и закалку), в то время как по предлагаемой – только 1 раз (нагревы под штамповку и закалку совмещены).

Применение предложенной технологии, позволяет получить зоны повышенной твердости в местах интенсивного износа (рисунок 5.9). При этом интегральная твердость в головной части державки резца составляет ~53 HRC.



Рисунок 5.9 – Распределение твердости по зонам в местах повышенного износа

Применение технологии создания локальных зон повышенной твердости позволяют не только повысить износостойкость поворотного резца, но и сократить время изготовления резца и снизить энергозатраты, что не приводит к увеличению стоимости производства одного резца.

5.3 Предельный путь резания усовершенствованного поворотного резца

Как показано результатами экспериментальных исследований и моделирования процесса штамповки, применение усовершенствованной технологии изготовления резцов повышает твердость в локальных зонах

державок с 44 до 58 *HRC*, что в свою очередь приведет к уменьшению интенсивности их изнашивания i_{Ln} и увеличению предельного пути резания резцом.

В таблице 5.2 приведены интенсивности изнашивания K_{Ln} – фрагментов локальных зон державки, выраженные в мм/км, рассчитанные из величины этого показателя в кг/с с учетом скорости перемещения фрагмента в экспериментах и плотности материала державки.

Таблица 5.2 – Интенсивность изнашивания фрагментов державки после различных режимов ВТМО при абразивном изнашивании о песчаник и алевролит

№ фрагмента	Твердость <i>HB</i> , МПа (<i>HRC</i>)	Интенсивность изнашивания			
		алевролит		песчаник	
		<i>K</i> , кг/с	K_{Lj} , мм/км	<i>K</i> , кг/с	K_{Lj} , мм/км
1	4090 (44)	$3,26 \cdot 10^{-8}$	0,144	$5,7 \cdot 10^{-8}$	0,250
2	4550 (48)	$3,03 \cdot 10^{-8}$	0,133	$5,17 \cdot 10^{-8}$	0,227
3	4690 (49)	$2,81 \cdot 10^{-8}$	0,123	$4,37 \cdot 10^{-8}$	0,192
4	5120 (52)	$2,03 \cdot 10^{-8}$	0,089	$3,55 \cdot 10^{-8}$	0,156
5	5250 (53)	$1,85 \cdot 10^{-8}$	0,081	$2,97 \cdot 10^{-8}$	0,130
6	5430 (54)	$1,72 \cdot 10^{-8}$	0,075	$2,93 \cdot 10^{-8}$	0,129
7	5600 (55)	$1,70 \cdot 10^{-8}$	0,074	$2,88 \cdot 10^{-8}$	0,127

При установлении интенсивности изнашивания (i_{Ln}) локальных зон державки и предельного пути резания ($L_{пд}$) усовершенствованного резца по имитационной модели (п.2.3) исходили из экспериментально установленного факта (рисунок 4.4), что интенсивность изнашивания фрагментов державки в лабораторных условиях прямо пропорциональна их твердости. Это обстоятельство позволило прийти к заключению, что и в условиях эксплуатации резца интенсивность изнашивания его державки в каждом сечении i_{Ljn} так же пропорциональна ее твердости.

$$i_{Ljn} = \frac{i_j K_{L1}}{K_{Ln}}, \quad (5.4)$$

где i_j – интенсивность изнашивания (отношение толщины изношенной части державки (величины износа) в каждом сечении резца к пройденному пути), мм/км; K_{L1} – интенсивность изнашивания фрагмента (№1 таблицы 5.2) с твердостью, соответствующей твердости державки, получаемой при

существующей технологии, мм/км; K_{Ln} – интенсивность изнашивания фрагмента с твердостью, соответствующей твердости в определенном зоне износа державки, после получения державки по усовершенствованной технологии, мм/км.

Тогда, предельный путь до наступления отказа резца $L_{пд}$:

$$L_{пд} = \frac{e_j}{i_{Ljn}}, \quad (5.5)$$

В качестве примера, произведен расчет при разрушении поворотным резцом типа РШ 32-70/16.М1 алевролита прочностью 52 МПа и абразивностью 10 мг после создания локальных зон твердости, при работе в составе исполнительного органа проходческого комбайна КП-21 (продольно-осевая коронка) в кулаке №9 [89] до момента, непосредственно предшествующего выламыванию твердосплавной вставки и скорости резания V_p с учетом частоты вращения исполнительного органа – 1 м/с; средняя толщина стружки $h = 35$ мм;

Рисунок 5.10 иллюстрирует результаты расчета формы износа резца РШ 32-70/16.М1, изготовленного по усовершенствованной технологии (а), по сравнению с резцом, изготовленным по существующей технологии (б), при одинаковом пути резания при разрушении алевролита: если при существующей технологии изготовления предельный путь резания резца составляет 13,5 км, то по усовершенствованной – 26,5 км, т.е. увеличивается в 1,9 раза. Таким образом, снижение интегральной интенсивности изнашивания в зонах наибольшего износа приводит к повышению износостойкости поворотного резца до 1,9 раза, тем самым увеличивая предельный путь резания одним резцом пород средней крепости и абразивности.



Рисунок 5.10 – Формы износа резца РШ 32-70/16.М1, изготовленного по усовершенствованной технологии (а), по сравнению с резцом, изготовленным по существующей технологии (б), при одинаковом пути резания при разрушении алевролита ($L=13,5$ км)

Подставляя в данную модель интенсивность изнашивания, предельный путь до наступления отказа резца всех резцов, установленных на исполнительном органе проходческого комбайна было установлено, что общая наработка комплекта резцов повысилась в 1,6 раза.

5.4 Выводы по Главе 5

1. С использованием программы *DEFORM-3D* методом конечных элементов проведено компьютерное моделирование процесса пластической деформации заготовки из стали 30ХГСА в процессе ее штамповки на горизонтально-ковочной машине.

2. Анализом напряженно-деформированного состояния металла при штамповке обнаружено, что использование заготовки, применяемой при изготовлении державок цилиндрической формы, приводит лишь к

незначительной интенсивности пластической деформации ($\varepsilon_p=0,17$) металла в рабочей части поковки.

3. Установлено, что выполнение фаски на головной части применяемой заготовки приводит к повышению интенсивности пластической деформации в поверхностном слое рабочей части державки.

4. На основании проведенного компьютерного моделирования установлено, что наибольшая интенсивность пластической деформации металла в поверхностном слое рабочей части державки, в 4,1 раза превышающая величину ε_p , достигаемую при использовании применяемых цилиндрических заготовок, достигается выполнением на головной части заготовки фаски длиной $12\div 14$ мм под углом 45° - 55° .

5. Предложена технология создания локальных зон повышенной твердости на поворотных резцах, путем термомеханической обработки их державок и холодной запрессовки твердосплавной вставки в державку, обеспечивающая повышенные показатели износостойкости.

6. Применение технологии создания локальных зон повышенной твердости позволяют не только повысить износостойкость поворотного резца, но и сократить время изготовления резца и снизить энергозатраты, что не приводит к увеличению стоимости производства одного резца.

7. Экспериментально установлено, что повышение локальной твердости отдельных зон державки поворотного резца РШ 32-70/16.М1, установленного на исполнительном органе проходческого комбайна от 44 до 55 HRC, повышают интегральную износостойкость резца до 1,9 раз, в зависимости от места установки резца, для условий его применения в породах средней крепости и абразивности.

8. Создание локальных зон в местах повышенного износа приводит к повышению наработки комплекта резцов, установленных на исполнительном органе проходческого комбайна до 1,6 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические выводы, сделанные в результате выполненных исследований, заключаются в следующем:

1. В результате обобщения данных и исследований, установлено, что при работе проходческих комбайнов по породам малой и средней крепости и абразивности основной причиной выхода их поворотных резцов из строя является износ головной части стальной державки резца, приводящий к оголению твердосплавной вставки и ее выламыванию из державки или поломке, при этом затраты на замену инструмента достигают от 10 до 30% от общей стоимости проходческих работ.

2. Разработана имитационная модель процесса изнашивания поворотного резца в отдельных локальных зонах его поверхности с учетом специфики установки резца на исполнительном органе проходческого комбайна в процессе эксплуатации, позволяющая оценивать характер, форму, интенсивность износа рабочей поверхности резца во времени с целью повышения достоверности оценки его состояния и величины остаточного ресурса в процессе эксплуатации.

3. Экспериментально установлено, что повышение твердости в зонах наибольшего износа головной части державки поворотного резца с 44 HRC, характерной для серийных резцов, до 55 HRC, достигаемой совершенствованием технологического процесса формообразования державки, приводит к снижению их интенсивности изнашивания до 1,9 раз, в условиях, моделирующих работу проходческого комбайна по породам средней крепости.

4. Разработан экспериментальный стенд и методика исследования влияния твердости поверхностного слоя державок поворотных резцов на их износостойкость в условиях, моделирующих изнашивание отдельных локальных зон державок при работе проходческого комбайна.

5. Предложен, усовершенствованный технологический процесс формообразования державки поворотного резца, включающий обоснование конструкции заготовки державки резца и применяемой термической обработки, обеспечивающий повышение интегральной износостойкости головной части державки резца до 1,9 раз по сравнению с серийным.

6. Результаты исследований по повышению износостойкости поворотных резцов горных машин рекомендованы к внедрению в технологический процесс изготовления резцов на заводах ООО «Горный инструмент» и ОАО «Копейский машиностроительный завод», а также к использованию в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 151000 «Технологические машины и оборудование» и инженеров по направлению 130400 «Горное дело» специализации «Горные машины и оборудование».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A_{c3} – критическая температура плавления металла, °С;
 A_{r3} – критическая температура охлаждения металла, °С;
 a – абразивность горной породы, мг;
 a – ширина рабочей части деформированного образца, мм;
 B – коэффициент выдержки, с/мм;
 b – длина фаски, мм;
 b – ширина зоны контакта, мм²;
 b_r – расчетная ширина режущей кромки, мм;
 C – постоянный коэффициент зависящий от материала, мин/мг;
 D_0 – начальный диаметр образца, мм;
 $D_{\max}$ – максимальный (конечный) диаметр деформированного образца, мм;
 D_3 – диаметр заготовки, м;
 D_{Π} – максимальный диаметр поковки, мм.
 $D_{\text{ср}}$ – средняя величина диаметра рабочей части образцов, мм;
 dx, dy, dz – приращения проекций длины на координатные оси, с учетом закона несжимаемости твердого тела;
 e_1, e_2 – истинная деформация (степень деформации);
 F_0, F – исходная и конечная (максимальная) площадь сечения образца, мм²;
 f – коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протоद्याконова;
 G – коэффициент нагрева, с/мм;
 H_0 – начальная высота образца, мм;
 H_i – конечная высота i -го образца, мм;
 HB_0 – твердость материала, не подвергнутого деформированию, кгс/мм²;

h – толщина слоя металла допустимая для истирания при эксплуатации резца, мм;

h – толщина стружки, мм;

I – износостойкость материала, мин/мг;

I_0 – износостойкость материала, не подвергнутого деформированию, мин/мг;

ΔI – приращение износостойкости за счет горячего деформирования, мин/мг;

I^* – относительная износостойкость;

K – скорость изнашивания материала, мг/мин;

K – коэффициент аустенизации, с/мм;

k_{an} – коэффициент, учитывающий влияние угла резания резца при разрушении пород;

l_p – длина рабочей части поковки, мм;

M_H – температура начала мартенситного превращения, °С;

n_k – частота вращения коронки проходческого комбайна, мин⁻¹;

n – частота вращения шпинделя, мин⁻¹;

P – усилие прижатия образца к абразиву, Н;

P – усилие штамповки, Н

P_k – контактная прочность породы, МПа;

r – радиус расположения резца на коронке, мм;

S – площадь контакта образца и пластины абразива, мм²;

S_p – площадь контакта резца с породой в процессе резания, мм²;

S_z – проекция площадки затупления, мм²;

$T_{отп}$ – температура отпуска металла, К;

$T_{пл}$ – температура плавления металла, К;

$T_{рек}$ – температура рекристаллизации металла, К;

T_H – температура нагрева металла, К;

T_H – начальная температура поковки, °С;

T_K – начальная температура поковки, °С;

t_i – значение шага резания резца, мм;

t – время истирания образца, с;

t_{TO} – время на термические операции, с;

t_{MO} – время на операции механической обработки, с;

$t_{ц}$ – время цикла производства резца, с;

t_b – время выдержки заготовки при температурековки, с;

t_k – времяковки, с;

t_1 – время нагрева заготовки подковку, с;

t_2 – время выдержки при температурековки и процессаковки заготовки подковку, с;

t_3 – время охлажденияпоковки, с;

t_4 – времянагревпоковки передпайкой и закалкой, с;

t_5 – время выдержки державки с припоем и аустенизации, с;

t_6 – время подстуживания державки и твердосплавной вставки перед закалкой, с;

t_7 – время закалки, с;

t_8 – время охлаждения на воздухе до комнатной температуры, с;

t_9 – время нагрева под отпуск стали, с;

t_{10} – время выдержки при температуреотпуска, с;

t_{11} – время охлаждения на воздухе после отпуска, с;

$V_{обр}$ – линейная скорость перемещения точек контакта на поверхности образца, м/с;

V_p – линейная скорость перемещения точек контакта на резце, м/с;

V_i – объем i -го участка, мм³;

V_0 – скорость охлаждения, °C/с;

x_0, y_0, z_0 – проекции исходной длины на оси координат, соответственно;

Z_{ij} – усилие на i -ом резце в j -ом положении, Н;

Z – усилие резания на резце, Н;

α – угол резания, град;

- α – угол наклона фаски, град;
 Δm – убыль массы металла, мг;
 ΔHB – приращение твердости, кгс/мм²;
 δ – относительное удлинение металла, %;
 δ – толщина стружки, мм;
 ε – степень пластической деформации, %;
 $\bar{\varepsilon}$ – эффективная степень деформации;
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – главные деформации, соответствующие напряжениям по осям x, y, z ;
 ε_p – среднее значение интенсивности деформации;
 $\varepsilon_{кр}$ – критическая степень деформации;
 ε_i – интенсивность деформации i -го участка;
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительная деформация, %;
 μ_p – коэффициент сопротивления резанию;
 $\Sigma \Delta m$ – суммарная убыль массы металла, мг;
 $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа;
 σ_B – предел прочности материала, МПа;
 $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия, МПа;
 $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие породы, МПа;
 φ – центральный угол расположения резца на коронке, град;
 $A, B, C, n_1, n_2, n_3, x, y$ – постоянные коэффициенты зависящие от материала;
 МКЭ – метод конечных элементов;
 НДС – напряженно-деформированное состояние;
 «КМЗ» Копейский машиностроительный завод;
 ТМО – термомеханическая обработка;
 ВТМО – высокотемпературная термомеханическая обработка;
 НТМО – низкотемпературная механическая обработка;
 ПТМО – полугорячая термомеханическая обработка;

ОМД – обработка металлов давлением;

CAD (CAE) система автоматизированного проектирования (системы инженерного анализа);

ГКМ – горизонтально-ковочная машина.

Список литературы

1. Бритарев, В.А. Горные машины и комплексы / В.А. Бритариев, В.Ф. Замышляев. – М.: Недра, 1984. – 288 с.
2. Барон, Л.И. Анализ различных способов разрушения горных пород применительно к созданию породопроходческих комбайнов. / Л.И. Барон, Б.М. Логунцов. - Гос. ком. Совета Министров СССР по топливной промышленности; Центр. Ин-т техн. Информации угольной промышленности. - М., 1962. – 55 с.
3. Барон, Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, Е.К. Губенков. - М.: Наука, 1968. – 216 с.
4. Тургель, Д.К. Горные машины и оборудование подземных разработок. / Д.К. Тургель. – Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 302 с.
5. Чеченков, М.С. Разработка прочных грунтов. / М.С. Чеченков. – Л.: Ст-т., 1987. – 231 с.
6. Цыганков, Д.А. Новая технология добычи крепких горных пород / Д. А. Цыганков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. - № 3. – С. 98-102.
7. Пат. RU 2131032 C1 МПК E21C37/02. Способ разрушения горных пород. / Кю Н.Г., Чернов О.И. - № 97114211/03; Заявлено 01.08.1997.
8. Лебедев, Ю.А. Добыча гранитных блоков в ЮАР. / Ю.А. Лебедев, А.К. Горьков, А.Б. Макаров // Горный журнал. – 1996. – № 6. – С. 43–44.
9. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих веществ при фиксированном сопротивлении их объемному расширению. / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – 2010. – № 18. – С. 135–149.

10. Крапивин, М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я. Раков, Н.И. Сысоев. – М.: Недра, 1990. – 256 с.
11. Солод, В.И. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. / В.И. Солод, В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек. – М.: Недра, 1982. – 350 с.
12. Хорешок, А.А. О состоянии и перспективах развития средств механизации горнопроходческих работ в условиях Кузнецкого угольного бассейна. / А.А. Хорешок, В.В. Кузнецов, А.Ю. Борисов // Горная техника. – 2008. – С.86-90.
13. Хорешок, А.А. Повышение эффективности эксплуатации горных комбайнов. / А.А. Хорешок, А.М. Цехин, В.М. Завьялов, В.В. Кузнецов, А.Ю. Борисов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Тр. Межд. Науч.-практ. Конф. Кемерово: ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского, ИУУ СО РАН, Куз.ГТУ. – 2009. – С.174-179.
14. Леванковский, И.А. Научные основы создания высокоэффективных инструментов для разрушения горных пород и породосодержащих композитов: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.06 / Леванковский Игорь Анатольевич. – М., 1999. – 335 с.
15. Кантович, Л.И. Горные машины: учебник для техникумов / Л.И. Кантович, В.Н. Гетопанов. – М.: Недра, 1989. – 304 с.
16. Хорешок, А.А. Производство и эксплуатация разрушающего инструмента 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.
17. Маметьев, Л.А. Тенденции формирования парка проходческих комбайнов на шахтах Кузбасса / Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2013. – №2. С. 14–16.
18. Кантович, Л.И. Горные машины: учебник для техникумов / Л.И. Кантович, В.Н. Гетопанов. – М.: Недра, 1989. – 304 с.

19. Каталог выпускаемой продукции компании «Копейский Машиностроительный завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kopemash.ru/products/12/108.html>
20. Инструмент для очистных и проходческих комбайнов: Тангенциальные поворотные резцы. Радиальные резцы. Втулки и резцедержатели. Аксессуары: Каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://grins.ru/pdf/Cutting_tool_system_for_mining.pdf.
21. *Underground mining: Catalog.* / Kennametal Inc. Latrobe, Pa., 2004. – 60 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Mining/B-12-02961_KMT_UGM13_EN_LR.pdf.
22. *Cutting tool systems for mining: Catalog.* / Sandvik Mining and Constraction. [Stockholm], 2008. – 56 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Polan/S004947.nsf/Alldocs/Products*5CRock*tools*and*systems*5CCutting*tool*systems*2ACutting*tool*systems*for*mining/\\$FILE/MGT_Mining_2010.pdf](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Polan/S004947.nsf/Alldocs/Products*5CRock*tools*and*systems*5CCutting*tool*systems*2ACutting*tool*systems*for*mining/$FILE/MGT_Mining_2010.pdf).
23. Каталог выпускаемой продукции компании Бетек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.betek.de/onlinekatalog/ru/mining>.
24. ГОСТ Р 51047-97 Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические требования. - М.: Госстандарт РФ, 1997. – 24 с.
25. Глатман, Л.Б. Основные аспекты создания новых поколений поворотных резцов для разрушения горных пород. / Л.Б. Глатман, И.А. Леванковский, С.И. Мультанов // Горный вестник. – 1993. – № 2. – С. 54-60.
26. Барон, Л.И. Коэффициенты крепости горных пород. / Л.И. Барон. – М.: Наука, 1972. – 176 с.
27. Глатман, Л.Б. О контактной прочности и агрегатной твердости горных пород // Научные сообщения / Акад. Наук СССР. Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД, 1977. – Вып. 154. – С. 3-9.

28. Барон, Л.И. Абразивность горных пород при добывании / Л.И. Барон, А.В. Кузнецов. – М.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1961. – 168 с.
29. Барон, Л.И. Методика испытаний горных пород на абразивность / Акад. Наук СССР. Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД, 1960. – 15 с.
30. Глатман, Л.Б. Инструмент очистных и проходческих комбайнов. / Л.Б. Глатман, Б.М. Логунцов, Е.З. Позин // Итоги науки и техники. ВИНТИ Сер. «Горн. и нефтепромысл. машиностроение». – М.: ВИНТИ, 1978. – Т.5 – 214 с.
31. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
32. Малевич, Н.А. Горнопроходческие машины и комплексы: Учебник для вузов. / Под ред. В.А.Бреннера.– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 384 с.
33. Курбатов, В.М. Шахтные испытания резцов РКС-1. / В.М. Курбатов, А.Н. Мельников// Научные сообщения Акад. Наук СССР. Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД. – 1977. – Вып. 155. – С. 28-31.
34. Глатман, Л.Б. Состояние и перспективы использования механического способа разрушения пород для создания проходческих комбайнов. / Л.Б. Глатман // Теория и практика разрушения углей и горных пород: Материалы Науч. Совета по пробл. «Новые процессы и способы пр-ва работ в горн. Деле» Гос. ком Совета Министерств СССР по науке и технике. [Материалы семинара]. – М.: ИГД. – 1978. – С. 61-62.
35. Коняшин, Ю.Г. Некоторые результаты исследований процессов разрушения горных пород тангенциальными резцами с круглыми стержнями и коническими головками. / Ю.Г. Коняшин, А.И. Кравцов // Научные сообщения Акад. Наук СССР. Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД. – 1979. – Вып. 179. – С. 25-32.

36. Курбатов, В.М. Исследование износа резцов РКС-1. / В.М. Курбатов, В.З. Нацвлишвили // Научные сообщения Акад. наук СССР. Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. – М.: ИГД. – 1979. – Вып. 178. – С. 7-11.
37. Курбатов, В.М. Опыт применения поворотных резцов РКС-1 на проходческих комбайнах. / В.М. Курбатов, А.Н Мельников // Разработка и опыт применения новых типов горнорежущего и горнобурового инструмента: Темат. сб. – Киев: ИСМ. – 1983. – С. 8-9.
38. Глатман, Л.Б. Поворотные резцы для проходческих комбайнов. / Л.Б. Глатман // Научные сообщения Акад. наук СССР. Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. – М.: ИГД. – 1981. – Вып. 202. – С. 7-11.
39. Кекелидзе, З.Ш. Определение рациональных геометрических параметров и углов установки поворотных резцов для проходческих комбайнов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Кекелидзе Зураб Шахметович. – Тбилиси, 1981. – 16 с.
40. Нацвлишвили, В.З. Установление нагрузок на поворотных резцах в процессе их изнашивания при работе проходческих комбайнов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Нацвлишвили Варлам Зурабович. – Тбилиси., 1982. – 15 с.
41. Цыпин, Я.Л. Исследование нагрузок на поворотных резцах исполнительных органов очистных угольных комбайнов и разработка методики их расчета: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Цыпин Яков Львович. – М., 1986. – 15 с.
42. Чавчанидзе, К.Г. Разработка методов расчета износостойкости и нагруженности поворотных резцов проходческих комбайнов: автореф. дисс ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Чавчанидзе Каха Гурамович. – Тбилиси., 1989. – 24 с.
43. Базер, И.Я. Поворотные резцы для разрушения угля и горных пород. / И.Я. Базер, И.Ф. Борисов, Л.Б. Глатман, В.И. Крутилин / / М-во угольн. пром. СССР. Экспресс-информация. – М.: ЦНИЭИуголь, 1977. – 20 с.

44. Талеров, М.П. Повышение эффективности применения поворотных резцов проходческих комбайнов выбором рациональных геометрических параметров инструментов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06/ Талеров Михаил Павлович. – СПб., 2012. – 147 с.

45. Бобров, В.Л. Повышение износостойкости тангенциальных резцов проходческих комбайнов совершенствованием термической обработки при их изготовлении: дис. канд. техн. наук: 05.05.06/ Бобров Владимир Леонидович. – СПб., 2012. – 128 с.

46. Крестовоздвиженский, П.Д. Повышение прочности тангенциальных поворотных резцов горных очистных комбайнов: дис. ... кандидата технических наук: 05.05.06 / Крестовоздвиженский Павел Дмитриевич. – Новокузнецк, 2011. – 190 с.

47. Пат. RU 2448247 C1 МПК E21C35/18. Составной резец для горных машин. / Болобов В.И., Габов В.В., Талеров М.П., Талеров К.П. - № 2010148945/03; Заявлено 30.11.2010.

48. Клейнерт, Х.В. Состояние технологии разрушения пород исполнительными органами комбайнов избирательного действия. / Х.Ф. Клейнерт // Глюкауф на русском языке. - *Glückauf GmbH.Essen*, – 1989. – №15/16. – С. 25-31.

49. Дриш, С. Новые материалы режущих вставок резцов проходческих комбайнов избирательного действия. / С. Дриш, Х.В. Кляйнерт, Е. Хайф // Глюкауф на русском языке. – *Glückauf GmbH.Essen*. – 1992. – №5. – С. 85-90.

50. *Patent US No: 4,705,123 Int B22F Cutting element for a rotary drill bit and method for making.* / Dennis, Mahlon D. Publ 10 Nov., 1987.

51. Лахтин, Ю.М. Материаловедение. / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

52. Этапы процесса изготовления державок резцов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tehpostavka.com/derzavka.html>.

53. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением. / М.В. Сторожев, Е. А. Попов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 423 с.
54. Семенов, Е.И. Ковка и горячая штамповка: учебник / Е.И. Семенов — М.: МГИУ, 2011. — 414 с.
55. Гуляев, А.П. Металловедение: учеб. для вузов. / А.П. Гуляев. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1986. — 541 с.
56. Каменичный, И.С. Краткий справочник технолога-термиста / И.С. Каменичный — К.: Машгиз, 1963. — 287 с.
57. Балдаев, Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. / Л.Х. Балдаев. — М.: КХТ, 2004. — 134 с.
58. Собенин, Л.А. Устройство и ремонт тепловозов: Учебник для нач. проф. Образования. / Л.А. Собенин, В.И. Бахолдин, О.В. Зинченко, А.А. Воробьев. — М.: Академия, 2004. — 416 с.
59. Добаткин, С.В. Наноматериалы. Объемные металлические нано- и субмикрорекристаллические материалы, полученные интенсивной пластической деформацией: Учеб. Пособие. / С.В. Добаткин. — М.: МИС и С, 2007. — 36 с.
60. Рудской, А.И. Нанотехнологии в металлургии. / А.И. Рудской. — СПб.: Наука, 2007. — 186 с.
61. Чупин, С.А. Обоснование использования метода равноканального углового прессования в производстве породоразрушающих резцов с повышенными прочностными показателями / С.А. Чупин, В.И. Болобов // Сборник материалов конференции «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении». — СПб. — 2014. — Т. 2. — С. 93-97.
62. *Chupin, S.A. By applying the method equal channel angular extrusion for products submicron structure at the bulk of metal / Smart Nanocomposites, Proceedings from the seminar «Nanophysics and Nanomaterials». — Volume 4. — №1. — pp.55-59.*

63. Гольдштейн, М.И. Металлофизика высокопрочных сплавов: Учеб. Пособие для вузов. / М. И. Гольдштейн, В. С. Литвинов, Б.М. Бронфин. – М.: «Металлургия», 1986. – 310 с.
64. Mattox, Donald M. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control*. Westwood, N.J.: Noyes Publications, 1998. – 735 p.
65. Бернштейн, М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. / М.Л. Бернштейн. – М.: Metallurgiya, 1968. Т. 1-2. – 1172 с.
66. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов. / И.И. Новиков. – М.: Metallurgiya, 1978. – 392 с.
67. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. / А.В. Третьяков, В. И. Зюзин. - Справочник 2-е изд. М.: Metallurgiya, 1973. – 224 с.
68. Петрова, С.Н. Упрочнение сталей // С.Н. Петрова, В.Д. Садовский, Е.И. Соколов. – М: Металургиздат, 1960. – 111 с.
69. Леванковский, Л.А. Анализ и оценка влияния основных факторов и условий на износ поворотных резцов при работе проходческих комбайнов / Леванковский Л.А., Глатман Л.Б. // Разрушение горных пород и композиционных материалов поворотными резцами: Сб. научных трудов. – М.: АГН, 1998. – Вып.1. – С. 81–109.
70. Леванковский, И.А. Расчет износостойкости поворотных резцов при работе проходческих комбайнов. / И.А. Леванковский // Разрушение горных пород и композиционных материалов поворотными резцами: Сб. научных трудов. М.: АГН. 1998. – Вып.1. – С.110-128.
71. Тон, В.В. Статистические характеристики пути трения и изнашивания режущего инструмента // Научные сообщения / Акад. Наук СССР. Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД, 1973. – Вып. 113: Горные машины и их эксплуатация. С. 140-145.
72. Типовая методика приемочных испытаний опытных образцов (опытных партий) режущего инструмента для очистных комбайнов / М-во

угол. пром-сти СССР, Техническое управление, Ордена Трудового Красного Знамени Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского; [Разраб. проф., д.т.н. Е.З. Позин и др.]. – М.: ИГД, 1976 – 58 с.

73. Типовая программа и методика приемочных испытаний опытной партии режущего инструмента для проходческих комбайнов / М-во угол. пром-сти СССР, АН СССР, Ордена Трудового Красного Знамени Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского; [Разраб., д.т.н. Л.Б. Глатман и др.]. – М.: ИГД, 1977 – 36 с.

74. Курбатов, В. М. К установлению норм возврата твердого сплава резцов РКС-1 / В.М. Курбатов, Ю.Н. Линник, Н.С. Арустамян // Научные сообщения / Акад. наук СССР. Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. – М.: ИГД, 1981. – Вып. 202: Научно-технические вопросы комплексной механизации горнопроходческих работ. – С. 73–75.

75. Глатман, Л. Б. Влияние параметров режима резания и износа поворотных резцов на силовые показатели разрушения горных пород / / Л.Б. Глатман, Ю.Н. Козлов, В.М. Курбатов, В.З. Нацвлишвили // Научные сообщения / Акад. наук СССР. Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. – М.: ИГД, 1980. – Вып. 189: Новые методы разрушения углей и горных пород. – С. 15–19.

76. Позин, Е.З. Математическая модель надежности режущего инструмента угледобывающих комбайнов. / Е.З. Позин, В.В. Тон, А.С. Водяной // Научные сообщения / АН СССР Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД, 1982. – Вып. 212: Совершенствование средств механизации проведения подготовительных выработок. – С. 20-28.

77. Горбатов, П.А. Горные машины для подземной добычи угля. / П.А. Горбатов, Г.В. Петрушкин, Н.М. Лысенко, С.В. Павленко, В.В. Косарев. – Донецк: ДонНТУ, – 2006. – 669 с.

78. Любощинский, Д.М. Разрушение углей исполнительными органами выемочных машин / Д.М. Любощинский, Е.З. Позин, Ю.Н. Казак. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 220 с.

79. Прокопенко, С.А. Эволюция конструкции резцов для шахтных комбайнов / С.А. Прокопенко, В.С. Лудзиш // Горная промышленность. – М: МГГУ, 2015. – №2 (120) – С. 65-66.

80. Thuro, K. *Geological limits in roadheader excavation - four case studies.* // K. Thuro, R.J. Plinnger / 8th International IAEG Congress, Vancouver, 1998, vol. 2, pp. 3545-3552.

81. J.Gajewski, J. Jonak: *Metody sztucznej inteligencji w badaniach noży i głowic urabiających* // Wyd. Polskie Naukowo - Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warszawa, 2008. – 183 p.

82. Тененбаум, М.М. Износостойкость деталей и долговечность горных машин. / М.М. Тененбаум. – М.: Госгортехиздат, 1960. - 238 с.

83. Габов, В.В. Особенности эксплуатации проходческих комбайнов на шахтах ОАО «Воркутауголь» / В.В. Габов, Д.А. Задков, Ю.В. Лыков, А.И. Гурымский, С.И. Шпилько // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – №12. – С. 2-6.

84. 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 // Горный журнал. – 2000. – №2. – С.33–35.

85. Чупин, С.А. Методика расчета долговечности и установления причины выхода из строя тангенциальных поворотных резцов / С.А. Чупин, В.И Болобов, М.П. Талеров, // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – №1. – С. 16-23.

86. Габов, В.В. Анализ измельчения угля при добыче на шахтах Воркуты // В.В. Габов, А.А. Банников // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №2. – С. 2-12.

87. Крестовоздвиженский, П.Д. Некоторые результаты наблюдений за работой очистных комбайнов на шахтах Кузбасса [Текст] / П.Д. Крестовоздвиженский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – МГГУ. – Москва, 2009. – Вып.6. – С. 121-124.

88. Белич, Е.В. Испытание нового горно-режущего инструмента в шахтах Воркуты. / Е.В. Белич, Л.М. Гусельников, Д.А. Задков, А.А. Подосенов // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – №8. – С. 2-5.

89. Комбайны проходческие КП-21, КП-21-01. Руководство по эксплуатации / ОАО «Копейский машиностроительный завод». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/229010/>.

90. Методы испытания на изнашивание: Труды совещания, состоявшегося 7-10 дек. 1960 г. / Акад. наук СССР. Гос. ком. Совета Министров СССР по автоматизации и машиностроению. Ин-т машиноведения; [Отв. ред. д-р техн. наук проф. М. М. Хрущов]. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 238 с.

91. Хрущов, М. М. Исследования изнашивания металлов / М.М. Хрущов, М. А. Бабичев. - Акад. наук СССР. Ин-т машиноведения. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 351 с.

92. Ткачев, В.Н. Методы повышения долговечности деталей машин / В.Н. Ткачев. – М.: Машиностроение, 1971. – 272 с

93. Кравченко, И. П. Основы надежности машин. – Ч. II. / И.П. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин – М.: Изд-во ВТУ при Федеральном агентстве специального строительства, 2007. – 260 с.

94. Кроха, В.А. Кривые упрочнения при холодной деформации / В.А. Кроха – М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.

95. Бабук, В.В. Вестник машиностроения: научно-технический и производственный журнал / Орган Госкомитета Совета Министров СССР по науке и технике. / В.В. Бабук. – М.: Машиностроение, 1966. – № 7. – 67 с.

96. *DEFORM-3D Version 6.1 (sp1) /User's manual*, 2007. – 368p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/PDF/DEFORM-3D-V61.pdf>.

97. Колбасников, Н.Г. Влияние больших деформаций в горячем состоянии на структуру и свойства низкоуглеродистой стали /

Н.Г. Колбасников, О. Г. Зотов, В. В. Дураничев, А. А. Наумов, В. В. Мишин, Д. А. Рингинен // *Металлообработка*. – 2009. – №4 (52). – С. 25-31.

98. *Naumov, A.A. Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing / A.A. Naumov, Y.A. Bezobrazov, N.G. Kolbasnikov, E.V. Chernikov // M. Sci. Forum.* – 2013 – V.762. – pp. 62-69.

99. Исследование процесса осадки цилиндрической заготовки в программе *LS-Dyna* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dynaomd.ru/Osadka.pdf?id=12>.

100. Семенов, Е.И. Ковка и горячая штамповка: учебник / Е.И. Семенов – М.: МГИУ, 2011. – 414 с.

101. Багмутов, В.П. Испытания на сжатие: метод. Указания / В.П. Багмутов, В.И. Водопьянов, О.В. Кондратьев, А.В. Коробов. – Волгоград: ИУНЛ ВолГТУ, 2011. – 16 с.

102. Болобов, В.И. К влиянию крепости породы на ее абразивные свойства / В.И. Болобов, В.С. Бочков, С.А. Чупин, С.Ю. Степанов // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2014. – №9. – С. 40-43.

103. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосников, С.А. Вяткин и др.; под общ. Ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

104. Чупин, С.А. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / С.А. Чупин, В.И. Болобов, В.С. Бочков, А.П. Баталов // *Записки Горного института*. – 2014. – Т.209. – С. 17-23.

105. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прущак. – Минск: выш. Шк. – 1988. – 374 с.

106. *Patent US No: 4,705,123 Int B22F Cutting element for a rotary drill bit and method for making. / Dennis, Mahlon D. Publ 10 Nov., 1987.*

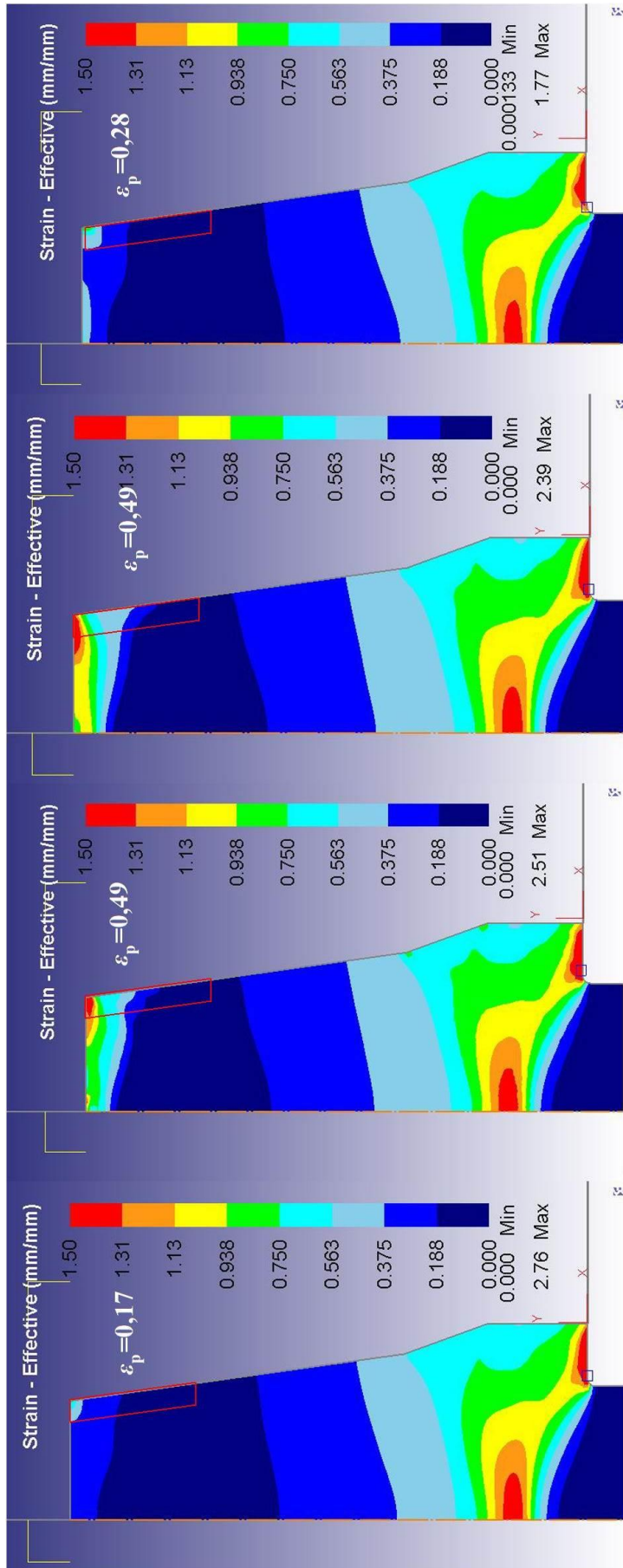
107. *Patent US No: 4660660 Round/flat carbide seat / Ching-Fen Yuh 28 Apr., 1987.*

108. Патент *RU 2270318 C1* МПК *E21B10/16* Буровое долото с твердосплавным вооружением / Р.М. Богомолов, А.Г. Ищук,

М.В. Гавриленко, В.Г. Неупокоев, Л.В. Морозов, В.П. Мокроусов. Оpubл. 20.02.2006.

109. Зябрева, Н.Н. Пособие к решению задач по курсу «Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения» / Н.Н. Зябрева. – М: Высшая школа, 1977. – 203 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



$\alpha=0^\circ$ $\alpha=45^\circ$ $\alpha=55^\circ$ $\alpha=80^\circ$

Рисунок А1 - Диаграммы интенсивности пластической деформации в материале поверхностного слоя державки при различных углах фаски на заготовке

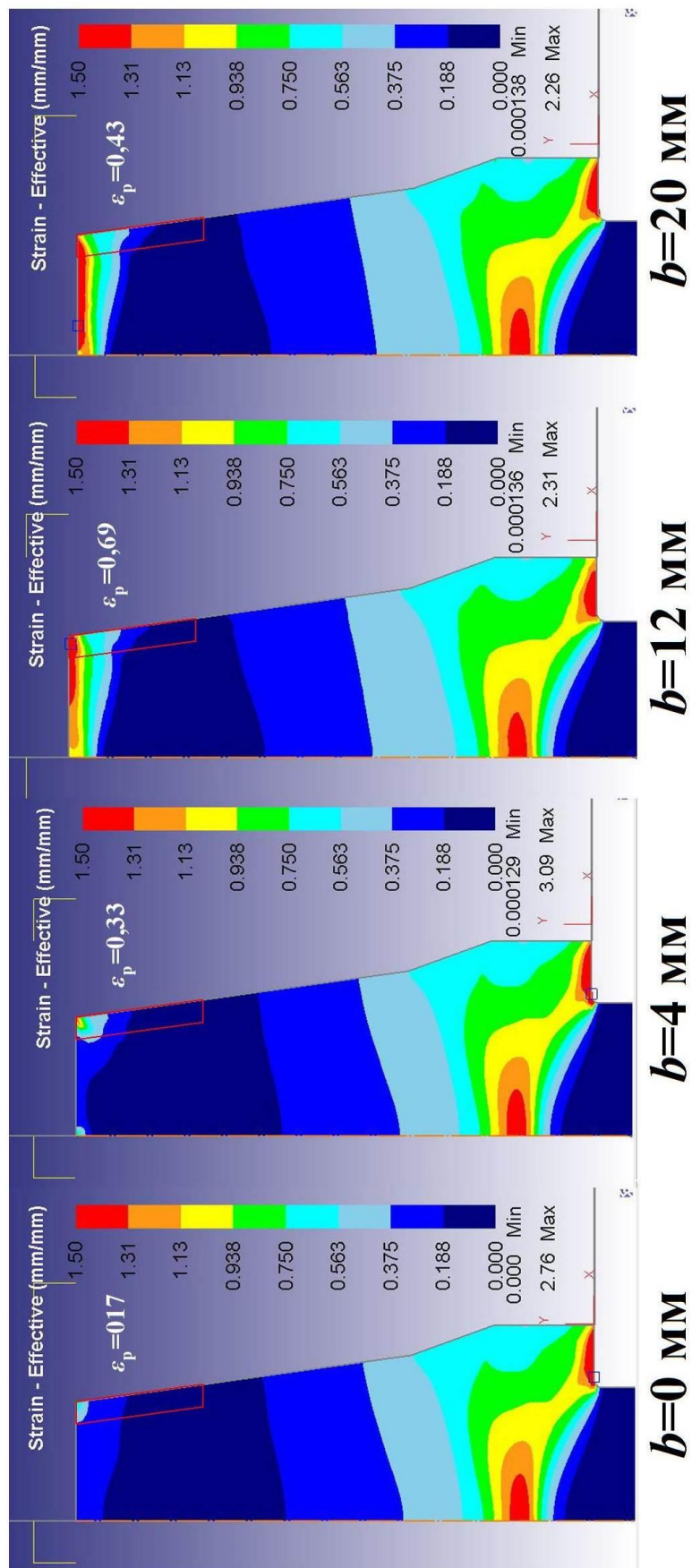


Рисунок А2 - Диаграммы интенсивности пластической деформации в поверхностном слое рабочей части державки при различных длинах фаски на заготовке

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

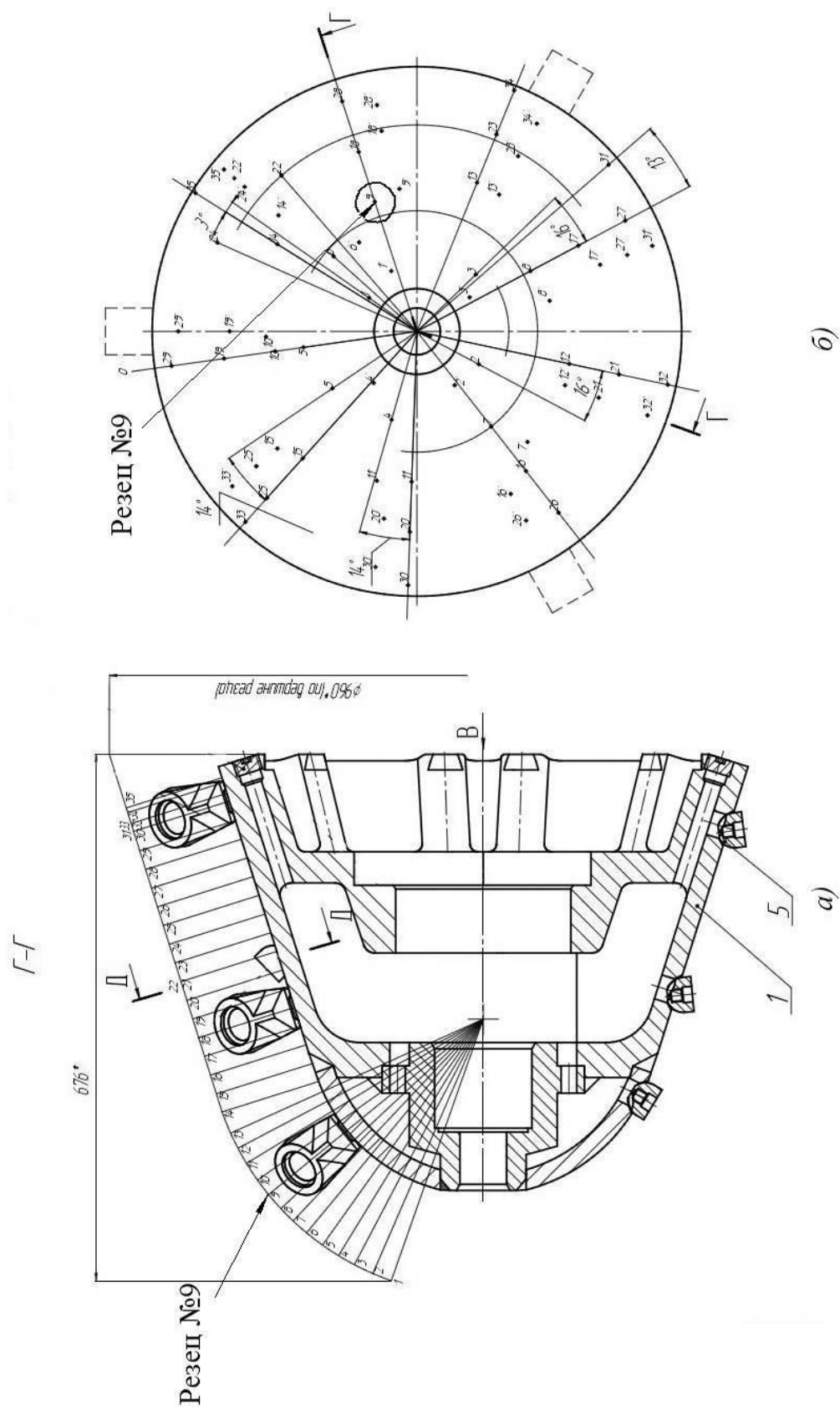


Рисунок Б1 - Коронка проходческого комбайна КП-21(а) и схема расстановки резцов (б)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В1 - Результаты экспериментального исследования абразивного изнашивания об песчанник образцов подверженных различным режимам обработки

Образец	Степень деформации ϵ_p	№ опыта	$\Sigma \Delta m$, мг за время t , мин										Средняя скорость изнашивания K , мг/мин	Износостойкость I , мин/мг
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0	1	2,72	7,71	12,14	12,69	17,17	20,62	23,67	28,11	31,72	34,14	3,42	0,29
		2	3,98	7,89	10,68	13,54	17,38	21,65	24,08	26,34	30,78	35,48		
		3	2,80	6,35	9,51	13,76	16,6	19,56	23,5	25,84	30,4	34,81		
2	0,17	1	1,70	5,12	8,42	11,34	13,92	17,62	19,92	23,58	26,48	30,27	3,10	0,32
		2	4,35	7,84	10,84	13,38	17,81	19,45	22,12	25,47	29,25	31,44		
		3	2,87	5,85	9,29	12,98	15,71	19,56	23,14	25,34	27,84	31,76		
3	0,22	1	1,67	4,35	6,91	8,98	12,15	15,21	17,39	20,45	22,63	24,01	2,62	0,38
		2	2,80	4,01	7,70	10,45	12,60	14,78	17,50	19,52	22,42	25,26		
		3	2,13	5,01	7,61	10,12	13,09	15,42	18,58	21,78	24,06	27,01		
4	0,32	1	2,61	5,92	7,64	9,13	11,61	13,72	15,23	17,96	20,83	22,2	2,13	0,47
		2	2,58	4,54	7,00	9,75	11,42	13,54	15,84	17,79	20,26	22,79		
		3	1,42	3,89	5,50	7,15	9,58	11,79	13,66	16,01	17,25	19,78		
5	0,44	1	1,12	3,71	6,32	7,01	8,43	10,67	12,54	14,25	15,78	17,83	1,78	0,56
		2	2,66	4,43	6,38	8,95	10,10	12,05	13,82	15,32	17,54	20,25		
		3	2,92	4,89	6,26	8,02	9,6	11,32	12,94	14,11	16,28	18,55		
6	0,49	1	1,71	4,72	7,13	7,51	9,00	11,22	13,45	14,85	16,14	18,18	1,76	0,57
		2	1,29	3,45	4,77	6,12	8,25	9,42	11,73	13,79	15,21	17,24		
		3	2,69	4,85	6,31	7,96	9,93	11,48	13,55	16,26	17,17	18,24		
7	0,69	1	1,23	3,51	6,24	6,85	8,12	10,29	11,98	13,71	15,78	17,13	1,73	0,58
		2	1,00	2,45	4,49	6,12	7,96	9,54	11,44	13,78	14,92	16,52		
		3	2,49	4,25	5,89	7,41	9,29	10,42	12,69	14,89	16,09	17,42		

Таблица В2 - Результаты экспериментального исследования абразивного изнашивания об алеролит образцов подверженных различным режимам обработки

Образец	Степень деформации ϵ_p	№ опы-та	$\Sigma \Delta t$, мг за время t, мин										Средняя скорость изнашивания K , мг/мин	Износостойкость I , мин/мг
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0	1	1,59	4,53	7,12	7,59	10,00	12,68	14,88	16,53	18,62	19,75	1,96	0,51
		2	2,34	4,64	6,28	7,96	11,21	12,74	14,16	16,02	18,11	19,87		
		3	2,78	3,74	6,13	8,25	9,76	11,51	13,82	15,20	17,88	19,48		
2	0,17	1	1,54	3,31	4,94	6,65	9,01	10,35	12,72	13,87	15,58	17,81	1,82	0,55
		2	2,56	4,61	6,02	7,64	10,47	11,02	13,00	14,98	17,21	18,12		
		3	1,69	3,24	5,46	7,64	9,24	11,51	13,61	14,32	16,98	18,68		
3	0,22	1	1,27	2,56	4,06	5,28	7,15	8,95	10,87	12,03	14,31	15,78	1,68	0,60
		2	1,64	2,36	4,85	6,28	7,41	8,69	10,29	12,98	14,87	15,85		
		3	1,25	2,95	4,48	5,95	8,02	9,24	10,93	13,81	15,15	16,91		
4	0,32	1	2,01	3,47	4,47	5,35	6,82	8,07	8,96	10,56	12,25	12,85	1,22	0,82
		2	1,98	3,12	4,11	5,74	6,71	7,97	9,31	10,46	11,91	13,01		
		3	2,03	2,29	3,88	4,76	6,97	7,45	8,79	10,42	11,14	12,03		
5	0,44	1	1,45	2,58	3,99	5,12	5,54	6,28	7,38	8,84	10,12	12,54	1,11	0,91
		2	1,56	2,60	3,75	5,27	5,94	7,09	8,13	9,01	10,32	11,91		
		3	1,71	2,88	3,68	4,72	5,64	6,83	7,94	8,30	10,56	11,91		
6	0,49	1	1,00	2,32	4,64	5,02	5,29	6,60	7,91	8,74	9,49	10,24	1,03	0,97
		2	1,21	2,03	2,81	4,51	5,43	6,27	7,49	8,11	9,37	10,14		
		3	1,58	2,85	3,71	4,68	5,84	6,75	7,97	9,12	10,10	10,73		
7	0,69	1	0,71	2,34	3,65	4,00	5,23	6,05	7,38	8,06	9,28	10,08	1,02	0,98
		2	1,24	1,44	3,23	4,24	4,68	5,61	6,73	8,69	9,38	10,69		
		3	1,46	2,50	3,46	4,36	5,46	6,42	7,46	8,76	9,46	10,25		

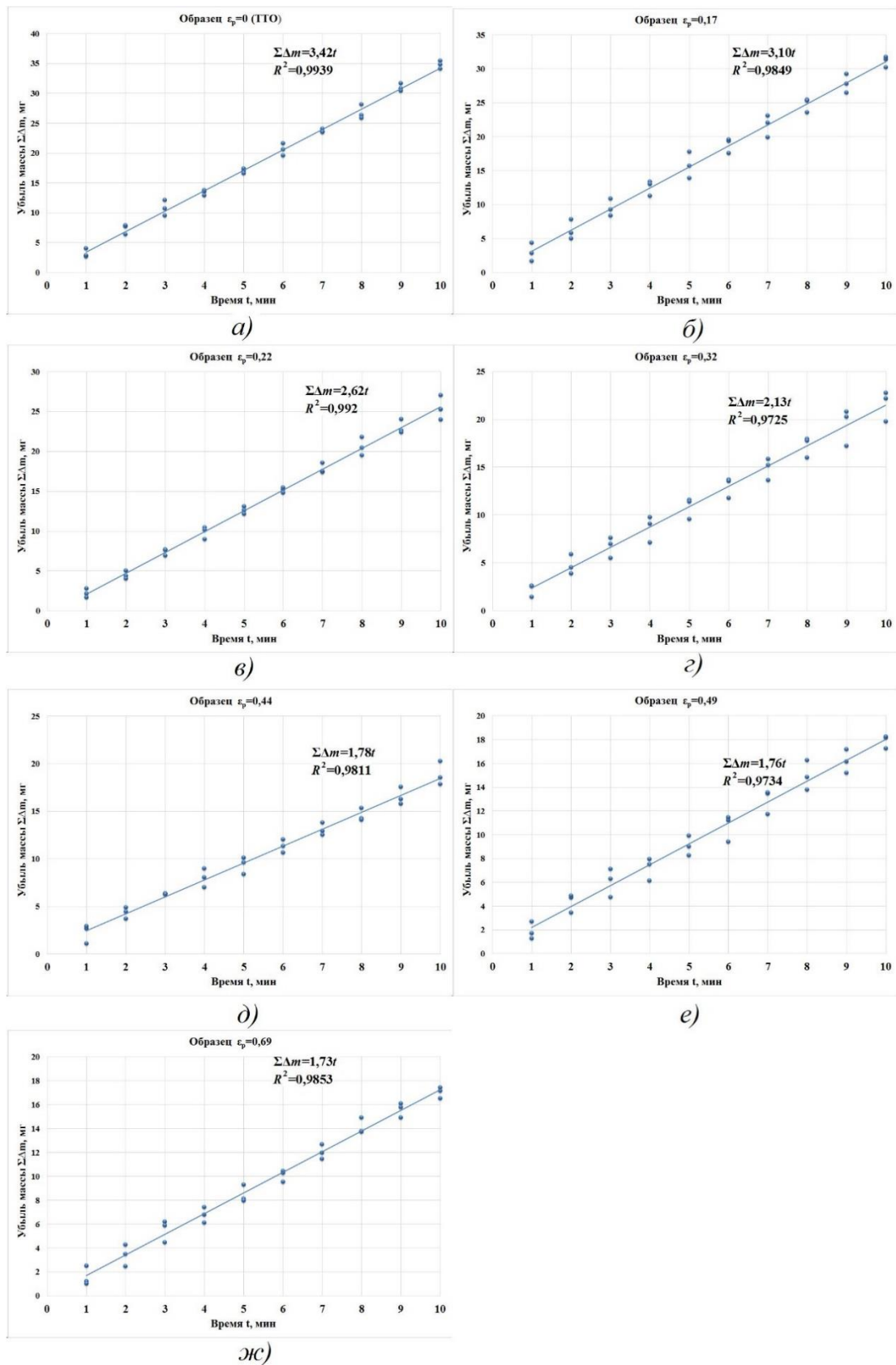


Рисунок В3 – временные зависимости убыли массы образцов фрагментов державки резца подвергнутого термомеханической обработке при различных режимах при их абразивном изнашивании по песчанику.

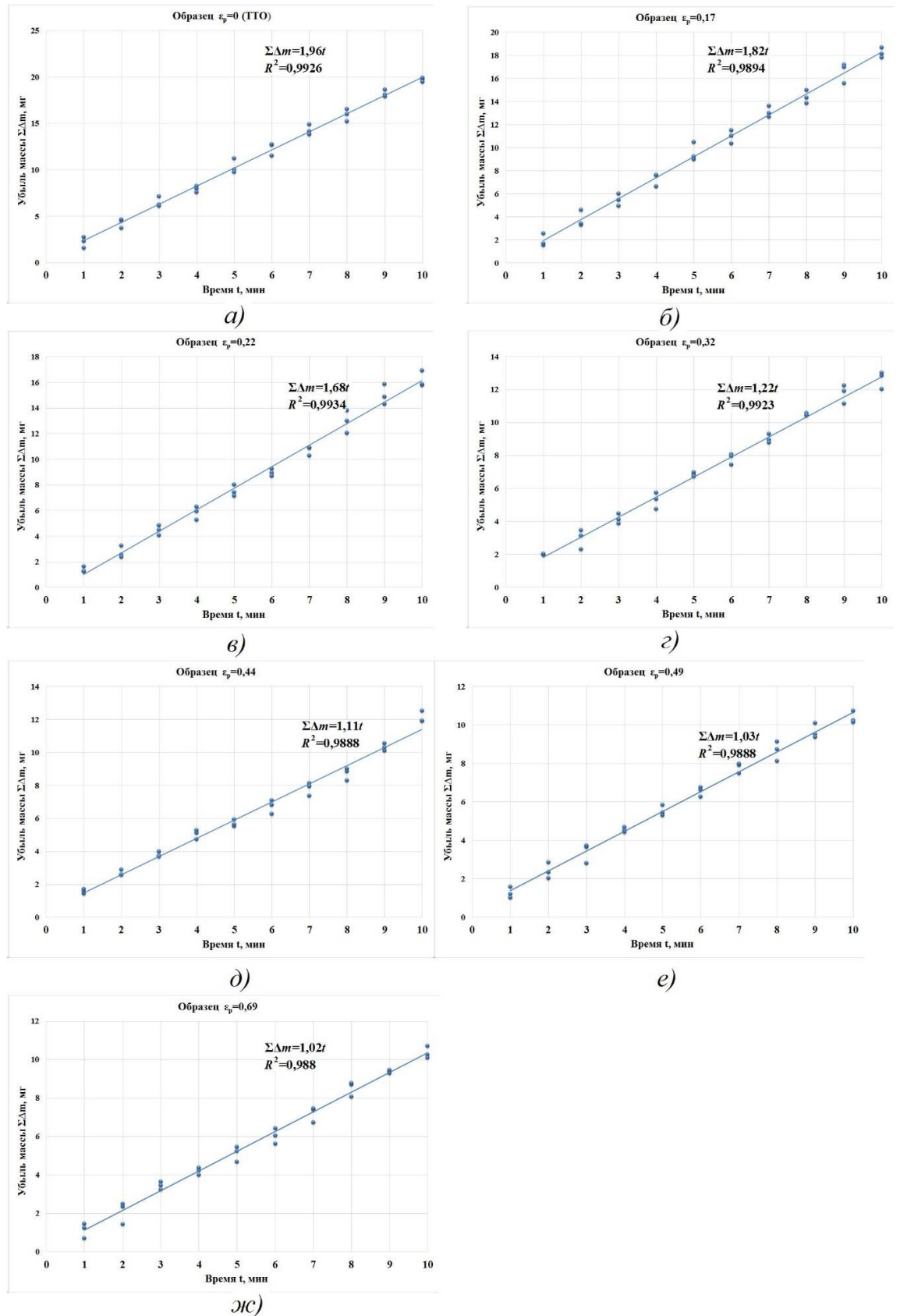


Рисунок В4 – Временные зависимости убыли массы образцов фрагментов державки резца подвергнутого термомеханической обработке при различных режимах при их абразивном изнашивании по алевролиту