

Г. И. Солог, К. И. Шахова, В. И. Русихин

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГОРНЫХ МАШИН

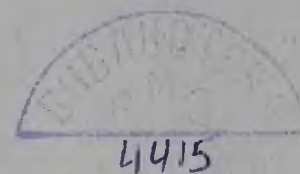


ИЗДАТЕЛЬСТВО • МАШИНОСТРОЕНИЕ •

с 60
✓
Г. И. СОЛОД, К. И. ШАХОВА, В. И. РУСИХИН

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГОРНЫХ МАШИН

Под ред. д-ра техн. наук проф. Г. И. СОЛОДА



Москва «Машиностроение» 1979

Рецензент А. Е. Ильин

Солод Г. И. и др.
С 60 Повышение долговечности горных машин./
Г. И. Солод, К. И. Шахова, В. И. Русихин. — М.:
Машиностроение, 1979. — 184 с., ил.

60 к.

В книге приведены сведения о долговечности горных машин; изложена методика оценки качества горных машин и материалов, применяемых при их изготовлении. Рассмотрены виды разрушения деталей; факторы влияющие на процесс изнашивания, а также протекающие при этом процессы; технологические методы повышения долговечности деталей горных машин с рекомендациями по выбору и оценке. Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами повышения долговечности горных машин.

ББК 33.1
6П1.2

30704-357
038(01)-79 357-79 2501020000

Совершенствование добычи полезных ископаемых состоит в основном в концентрации горных работ и интенсификации выемки полезных ископаемых на базе комплексной механизации и автоматизации производственных процессов и научной организации труда без увеличения численности работающих. Концентрация горных работ и интенсификация выемки, в свою очередь, вызывают необходимость повышения производительности труда при комплексной механизации добычи полезных ископаемых, причем при подземной добыче повышать производительность горных машин следует не только увеличивая габариты машин, но и повышая их прочностные и режимные параметры.

Повышение режимных параметров машин затрудняет управление механизированными выемочными и транспортными системами, особенно в стесненных условиях работы, что настоятельно требует применения средств автоматизации, обеспечивающих выемку ископаемых без постоянного присутствия людей в забое и задалживания минимального числа рабочих в подземных выработках.

В настоящее время в шахтах, рудниках и карьерах работает большое число различных горнодобывающих машин. Причем для одинаковых условий часто создают несколько типов машин, комплексов и агрегатов одного функционального назначения, что приводит к значительной затрате сил и средств на освоение новых машин, обуславливает индивидуальное или мелкосерийное их производство и увеличение стоимости при недостаточном качестве изготовления. Многообразие конструкций для различных условий эксплуатации свидетельствует о том, что создание горных машин, комплексов и агрегатов все еще находится в стадии поиска решений, наиболее полно удовлетворяющих условиям эксплуатации.

Создание высококачественной новой техники и повышение качества существующей механизации требует определенного комплекса мероприятий, в том числе организации единого надзора и контроля уровня качества на всех стадиях формирования и потребления при проектировании, изготовлении, эксплуатации и ремонте. Однако для оценки качества новой техники необходимо систематическое сравнение уровня качества отече-

ственной горнодобывающей техники с лучшими образцами зарубежных машин.

Объективная оценка качества возможна только при наличии объективной единицы измерения качества или показателя качества рассматриваемых машин. Под показателем качества горных машин понимают количественную характеристику определяющих качество параметров, обеспечивающих способность выполнять определенные функции в заданных условиях эксплуатации.

Горная техника предназначена для выемки полезного ископаемого, его транспортирования, управления кровлей, проведения горных выработок и т. д., и характеризуется многими параметрами, увязанными между собой. Для оценки и систематического повышения качества горных машин, комплексов и агрегатов, состоящих из разнофункциональных машин, необходима вполне определенная система, базирующаяся на методике объективной оценки уровня качества машин с учетом условий эксплуатации.

Условия эксплуатации горных машин как при подземной, так и при открытой разработке месторождений полезных ископаемых весьма сложны и разнообразны. Так как основным объектом, на который воздействуют горные машины, являются горные породы, то характеристики последних определяют долговечность горных машин. Основной причиной непродолжительного срока службы горных машин является абразивность горных пород, влажность и агрессивность окружающей среды. Особенно велик износ исполнительных органов горных машин, работающих в абразивных горных породах и в агрессивной среде. Так, зубья ковшей экскаваторов на скальных породах служат несколько дней, а долговечность резцов горных комбайнов исчисляется несколькими часами. Брони конусных дробилок служат 1,5—2 месяца, а землесосы изнашиваются в течение 5—8 суток. Срок службы забойных выемочных и транспортных машин при подземной разработке полезных ископаемых до капитального ремонта редко превышает один год. При полноресурсном сроке службы 5 лет машины проходят четыре капитальных ремонта, суммарная стоимость которых значительно превышает стоимость новой машины. Кроме того, по мере достижения полноресурсного срока службы горных машин их качество и эффективность эксплуатации уменьшаются. Между тем действительная эффективность от повышения долговечности горных машин проявляется при их эксплуатации в пересчете на полноресурсный обобщенный уровень качества. Естественно, полноресурсный уровень качества зависит от долговечности машин и их элементов.

Введение и гл. 1 написаны Г. И. Солодом; гл. 2, 5 и 6 (кроме подразд. 6.1) — К. И. Шаховой; гл. 3, 4, 7, 8 и подразд. 6.1 — В. И. Русихиным.

1.1. Систематизация средств механизации добычи полезных ископаемых

Наиболее эффективное повышение эксплуатационных качеств, надежности, в том числе долговечности, и улучшение конструкции горных машин, т. е. оптимальное повышение качества горной техники, немыслимо без научно обоснованного решения проблемы объективной оценки качества горных машин, с помощью которых осуществляется механизация основных технологических процессов добычи полезных ископаемых.

Под технологическим процессом понимают часть производственного процесса, выполняемого на определенном образе оборудованных рабочих местах, во время которого полезное ископаемое вынимается и транспортируется в пределах предприятия и производится первичная технологическая переработка с целью превращения его в продукт, удобный для потребления другими отраслями народного хозяйства.

Технологический процесс добычи ископаемых Π_T делится на функциональные процессы выемки v , транспортирования t и первичной технологической переработки (сортировки) c .

Законченную часть технологического процесса, выполняемую на отдельном рабочем месте одним или несколькими рабочими, принято называть операцией. Операции являются основными функционально определенными элементами, на которые делится технологический процесс.

Основными функциональными элементами, например, процесса выемки при подземной добыче пластовых ископаемых v являются: собственно выемка B , т. е. отделение угля от массива и погрузка его на средства доставки; доставка D — перемещение ископаемого вдоль забоя и, наконец, крепление призабойного пространства K — управление кровлей.

Основными функциональными элементами процесса транспортирования горных пород в пределах горнодобывающего предприятия t являются: загрузка средств транспорта $З$, собственно транспортирование груза T и разгрузка средств транспорта P на склад, средства первичной технологической переработки рядового ископаемого или на средства внешнего транспорта.

Основными функциональными элементами процесса первичной технологической переработки рядового ископаемого c являются: грохочение G с целью выделения крупных кусков

ископаемого; отделение крупных кусков пустой породы O , т. е. собственно обогащение и сортировка полезного ископаемого C .

В соответствии с функциональными элементами технологического процесса добычи полезных ископаемых осуществлялась соответствующая механизация.

Приняв буквенные символы, обозначающие функциональные процессы и функциональные элементы операций технологического процесса добычи, в качестве символов для обозначения машин, их механизмирующих, и, установив условные обозначения видов связей между структурными элементами, можно составить структурные формулы средств механизации выемки, транспортирования и первичной технологической переработки ископаемого при различном сочетании функциональных машин, а также структурные формулы систем механизации добычи угля при различном сочетании средств механизации соответствующих функциональных процессов.

Проведенными исследованиями установлено, что между функциональными машинами, составляющими структуру механизации технологического процесса добычи пластовых ископаемых, существует три вида связей: технологическая (—), кинематическая (+) и конструктивная (·).

Пользуясь принципами согласования, сочленения и совмещения структурных элементов, с учетом возможного их вырождения из базовой структурной формулы, представляющей согласование всех структурных элементов, получены 24 формально возможные структурные формулы средств и систем механизации соответствующих процессов: выемки (табл. 1), транспортирования (табл. 2), первичной технологической переработки полезного ископаемого (табл. 3) и добычи ископаемого (табл. 4).

Каждая из классификационных таблиц средств механизации содержит семь групп и четыре вида средств механизации: индивидуальные функциональные машины (группа I), комплексы функциональных машин (группа II), комплексы (группы III, IV) и агрегаты (группы V, VI и VII). Группы средств механизации имеют свои отличительные особенности. При этом каждая последующая группа отражает более высокую ступень развития средств механизации по сравнению с предыдущей.

Не останавливаясь на оценке каждой из структурных формул механизации процессов выемки, транспорта и первичной технологической переработки полезного ископаемого, заметим, что все они состоят из структурных элементов — функциональных машин, на которые наложены соответствующие связи. Следовательно, функциональные машины являются основой средств механизации технологического процесса добычи полезных ископаемых.

Таблица 1

Структурное строение и классификация средств механизации процесса выемки пластовых полезных ископаемых

Принцип построения структурных формул	Согласование элементов		Базовая формула		Сочленение элементов		Совмещение элементов			
	с вырож-дением двух элементов	с вырож-дением одного элемента	с вырож-дением		с вырож-дением	с согласо-ванием	с согласо-ванием	с согласо-ванием	с вырож-дением	всех
Структурные формулы	B D K $B-D$ $B-K$ $D-K$		$B-D-K$		$B+D$ $B+K$ $D+K$ $B+D-K$ $B+K-D$ $D+K$	$B+D+K$	$B+D+K$ $B+K-D$ $B+D-K$ $D+K$	$B+D+K$ $B+K-D$ $B+D-K$ $D+K$	$B+D$ $B+K$ $D+K$	$B \cdot D \cdot K$
Группа средств механизации	I	II	II		III	IV	V	VI	VII	
Средства механизации выемки	Функциональные машины	Комплекты функциональных машин	Выемочные комплексы		Выемочные агрегаты					
Особенности средств механизации	Обособленные индивидуальные машины	Неполной механизации	Полной механизации		Неполной механизации	В комплекте с функциональными машинами	Полной механизации	В комплекте с функциональными машинами	В комплекте с функциональными машинами	Полной механизации

Таблица 2

Структурное строение и классификация средств механизации процесса транспортирования ископаемого $\tau = \{3, T, P, -, +, \cdot\}$

Принцип построения структурных формул	Согласование элементов		Базовая формула	Сочленение элементов			Совмещение элементов		
	с вырож-дением двух элементов	с вырож-дением одного элемента		с вырож-дением	с согласо-ванием	всех	с вырож-дением	с согласо-ванием	всех
Структурные формулы	ω τ P $3-T$ $3-P$ $T-P$ $3-T-P$		$3-T-P$	$3+T$ $3+P$ $T+P$ $3+T-P$ $3+P-T$ $3-T+P$ $3+T+P$		$3+T+P$	$3 \cdot T$ $3 \cdot P$ $T \cdot P$ $3 \cdot T-P$ $3 \cdot P-T$ $3-T \cdot P$ $3+T \cdot P$ $3+T \cdot P$ $3 \cdot T \cdot P$		
Группы средств механизации	I	II	III	IV	V	VI	VII		
Средства механизации транспортирования	Функ-циональные машины	Комплекты функциональных машин	Транспортные комплексы			Транспортные агрегаты			
Особенности средств механизации	Обособ-ленные индивиду-альные машины	Непол-ной ме-ханиза-ции	Полной механизации	Непол-ной ме-ханиза-ции	В ком-плек-те с функ-циональ-ными машинами	Полной механизации	В ком-плек-те с функ-циональ-ными машинами	В ком-плек-те с функ-циональ-ными машинами	Полной механизации

Таблица 3

Структурное строение и классификация средств механизации процесса первичной технологической переработки ископаемого $c = \{Г, О, С, -, +, \cdot\}$

Принцип построения структурных формул	Согласование элементов		Базовая формула	Сочленение элементов			Совмещение элементов		
	с вырож-дением двух элементов	с вырож-дением одного элемента		с вырож-дением	с согласо-ванием	всех	с вырож-дением	с согласо-ванием	всех
Структурные формулы	τ $О$ $С$ $Г-О$ $Г-С$ $О-С$ $Г-О-С$		$Г-О-С$	$Г+О$ $Г+С$ $О+С$ $Г+О-С$ $Г+С-О$ $Г-О+С$ $Г+О+С$		$Г+О+С$	$Г \cdot О$ $Г \cdot С$ $О \cdot С$ $Г \cdot О-С$ $Г \cdot С-О$ $О \cdot С-Г$ $Г \cdot О+С$ $Г \cdot С+О$ $О \cdot С+Г$ $Г \cdot О \cdot С$ $Г \cdot С \cdot О$ $О \cdot С \cdot Г$		
Группы средств механизации	I	II	III	IV	V	VI	VII		
Средства механизации технологической переработки	Функ-циональные машины	Комплекты функциональных машин	Комплексы для первичной технологической переработки угля			Агрегаты для механизации первичной технологической переработки угля			
Особенности средств механизации	Обособлен-ные машины	Неполной механизации	Полной механизации	Неполной механизации	В ком-плек-те с функ-циональ-ными машинами	Полной механизации	В ком-плек-те с функ-циональ-ными машинами	В ком-плек-те с функ-циональ-ными машинами	Полной механизации

Таблица 4

Структурное строение и классификация систем механизации добычи полезных ископаемых $D = \{B, T, c, -, +, \cdot\}$

Принципы построения структурных формул	Согласование элементов			Базовая формула		Сочетание элементов				Сочетание элементов			
	с вырождением двух элементов		с вырождением одного элемента			с вырождением	с совпадением	всех	с вырождением	с совпадением	с совпадением	всех	
	B	T	c	$B-T$	$T-c$	$B-T-c$	$B+T$	$B+c$	$T+c$	$B+T-c$	$B-T+c$	$B+T+c$	
Структурные формулы													
Группы систем механизации	I			II			III	IV		V	VI	VII	
	Индивидуальные средства механизации			Добычные комплексы		Добычные агрегаты							
Системы механизации добычи						Неполной механизации							
						Полной механизации							
						В комплексе с индивидуальными средствами механизации							
						В комплексе с индивидуальными средствами механизации							
Особенности систем механизации	Обособленные средства			Неполной механизации		Полной механизации		Неполной механизации		Полной механизации			
										В комплексе с индивидуальными средствами механизации			
										В комплексе с индивидуальными средствами механизации			
										В комплексе с индивидуальными средствами механизации			

допускать оценку качества горных машин по различному числу показателей;

иметь прогрессивные динамические базовые показатели для оценки качества машин;

не ограничивать конструкторов в выборе конструктивных решений при проектировании новых машин;

обеспечивать возможность прогнозирования уровня качества на заданный период и значений основных параметров, необходимых для проектирования новых машин;

обеспечивать возможность оценки и управления уровнем качества машин на стадиях проектирования, изготовления и ремонта;

обеспечить возможность определения оптимального для данных условий уровня качества горных машин;

устанавливать рациональные сроки выпуска и модернизации машин данного уровня качества;

способствовать объективной аттестации и планированию повышения качества горных машин.

Анализ опубликованных методик оценки качества промышленной продукции, в том числе и горных машин, показывает, что они не удовлетворяют сформулированному комплексу основных требований и нуждаются в коренной переработке.

Уровень качества машин одного функционального назначения — это степень соответствия фактических свойств (параметров) рассматриваемых машин комплексу требуемых свойств (параметров) и базовым показателям качества, которыми обладает выбранная для сравнения базовая машина, способная выполнять определенные функции в заданных условиях эксплуатации. Уровень качества выражается количественным показателем, оценивающим значение показателя качества рассматриваемой машины в сравнении со значением базового показателя качества по каждому из определяющих свойств или параметров.

Определяющими параметрами машин являются параметры, изменение которых оказывает существенное влияние на изменение уровня качества этих машин. Выбор определяющих параметров зависит от конструктивных особенностей функциональных машин, требований условий эксплуатации и поставленной цели при определении уровня качества.

Основной целью оценки качества средств механизации технологических процессов является установление того, какие из горных машин наиболее эффективно выполняют заданные функции в конкретных условиях эксплуатации. Для такой оценки необходимо иметь единицу измерения, на основании которой можно количественно оценивать выполнение заданной функции, т. е. необходимо иметь функциональный критерий машины, соответствующий ее основному назначению.

Основным назначением выемочной машины является отде-

ление от массива ископаемого определенной крепости с определенной интенсивностью, поэтому функциональный критерий выемочной машины λ (Н·м/ч) можно представить в следующем виде:

$$\lambda = 60mbv\omega = Q\omega, \quad (1.1)$$

где m — мощность вынимаемого пласта, м; b — ширина захвата исполнительного органа, м; v — скорость перемещения исполнительного органа выемочной машины вдоль забоя, м/мин; ω — удельная энергия разрушения ископаемого определенной крепости, Дж/м³; Q — производительность выемочной машины, м³/ч.

Основным назначением транспортирующих машин является перемещение определенного объема транспортируемого груза на заданное расстояние в единицу времени.

Функциональный критерий машины:

для поточного транспорта

$$\lambda = 3600F\gamma_n v L = Q\gamma_n L, \quad (1.2)$$

для циклического транспорта

$$\lambda = V\gamma_n z n L = Q\gamma_n L, \quad (1.2')$$

где F — площадь поперечного сечения груза на транспортной установке поточного транспортирования, м²; γ_n — насыпной вес груза, Н/м³; v — скорость движения груза, м/с; L — расстояние, на которое транспортируется груз, м; V — объем груза в транспортном сосуде, м³; z — число транспортных сосудов в составе (партии); n — число циклов транспортирования в час; Q — производительность транспортной машины, м³/ч.

Функциональный критерий для машин поточного и циклического транспорта один и тот же, что позволяет сравнивать качественные показатели этих машин между собой.

Основным назначением механизированных крепей выемочных комплексов и агрегатов является поддержание кровли в призабойном пространстве вслед за движением лавы.

Функциональный критерий механизированных крепей можно представить как

$$\lambda = 60mLv_n \frac{P}{lL} = Qp, \quad (1.3)$$

где m — мощность пласта, м; L — длина крепи, равная обычно длине лавы, м; v_n — скорость перемещения крепи вслед за движением лавы, м/мин; P — нагрузка на крепь, Н; l — ширина крепи, м; Q — интенсивность крепления выработанного призабойного пространства (равная производительности выемочной машины), м³/ч; p — удельная нагрузка на крепь, Н/м².

Функциональными критериями выемочных и доставочных машин, а также механизированных крепей являются мощность на разрушение при отделении ископаемого от массива, транспортная мощность и мощность, с которой осуществляется поддержание кровли вслед за продвижением забоя.

Приведенные формулы справедливы только для подсчета функциональных критериев забойных машин, от которых в первую очередь зависит технологический процесс добычи полезных ископаемых. Однако функциональные критерии должны быть определены для всех функциональных машин, механизмирующих не только операции технологического процесса, но и операции производственного процесса добычи полезных ископаемых, если необходимо определить уровень качества разнотипных функциональных машин.

1.3. Методика оценки качества горных машин

Оценка качества горных машин — это определение степени приближения значений параметров оцениваемых машин к значениям базовых показателей, которыми обладает модель эталонной машины.

Определение базовых показателей модели эталонной функциональной машины данного назначения целесообразно проводить по удельным показателям. С этой целью необходимо определить значение удельных величин x_{ij} параметров (P_{ij}), принятых для оценки качества машин одного функционального назначения:

$$x_{ij} = \frac{P_{ij}}{\lambda_i}, \quad (1.4)$$

где i — порядковый номер машины в рассматриваемой совокупности; j — порядковый номер параметра из числа параметров, принятых при оценке качества.

Подсчитанные по формуле (1.4) значения x_{ij} заносят в таблицу (матрицу)

$$\{x_{ij}\} = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{vmatrix}. \quad (1.5)$$

Строка матрицы относится к одной из машин совокупности и состоит из значений удельных величин j -го параметра, а каждый столбец содержит удельные величины показателей качества по одному из j -х параметров каждой i -й машины совокупности.

Из всех полученных j -х столбцов матрицы выбирают минимальные значения удельных величин показателей качества и приписывают им соответствующие индексы:

$$\{x_{6j}\} = \|x_{61}x_{62} \dots x_{6j} \dots x_{6n}\|. \quad (1.6)$$

Совокупность значений $\{x_{6j}\}$ представляет собой динамичную модель фиктивной эталонной машины, обладающей наиболее высокими (уже достигнутыми в различных машинах, но, как правило, не имеющими аналога в виде одной машины) свойствами, выраженными в удельных величинах показателей.

В частном случае, когда все x_{6j} принадлежат одной машине, имеет место не фиктивная, а реальная модель эталонной машины.

Все последующие сравнения показателей качества производят по отношению к фиктивному эталону.

При оценке уровня качества однотипных машин в ряде случаев для выбора базовых показателей целесообразно воспользоваться не удельными x_{ij} , а относительными h_{ij} показателями, т. е. отношением значений показателей качества P_{ij} к значению главного параметра G_i машины данного типа.

При определении относительных и удельных значений параметров необходимо следить за тем, чтобы для всех показателей уменьшение значения этих параметров приводило к улучшению качества изделия. Для параметров, с уменьшением относительных и удельных значений которых качество изделия ухудшается, должны быть взяты их обратные величины.

Такое упорядочение относительных и удельных значений показателей, принятых для оценки качества, существенно упрощает методику и сам процесс подсчета уровня качества горных машин (изделий).

Уровень качества по единичным показателям q_{ij} , т. е. по отдельным сравниваемым параметрам P_{ij} , представляет собой отношения значений удельных величин базовых показателей x_{6j} модели эталонной машины к значениям таких же удельных величин x_{ij} рассматриваемой i -й машины:

$$q_{ij} = \frac{x_{6j}}{x_{ij}} < 1. \quad (1.7)$$

Отношение (1.7) с физической точки зрения представляет собой долю наименьшего реально достигнутого удельного значения базового показателя x_{6j} в одной из машин данного функционального назначения, приходящегося на единицу функционального критерия в значении такого же параметра x_{ij} рассматриваемой i -й машины.

Из выражения (1.7) видно, что единичные уровни качества машин безразмерны и всегда меньше единицы для любой из машин, параметров которой входят в матрицу. Для матрицы выбирают наименьшие удельные значения $(x_{ij})_{\min}$ для модели

эталонной машины $x_{6j} = (x_{ij})_{\min}$. С приближением значения x_{ij} к x_{6j} значение уровня по единичным показателям качества стремится к единице (наибольшее значение). Уровень качества по единичным показателям для модели эталонной машины равен единице.

Для определения обобщенного уровня качества горных машин по комплексу уровней качества выбранных единичных показателей необходимо вычислить коэффициент участия каждого уровня качества по единичному показателю в их общей сумме для рассматриваемой i -й машины.

Доля участия уровней качества по каждому единичному показателю рассматриваемой q_{ij} и эталонной q_{6j} машин в их общей сумме при n параметрах

$$a_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_{ij}}; \quad (1.8)$$

$$a_{6j} = \frac{q_{6j}}{\sum_{j=1}^n q_{6j}} = \frac{1}{n}. \quad (1.9)$$

Чтобы по значению доли участия определить коэффициент участия уровней качества по каждому единичному показателю в значении обобщенного уровня качества машины, необходимо исключить влияние на него числа выбранных для сравнения параметров (единичных показателей):

$$y_{ij} = \frac{1 - a_{ij}}{1 - a_{6j}}. \quad (1.10)$$

Для модели эталонной машины $y_{6j} = 1$.

Суммарное значение уровней качества по единичным показателям i -й машины с учетом их коэффициентов участия y_{ij} при сложении по правилу векторов в n -мерном пространстве подсчитывают по формуле

$$\psi_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} q_{ij})^2}. \quad (1.11)$$

Суммарное значение уровней качества по единичным показателям для модели эталонной машины

$$\psi_6 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{6j} q_{6j})^2} = \sqrt{n}. \quad (1.12)$$

Обобщенный показатель качества машины равен отношению суммарных значений уровней качества по единичным показателям

рассматриваемой машины к аналогичным уровням качества модели эталонной машины:

$$K_i = \frac{\psi_i}{\psi_6} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{ij} q_{ij})^2}. \quad (1.13)$$

После подстановки в выражение (1.13) значения y_{ij} из (1.10) с учетом (1.8) и (1.9) получим формулу для подсчета обобщенного уровня качества при известных значениях уровней качества по единичным показателям этих машин

$$K_i = \frac{1}{(n-1) \sum_{j=1}^n q_{ij}} \sqrt{n \sum_{j=1}^n \left[q_{ij} \sum_{j=1}^n (q_{ij} - q_{ij}) \right]^2}. \quad (1.14)$$

Подставив вместо q_{ij} его значение из (1.7) с учетом (1.4) и проведя необходимые преобразования, получаем формулу для подсчета обобщенного уровня качества при известных удельных значениях параметров модели эталонной машины и значениях параметров рассматриваемой машины

$$K_i = \frac{\lambda}{(n-1) \sum_{j=1}^n \frac{x_{6j}}{P_{ij}}} \sqrt{n \sum_{j=1}^n \left[\frac{x_{6j}}{P_{ij}} \left(\sum_{j=1}^n \frac{x_{6j}}{P_{ij}} - \frac{x_{6j}}{P_{ij}} \right) \right]^2}. \quad (1.15)$$

Приведенная методика также пригодна для оценки качества средств рудничного транспорта и первичной технологической переработки угля, а также для подсчета уровня качества других машин, необходимо только установить в соответствии с приведенными рекомендациями функциональные критерии рассматриваемых машин и комплекс показателей, по которым нужно оценивать их качество.

Обобщенный уровень качества наиболее существенно зависит от значения функционального критерия по сравнению с любым из показателей P_{ij} , поэтому его увеличение является наиболее действенным для повышения качества машины.

Формулы для подсчета функциональных критериев горных машин (1.1)–(1.3) содержат производительность соответствующих машин, следовательно, обобщенный уровень качества при прочих равных условиях прямо пропорционально зависит от производительности.

Наибольшего значения уровень качества достигает при теоретической производительности Q , под которой понимают наибольшую достижимую производительность при непрерывной

работе машины с номинальными параметрами для расчетных условий эксплуатации.

Целесообразно кроме теоретической выделить техническую Q_T , эксплуатационную $Q_э$, межремонтную Q_p и полноресурсную Q_n производительности.

Техническая производительность — это наибольшая средняя производительность машины при определенных условиях эксплуатации технически возможной непрерывности работы и достигнутой надежности этой машины:

$$Q_T = Qk_T, \quad (1.16)$$

где k_T — коэффициент технической реализации теоретической производительности машины, численно равный произведению коэффициентов готовности и использования по производительности.

Эксплуатационная производительность — это фактическая средняя производительность машины с учетом организационно-технических неполадок, а также надежности взаимодействия машин, оборудования и условий эксплуатации:

$$Q_э = Qk_э = Q_Tk_{э,T}, \quad (1.17)$$

где $k_э$ — коэффициент реализации теоретической производительности машины в процессе эксплуатации, численно равный произведению коэффициентов готовности внешних (для этой машины) условий и использования машины во времени; $k_{э,T}$ — коэффициент реализации технической производительности в процессе эксплуатации:

$$k_{э,T} = \frac{k_э}{k_T}.$$

Межремонтная производительность — это средняя производительность машины за период между двумя очередными капитальными ремонтами в детерминированных горных условиях:

$$Q_p = Qk_p = Q_Tk_{p,T} = Q_эk_{p,э}, \quad (1.18)$$

где k_p — коэффициент реализации теоретической производительности машины в период между двумя капитальными ремонтами или до первого капитального ремонта; $k_{p,T}$ — то же, технической производительности, $k_{p,T} = k_p/k_T$; $k_{p,э}$ — то же, эксплуатационной производительности, $k_{p,э} = k_{p,T}/k_{э,T}$.

Полноресурсная производительность — это средняя производительность за период полного срока службы машины в детерминированных горных условиях:

$$Q_n = Qk_n = Q_Tk_{n,T} = Q_эk_{n,э} = Q_p k_{n,p}, \quad (1.19)$$

где k_n — коэффициент реализации теоретической производительности машины за ее срок службы; $k_{n,T}$ — то же, техниче-

ской производительности, $k_{n,T} = k_n/k_T$; $k_{n,э}$ — то же, эксплуатационной производительности, $k_{n,э} = k_{n,T}/k_{э,T}$; $k_{n,p}$ — то же, межремонтной производительности, $k_{n,p} = k_{n,э}/k_{p,э}$.

В соответствии с производительностью следует различать и функциональные критерии горных машин: теоретический λ , технический λ_T , эксплуатационный $\lambda_э$, межремонтный λ_p и полноресурсный λ_n . Подставляя значения функциональных критериев в формулу (1.15), получим формулы для определения обобщенных уровней качества технического K_T , эксплуатационного $K_э$, межремонтного (между двумя смежными капитальными ремонтами) K_p и полноресурсного K_n . Обобщенные уровни качества $K_э$, K_p и K_n , по существу, характеризуют степень использования обобщенного уровня качества спроектированных конструкторами и изготовленных заводами горных машин определенного уровня качества K и K_T .

1.4. Оценка качества горных машин *

Оценку качества горных машин рассмотрим на примере механизированных крепей.

Без применения ЭВМ обобщенный уровень качества вычисляют в следующей последовательности:

- 1) определяют функциональный критерий λ_i крепей по формуле (1.3);
- 2) выбирают показатели, характеризующие качество крепи P_{ij} ;
- 3) определяют удельные значения показателей качества x_{ij} по формуле (1.4) и составляют матрицу (1.5);
- 4) по каждому столбцу матрицы определяют минимальные значения $x_{\min j} = x_{0j}$, совокупность которых принимают в качестве эталона;
- 5) по формуле (1.7) находят уровни качества по единичным показателям q_{ij} ;
- 6) определяют $\sum_{j=1}^n q_{ij} = A_i$;
- 7) находят разности $A_i - q_{ij} = B_{ij}$;
- 8) находят произведения $B_{ij}q_{ij} = C_{ij}$;
- 9) определяют C_{ij}^2 ;
- 10) вычисляют $D_i = \sum_{j=1}^n C_{ij}^2$;
- 11) определяют обобщенные уровни качества отдельных крепей по формуле (1.14), которая после подстановки в нее введенных обозначений принимает вид

$$K_i = \frac{\sqrt{nD_i}}{(n-1)A_i}.$$

* В подготовке материала принял участие В. Б. Тимофеев.

Функциональные критерии и обобщенные уровни качества механизированных крепей

Модель крепи	Теоретический функциональный критерий $\lambda \cdot 10^{-3}$, Дж/ч	Теоретический обобщенный уровень качества K	Технический функциональный критерий $\lambda_T \cdot 10^{-3}$, Дж/ч	Технический обобщенный уровень качества K_T	Эксплуатационный функциональный критерий $\lambda_3 \cdot 10^{-3}$, Дж/ч	Эксплуатационный обобщенный уровень качества K_3
--------------	--	---	--	---	---	--

I. Крепи поддерживающего типа

М-70	18,10	0,136	7,85	0,059	—	—
МК-97-I	19,80	0,214	14,60	0,162	11,10	0,119
МК-97-II	26,60	0,293	21,60	0,238	14,90	0,164
М-100-I	36,00	0,378	14,95	0,160	—	—
М-100-II	45,30	0,476	18,80	0,201	—	—
М-87Д-I	41,70	0,384	13,15	0,123	9,54	0,087
М-87Д-II	56,70	0,543	17,85	0,173	17,34	0,166
М-87ДН-II	56,30	0,620	—	—	—	—
Донбасс-I	41,80	0,422	—	—	—	—
Донбасс-II	51,10	0,524	—	—	—	—
М-87	56,50	0,526	17,50	0,167	—	—
М-87А-I	58,30	0,562	18,30	0,179	—	—
М-87А-II	76,50	0,762	24,00	0,243	—	—
М-87Э-I	50,60	0,448	—	—	—	—
М-87Э-II	77,10	0,615	—	—	—	—

II. Крепи поддерживающе-оградительного типа

2М-81	17,20	0,162	13,55	0,131	—	—
2М-81К-I	11,70	0,095	10,15	0,083	—	—
2М-81К-II	17,10	0,137	14,80	0,119	—	—
МК-2	24,60	0,211	—	—	—	—
М-120	78,30	0,580	22,90	0,207	—	—
М-130	65,10	0,543	—	—	—	—

III. Крепи оградительно-поддерживающего типа

ОМКТМ-I	13,90	0,114	5,16	0,043	3,65	0,030
ОМКТМ-II	16,90	0,139	6,28	0,053	4,44	0,037
СА	12,60	0,109	10,80	0,096	—	—
ОКП-II	16,50	0,147	6,46	0,058	4,90	0,044
30КП	19,20	0,169	—	—	—	—
МК-I	21,50	0,185	6,47	0,057	—	—
МК-II	26,30	0,223	8,32	0,072	—	—
2М-КЭ	16,40	0,149	6,97	0,064	—	—

IV. Крепи оградительного типа

КТУ-2М	14,10	0,203	—	—	—	—
КТУ-3М	19,60	0,286	—	—	—	—

Продолжение табл. 5

Модель крепи	Теоретический функциональный критерий $\lambda \cdot 10^{-3}$, Дж/ч	Теоретический обобщенный уровень качества K	Технический функциональный критерий $\lambda_T \cdot 10^{-3}$, Дж/ч	Технический обобщенный уровень качества K_T	Эксплуатационный функциональный критерий $\lambda_3 \cdot 10^{-3}$, Дж/ч	Эксплуатационный обобщенный уровень качества K_3
--------------	--	---	--	---	---	--

V. Крепи для крутых пластов

Днепр-2	6,55	0,074	—	—	—	—
АКД-2	12,10	0,148	—	—	—	—
МКТ	23,8	0,303	—	—	—	—
2КГД	30,70	0,402	—	—	—	—
ЗКТУ	36,9	0,483	—	—	—	—

VI. Зарубежные модели крепей

ДВП-5 (ЧССР)	53,00	0,358	—	—	—	—
ДВП-4 (ЧССР)	79,00	0,591	—	—	—	—
Добсон-5/150-II (Англия)	89,00	0,753	—	—	—	—
Вестфалия-II (ФРГ)	60,7	0,559	—	—	—	—
Ферро-мат-2/4-III (ФРГ)	69,3	0,784	—	—	—	—

Для определения обобщенного уровня качества горных машин разработана программа на ЭВМ «Минск-22». По этой программе рассчитывали теоретический обобщенный уровень качества 85 отечественных и 21 зарубежной моделей механизированных крепей. Часть результатов расчета приведена в табл. 5.

Ввиду недостаточности сведений по надежности и эксплуатации крепей удалось оценить технический обобщенный уровень качества 22 моделей крепей, а эксплуатационный — для 7 моделей. Результаты также приведены в табл. 5.

В качестве единичных показателей P_{ij} были выбраны параметры крепей, имеющие статистически значимую линейную связь с функциональным критерием крепи и не использующиеся при подсчете функционального критерия, а именно P_{i1} — показатель применимости по углам падения разрабатываемых пластов; P_{i2} — давление крепи на почву пласта; P_{i3} — общая масса крепи на всей длине лавы; P_{i4} — показатель гидравлической раздвижности крепи; P_{i5} — показатель стеснения сечения вентиляционной струи; P_{i6} — показатель давления в гидро-

системе крепи; P_{17} — показатель мощности насосной станции, приходящейся на 1 м² поддерживаемой кровли.

При расчете теоретического, технического и эксплуатационного обобщенных уровней качества принимались одни и те же единичные показатели качества и значения базовых удельных показателей эталона (x_{6j}), которые были определены при оценке теоретического уровня качества. Это дало возможность сопоставить результаты оценки обобщенного уровня качества крепей на различных стадиях: при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Анализ результатов оценки показывает: качество отечественных и зарубежных крепей находится примерно на одинаковом уровне;

наибольший теоретический обобщенный уровень качества по группам имеют крепи: Донбасс, М-87 — поддерживающие; М-120, М-130 — поддерживающе-оградительные; ЗОКП, МК-II — оградительно-поддерживающие; 2КГД, 3КГУ — для крутых пластов;

теоретический обобщенный уровень качества крепей превышает технический в 2,5—3,0 раза, эксплуатационный — в 3,5—4,5 раза, что говорит о резервах повышения качества крепей при их изготовлении и эксплуатации.

В табл. 6 приведена оценка обобщенного уровня качества по группам крепей. В этом случае значение базовых удельных показателей эталона (x_{6j}) определяли внутри каждой группы.

Из сопоставления результатов оценки обобщенного уровня качества крепей, приведенных в табл. 5 и 6, следует, что при

Таблица 6

Теоретический обобщенный уровень качества K крепей, рассчитанный по базовым удельным показателям, определенным внутри каждой из групп крепей

Крепи для крутых пластов		Крепи поддерживающе-оградительного типа		Крепи оградительно-поддерживающего типа	
Модель крепи	K	Модель крепи	K	Модель крепи	K
Днепр-2	0,169	2М-81К-I	0,143	СА	0,372
КДЗ-I	0,237	2М-81К-II	0,206	ОМКТМ-I	0,406
АКД-2	0,308	2М-81Э-I	0,171	ОМКТМ-II	0,495
РГКА	0,357	2М-81Э-II	0,221	ОКП-I	0,454
РГКД	0,366	2М-81	0,244	ОКП-II	0,569
1КГД-2	0,657	М-127	0,269	ОМКТ-Iк	0,569
1КГУ	0,668	МК-2	0,346	2МКЭ	0,582
МКГ	0,679	А-3	0,465	ЗОКП	0,656
2КГУ	0,848	АМС	0,486	МК-I	0,710
КГД-2	0,865	М-130	0,747	МК-II	0,859
3КГУ	0,995	М-120	0,909	1МКМ	0,857

Таблица 7

Теоретический обобщенный уровень качества K крепей, определенный по 18 единичным показателям качества, принятым по отраслевой методике оценки качества

Модель крепи	K	Модель крепи	K	Модель крепи	K
МК-97-I	0,187	М-87ДН-I	0,425	ЗОКП	0,214
МК-97-II	0,267	М-87ДН-II	0,598	ВОВ-ХП-103	0,688
Донбасс-I	0,256	1МКМ	0,264	(ВНР)	
Донбасс-II	0,346	2МКЭ	0,220	Краб-II	0,754
М-87Э-I	0,509	2М-81Э-II	0,374	(ПНР)	
М-87Э-II	0,709	ОКП-70-II	0,457	СМА-2	0,495
				(СРР)	
				ДВП-6А	0,682
				(ЧССР)	

базовых удельных показателей, определенных по группам крепей, обобщенные уровни качества выше, чем при базовых удельных показателях, определенных внутри совокупности всех крепей. Однако ранжирование обобщенных уровней качества крепей внутри каждой группы не изменилось.

Как изменится оценка уровня качества крепей, если изменить число единичных показателей качества? Для ответа на этот вопрос производили оценку по 18 единичным показателям качества, которые были выбраны в соответствии с отраслевой методикой оценки уровня качества механизированных крепей (за исключением коэффициента готовности, патентно-правового показателя, показателя стандартизации и унификации и минимальных конструктивных размеров в проходе для людей). Часть единичных показателей качества выражается количественно, другая часть определяется по балльной системе (направленность и управляемость движения, наличие крепей сопряжения и т. д.). Результаты оценки приведены в табл. 7.

Сравнение результатов оценки обобщенного уровня качества крепей по семи единичным показателям (см. табл. 5) и по 18 показателям (см. табл. 7) показывает, что они отличаются друг от друга в среднем на 25%. Результаты оценок различались бы меньше, если бы некоторые единичные показатели качества, принятые по отраслевой методике, не выражались в баллах и не использовались при подсчете функционального критерия крепей (рабочее сопротивление, скорость крепления).

При сопоставлении результатов оценки уровня качества крепей по отраслевой и рассмотренной методикам (табл. 8), выполненной по 18 показателям, оказалось, что, несмотря на отличие уровней качества крепей, их ранжирование внутри групп осталось почти без изменений.

Таблица 8

Сопоставление уровней качества крепей

Модель крепи	Результат оценки по отраслевой методике	Результат оценки по рассмотренной методике
<i>Крепи поддерживающего типа</i>		
МК-97-I	0,676	0,187
МК-97-II	0,681	0,267
М-87Э-I	0,758	0,509
М-87Э-II	0,725	0,709
Донбасс-I	0,814	0,256
Донбасс-II	0,812	0,346
Краб-II	0,792	0,754
ДВП-6А	0,799	0,682
М-87ДН-I	0,823	0,425
М-87ДН-II	0,809	0,598
<i>Крепи оградительно-поддерживающего типа</i>		
ОКП-70-II	0,881	0,457
ЗОКП	0,845	0,214
СМА-2	0,820	0,495
ВОВ-Х11-103	0,827	0,688

Результаты оценки уровня качества крепей (см. табл. 5) использовались для установления статистических зависимостей обобщенного уровня качества K от функционального критерия λ и уровней качества по единичным показателям q_j . Искомые зависимости описываются линейной функцией:

$$K = 0,00540 + 0,00987\lambda; \quad r = 0,976; \quad S_{\text{ост}} = 0,041; \quad (1.20)$$

$$K = 0,105 + 0,723q_1; \quad r = 0,894; \quad S_{\text{ост}} = 0,085; \quad (1.21)$$

$$K = 0,085 + 1,575q_2; \quad r = 0,675; \quad S_{\text{ост}} = 0,140; \quad (1.22)$$

$$K = 0,059 + 0,687q_3; \quad r = 0,751; \quad S_{\text{ост}} = 0,125; \quad (1.23)$$

$$K = 0,023 + 0,786q_4; \quad r = 0,981; \quad S_{\text{ост}} = 0,037; \quad (1.24)$$

$$K = 0,021 + 0,749q_5; \quad r = 0,961; \quad S_{\text{ост}} = 0,054; \quad (1.25)$$

$$K = 0,104 + 0,709q_6; \quad r = 0,910; \quad S_{\text{ост}} = 0,079; \quad (1.26)$$

$$K = 0,105 + 0,861q_7; \quad r = 0,923; \quad S_{\text{ост}} = 0,073. \quad (1.27)$$

Необходимо отметить, что зависимости (1.20) — (1.27) справедливы и для технического, и для эксплуатационного обобщенных уровней качества крепей.

Задаваясь требуемым обобщенным уровнем качества или устанавливая его прогнозом и используя зависимости (1.20) — (1.27), можно определить функциональный критерий и уровни качества по единичным показателям крепи; а затем с учетом (1.4) и (1.7) и значений базовых удельных показателей эталона (x_{6j}) — единичные показатели качества крепи, соответствующие заданному обобщенному уровню качества:

$$P_j = \frac{x_{6j}}{q_j} \lambda. \quad (1.28)$$

Таким образом, появляется возможность управлять обобщенным уровнем качества крепей посредством их параметров.

2.1. Методика оценки качества материала по химическому составу

Качество горных машин во многом определяется качеством материала, из которого они изготовлены. Для изготовления деталей горных машин используется широкая номенклатура материалов. В условиях ужесточения эксплуатационных параметров требования к материалам должны быть четко сформулированы. Использование конструктивных материалов может быть целесообразным только при оценке качества материала, начиная с момента поступления его на машиностроительный завод и до выпуска готовых деталей.

Для регламентации состава и свойств материалов созданы ГОСТы и ТУ. В сфере производства черных и цветных металлов действуют более 1700 ГОСТов и около 10 000 ОСТов и ТУ, в которых качество продукции регламентируется нормой потребительских свойств, а также количеством и нормой допустимых дефектов. Химический состав металлических материалов является основной характеристикой, определяющей весь комплекс свойств, поэтому именно с регламентации химического состава начинаются все марочные стандарты.

Анализ действующих стандартов на металлургическую продукцию в СССР и за рубежом показывает, что она различается, главным образом, содержанием серы и фосфора в стали, а также пределами содержания углерода и марганца в стали. В связи с этим качество стали по химическому составу можно оценивать, используя стандарты, действующие как в СССР, так и за рубежом.

Под качеством материала по химическому составу понимают совокупность компонентов, обуславливающих определенный (заданный) уровень механических свойств.

Уровень качества по химическому составу — это степень соответствия состава материала базовому составу $b_{баз}$, обеспечивающему заданный уровень механических свойств.

Для оценки качества материала по химическому составу необходимо иметь эталон. В качестве эталона материала рекомендуется принять состав, содержание компонентов в котором соответствует среднему содержанию всех компонентов, входящих в данный сплав, оговоренному ГОСТом или ТУ. Исключения составляют вредные примеси, содержание которых должно быть минимальным.

Таким образом,

$$b_{баз} = \frac{b_{max} + b_{min}}{2}, \quad (2.1)$$

где b_{max} — максимальное содержание компонента по ГОСТу или ТУ; b_{min} — минимальное содержание компонента по ГОСТу или ТУ.

Как правило, материал базового состава является фиктивным, и только в частном случае он может оказаться действительным. Уровень качества материала отличного от базового состава компонентов по ГОСТу или ТУ меньше единицы.

Оценка обобщенного уровня качества ведется с определением единичных показателей качества по отдельным компонентам, входящим в сталь.

Уровень качества по единичным показателям оценивают по формуле

$$q_{ij} = \frac{b_{баз}}{b_{баз} + \Delta}, \quad (2.2)$$

где $\Delta = b_i - b_{баз}$ при $b_i > b_{баз}$; $\Delta = b_{баз} - b_i$ при $b_i < b_{баз}$; b_i — фактическое значение содержания элементов, входящих в сталь.

Величина q_{ij} всегда безразмерна и может быть равна единице только при $\Delta = 0$, т. е. при среднем содержании элемента по ГОСТу или ТУ.

После определения уровня качества по единичным показателям рассчитывают долю участия a_{ij} и коэффициент участия y_{ij} по методике, изложенной в подразд. 1.3. Обобщенный уровень качества материала по химическому составу

$$K_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{ij} q_{ij})^2}. \quad (2.3)$$

Результаты расчета уровней качества по основным элементам, входящим в сталь, и обобщенного уровня качества для

Таблица 9

Стали, используемые для валов

Сталь	q_C	q_{Mn}	q_{Si}	q_{Cr}	q_{Ni}	K
35	0,835	0,746	0,574	—	—	0,723
40	0,837	0,746	0,574	—	—	0,728
45	0,838	0,746	0,574	—	—	0,729
40X	0,833	0,746	0,574	0,76	—	0,735
40XM	0,833	0,746	0,574	0,570	0,75	0,737
40XNMA	0,833	0,746	0,574	—	0,78	0,743

Таблица 10

Стали, используемые для шестерен и вал-шестерен

Марка стали	q_C	q_{Mn}	q_{Si}	q_{Cr}	q_{Ni}	$q_{Mo, Ti, W}$	K
18ХГТ	0,727	0,760	0,574	0,793	—	0,66	0,680
30ХГТ	0,777	0,760	0,574	0,793	—	0,60	0,692
20ХГР	0,777	0,739	0,574	0,752	—	0,538	0,682
20ХН3А	0,759	0,529	0,574	0,714	—	—	0,704
25Х2ХГНТА	0,780	0,818	0,538	0,789	0,733	0,60	0,716
18Х2Н4ВА	0,739	0,571	0,574	0,833	0,913	0,714	0,735

различных марок стали, проведенного по предлагаемой методике, приведены в табл. 9 и 10.

Зависимость обобщенного уровня качества от уровня по единичным показателям может быть аппроксимирована на небольшом участке прямой линией

$$K_i = c + q_i x. \quad (2.4)$$

Эту зависимость можно представить в следующем виде: $K = 0,377 + 0,57 q_C$; $K = 0,346 + 0,5 q_{Mn}$; $K = 0,634 + 0,125 q_{Cr}$; $K = 0,506 + 1,5 q_{Ni}$.

Влияние на обобщенный уровень качества таких примесей, как сера, фосфор, газы и другие, было рассчитано для стали 12ХН3А.

Сталь выплавляли электродуговым, электрошлаковым, вакуумно-дуговым и электронно-лучевым методами. В зависимости от способа переплава количество вредных примесей в стали менялось. По предлагаемой методике рассчитаны обобщенные показатели уровня качества для всех способов выплавки (табл. 11).

Как и следовало ожидать, наибольшим обобщенным уровнем качества обладает сталь электронно-лучевого переплава. Вакуумно-дуговой и электрошлаковый переплавы имеют примерно одинаковый обобщенный уровень качества. Разница в

Таблица 11

Уровень качества стали 12ХН3А различными способами выплавки

Способ переплава	K	q_H
Электродуговой (ЭДП)	0,870	3,4
Электрошлаковый (ЭШП)	0,885	10,7
Вакуумно-дуговой (ВДП)	0,887	8,7
Электронно-лучевой (ЭЛП)	0,915	10,9

значениях обобщенного уровня качества различных способов выплавки составляет 0,05. Это дает основание не учитывать их концентрацию.

Что касается влияния способов выплавки (чистоты стали) на механические свойства, то надо отметить существенное различие значений работы распространения трещины (табл. 11). Наибольшему значению обобщенного уровня качества по химическому составу соответствует самое высокое значение работы распространения трещин.

2.2. Методика оценки качества стали по механическим свойствам

Разрушение конструкций из материалов, обладающих значительным запасом прочности, является одной из важных проблем механики и физики прочности, поэтому выбор критерия, по которому оценивается прочность, является одной из наиболее сложных задач. Существующие критерии разрушения хорошо «работают» в области хрупкого разрушения, но с развитием пластических деформаций эти критерии дают существенные погрешности, поэтому использовать их для оценки качества современных пластичных конструкционных материалов затруднительно. В качестве критерия при оценке качества конструкционного материала можно выбрать удельную работу или удельную мощность разрушения.

Анализ данных по удельной работе разрушения и ударной вязкости для большого количества материалов показывает, что работа разрушения, определенная различными методами, различна по абсолютной величине, но имеет одинаковый характер изменения. Исходя из этого, в качестве критерия разрушения при оценке качества конструкционного материала следует использовать ударную вязкость, которая легко определяется. Ударная вязкость является интегральной характеристикой, определяющей удельной работой, которая затрачивается на зарождение и распространение трещины. Условия поглощения энергии металлом в процессе распространения и зарождения трещины различны: зарождение трещины происходит под действием касательных напряжений, разрушение, т. е. распространение трещин, вызывается нормальными напряжениями, действующими в устье трещины.

Поскольку металлические детали имеют различного рода дефекты (металлургического, технологического или сварочного происхождения), то наиболее важным фактором является способность металла сопротивляться распространению трещины. Наличие в конструкции сложного напряженного состояния обуславливает различие работы распространения трещины, которую можно определить по ударной вязкости. Существует ряд

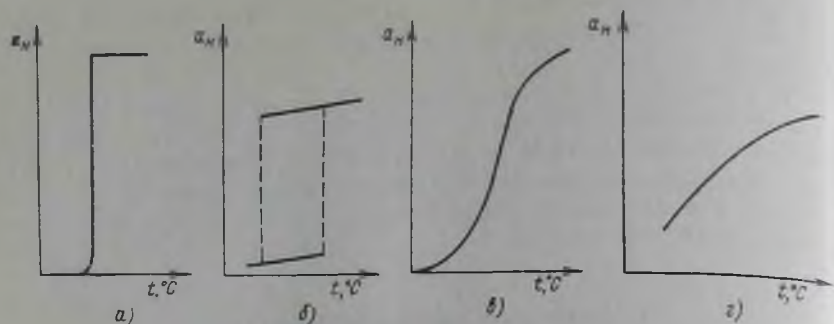


Рис. 1. Изменение ударной вязкости в зависимости от температуры и состояния материала:

а — чистые металлы; б — твердые растворы; в — стали после термообработки; г — высокопрочные стали

методик по разделению ударной вязкости на работу зарождения и распространения трещины [13].

Расхождение результатов определения работы по распространению трещин связано с большой погрешностью копровых надрезных образцов. Анализ этих работ позволяет использовать ударную вязкость α_n в качестве функционального критерия при оценке качества конструкционного материала по механическим свойствам. Изменение ударной вязкости в зависимости от температуры для различного рода материалов приведено на рис. 1.

Имея функциональный критерий по разрушению, можно воспользоваться для оценки качества материала методикой Московского горного института (см. гл. 1).

В качестве базовых показателей выбраны показатели, которые должны:

- 1) давать возможность определения показателей стандартными методами;
- 2) исключать экспертные способы назначения показателей;
- 3) быть динамичными, т. е. совершенствоваться по мере разработки новых материалов и методов упрочнения.

В качестве таких показателей можно использовать механические свойства, определяемые стандартными испытаниями. Нами для оценки качества материалов по механическим свойствам использовались свойства, определяемые для большинства материалов стандартными методами.

Зная механические свойства различных материалов после различных видов упрочнения и функциональный критерий разрушения, можно рассчитать удельные значения базовых показателей, принятых для оценки:

$$x_{ij} = \frac{P_{ij}}{a_{ni}}, \quad (2.5)$$

где i — порядковый номер материалов в рассматриваемой совокупности; j — порядковый номер параметров из числа параметров, принятых для оценки.

Удельные значения величин x_{ij} дают возможность получить матрицу

$$\{x_{ij}\} = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{vmatrix}.$$

Строка матрицы относится к одной марке стали, имеющей определенный уровень механических свойств после соответствующей обработки, столбец — удельное значение каждого показателя по одному из параметров.

Для назначения материала эталона из матрицы выбирают минимальные значения удельных величин:

$$\{x_{базj}\} = \left\| x_{б1}^{\sigma} x_{б2}^{\sigma} x_{б3}^{\sigma} x_{б4}^{\sigma} x_{б5}^{\sigma-1} \right\|. \quad (2.6)$$

Совокупность значений $\{x_{базj}\}$ используют в качестве динамического фиктивного материала, обладающего наиболее высокими механическими свойствами, полученными в сталях разного состава и после различных обработок. Выбор материала эталона дает возможность определить уровни качества по механическим свойствам (см. подразд. 1.3).

Для оценки качества материала определяют уровни качества по единичным показателям q_{ij} , долю участия каждого показателя в общей сумме при пяти параметрах оценки a_{ij} , коэффициент участия y_{ij} и обобщенный показатель качества материала по формуле

$$K_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{ij} q_{ij})^2}. \quad (2.7)$$

2.3. Оценка качества стали по механическим свойствам

По предлагаемой методике было определено качество стали нескольких марок после различных видов объемных термических обработок. Вычисления выполнены на машине «Минск-32». Полученные результаты приведены в табл. 12.

Зависимость обобщенного уровня качества от уровня качества по единичным показателям имеет низкий коэффициент корреляции.

Таблица 12

Обобщенные уровни качества по механическим свойствам

Для валов		Для зубчатых передач		Для цепей	
Сталь	K_f	Сталь	K_f	Сталь	K_f
40	0,701	20X	0,664	25Г2	0,757
45	0,703	18ХГТ	0,749	26Г2С	0,875
40Х	0,859	30ХГТ	0,753	30ХМА	0,955
40ХН	0,863	20Х2Н4А	0,921	25ХГНМА	0,989
40ХНМ	0,901	20ХГР	0,764		
40ХНМА	0,998	20ХГНР	0,796		
		25Х2ГНТА	0,817		
		20Х2Н3А	0,959		

Однако зависимость $K_{х.с} = f(\sigma_B, \sigma_T, \delta, \psi)$ описывается кривыми, имеющими максимум (рис. 2). Это говорит о том, что для оптимальных значений $\sigma_B, \sigma_T, \delta, \psi, \sigma_{-1}$ показатель качества материала по химическому составу должен быть вполне определенным [21].

Выше некоторого значения уровня качества по химическому составу все механические свойства снижаются. Зная это, можно выбирать материал для деталей ответственного назначения.

Для сталей, используемых при производстве цепей, были рассчитаны уровни качества (табл. 13).

Анализ результатов показывает, что уровни качества сталей для цепей по механическим свойствам колеблются в широких пределах. Причем для каждой марки стали существует уровень механических свойств, который дает максимальный уровень качества. Так, для стали 30ХМА $\sigma_B = 1010$ МПа; $\sigma_T = 880$ МПа; $\delta = 11\%$; $\psi = 57\%$; для стали 25ХГНМА, используемой для из-

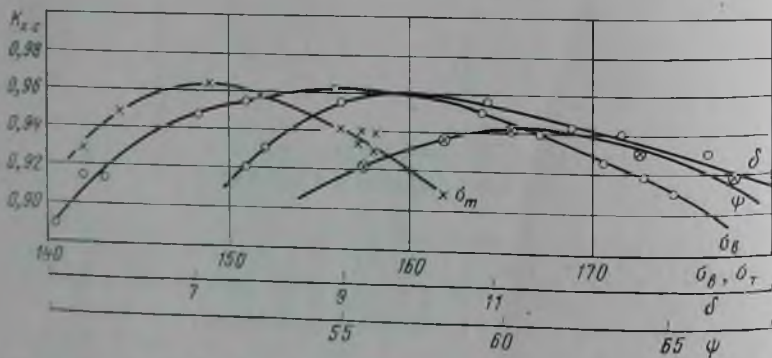


Рис. 2. Зависимость обобщенного уровня качества от механических свойств

Таблица 13

Уровни качества сталей, используемых при производстве цепей

Сталь	Механические свойства				$K_{х.с}$ до Н·м/см ²
	σ_B , даН/мм ²	σ_T , даН/мм ²	δ , %	ψ , %	
25Г2	110	95	8	50	4
26Г2С	110	102	12	55	9
30ХМА	95	75	12	50	9
30ХМА	140	120	8	50	5
30ХМА	130	110	10	50	5
30ХМА	101	88	12	57	11
25ХГНТА	140	120	8	55	6
25ХГНТА	120	110	10	55	8
25ХГНТА	110	100	12	60	10
25ХГНА	110	100	12	60	12
25ХГНА	160	150	10	63	12

Продолжение табл. 13

Сталь	Уровни качества				K_f
	q_{σ_B}	q_{σ_T}	q_{δ}	q_{ψ}	
25Г2	0,333	0,336	0,501	0,407	0,398
26Г2С	0,751	0,700	0,752	0,820	0,737
30ХМА	0,873	0,950	0,752	0,910	0,875
30ХМА	0,326	0,333	0,625	0,507	0,464
30ХМА	0,352	0,360	0,503	0,455	0,422
30ХМА	0,935	1	0,917	0,965	0,955
25ХГНТА	0,393	0,400	0,602	0,546	0,490
25ХГНТА	0,611	0,580	0,800	0,729	0,686
25ХГНТА	0,826	0,800	0,833	0,833	0,817
25ХГНА	1,0	0,961	1	1	0,989
25ХГНА	0,689	0,640	0,83	0,952	0,791

готовления более высокопрочных цепей, максимальный уровень качества $K = 0,989$. Использование этой стали с пределом прочности 1600 МПа снижает обобщенный уровень качества по механическим свойствам до 0,791.

2.4. Взаимосвязь качества стали по составу и механическим свойствам

В связи с тем, что на заводы сталь поступает определенного состава, желательно иметь методику, по которой для стали данного состава можно найти режимы обработки, обеспечивающие получение наивысшего уровня качества по свойствам.

Для этого проведем анализ стали 25Г2 по химическому составу и механическим свойствам, которая используется для изготовления цепей. Максимальный уровень качества по хими-

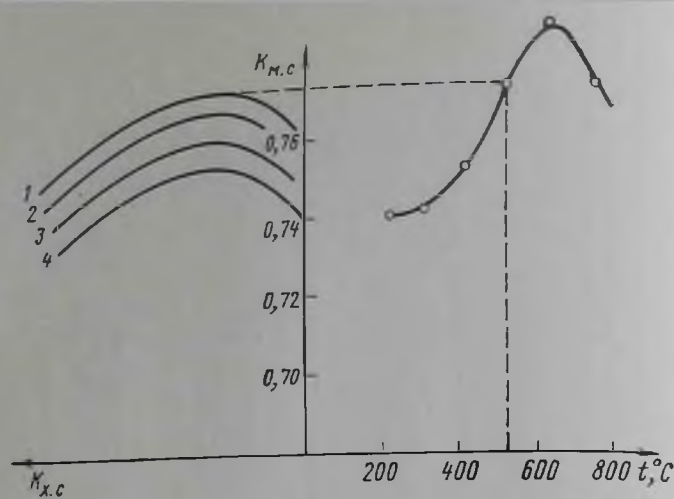


Рис. 3. Номограмма для выбора температуры отпуска в зависимости от $K_{м.с}$

ческому составу $K_{х.с}=0,937$, а по механическим свойствам $K_{м.с}=0,892$.

Наблюдается несоответствие в уровнях качества по химическому составу и механическим свойствам. Это свидетельствует о неоптимальных режимах термической обработки для конкретных условий поставки стали с определенным химическим составом.

Для получения высокого уровня качества по механическим свойствам этой стали, но с другими значениями уровня качества по химическому составу необходимо изменять температуры отпуска. Для создания схемы влияния температуры отпуска на уровень качества по механическим свойствам можно провести расчет этого показателя в зависимости от температуры отпуска.

По имеющимся в литературе данным мы проанализировали влияние температуры отпуска на обобщенный уровень качества стали 30ХГСА, которая также используется для изготовления цепей и соединительных звеньев.

Для определения температуры отпуска и получения максимального уровня качества данной марки стали рекомендуется иметь номограмму (рис. 3). Чтобы определить температуру отпуска, необходимо иметь входной контрольный анализ химического состава; по данным входного химического анализа рассчитать обобщенный уровень качества; по имеющейся номограмме найти температуру отпуска, обеспечивающую максимальный уровень качества по механическим свойствам.

Применение дифференцированной температуры отпуска дает возможность сократить разброс по механическим свойствам и увеличить уровни качества деталей.

Глава 3 УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

3.1. Условия эксплуатации и требования к долговечности горных машин

Горные машины работают в различных горно-геологических, горнотехнических и погодно-климатических (для открытых разработок) условиях эксплуатации. В связи с этим при проектировании горных машин необходимо учитывать влияние на долговечность таких факторов, как свойства горных пород и их расположение в массиве, изменение температуры, содержание влаги и пыли в атмосфере и др.

В особенно тяжелых условиях работают выемочные машины на рудных и угольных разработках. Для рудных месторождений характерны большая мощность пласта вскрыши, различные физико-механические свойства вскрышных пород и руд, включения скального типа, резкие колебания температуры и т. д.

Так, в бассейне Курской магнитной аномалии (КМА), где сосредоточено четверть всех запасов железной руды страны, мощность наносных отложений в центральной части района составляет 80—100 м (на периферийных частях 300—500 м). В осадочной толще участвуют породы четвертичного и третичного возрастов, покрывающие метаморфизированные кристаллические породы докембрийского возраста. Породами повышенной крепости, способствующими интенсивному износу деталей, являются меломергельные отложения полускального типа, доля которых в общем объеме вскрыши довольно велика. Так, на Стойленском месторождении она составляет 70, на Лебединском 40%. Скальные прослойки имеют линзовидную форму в поперечном сечении от нескольких метров до сотен метров, коэффициент их крепости по шкале М. М. Протодяконова 4—17, мощность прослоя достигает 7,7 м. Работа экскаваторов в этих условиях сопровождается появлением больших динамических нагрузок, которые приводят к вибрации всей машины и нередко к разрушению деталей. Мощность рудного тела на месторождениях различна. Так, на Михайловском карьере она составляет 80 м. В осадочной толще гранулометрический состав фракции пыли 0,05—0,002 мм наиболее агрессивен при износе деталей.

Угольные месторождения также отличаются большим разнообразием горно-геологических условий. Так, на месторождениях Кузнецкого бассейна, расположенных в южной и северной его частях, наблюдается пологое и наклонное залегание свит уголь-

ных пластов, а в центральной части — крутое залегание пластов мощностью 40—50 м. Покрывающие породы (песчанники, алевролиты и аргеллиты) имеют большой разброс физико-механических и структурных (в пределах одного карьерного поля) свойств. Коэффициент крепости пород по шкале М. М. Протодьяконова колеблется в пределах от 3 до 11.

Большинство марок угля Кузнецкого бассейна отличается малой абразивностью, которая повышается с увеличением содержания кремнезема. Для машин подземной разработки полезных ископаемых важным является мощность и угол наклона пласта, определяющие габариты машин, а также гипсометрия пластов, которая влияет на конструктивное исполнение машин. Так, гипсометрия существенно влияет на длину рештаков, конструкцию стыковых соединений скребковых конвейеров, и расположение масла в редукторах забойных машин.

Детали машин, работающих на открытых разработках, подвергаются комплексному воздействию окружающей среды. Это одновременное действие запыленной атмосферы, осадков и т. д. Содержащаяся в атмосфере и в горных породах влага ускоряет процесс коррозии металлов, в результате чего снижаются механическая прочность конструкции и продолжительность работы механизмов, разрушается внешняя отделка машин, а попадающие на детали и в смазку продукты коррозии интенсифицируют процесс износа деталей сопряжений. Повышенная скорость старения имеют материалы, содержащие влагу. Под дождем процесс коррозии протекает менее интенсивно, чем туман. Температура воздуха и действие солнечных лучей, как правило, не оказывают значительного влияния на коррозионные процессы. Влажность шахтной атмосферы и кислотность вызывают электрохимическую коррозию шахтного оборудования. Процессы коррозии под действием блуждающих токов, появляющихся при работе контактных электровозов, интенсифицируются. Показатели влажности по угольным бассейнам приведены в табл. 14.

Таблица 14

Влажность воздуха в забоях, %			
Бассейн	Среднемесячная влажность		Среднегодовая влажность
	максимальная	номинальная	
Донецкий	90	64	79
Кузнецкий	86	72	82
Карагандинский	86	58	74
Подмосковный	92	74	85
Челябинский	86	67	80
Сахалинский	86	77	82

Ряд месторождений отличается сложными гидрогеологическими условиями: наличием водоносных горизонтов, скоплением грунтовых вод, источником которых являются атмосферные осадки.

Суровые климатические условия способствуют, как правило, возникновению аварий. С повышением температуры снижается долговечность электрического оборудования экскаваторов из-за худшего охлаждения токоведущих частей и, наоборот, повышается долговечность механического оборудования.

При работе в зимних условиях крупные глыбы, образовавшиеся при экскавации мерзлых пород, а также их замерзание вызывают большие динамические нагрузки, затрудняющие работу экскаваторов. Под действием колебания температуры изменяются геометрические размеры деталей, в результате чего изменяются и зазоры в сопряжениях. Температура на карьерах колеблется от -60 до $+50^{\circ}\text{C}$. Более стабильна она в подземных выработках.

Равнинный характер местности и значительные колебания температуры воздуха и почвы в течение суток способствуют появлению сильных ветров, пыли (табл. 15), которая, проникая во вращающиеся части машин, вызывает их повышенный износ, преждевременный выход из строя, а также поломки.

Таким образом, содержание пыли значительно превышает санитарную норму — 2 мг/м^3 .

Попадание органической и неорганической пыли на поверхности деталей способствует развитию, а действие ветра — замедлению коррозии, так как происходит испарение влаги.

При проектировании горных машин особое внимание обращают на специальные требования, учитывающие влажность среды, химическую активность шахтной воды, запыленность

Таблица 15

Запыленность воздуха при работе роторного экскаватора [24]

Горизонт разработки	Запыленность воздуха в кабине*, мг/м^3	
	экскаватора	конвейера
Верхний уступ, песчаные породы	7,1—26,5 6,4—24,2	2,9—15,8
Верхний уступ, выветренные глинистые породы	3,0—23,5 1,4—7,4	1,3—3,8 1,2—3,4
Уступы II и III глинистых пород	2,2—18,5 1,3—7,1	1,3—3,8 1,2—3,2

* В числителе — запыленность воздуха в кабине в летний период; в знаменателе — в зимний.

среды, абразивность пород, взрывобезопасность рудничной атмосферы, возможные внезапные перегрузки, горизонтальные или наклонные расположения машин, которые в различной степени влияют на долговечность горного оборудования.

3.2. Общие сведения по долговечности машин

Эксплуатация машин — процесс целенаправленного их использования, при котором должна обеспечиваться бесперебойная и безопасная их работа при максимальной производительности и минимальных эксплуатационных затратах. Эти условия рациональной эксплуатации обеспечиваются организационными и технологическими мероприятиями, максимальным использованием эксплуатационных свойств машин. Эксплуатация включает все этапы существования машин с момента приема их потребителем до списания, включая хранение, транспортирование, подготовку к использованию по назначению, все виды технического обслуживания и ремонта. Использование по назначению машин является основным этапом эксплуатации.

Горные машины отличаются разнообразием конструкции и сложностью, поэтому оценка их эксплуатационных свойств должна производиться комплексно рядом характеристик.

Эксплуатационные свойства делятся на технологические, технико-экономические и эргономические.

Технологические свойства характеризуют приспособленность машин к выполнению требований производства. Они включают производственную эффективность рабочего органа, проходимость, маневренность, плавность хода и т. д.

Эргономические свойства машин характеризуют функциональное состояние, работоспособность и безопасность обслуживающего персонала. Они зависят от метеорологических условий, состава воздуха и содержания в нем пыли, газа, паров, радиации, вибрации и шума, перегрузок, удобства управления, освещенности, зоны комфорта труда, технической эстетики и т. д.

К технико-экономическим свойствам машин относятся надежность (долговечность, ремонтпригодность) тягово-скоростные свойства, энергоэкономичность. Для определенных машин и условий их эксплуатации значимость этих свойств может быть различной.

Надежность (ГОСТ 13377—75) — свойство объекта¹ выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и

транспортирования. Это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения машины и условий ее эксплуатации, может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Надежность горных машин в технологической цепи или в комплексе определяет производительную работу всех остальных машин. Так, например, роторный экскаватор обуславливает работу роторного комплекса. На надежную работу горных машин оказывает влияние большое число факторов.

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Под безотказностью понимают свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки, а также в периоды хранения и транспортирования. При работоспособном состоянии объект способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией, при этом объект может быть как исправным, так и неисправным.

Наработка представляет собой продолжительность или объем выполненной объектом работы и измеряется в часах, тоннах, кубометрах и в других единицах. Она может быть суточной, месячной, между отказами и т. д. Под отказом понимают событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Отказы подразделяют на внезапные и постепенные. Кроме того, отказы бывают зависимыми и независимыми, конструкционными, производственными, эксплуатационными и др. Они возникают в результате дефектов (ГОСТ 17102—71) проектирования, изготовления и ремонта, нарушения правил эксплуатации, различных повреждений, естественного износа и старения деталей. В горных машинах наибольшее число отказов приходится на детали, воспринимающие большие динамические нагрузки.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Под предельным понимают состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или необходимости проведения среднего или капитального ремонта. Признаки предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данный объект.

¹ Под объектом следует понимать машину, сборочную единицу, деталь.

Показателями долговечности являются (ГОСТ 13377—75) гамма-процентный ресурс, средний ресурс, назначенный ресурс, средний ресурс между средними (капитальными) ремонтами, средний ресурс до списания, средний ресурс до среднего (капитального) ремонта, гамма-процентный срок службы, средний срок службы, средний срок службы между средними (капитальными) ремонтами, средний срок службы до среднего (капитального) ремонта, средний срок службы до списания.

Под техническим ресурсом понимают наработку объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния. Начало эксплуатации устанавливается в технической документации на объект или в договоре на поставку и может исчисляться с момента получения или установки у потребителя, отгрузки изготовителем и т. д.

Средний ресурс — математическое ожидание ресурса. Гамма-процентный ресурс — наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов. Величину γ определяют из уравнения

$$1 - F_p(t) = \gamma/100, \quad (3.1)$$

где $F_p(t)$ — функция распределения ресурса.

Под назначенным ресурсом понимают суммарную наработку объекта, при достижении которой эксплуатация прекращается независимо от его состояния.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления, после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния. Средний срок службы представляет собой математическое ожидание срока службы. Гамма-процентный срок службы — календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Для оценки надежности машин могут быть использованы также коэффициент готовности и технического использования.

Коэффициент готовности — вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается:

$$K_g = \frac{T_o}{T_o + T_v}, \quad (3.2)$$

где T_o — наработка на отказ; T_v — среднее время восстановления.

В повышении коэффициента готовности существенную роль играет правильно выбранная система технического обслуживания и ремонта, т. е. комплекс взаимосвязанных положений и норм, обуславливающих организацию и порядок проведения

работ по техническому обслуживанию и ремонту изделий в определенных условиях эксплуатации.

Ремонт (ГОСТ 18322—73) — комплекс работ для поддержания и восстановления исправности или работоспособности изделия. Техническое обслуживание — комплекс работ для поддержания исправности или только работоспособности изделия при подготовке и использовании по назначению, при хранении и транспортировании.

При проведении работ по техническому обслуживанию и ремонту рекомендуется применять техническое диагностирование. Техническое диагностирование (ГОСТ 20911—75) — процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определенной точностью.

Коэффициент технического использования — отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев в техническом обслуживании и ремонте за этот же период:

$$K_{т.и} = \frac{t_{сум}}{t_{сум} + t_{рем} + t_{обс}}, \quad (3.3)$$

где $t_{сум}$ — суммарная наработка; $t_{рем}$ — суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых ремонтов; $t_{обс}$ — суммарное время простоев из-за планового и внепланового технического обслуживания.

В. И. Казарцев рекомендует долговечность подразделять на физическую, технико-экономическую и моральную.

Физическая долговечность — продолжительность работы машины до разрушения или достижения предельного состояния базовых деталей. Она зависит от материала деталей, технологии их изготовления, конструкции сборочной единицы, качества монтажа и т. д. В качестве критерия физической долговечности машины может быть принят срок службы основных корпусных деталей, определяемый по формуле

$$T_{\phi} = \frac{S_{\max} - S_{\text{нач}}}{\text{tg } \alpha (1 + \epsilon)}, \quad (3.4)$$

где $S_{\max}$ и $S_{\text{нач}}$ — соответственно максимальный и начальный зазор, мм; $\text{tg } \alpha$ — величина, характеризующая интенсивность износа, мм/ч; ϵ — коэффициент, показывающий, во сколько раз быстрее изнашивается деталь, сопряженная с базовой.

Моральный износ — срок службы машины до появления более совершенной конструкции машины этого же типа. Критерием моральной долговечности T_m может служить продолжительность работы машины до ее морального износа, которая опре-

деляется техническим прогрессом в производстве новых машин экономикой страны:

$$T_m = \eta T, \quad (3.5)$$

где η — коэффициент, учитывающий несоответствие машин требованиям в связи с ее моральным износом по производительности; T — срок службы машины.

Применительно к горным машинам срок службы машины T_m согласно методике В. Н. Трейера можно определить как

$$T_m = \eta \frac{\lg e' \frac{P_n}{P_o}}{\lg \left(1 + \frac{K}{100} \right)}, \quad (3.6)$$

где e' — коэффициент, учитывающий происходящее за время T совершенствование организации производства на карьере, в шахте, лаве, повышение квалификации персонала и производительности труда (для шахт e' принимают 1,5—1,8 [2]); P_n — производительность проектируемой машины; P_o — производительность машины, находящейся в эксплуатации и выполняющей подобные операции.

Для многих типов горных машин моральная долговечность превышает 10 лет, а их физическая долговечность измеряется несколькими годами. Такой разрыв свидетельствует о необходимости повышения физической долговечности, т. е. технического ресурса машин.

Технико-экономическая долговечность — продолжительность работы машины от ее ввода в эксплуатацию до того момента, когда общие затраты на эксплуатацию, а также издержки, связанные со снижением производственных функций, превзойдут экономический эффект от использования новой машины.

Эксплуатационные свойства характеризуют не только эффективность использования машин, но и позволяют оценить, в какой мере их конструкция соответствует условиям эксплуатации. Вместе с тем эксплуатационные свойства являются оценочными параметрами, по которым судят об экономической целесообразности замены одного типа машин другим, а также о пригодности проектируемой или испытываемой машины для использования в конкретных условиях эксплуатации.

3.3. Долговечность горных машин

Долговечность — одно из основных свойств горных машин, зависящее от качества конструкции, изготовления и эксплуатации. В процессе конструирования и изготовления долговечность достигается стабильностью форм, точностью размеров, качеством поверхностей, использованием износостойких материалов,

физико-механическими свойствами деталей, а также применением современных методов расчета на прочность, снижением динамических нагрузок, разработкой более надежных конструкций и схем, установкой приборов контроля, совершенствованием технологии производства, сборки, монтажа и испытания машин, автоматизацией технологических процессов и т. д. В большинстве случаев это приводит к увеличению стоимости массы, габаритов машин и расходов на их создание.

Качество поверхностей и точность размеров должны формироваться на протяжении всего технологического процесса изготовления деталей. Так, точность получения заготовок позволяет предъявлять высокие требования к точности деталей.

Заготовки изготавливают литьем, обработкой давлением, сваркой, из профильного материала. Заготовки из стали, чугуна и цветных металлов получают отливкой в землю, в стержневые, металлические и оболочковые сферы, по выплавляемым моделям. Корпусные детали из серого чугуна отливаются главным образом в земляные формы, изготовленные машинной формовкой. При этом степень точности отливок 9. Наименьшие припуски на механическую обработку и наименьшая шероховатость поверхности получаются при литье по выплавляемым моделям, в оболочковые формы, под давлением.

Заготовки, получаемые штамповкой на прессах или молотах, имеют степень точности 7—8. При штамповке заготовок на ковочных прессах припуски на механическую обработку получают в 1,5—2 раза меньше, чем при штамповке на молотах. Заготовки высокого качества получают горячей штамповкой на горизонтально-ковочных машинах.

Для заготовок из сортового материала используют прокат в виде калиброванного цилиндрического, квадратного и других профилей, а также проволоку, горячекатаную сталь, трубы. В ряде случаев для получения заготовок применяют сварку, что позволяет заменить цельнолитые или кованые детали из высоколегированной стали комбинированными.

Упрочнение поверхностей деталей пластическим деформированием (обкатка роликами, дробеструйная обработка, чеканка и др.) позволяет уменьшить влияние концентраторов напряжений, повысить предел выносливости, обеспечить высокую износостойкость поверхностных слоев и т. д. Так, предел выносливости поверхностей гладких валов после обкатки роликами повышается на 15—40%. Долговечность деталей обеспечивается различными химико-термическими способами (цементацией, азотированием, цианированием, алитированием, силицированием и др.).

Полнота реализации качеств эксплуатации машин определяется горно-геологическими, горнотехническими и погодными климатическими условиями, квалификацией машиниста, качеством технического обслуживания и ремонта и т. д.

На открытых разработках полезных ископаемых из девяти типов механических лопат, применяемых на горных предприятиях, наибольшее число приходится на типы экскаваторов ЭКГ-4,6; ЭКГ-8И. Однако, как показывает опыт эксплуатации, они используются ниже технических возможностей, заложенных в машинах, из-за значительного числа отказов. Наиболее частые отказы экскаваторов происходят в результате износа деталей или их аварийных поломок. На карьерах, размещенных в центральной части или на юге страны, отказы могут возникать вследствие потери прочности металлом или его усталости, а в районах с низкими температурами — в результате хрупкого разрушения. Динамические перегрузки элементов карьерных экскаваторов приводят к появлению внезапных отказов. Наименее долговечными элементами у экскаваторов ЭКГ-8И являются канат подъема и напора, седловой подшипник, ковш, траверса ковша, ванты, электрическая система управления, а у экскаватора ЭКГ-4,6 — канат подъема, редуктор поворота, лебедка подъема, система управления, двигатель напора [56].

Основная причина снижения экономичности использования мощной техники непрерывного действия заключается в недостаточно высокой долговечности дорогостоящего оборудования. Так, например, аварийные простои роторных экскаваторов на ряде предприятий составляют 2%, а цепные 5—13% календарного времени. Из них простои, вызванные отказами и неисправностями по механической части, в общем объеме unplanned простоев составляют для цепных экскаваторов 4—10%, для роторных около 2%. При этом более 50% простоев цепных экскаваторов происходит из-за повреждения деталей рабочего органа.

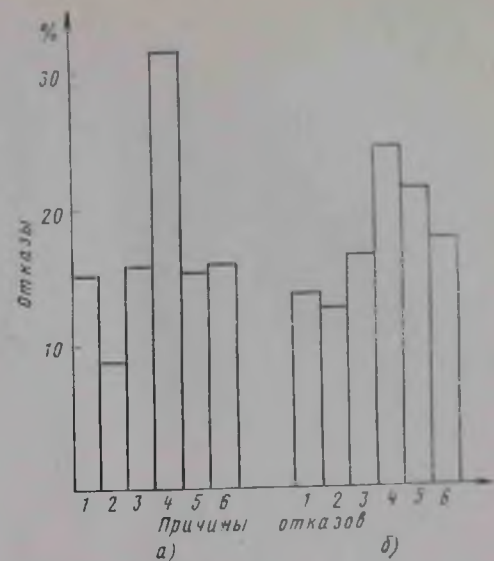
На роторных комплексах к деталям и узлам, имеющим ограниченный срок службы и обуславливающим их эффективную работу, относятся зубья ковша, ковши, питатели, ходовой механизм, конвейерные ролики и лента, привод конвейера.

На рис. 4 дана классификация отказов буровых станков на карьерах КачГОКа и ССГОКа. Конструктивные недостатки составляют значительный процент от общих отказов.

Повышение долговечности оборудования при подземной разработке полезных ископаемых, например, в угольной промышленности в условиях комплексной механизации и автоматизации приобретает особенно большое значение в связи с простоями горно-шахтного оборудования. Выполненные хронометражные наблюдения за работой комбайна 1К-52Ш в 80 лавах Донецкого бассейна позволили составить для него баланс рабочего времени и структуру простоев по горнотехническим причинам (рис. 5) [4]. На поиск и устранение отказов затрачивалось 19,9% рабочего времени, на проведение технических обслуживаний и ремонтов 5,9%.

Рис. 4. Классификация отказов буровых станков на карьерах КачГОКа и ССГОКа (по данным ИГД МЧМ СССР):

а — число отказов; б — продолжительность простоев; 1 — несвоевременный ремонт; 2 — некачественный ремонт; 3 — ошибки в работе машиниста; 4 — неудовлетворительное техническое обслуживание; 5 — конструктивные недостатки; 6 — прочие причины [4]

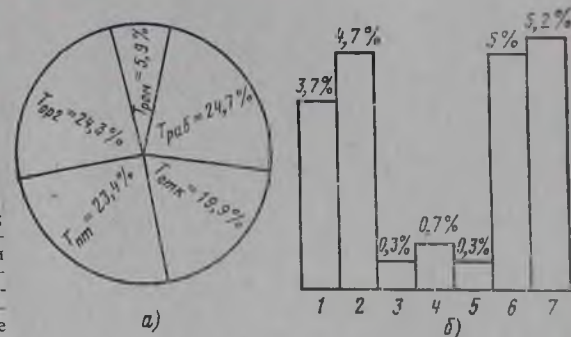


На рис. 6 приведены диаграммы, позволяющие судить об удельном весе отказов средств механизации очистных работ в зависимости от причин их возникновения [39]. Эксплуатационные отказы имеют больший удельный вес по сравнению с технологическими и конструктивными. Особенно они значительны для струговых установок.

Детали и сборочные единицы горно-шахтного оборудования в зависимости от сроков службы подразделяются на группы (I, II и др.), соответствующие определенным видам обслуживания и ремонта. Обычно детали и сборочные единицы группы I имеют месячный срок службы до плановой замены и заменяются при ремонтных осмотрах. Детали и единицы сбороч-

Рис. 5. Баланс рабочего времени (а) и структуры простоев (б) комбайна 1К-52Ш:

1 — неисправности комбайна; 2 — неисправности конвейера в лавах; 3 — неисправности орошения; 4 — сход комбайна с конвейера; 5 — неисправности маслостанции; 6 — неисправности конвейера вне лавы; 7 — отказы по горно-геологическим причинам



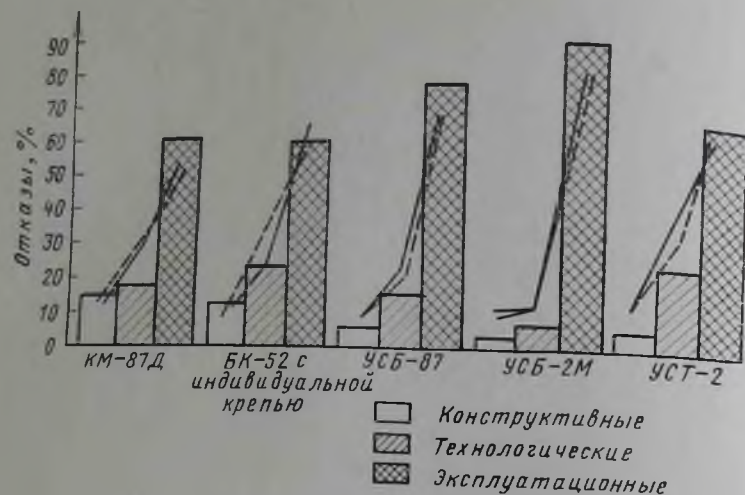


Рис. 6. Диаграммы, числа, продолжительности (сплошные линии) и трудоемкости устранения (штриховые линии) отказов оборудования для подземной добычи полезных ископаемых [39]

ные, относящиеся к группе II и последующим группам, заменяются при различных видах ремонта и должны иметь кратные сроки службы до плановой замены.

Средние сроки службы деталей и сборочных единиц по отдельным бассейнам устанавливают на основании статистических данных, полученных при эксплуатации машин с учетом рекомендаций заводов-изготовителей.

Долговечность горных машин зависит от большого числа конструктивных факторов (табл. 16).

Причины нарушения работоспособности дробильного оборудования:

1) выход из строя отдельных деталей и сборочных единиц дробилок, связанный с нарушением правил технической эксплуатации, износом или низким качеством изготовления деталей, а также вязким, хрупким или усталостным их разрушением;

2) нарушение технологических режимов работы, вызванных подачей в дробилки кусков руды, размеры которых превышают допустимые; содержание в рудах глинистых включений и влаги. Эти причины приводят к заклиниванию и подпрессовкам дробилки, потере производительности, а иногда и их остановке.

По характеру износа детали и сборочные единицы конусных дробилок могут быть классифицированы следующим образом.

1. Детали, изнашиваемые в результате непосредственного воздействия дробимого материала. Скорость изнашивания зависит от физико-механических свойств руды (дробимости, крепости, абразивности, крупности, влажности) и производитель-

Таблица 16

Факторы, определяющие долговечность элементов узкозахватного комбайна [39]

Элемент	Фактор
Исполнительный орган	Тип исполнительного органа, число рабочих органов, регулирование по мощности пласта, скорость резания, система смазки подшипников, исполнение подшипниковых узлов, наличие режущей цепи, наличие автоматического регулирования исполнительного органа по мощности пласта
Гидропривод регулировки исполнительного органа по мощности пласта	Максимальное давление, развиваемое насосом; исполнительный механизм, конструктивное выполнение защиты разводки шлангов и гидроцилиндров, герметичность гидроблока, наличие реверса насоса, расположение пульта управления гидроприводом
Погрузочные устройства	Тип погрузочного устройства, характер работы, способ перемонтажа при работе по челючковой системе
Редуктор исполнительного органа	Расчетный момент, передаточное отношение, коэффициент эквивалентной нагрузки для расчета подшипников на долговечность, расчетное число часов работы, число элементов с прочностью и долговечностью ниже допускаемой (зубчатые колеса, валы, подшипники), система смазки
Электродвигатель	Тип, мощность (часовая, длительная), пусковой момент, максимальный момент, пусковой ток, напряжение, система охлаждения
Аппаратура управления	Аварийный разъединитель, кнопки управления, элементы автоматики
Механизм подачи	Типы механизмов подачи, гидродвигателя и насоса, тяговое усилие, максимальная работа, скорость подачи, маневровая скорость подачи, наличие автоматики
Тяговый орган	Тип тягового органа, число цепей, шаг звена, класс прочности, степень прочности, пробная нагрузка, разрушающая нагрузка
Опорные лыжи	Способ регулирования
Система орошения	Тип насоса, тип форсунок, жидкость для орошения, система фильтрации, защита оросительных шлангов в лаве
Оборудование энерго-снабжения	Тип кабеля, штепсельная муфта, защита кабеля в лаве, тип пускателя, сила тока, напряжение

ности дробилки. К деталям этого типа относятся брони, траверсы, конуса, станины, защитный колпак дробилок крупного дробления, брони конуса, регулирующие кольца и станины распределительные тарели дробилок среднего и мелкого дробления.

2. Детали и сборочные единицы, изнашиваемые в результате действия сил трения, возникающих в сопряженных парах, также под влиянием усталостных явлений, перераспределения внутренних напряжений, динамических нагрузок, возникающих из-за постоянного изменения сопротивления движению дробящего конуса. К деталям и сборочным единицам этого типа относятся эксцентрики, приводные валы, амортизирующие устройства, регулирующие кольца, сферические подпятники (дробилок среднего и мелкого дробления), зубчатые передачи, плоские подпятники, электрический привод.

3. Детали, практически не изнашивающиеся. К ним относятся базовые детали (станины, корпуса дробилок крупного дробления).

В табл. 17 приведены коэффициенты готовности конусных дробилок на некоторых горных предприятиях.

Наработка сборочных единиц конусных дробилок определяется долговечностью основных деталей (табл. 18).

Для повышения надежности горных машин необходимо соблюдать правила эксплуатации, выполнять мероприятия принятой системы технического обслуживания и ремонта, иметь разработанные технологические процессы ремонтных работ, обоснованные нормативы, использовать прогрессивные методы восстановления деталей, иметь высококачественные запасные части и ремонтные материалы, повышать квалификацию обслуживающего персонала.

Межремонтные периоды должны быть равны или кратны срокам службы деталей. При заниженных межремонтных сроках повышается стоимость ремонтов, так как годные детали заменяются преждевременно, а при завышенных сроках появляется возможность аварий и преждевременного выхода из строя машин. Их отсутствие становится нередко причиной замены деталей, которые не исчерпали свой ресурс.

Таблица 17

Дробилка	Коэффициент готовности конусных дробилок					
	Предприятие					
	ИНГОК	НКГОК	ЦГОК	ССГОК	Качканар-ский ГОК	Коршунинский ГОК
ККД-1500/180	0,81	0,87	0,94	0,95	0,92	0,95
КРД-900/100	0,86	0,93	0,89	0,96	0,95	0,95

Детали, определяющие долговечность конусных дробилок

Сборочная единица	Деталь
<i>Дробилки крупного и среднего дробления</i> ККД-1500/180 и КРД-900/100	
Нижняя часть	Броня нижней части, броня ребра, привода, броня патрубка, опорные кольца эксцентрика
Средняя часть	Броня чаши
Траверса	Броня траверсы, детали верхнего подвеса, защитный колпак
Эксцентрик	Корпус, зубчатое колесо
Дробящий конус	Броня, кольца уплотнения, детали крепления брони, опорные втулки хвостовика конуса (дробилки ГРШ)
Приводной вал	Вкладыши, приводная шестерня, соединительные муфты, шкивы, текстурные ремни
Гидравлическая опора	Пест, гидроцилиндр, опорные шайбы
<i>Дробилки среднего и мелкого дробления</i> КСД-2200, КМД-2200	
Нижняя часть	Втулка цилиндрическая, броня ребра и привода, плоские подпятники
Приводной вал	Втулки, шестерни коническая, соединительная муфта
Эксцентрик	Втулка коническая, зубчатое колесо
Опорная чаша	Подпятник сферический
Дробящий конус	Броня, тарель распределительная
Регулирующее кольцо	Броня, футеровка верхняя

В настоящее время на горных предприятиях межремонтные сроки определяются в машино-часах (например, на рудных предприятиях Минчермета СССР) или объемных показателях.

В угольной промышленности нормативно-исследовательской станцией комбината «Челябинскуголь» совместно с НИИОГР разработаны объемные нормативы для одноковшовых экскаваторов с учетом крепости пород и места работы машин (табл. 19). Эти нормативы более объективно учитывают условия эксплуатации машин.

В последние годы ИГД МЧМ СССР предложены для карьерных экскаваторов нормативы с учетом климатической зоны и категории пород по трудности экскавации (табл. 20).

Продолжительность ремонтного цикла буровых станков (табл. 21) на горных предприятиях не всегда достаточно обоснована. Так, на НКГОКе и Норильском комбинате ремонтный цикл буровых станков БС-1 равен двум годам, в Бакальском РУ — четырем, хотя горнотехнические и климатические условия на последнем тяжелее, чем на НКГОКе.

Периодичность ремонтов экскаваторов (тыс. м³) [47]

Таблица 19

Экскаватор	Категория породы											
	I и II (отвал)				III				IV (вскрыша)			
	ТО	Т	Т _п	К	ТО	Т	Т _п	К	ТО	Т	Т _п	К
ЭКГ-4,6	310	1250	2500	10000	220	890	1750	7200	170	680	1370	5500
ЭКГ-8И	560	2250	4500	18000	400	1600	3200	13000	300	1200	2400	10000
ЭШ-10/60	375	1500	3000	12000	270	1100	2200	88000	210	850	1700	6800
ЭШ-15/90А	800	3200	6400	25600	570	2300	4600	18400	—	—	—	—

Примечание. ТО — техническое обслуживание; Т, Т_п — текущие ремонты; К — капитальный ремонт.

Периодичность ремонтов карьерных экскаваторов, млн. т [16]

Таблица 20

Климатическая зона	Категория пород по трудности экскавации	Экскаватор			
		ЭКГ-4	ЭКГ-4,6	ЭКГ-8	ЭКГ-8И
А	I	23,0	26,0	42,7	44,5
	II	21,3	24,0	39,6	41,0
	III	19,7	22,3	36,6	38,0
	IV	18,5	21,0	34,3	35,7
	V	17,7	20,0	32,8	34,1
Б	I	19,5	22,4	36,2	37,6
	II	18,4	20,8	34,1	35,5
	III	17,0	19,2	31,5	32,8
	IV	16,0	18,1	29,6	30,9
	V	15,2	17,2	28,2	29,3
В	I	16,9	19,1	29,5	32,4
	II	15,6	17,7	29,0	30,1
	III	14,5	16,4	27,0	28,0
	V	13,6	15,4	25,3	26,3

Примечание. Климатические зоны приняты по Н. Г. Домбровскому; категории по трудности экскавации — по ЕНБ и Р.

Важным элементом технического обслуживания, существенно влияющим на долговечность деталей, узлов, является рациональная смазка. Однако большая номенклатура сортов смазочных материалов, используемых в горной промышленности, затрудняет снабжение, и в связи с этим нередко необоснованные замены одних сортов смазки другими. Это приводит к снижению долговечности не только отдельных деталей, но и целых машин. Важную роль в повышении долговечности машин играют безразборные

Продолжительность ремонтного цикла буровых станков

Таблица 21

Источник информации	Тип буровых станков					
	БН-2		БС-1		БСН-1	
	лет	тыс. ч	лет	тыс. ч	лет	тыс. ч
Нормативы	—	—	—	—	—	9,6
Главруда:	—	—	—	—	—	—
Коршуновский ГОК	—	—	—	9,6	—	9,6
Качканарский ГОК	—	—	—	9,6	—	9,6
НКГОК	—	—	2	—	—	—
Атасуйское РУ	—	—	—	—	—	—
Тургорское РУ	—	—	—	—	4	—
ЮГОК	—	—	—	—	—	—
Бакальское РУ	4	—	4	—	—	—
Михайловский ГОК	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 21

Источник информации	Тип буровых станков					
	2СБШ-200		СБШ-250		СБШ-320	
	лет	тыс. ч	лет	тыс. ч	лет	тыс. ч
Нормативы	—	9,6	—	9,6	—	9,6
Главруда:	—	—	—	—	—	—
Коршуновский ГОК	—	9,6	—	9,6	—	—
Качканарский ГОК	—	9,6	—	9,6	—	—
НКГОК	—	—	3	—	—	—
Атасуйское РУ	3	—	3	—	—	—
Тургорское РУ	4	—	4	—	—	—
ЮГОК	—	—	4	—	5	—
Бакальское РУ	6	—	—	—	—	—
Михайловский ГОК	—	9,6	—	9,6	—	—

методы контроля их технического состояния. Техническая диагностика в процессе эксплуатации машин позволяет определить их техническое состояние, по которому прогнозируют оптимальный межремонтный период или устанавливают остаточный технический ресурс.

Повышение долговечности деталей горных машин может быть достигнуто следующими способами: ручной электродуговой наплавкой, электродуговой наплавкой под слоем флюса, электродуговой наплавкой в среде защитных газов, вибродуговой наплавкой, газовой наплавкой, электрошлаковой наплавкой, плазменной наплавкой, металлзацией напылением, пластическим деформированием поверхностей (дробеструйная обра-

ботка, обкатывание шариками или роликами, чеканка и др.), химико-термической обработкой (цементация, азотирование, цианирование, алитирование, борирование и др.), поверхностной закалкой (нагрев ТВЧ, газовым пламенем), нанесением на рабочие поверхности покрытий химическими способами (никелирование, хромирование, покрытие кобальтом и др.).

Рекомендации по использованию этих способов приведены в соответствующих разделах работы. Чаще других применяют ручную, полуавтоматическую и автоматическую электродугу, вую наплавку, газопламенную наплавку, металлизацию напылением и т. д. Объем сварочных и наплавочных работ достигает 70% общего объема работ по восстановлению деталей. Стоимость восстановления деталей горных машин обычно составляет 30—50% стоимости новой детали, а срок их службы отличается незначительно.

3.4. Экономическая эффективность повышения долговечности деталей горных машин

Повышение долговечности горных машин и оборудования является экономической задачей, решение которой должно проводиться комплексно с учетом экономики завода-изготовителя машины, экономики народного хозяйства в целом и экономики предприятия-потребителя.

Завод-изготовитель при производстве более долговечных машин увеличивает затраты на конструктивно-технологическую отработку новых моделей. Затраты повышаются при введении в машину новых конструктивных элементов, использовании высококачественных материалов, совершенствовании технологических процессов, введении упрочняющей обработки, повышении точности изготовления деталей и сборки машин и при ускоренных испытаниях. Экономия при этом может быть получена от снижения брака и внутризаводских потерь.

В масштабах народного хозяйства повышение долговечности машин позволяет увеличить эффективность использования материальных ресурсов, производственных мощностей машиностроительных предприятий, рабочей силы при производстве и эксплуатации машин, а также уменьшить капиталовложения в новое строительство и т. д.

Предприятиям-потребителям повышение долговечности машин позволяет улучшить эффективность использования парка, сократить число машин вследствие увеличения сроков их службы и ресурса работы, уменьшить число резервных машин, сократить простои машин в технических обслуживаниях и ремонтах и затраты на их проведение, снизить трудоемкость ремонтов, уменьшить расход запасных частей и т. д.

Недостаточная надежность горных машин вынуждает предприятия иметь дополнительное оборудование. Так, резерв буровых станков может составлять до 15% имеющегося их парка, угольных комбайнов до 18%, ленточных конвейеров 8% и т. д.

Как правило, затраты на повышение долговечности горных машин окупаются за счет экономии при их эксплуатации [6].

Экономический эффект (в р.) от повышения долговечности машин определяют по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_k + \mathcal{E}_s. \quad (3.7)$$

Здесь $\mathcal{E}_k$ — экономический эффект от повышения долговечности машин конструктивно-технологическими методами; $\mathcal{E}_s$ — экономический эффект от повышения долговечности машин эксплуатационными методами [6]

$$\mathcal{E}_s = Q \left\{ \Delta I_p + \frac{H (K'_{T.н} - K_{T.н})}{K_{T.н}} + \right. \\ \left. + (\beta + E_n) \left[\frac{G_m (K'_{T.н} - K_{T.н})}{K_{T.н}} - G \right] \right\}, \quad (3.8)$$

где Q — среднегодовая производительность машины, м³ (т); ΔI_p — снижение удельных затрат на плановые и неплановые ремонты, р/м³ (р/т); H — удельные условно-постоянные расходы на мероприятия, повышающие долговечность на единицу продукции, р.; $K'_{T.н}$ и $K_{T.н}$ — коэффициенты технического использования соответственно до и после внедрения мероприятий, повышающих долговечность; β — амортизационные отчисления, %; E_n — нормативный коэффициент эффективности; G_m — стоимость машины, р.; G — затраты на мероприятия, повышающие долговечность, р.

Экономический эффект от увеличения срока службы деталей в результате повышения их долговечности можно определить по формуле [34]

$$\mathcal{E} = \frac{T(T_2 C_1 - T_1 C_2) - T_1 C(T - T_2) + T_1 T_2 (C_2 - C_1)}{T_1 T_2}, \quad (3.9)$$

где T — долговечность машины; T_1 и T_2 — долговечность детали соответственно до и после повышения ее свойств; C_1 и C_2 — стоимость детали соответственно до и после повышения ее свойств; C — стоимость монтажных и демонтажных работ с учетом потерь от простоя машины в процессе эксплуатации.

Экономическая целесообразность восстановления и повышения долговечности деталей горных машин вытекает прежде всего из того, что у многих быстроизнашивающихся деталей большой массы в работе участвует только небольшой слой ме-

талла, восстановить который можно во много раз быстрее и дешевле, чем изготовить новую деталь. Так, при восстановлении наплавкой поверхностей регулирующего кольца дробилки КСД-2200 массой 7500 кг расходуется только около 60 кг металла, что составляет 0,8% массы детали.

При выборе способа восстановления, обеспечивающего необходимую долговечность деталей, учитывают их конструктивно-технологические особенности (форму, размеры, материал, термообработку, твердость, шероховатость и точность обработки поверхностей, характер нагрузки и др.), условия их работы, износ, долговечность и стоимость. Для оценки выбранного способа восстановления В. В. Щадричев рекомендует пользоваться технологическим, экономическим и технико-экономическими критериями [54].

Технологический критерий характеризует возможность применения одного или нескольких способов восстановления и позволяет определить перечень деталей, подлежащих восстановлению.

Экономический критерий оценивает себестоимость восстановления деталей

$$C = C_{\text{п}} + C_{\text{в}} + C_{\text{м}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{ам}} + H_{\text{н.р}}, \quad (3.10)$$

где $C_{\text{п}}$ — стоимость подготовки поверхности детали к восстановлению, р.; $C_{\text{в}}$ — стоимость восстановления деталей, р.; $C_{\text{м}}$ — стоимость обработки после восстановления, р.; $C_{\text{эл}}$ — стоимость энергии, затрачиваемой на восстановление детали, р.; $C_{\text{ам}}$ — сумма амортизационных отчислений, р.; $H_{\text{н.р}}$ — сумма накладных расходов, р.

Технико-экономический критерий дает окончательное решение при выборе способа восстановления и связывает его себестоимость с коэффициентом долговечности:

$$C_{\text{в}} \leq KC_{\text{н}}, \quad (3.11)$$

где $C_{\text{в}}$ — стоимость новой детали.

В табл. 22 приведены примерные коэффициенты долговечности, получаемые при различных методах восстановления [29]. Они зависят от прочности сцепления покрытий с основным металлом, износостойкости и усталостной прочности. Для деталей горных машин в большинстве случаев определяющей характеристикой долговечности является износостойкость.

Стоимость восстановления деталей наплавкой определяют по формуле

$$C_{\text{в}} = C_{\text{св}} + M = ET_{\text{шт}}K + fGN, \quad (3.12)$$

где $C_{\text{св}} = ET_{\text{шт}}K$ — себестоимость наплавки; $M = fGN$ — стоимость наплавочных материалов; E — тарифная часовая ставка сварщика; $T_{\text{шт}}$ — штучное время на наплавку детали; $K = 1,08$ — коэффициент учета основного и дополнительного фонда зар

Таблица 22

Примерные коэффициенты долговечности деталей при восстановлении различными способами

Деталь, сопряжение	Материал сопряженных деталей	Коэффициент долговечности						Хромирование	Железные
		Ручная электро-дуговая наплавка	Наплавка под слоем флюса	Наплавка в среде углекислого газа	Выбродуговая наплавка	Восстановление механической обработкой	Восстановление		
Вал — подшипник при статической нагрузке	Баббит Бронза	—	0,8—1,1 0,85—1,0	0,85—0,90 0,80—0,85	0,9—1,0 0,9—1,0	0,95—1,0 0,90—1,0	1,5—1,8 1,1—1,3	—	1,0—1,2 1,1—1,2
Вал — подшипник скольжения при знакопеременной нагрузке	Баббит Бронза	—	0,75—0,8 0,75—0,8	0,80 —	0,7—0,8 0,75—0,8	0,90—1,0 0,85—1,1	1,1—1,25 1,0—1,1	—	0,95—1,0 0,8—0,95
Валы и оси — бронзовые втулки	Бронза	0,7—0,75	0,8—0,9	0,75—0,9	0,90—1,0	0,90—1,2	1,2—1,3	—	1,1—1,2
Цилиндрический стержень с возвратно-поступательным движением — направляющие	Серый чугун	—	—	—	—	0,93—1,0	2,5—3,0	—	1,5—2,0
Фиксированные стержни — втулки с вращательным или возвратно-вращательным перемещением	Чугун Бронза	—	—	—	—	—	1,5—1,8 1,1—1,3	—	1,0—1,2 1,1—1,2
Цилиндрические поверхности деталей, внутреннее кольцо подшипников качения по передаче с гарантированным натягом по ходовой посадке, по подвижной посадке	Сталь шарикоподшипника	0,9	0,95—1,0	0,8—0,95	0,8—1,0	0,9—0,95	1,5—1,8	—	0,8—1,1
Шлицевые поверхности	Сталь легированная	0,9	0,95—1,0	0,8—0,95	0,8—1,0	0,9—0,95	1,5—1,8	—	0,8—1,1
Наружные резьбы на валах	Сталь углеродистая	0,8—0,9	0,8—1,0	0,85—1,0	—	—	—	—	—

ботной платы; f — коэффициент, учитывающий потери металла при наплавке; G — масса наплавленного металла; N — стоимость 1 кг наплавленного металла.

Стоимость восстановления деталей способом ремонтных работ определяют по формуле

$$C_{\text{в}} = l_1 T_{\text{шт}} K_1, \quad (3.13)$$

где l_1 — тарифная часовая ставка токаря; $T_{\text{шт}}$ — штучное время на обработку детали; K_1 — коэффициент, учитывающий стоимость обработки.

По данным З. М. Меламеда, стоимость восстановленных деталей на угольных предприятиях составляет 15—30% их первоначальной стоимости.

Коэффициент сравнительной себестоимости 1 см² поверхности толщиной 0,1 мм при упрочении и восстановлении деталей различными способами равен: при ручной электродуговой наплавке 1,0; при механизированной наплавке под слоем флюса 0,6—0,8; при вибродуговой наплавке 0,8—0,82; при электролитическом хромировании 1,43; при электролитическом оставлении 0,7—0,8; при борировании 1,2; при металлизации напылением 0,85.

Долговечность горных машин зависит также от качества усатанавливаемых при ремонте деталей. Долговечность деталей, изготовляемых на машиностроительных предприятиях, в 1,8—2,6 раза выше долговечности деталей, изготовляемых в механических мастерских карьера или рудника [16].

Увеличение количества и мощности оборудования на горных предприятиях, их недостаточная надежность приводят к тому, что темпы роста объемов ремонтных работ значительно опережают темпы роста добычи полезных ископаемых. Так, за последние десять лет объем производства товарной железной руды по МЧМ СССР вырос в 1,7 раза, объем ремонтных работ в 2,7 раза, численность ремонтного персонала за это же время увеличилась в 2,36 раза. В настоящее время численность ремонтных рабочих в общем штате трудящихся угольных карьеров составляет 18%, рудных 28% и затраты на ремонт составляют 6—20 к/м³.

Трудоемкость ремонта горных машин из-за сравнительно низкой их ремонтпригодности довольно высока. Так, трудоемкость ремонтов карьерных экскаваторов достигает 25—40% общей трудоемкости вспомогательных процессов на карьере.

Глава 4

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

4.1. Классификация видов разрушения сопряженных деталей

Изменение технического состояния машин и оборудования в большинстве случаев связано с разрушением материала деталей при их взаимодействии с твердыми телами (горными породами), жидкими и газообразными средами. При этом наблюдаются несколько основных видов разрушений материала деталей: изнашивание, деформация и изломы; эрозионно-кавитационные повреждения; коррозионные повреждения; коррозионно-механические повреждения [26]. В табл. 23 приведены примеры разрушения деталей горных машин.

В соответствии с ГОСТ 16429—70 различают три группы видов изнашивания: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое. В горных машинах наиболее часто наблюдается механическое изнашивание. Разновидностями механического изнашивания являются: абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное, усталостное и кавитационное.

Абразивное изнашивание происходит в результате режущего или царапающего действия твердых тел или частиц, которые могут попадать на поверхности трения извне или находиться на поверхностях сопрягаемых деталей. Часто абразивные частицы имеют минеральное происхождение (песок, пыль и др.). Гидроабразивное изнашивание происходит при воздействии на поверхность деталей твердых тел или частиц, перемещаемых потоком жидкости, а газоабразивное изнашивание — потоком газа. Эрозионное изнашивание характерно для деталей, поверхности которых подвергаются воздействию потока жидкости или газа, а кавитационное — при большой скорости движения твердых тел в потоке жидкости. Усталостное изнашивание появляется при повторном деформировании микрообъемов материала, в результате чего возникают трещины и отделяются частицы металла.

Молекулярно-механическое изнашивание возникает в результате одновременного действия механических и молекулярных сил. Под действием молекулярных сил при скользящем происходит схватывание (прилипание) частиц металла одной поверхности с частицами другой. При отсутствии смазки, небольших скоростях и удельных нагрузках, превышающих предел текучести металла, в местах контакта происходит износ

Вид разрушения	Характер повреждения	Разрушаемые детали машин
Абразивное изнашивание	Интенсивное изменение геометрических форм и размеров, появление рисок, задигов	Зубья ковшей, режущие кромки рабочих органов, зубчатые передачи, подшипники, оси, валы, шипники, осп, валь, тали гусениц, брони драбелок, решетки, шнеки и др.
Гидроабразивное изнашивание	То же	Щелевые втулки уплотнений, крышки и корпуса углесосов, трубопроводы и пульповоды, насосы гидромониторных смесительных вилки шнеков, центрифуг
Усталостное изнашивание	Появление на поверхностях микро- и макроскопических трещин, углублений, впадин	Беговые дорожки подшипников качения, зубчатых колес и др.
Изнашивание при заедании	Адгезионное схватывание частиц металла и вырывание их из поверхностей	Гильзы, кольца, поршни, подшипники скольжения, зубья зубчатых колес и др.
Окислительное изнашивание	Образование и развитие микротрещин в защитной пленке, ее разрушение	Шейки коленчатых валов, поршни, цилиндры и др.
Изнашивание при фреттинг-коррозии	Появление на границах контакта пятен, неглубоких полос	Установочные поверхности зубчатых колес, муфт, подшипников качения; болтовые и заклепочные соединения
Хрупкий излом	Разрушение деталей без значительных макропластических деформаций	Болты, пальцы, звенья цепей, зубья зубчатых колес, сварные и чугунные детали
Вязкий излом	Разрушение деталей со значительными макропластическими деформациями	Звенья тяговых цепей, напряженные болты, несущие элементы стрелочных ферм и других металлоконструкций
Усталостный излом	Разрушение детали или появление трещины	Болты, оси, валы и другие детали, находящиеся под действием повторяющихся нагрузок
Остаточная деформация	Изгиб, удлинение	Рельсы, подшипники скольжения, звенья тяговых цепей
Контактные усталостные повреждения	Появление на рабочих поверхностях осповидных раковин, ухудшение качества поверхности	Подшипники качения, зубчатые колеса, гнезда и клапаны насосов, рельсы, бандажи колесных пар и др.

Вид разрушения	Характер повреждения	Разрушаемые детали машин
Жидкостная эрозия	Появление полос, пятен, раковин, вымоин, пустот	Рабочие поверхности цилиндров, стоек и гидродомкратов, клапанов, гильз и золотников, блоков управления, трубопроводов и др.
Атмосферная коррозия	Образование окисной пленки и очагов точечной коррозии (язв)	Кузова кабин, не имеющие стойких покрытий
Коррозионная усталость	Появление микроскопических питтингов, микротрещины, излом	Стальные канаты, рессо-ры, детали насосов и другие детали, работающие в коррозионных средах со знакопеременными нагрузками

схватыванием I рода (заедание) (рис. 7). При больших скоростях скольжения, значительных удельных нагрузках, недостаточной смазке и интенсивном повышении температуры в трущихся поверхностях происходит износ схватыванием II рода. Для него характерны большие задиры, налипание и намазыва-



Рис. 7. Заседание рабочих поверхностей:
а — пальца; б — зуба шестерни

ние металла, глубинное вырывание частиц, приводящие к разрушению деталей и часто к их поломкам.

Коррозионно-механическое изнашивание возникает при трении поверхностей деталей в присутствии агрессивной среды: воды, влажного воздуха, агрессивных газов. Его разновидностями являются окислительное изнашивание и изнашивание при фреттинг-коррозии.

При окислительном изнашивании на поверхностях трения происходит образование коррозионных пленок и их разрушение при внешнем механическом воздействии. Изнашивание при фреттинг-коррозии присуще соприкасающимся телам, имеющим малые колебательные перемещения в условиях динамической нагрузки.

Изломы в зависимости от свойства материала делятся на хрупкие и вязкие, в зависимости от характера нагружения — на статические и усталостные. Изломы происходят при растяжении, сжатии, изгибе, кручении, а также при сложном напряженном состоянии материала.

Хрупкий излом происходит чаще всего при отсутствии макропластических деформаций в результате мгновенного приложения нагрузки, наличия концентраторов напряжений (рис. 8). В плоскости излома наблюдается кристаллическое строение веерообразно расходящиеся лучи от очага разрушения. Вязкий излом происходит при незначительных макропластических деформациях в результате значительного увеличения статической нагрузки. В плоскости излома при этом видны следы пластической деформации. Из-за неравномерного развития пластических деформаций разрушение таких деталей, как болты, может быть замедленным. Процесс разрушения ускоряется при низком качестве термической обработки и наличии концентратора напряжения.

В горных машинах чаще других происходят усталостные изломы, которые появляются при напряжениях ниже предела текучести (рис. 9). Усталостные трещины возникают в местах концентрации напряжений и под действием переменной нагрузки постепенно развиваются в глубь детали. Излом носит хрупкий характер. Усталостному разрушению подвергаются зубчатые колеса, валы, оси и другие детали горных машин. В некоторых случаях действие переменных контактных нагрузок приводит не к полному разрушению деталей, а только вызывает остаточную деформацию.

Главной причиной возникновения остаточной деформации является пониженное сопротивление материала действию контактных напряжений, возникающих в результате больших динамических нагрузок, низкий предел прочности и др. У горных машин это явление наблюдается на круглозвенных цепях выемочных машин и конвейеров, где происходит вытяжка цепей в процессе эксплуатации (рис. 10). Это приводит к нарушению

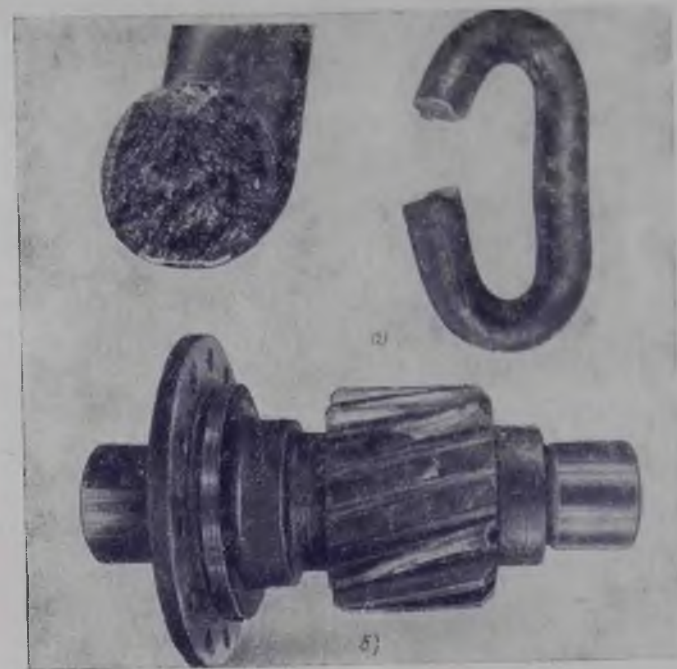


Рис. 8. Хрупкий излом:
а — звена круглозвенной цепи; б — болт-шестерни



Рис. 9. Усталостный излом:
а — звена круглозвенной цепи; б — коромысла газораспределительного механизма



Рис. 10. Деформация и усталостное повреждение звена цепи:
а — новое звено; б — разрушенное звено с остаточной деформацией; в — звено со следами контактных усталостных повреждений

режима работы цепи и преждевременному выходу из строя цепей и звездочек.

Контактная усталость металла проявляется в виде усталостного выкрашивания (питтинга) поверхностей деталей при трении качения или качения со скольжением (рис. 11). Усталостные трещины появляются на поверхности деталей в результате дефектов микроструктуры металла и действия многоциклических контактных нагрузок. Для контактной усталости характерно циклическое и прогрессирующее выкрашивание. Химические свойства и способ смазки поверхностей играют существенную роль в развитии процесса контактной усталости. Так, предел уст



Рис. 11. Усталостное выкрашивание поверхности зубьев шестерни редуктора роторного экскаватора

лостного выкрашивания повышается при уменьшении смазки. Усталостное выкрашивание наблюдается на поверхностях зубьев зубчатых колес, на рельсах, в бандажах, беговых дорожках подшипников качения.

Эрозионно-кавитационные повреждения деталей наблюдаются у деталей, подвергаемых действию потоков жидкости или газа, имеющих большую относительную скорость. Интенсивность процесса разрушения зависит от температуры и скорости потока, а также наличия в нем минеральных частиц. К эрозионным повреждениям относятся жидкостная и газовая эрозия. Газовой эрозии подвергаются детали горелок, лопасти газотурбинных установок, детали пневмоприводов и компрессоров. В результате износа на поверхностях деталей образуются вдоль газового потока риски. Жидкостная эрозия мало чем отличается от газовой. При этом характер разрушения поверхности под действием потока жидкости имеет вид полос, пятен, раковин, вымывов и т. д. Жидкостной эрозии подвержены клапаны и другие детали силового гидрооборудования, детали насосов.

Кавитационное разрушение металла происходит в тех случаях, когда нарушается сплошность потока жидкости и образуются пустоты, заполненные воздухом или паром. Закрываясь, они создают гидравлический удар о поверхность, в результате чего образуются очаги разрушения металла в виде питтингов. Кавитационному разрушению подвергаются рабочие колеса насосов, пульповоды и др.

Коррозионные повреждения деталей машин происходят в результате химического или электрохимического воздействия окружающей среды. Они подразделяются на атмосферную, газовую и коррозию в воде или электролитах. При коррозии металл превращается в окислы.

При атмосферной коррозии детали машин находятся под действием атмосферного воздуха и содержащейся в нем влаги. Частицы влаги на поверхностях образуют микрогальванические элементы, которые становятся источником возникновения пленок окислов железа, отделяющихся в виде пленок и точечных повреждений поверхностей. Атмосферной коррозии подвержены многие детали экскаваторов, автосамосвалов, электровозов, бульдозеров, вагонов. Часто атмосферная коррозия интенсифицируется при плохом уходе за оборудованием, низком качестве защитных покрытий. Так, в гидромеханизированных крепях из-за небольшого срока службы защитных хромовых покрытий теряют герметичность домкраты и стойки, где быстро изнашиваются уплотнения при работе с поверхностями, пораженными коррозией.

Детали машин, работающие в таких средах, как газ, пар и горячий воздух, подвергаются действию газовой коррозии, в результате чего на поверхности возникает плотный, хрупкий

слой окислов металла (окалина), иногда разрушение носит характер питтинга. Часто газовая коррозия наблюдается при взаимодействии кислорода воздуха с металлом. Содержание в сплавах легирующих элементов повышает сопротивление газовой коррозии из-за образующихся прочных окисных пленок, хорошо сопротивляющихся окислению. Интенсивность разрушения поверхности зависит от температуры и состава газа, защитного покрытия, а также металла, из которого изготовлена деталь.

Среди горных машин и оборудования газовой коррозии подвержены детали буровых станков огневого бурения, установок для сушки вагонов и очистки железнодорожных путей, клапаны двигателей внутреннего сгорания.

Коррозия металлов в электролите происходит при взаимодействии поверхностей деталей с водой, содержащей соли, кислоты, щелочи. Повреждения носят характер питтингов. Процесс коррозии металла может также происходить в таких средах, как бензин, керосин, которые плохо проводят электрический ток. Одной из причин выхода из строя редукторов забойных машин является коррозия подшипников качения и зубчатых передач из-за попадания воды в ванны редукторов. Коррозии в электролитах подвержены детали оборудования обогатительных фабрик, сосуды химической очистки, подводные части драг, землесосов, а также горношахтного оборудования при наличии агрессивных шахтных вод.

Коррозионно-механические повреждения деталей происходят при одновременном действии переменных нагрузок и коррозионно-активной среды. Они могут носить характер коррозионной усталости и коррозионного растрескивания.

При коррозионной усталости коррозионная среда интенсифицирует процесс зарождения и развития трещин в металле, вызывая расклинивающее действие продуктов коррозии. Характер трещин и скорость их роста в значительной степени зависят от уровня циклических напряжений, числа циклов нагружений и коррозионной активности среды. Трещины коррозионной усталости при большой частоте циклов и низкой агрессивности коррозионной среды подобны обычным усталостным трещинам. При малой частоте циклов и высокой агрессивности коррозионной среды трещины коррозионной усталости имеют клиновидную форму. Горные машины и оборудование работают в таких коррозионных средах, как кислотные и щелочные растворы, шахтная вода, сернистый газ, рудничный газ и др. Коррозионное растрескивание происходит при одновременном действии статических нагрузок и агрессивной коррозионной среды. При этом разрушение деталей может происходить внезапно без внешних видимых повреждений поверхности.

Наиболее часто детали горных машин подвергаются абразивному изнашиванию твердыми составляющими горных пород.

4.2. Абразивный износ деталей горных машин

Горные машины работают в условиях абразивной среды, что в значительной степени определяет долговечность их деталей. Интенсивному абразивному износу подвергаются рабочие органы выемочных машин и буровых станков, рабочие поверхности дробильно-размольного оборудования и т. д. Абразивный износ появляется в результате взаимодействия поверхностей деталей с твердыми горными породами, грунтами, с сыпучей массой (песок, уголь), с поверхностями сопряженных деталей, шаржированных абразивными частицами, со струей жидкости или газа, несущими абразивные частицы. Абразивный износ протекает при попадании абразивных частиц между сопряженными деталями, а также в результате царапания сопряженных поверхностей выкрошившимися частицами металла или окислов и т. д.

Вопросам абразивного износа деталей машин в настоящее время посвящено много работ. Однако единой теории, объясняющей происходящие при этом процессы, пока нет. Не разработана также единая классификация признаков изнашивания. Отсутствие единого мнения о механизме абразивного изнашивания объясняется влиянием на процесс износа большого числа трудноподдающихся учету переменных факторов. Из известных теорий абразивного изнашивания получили распространение теории, предложенные М. М. Хрушевым, И. В. Крагельским, Б. И. Костецким, Г. Д. Полосаткиным, В. Д. Кузнецовым, Г. М. Заморуевым и П. Н. Львовым. Наибольшее признание получила теория М. М. Хрушева, согласно которой абразивное изнашивание представляют как процесс интенсивного разрушения поверхностного слоя материала при трении скольжения, вызванного режущим или царапающим действием твердых частиц. Их твердость, форма, ориентация относительно поверхности трения, направление движения, а также твердость изнашиваемого материала оказывают различное влияние на процесс абразивного изнашивания. При этом появляются следующие виды разрушения поверхности материала: металл пластически деформируется и отделяется стружка; металл пластически деформируется; металл пластически не деформируется, но с поверхности происходит выкалывание крупных и мелких частиц. В процессе эксплуатации машин проявляются все виды указанных процессов абразивного изнашивания.

Выполненные в настоящее время работы, посвященные абразивному изнашиванию, показывают функциональную зависимость износостойкости деталей от физико-химических и структурных свойств их материала, характеристики внешней среды и абразива, условий работы. Твердость является одним из основных свойств, определяющих износостойкость деталей. Установлено, что для технически чистых металлов и сталей в отожж-

женном состоянии существует прямая зависимость между носительной износостойкостью ε и микротвердостью H [с]

$$\varepsilon = bH.$$

Для термически обработанной стали эта зависимость имеет вид

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H' - H),$$

где b и b' — коэффициенты пропорциональности; ε_0 — относительная износостойкость стали в отожженном состоянии; H — твердость стали в отожженном состоянии; H' — твердость стали в термически обработанном состоянии.

Эта зависимость показана на рис. 12. Износостойкость чистых металлов и отожженных сталей (кривая 1) с увеличением микротвердости увеличивается значительно быстрее износостойкости термически обработанных сталей (кривые 2—5). Разную относительную износостойкость имеют детали из сталей одинаковой твердостью, но полученной различными способами (термической обработкой, легированием и т. д.). В общем случае с увеличением твердости металлов и сплавов их износостойкость повышается. Большое влияние на повышение износостойкости оказывает структурное состояние металла и прочность межатомных связей, а также содержание углерода в термически обработанных и углеродистых нормализованных сталях.

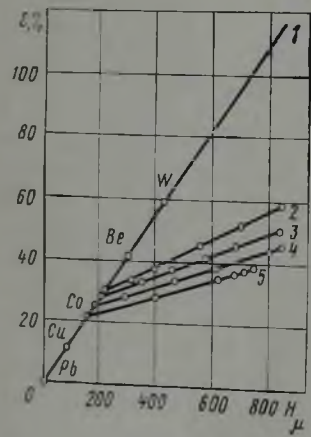


Рис. 12 Зависимость относительной износостойкости ε стали от микротвердости H при абразивном изнашивании (по М. М. Хрущеву и М. А. Бабичеву):

1 — чистые металлы и отожженные стали; 2 — стали У12; 3 — стали У12; 4 — стали У8; 5 — стали 40

Износостойкость металлов повышается с увеличением объема карбидных фаз и равномерным расположением карбидов. Содержание остаточного аустенита в сплавах, по данным ВНИИСТА, может быть равным 50%. Пластинчатое строение перлита повышает износостойкость углеродистых сталей. Износостойкость цементитных фаз повышает сопротивляемость изнашиванию. Наиболее износостойкой признается мартенситная структура. При абразивном изнашивании структура металлов оказывает меньшее влияние на износостойкость, чем твердость.

Использование высоколегированных сплавов для изготовления деталей, работающих в абразивной среде, значительно повышает их долговечность. Исследования, выполненные В. Г. Тимофеевым под руководством М. М. Хрущева, показали, что наибольшую износостойкость при абразивном износе обладает белый чугун.

Таблица 24

Износостойкость материалов при абразивном износе

Материал	Элементы микроструктуры			Твердость HB	Коэффициент относительной износостойкости
	Феррит	Перлит	Другие		
Белый чугун	—	80	Цементит 20	364	1,71
Закаленный магниевый чугун	—	—	Мартенсит 100	585	1,63
Закаленный магниевый чугун в литом состоянии	—	100	—	217	1,12
Ковкий чугун	—	95	Цементит 5	421	1,05
Модифицированный чугун СЧ40-60	3	97	—	242	1,05
Серый чугун СЧ21-40	5	95	—	194	0,95
Магниевый чугун с ферритной основой	100	—	—	156	0,75
Сталь 50	50	50	—	200	1,0
Графитизированная сталь	—	100	—	255	0,96

(табл. 24). Испытание производилось на машине Х4-Б, зернистость электрокорундового полотна составила 170.

Износостойкость материалов деталей не всегда повышается при наклепе. Так, зубчатые венцы на приводах ротора экскаватора ЭР7А, изготовленные из стали 110Г13Л, имеют твердость HB 300—450 после объемной закалки и в процессе работы подвергаются значительному наклепу. Однако, как показывает опыт эксплуатации, это не повышает их износостойкость [11]. Микротвердость структурных составляющих конструкционных материалов деталей горных машин дана в табл. 25.

Абразивные свойства грунтов характеризуются их способностью изнашивать работающие с ними в соприкосновении детали и оцениваются несколькими способами: по отношению объ-

Таблица 25

Микротвердость материалов

Материал	Микротвердость	Материал	Микротвердость
Аустенит (сталь 110Г13Л):		Карбид железа	800—1150
после наклепа	До 750	Карбид марганца	750—1000
после закалки	400—450	Карбид молибдена	1480
Перлит углеродистой стали	200—350	Карбид хрома	1570
Мартенсит углеродистой стали	700—1350	Карбид титана	2850
Феррит (сталь 20)	100—150	Карбид бора	2800—3500

ема изношенного образца к затраченной работе, по отношению потери массы эталонного образца за установленный промежуток времени к исходной массе, по радиоактивности при титровании и т. д. Для оценки грунтов могут быть использованы их характеристики и шкалы абразивности.

Твердость и размеры абразивных частиц являются существенным фактором в процессе изнашивания. По данным М. М. Хрушева и М. А. Бабичева, при $H_a \geq H_m$ (где H_a и H_m соответственно твердость абразива и металла) существует прямая зависимость между твердостью абразива и его изнашивающей способностью, которая нарушается при $H_a \approx 1,47 H_m$. С увеличением среднего размера зерна абразива износ повышается до определенного критического значения, а затем не изменяется. Для стали, например, это критическое значение соответствует размеру зерна примерно 100 мкм, а для цветных металлов — 150 мкм. С уменьшением разницы между твердостями абразивных частиц и металла снижается интенсивность износа. Микротвердость некоторых абразивных материалов составляет (кгс/мм²): известняк 130—140; полевой шпат 560; кварц 800—1200; гранит 300—800. Исследования Г. С. Солода показывают, что относительная абразивность углей различных месторождений колеблется в пределах от 1 до 27,4 в зависимости от содержания свободного кварца в угле. Исследования В. М. Гутенмана, М. М. Тененбаума показали, что разрушение поверхностного слоя деталей происходит даже при абразивах с невысокой твердостью [45]. Это подтверждается исследованиями взаимодействия деталей горных машин с углем, при котором наблюдается абразивный износ. Уголь без примесей минералов обладает низкой абразивной способностью по отношению к стальным деталям и его абразивные свойства возрастают прямо пропорционально содержанию в нем кремнезема. Оценку абразивности угля производят с учетом микротвердости минеральных включений, основными из которых являются кальций (микротвердость H 110), пирит (H 1000), кварц и его разновидности (H 900—1200), окислы металлов. Очевидно, для получения необходимой долговечности деталей горных машин микротвердость их поверхностных слоев должна быть не ниже микротвердости минеральных включений. Различное процентное содержание этих примесей в угольной массе обуславливает колебание ее абразивности в широких пределах.

По данным Р. Шеферди, абразивность угля и некоторых минералов равна (г/мин):

Уголь	1—2
Известняк	13—52
Глинистый сланец	19—46
Песчаник кварцевый	63
Кварцит	69

Повышение долговечности деталей при абразивном изнашивании может быть достигнуто при определенном соотношении твердости абразива и материала детали. При твердости абразива H_a больше твердости материала детали H_m интенсивность износа повышается. Критическое значение $K = H_m/H_a = 0,68 \dots 0,70$ [51]. До критического значения K увеличение износа материала прямо пропорционально твердости, при значении K больше критического — резко возрастает.

По данным С. И. Розенберга процесс изнашивания начинается только, когда размер абразивной частицы достигает 1 мкм.

Процесс абразивного изнашивания протекает более интенсивно в жидкой или газообразной среде. Агрессивные среды увеличивают интенсивность процесса изнашивания.

Результаты исследования показывают, что увеличение нагрузки приводит к пропорциональному увеличению абразивного износа [5]. При достижении некоторого критического значения нагрузки процесс износа замедляется и протекает по линейному закону. Эта закономерность очевидно будет изменяться при динамических режимах нагружения. Например, у опорных катков роторных экскаваторов, работающих в условиях абразивной среды и подвергаемых значительным динамическим нагрузкам от роторного колеса через раму и ходовую часть.

С увеличением износа режимы нагружения деталей ухудшаются. В табл. 26 приведены нормы износа деталей экскаватора ЭКГ-4,6, работающих в условиях абразивного износа.

Г. И. Киселевым исследовалось влияние скорости и температуры на абразивное изнашивание. Установлено, что для сталей увеличение скорости приводит сначала к увеличению износа, а затем — к снижению. С повышением температуры до 230—270°C наблюдается увеличение износа.

Износ зубьев ковшей экскаваторов сопровождается появлением микро- и макроцарапин, а также вырывов (рис. 13 и 14). Характер износа зубьев ковшей меняется в зависимости от типа грунта: на крупнокусковых породах — затупляется, а на грунтах с большой степенью измельчения — заостряется.

Таблица 26

Нормы износа деталей экскаватора ЭКГ-4,6

Деталь	Степень износа
Зубья ковша	40—60% рабочей высоты
Передняя стенка ковша	15—20% толщины
Предохранительный лист днища	60% толщины в передней части
Засов днища	70% рабочей высоты
Втулки коромысла ковша	Более 1,6—2,0%
Отверстия в звеньях гусениц	Более 12 мм
Износ пальцев гусениц	Более 2 мм

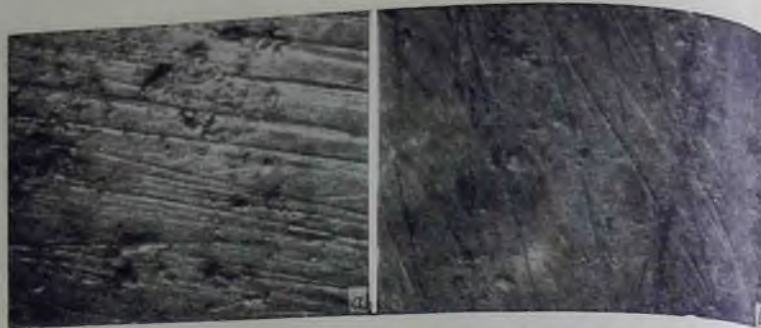


Рис. 13. Изношенная поверхность зуба ковша экскаватора ЗЭР-500-2
а — по передней грани; б — по задней грани (по Э. С. Крылову)

Исследование броней конусных дробилок КСД-2200, подвергаемых абразивному износу, показывает (табл. 27), что интенсивность изнашивания броней одного типа из стали 110Г13 меняется в зависимости от условий эксплуатации, а характер изнашивания — нет (рис. 15).

Большое влияние на скорость изнашивания деталей оказывает возможность проникновения абразивных частиц на соприкасаемые поверхности. Часто недостаточная надежность уплотнения приводит к попаданию в смазку пыли, что способствует повышению интенсивности износа. Так, в смазке забойных машин содержится от 2 до 10% механических примесей. Содержимое же в смазке только 1% угольной пыли повышает интенсивность износа деталей редуктора в 10 раз. По данным ИГД

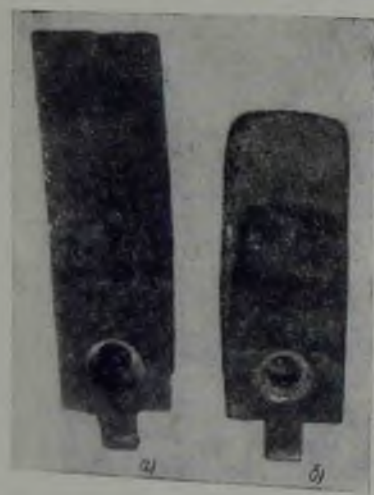


Рис. 14. Новый и предельно изношенный зубья ковша экскаватора ЗЭР-500-2

А. А. Скочинского, 30% деталей стерены врубных машин угольных комбайнов выходят из строя из-за абразивного износа рабочих поверхностей зуба. По данным Е. Е. Носкова, на шахтах Донбасса около 20% подшипников скатов вагонеток выходят из строя из-за абразивного износа около 45% из-за смешанного с окислением. Одним из методов снижения износа подшипников скатов является применение консистентной смазки 1-ЛЗ. Интенсивность абразивному износу (0,4–0,63 мкм/ч) подвергаются решетки скребковых конвейеров. Уменьшить износ реш

ков можно, установив в местах прохода цепи защитных полос из износостойчивого материала. Абразивный износ шарниров тяговых цепей скребковых конвейеров протекает с малой интенсивностью. Скорость абразивного изнашивания частей решетчатого става увеличивается с увеличением содержания кремнезема в горной массе и крупности угля.

В скребковых конвейерах и пластинчатых питателях ограниченный срок службы имеют тяговые цепи, где трущиеся пары валик—втулка, валик—пластина подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию. Износостойкость повышается в результате увеличения твердости их рабочих поверхностей. Ряд деталей на обогатительных фабриках: конуса и корпуса гидроциклонов, статоры и импеллеры флотационных машин, улитки и турбинки шламовых насосов и другие — выходят из строя в результате интенсивного гидроабразивного износа.

Большая работа по изучению вопросов износа ножей и зубьев экскаваторов выполнена под руководством Ю. А. Ветрова [9, 10], который исследовал зубья ковшей более чем на 40 экскаваторах различных марок. На рис. 16 приведены экспериментальные зависимости износа I зубьев от количества перерабатываемой песчано-глинистой породы M экскаватором

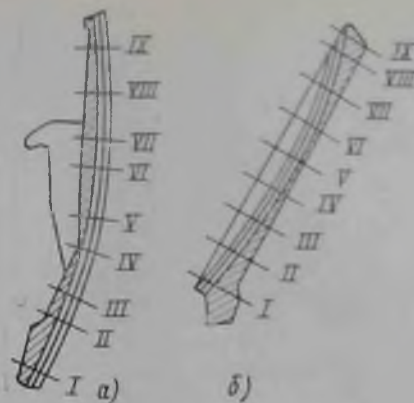


Рис. 15. Профили износа броней конусных дробилок КСД-2200 (а) и регулирующего кольца (б)

Таблица 27

Износ брони конусной дробилки КСД-2200, мм [41]

Сечение брони (рис. 15)	Броня регулирующего кольца			Броня конуса		
	Оленегор- ский ГОК	НКГОК	Михайлов- ский ГОК	Оленегор- ский ГОК	НКГОК	Михайлов- ский ГОК
I	19	29	35,5	24,5	45	57
II	26	42	49	32,5	52,5	63
III	28	45,5	52,5	38	57	66
IV	30	47,5	54,5	39	57	66
V	29,5	46,5	53,5	36	54	60
VI	24	40	46	30	46	57
VII	22	33	39	18	36	46
VIII	13	22	27	12	24	33
IX	6	12	16,5	6	12	24

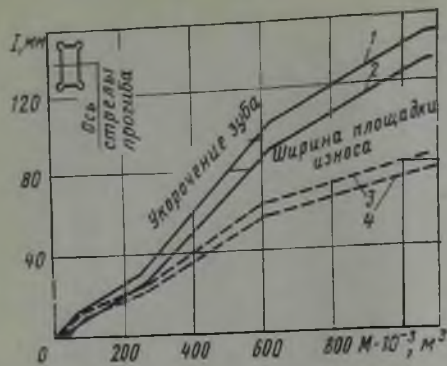


Рис. 16. Зависимость износа зубьев ковша экскаватора ЭРГ-1600 от количества разрабатываемого грунта:
1, 2, 3, 4 — группы зубьев [11]

каватора производительностью 2100 м³/ч больше скорости износа зубьев передней стенки ковша. Это объясняется тем, что угловые зубья выполняют большую работу резания.

Износ зубьев вызывает значительное увеличение усилий прикладываемых к ковшу для отделения стружки породы при работе. Ю. А. Ветров считает, что для экскаваторов с емкостью ковша от 0,2 до 20 м³ при износе зубьев удельная сила резания возрастает на 60—100% по сравнению с новыми зубьями. В табл. 26 приведены некоторые данные по исследованию рабочих органов экскаваторов ЭКГ-4,6. При абразивном износе на рабочих органах горных машин наблюдается деформация поверхности в виде вырывов и царапин, а также их наклеп. На рабочих органах карьерных экскаваторов глубина макро-микроцарапин может быть от 10 до 5000 мкм [30]. Средняя площадь микро- и макровыворов составляет от 100 мкм² до 10 мм².

Наклеп как на поверхности, так и на глубине зависит от удельной нагрузки. Твердость поверхности зубьев экскаваторов может быть до HRC 40. Форма износа зубьев и характер деформации поверхности определяются типом разрабатываемого грунта.

Интенсивность износа рабочих органов может быть различной. В связи с этим сроки их службы изменяются в широких пределах. Так, ножи бульдозеров в зависимости от абразивности грунтов работают 30 сут. и более, а зубья роторных экскаваторов — до нескольких месяцев [36, 38].

В настоящее время ремонтные нормативы для целого ряда машин и оборудования учитывают свойства горных пород. Нормативы на ремонт для конусных дробилок учитывают крепость руды (табл. 28).

ЭРГ-1600. Износ можно считать практически пропорциональным переработанной порода. Учитывая пропорциональность износа суммарному пути резания, Ю. А. Ветров предложил формулу для расчета износа зубьев ковшей экскаваторов циклического действия по известному износу зубьев ковшей некоторого другого экскаватора. В результате исследования, выполненного В. К. Чудновским, установлено, что скорость износа угловых зубьев роторного экскаватора пропорциональна скорости износа зубьев ковша экскаватора.

* В числителе — периодичность ремонтов в сутках; в знаменателе — продолжительность ремонтов в часах.

** В числителе — периодичность в годах; в знаменателе — продолжительность в сутках.

В табл. 29 приведены характеристики предельного состояния деталей конусных дробилок, работающих в условиях абразивного износа.

Таблица 29
Характеристика предельного состояния износа деталей конусных дробилок

Детали	Характеристика предельного состояния деталей	Возможные последствия при достижении предельного состояния
Броня дробящего пространства (конуса и чаши), сталь 110Г13Л, твердость HB 180—220	Уменьшение первоначальной массы на 60—65% или уменьшение толщины брони в зоне дробления на 65—70%	Образование трещин и возможность появления внезапного отказа; увеличение крупности дробленого продукта сверх заданной, нарушение режима питания
Броня станины, траверсы загрузочного устройства, сталь 110Г13Л, твердость HB 180—220	Уменьшение первоначальной толщины на 70—75%	Разрушение брони и возможность износа базовых деталей дробилки
Кольца уплотнения дробящего конуса дробилок ККД и КРД, сталь 40, HRC 48—53	Износ колец до 1,2—1,5 мм, разрушение дюритового шланга	Проникновение пыли в масляные ванны и абразивный износ эксцентрика, зубчатых передач, вала конуса
Защитный колпак дробилок крупного дробления, сталь 35Л	Износ колпака на 65—70%	Попадание пыли и осколков руды в узел верхнего подвеса и разрушение узла

Гидроабразивный износ зависит от большого числа факторов, трудно поддающихся учету.

Значение гидроабразивного износа можно определить формуле

$$S = C\alpha N \frac{mv^2}{2} t,$$

где C — коэффициент, учитывающий свойства абразивных частиц исследуемого материала; α — коэффициент, показывающий, какая доля кинетической энергии переходит в работу износа; N — число абразивных частиц; m и v — масса и скорость абразивной частицы; t — продолжительность воздействия абразивных частиц.

Как показали исследования, существенное повышение долговечности деталей может быть достигнуто при покрытии их боковых поверхностей хромом. Долговечность деталей, работающих в условиях ударных нагрузок, может быть повышена нанесением на их поверхности эмалевых покрытий. Хорошие результаты дает применение для изготовления деталей гидродвигателей и флотационных машин высоколегированного чугуна ИЧХ17Н3ГЗ и сплава 300Х12М. Повышение износостойкости деталей углесосов, работающих в тяжелых условиях гидроабразивного износа, может быть достигнуто применением высокохромистого чугуна ИЧХ28Н2.

Большой расход и высокая стоимость трубопроводов при гидротранспортировании вынуждает искать средства уменьшения гидроабразивного износа их внутренних поверхностей. Одним из главных образцов, колен и стыков. Для уменьшения износа трубопроводов рекомендуют их изготавливать из легированных сталей, выполнять наплавки и производить покрытие рабочих поверхностей различными материалами, футеровать трубы базальтом, устанавливать вкладыши из легированных чугунов. Наплавка концов труб производится в настоящее время электродами Т-590, Т-620, которые, по данным С. П. Турчанинова, позволяют повысить срок их службы в 4—6 раз.

Вопросы повышения долговечности деталей и узлов, работающих в абразивной среде, рассмотрены в целом ряде работ. Несмотря на это, проблема повышения сроков службы деталей и особенно режущих органов остается актуальной.

4.3. Изнашивание типовых деталей и сопряжений горных машин и методы их измерения

Все детали горных машин и оборудования в зависимости от условий работы и вида изнашивания могут быть разбиты на пять групп.

Долговечность деталей первой группы обуславливается абразивным износом. В нее входят зубья и режущие кромки ковшей экскаваторов; корпуса комбайнов; основания крепи, перекрытия крепей; шнеки; бары, отвалы бульдозеров; траки, опорные ролики, оси, пальцы, втулки, звездочки ходовой части машин на гусеничном ходу; брони конусных дробилок и др.

Долговечность деталей второй группы определяется механическим износом поверхностей деталей. Это детали со шлицами и резьбами, зубчатые муфты, посадочные места под подшипники качения валов, станков, поверхности зубчатых передач и др.

Долговечность деталей третьей группы лимитируется молекулярно-механическим или коррозионно-механическим износом (это детали двигателей внутреннего сгорания автосамосвалов, бульдозеров, скреперов, устройства для термического разрушения горных пород и огневого бурения и др.).

Долговечность деталей четвертой группы зависит от усталостной прочности материала. Это подшипники качения, ресоры, пружины, шатуны, шатунные болты и др.

Долговечность деталей пятой группы обуславливается работой в условиях усталостного разрушения и одновременно подвергающихся механическому или химико-механическому изнашиванию. Это детали двигателей внутреннего сгорания (коленчатые валы, поршневые пальцы, вкладыши подшипников), тяжело нагруженные шестерни коробок передач и др.

Рассмотренная классификация не исключает переход деталей из одной группы в другую при изменении условий эксплуатации горных машин.

Согласно рекомендациям М. М. Хрущева износ можно измерять следующими методами: интегральным, суммарным, микрометражем, профилографированием и методом искусственных баз. Эти методы обеспечивают различную степень точности измерения износа, и, естественно, области их применения различны.

Интегральным методом износ детали или сопряжения определяют по изменению служебных свойств машины (например, производительности, мощности, качеству продукции и т. д.). При суммарном методе износ определяют по содержанию металла в масле, по интенсивности радиоактивного излучения среды, в которой происходит изнашивание, по изменению параметров шума или вибрации механизмов. Метод микрометража предусматривает измерение размеров деталей до и после изнашивания и позволяет по полученным данным судить об интенсивности износа. При методе профилографирования износ определяют совмещением снимаемых последовательно с изнашиваемых поверхностей профилограмм. Метод искусственных баз позволяет определять износ по измерению глубины лунки

Методы измерения износа деталей и сопряжений горных машин

Таблица 30

Деталь или сопряжение	Измеряемый и контролируемый размер	Приборы или оборудование для измерения износа	Предельное состояние
Подшипник качения	Радиальный зазор Осевой зазор	Приборы Р-123, Р-124, шупы Приборы А-121, А-122, А-123	Увеличение зазора в 3—4 раза по сравнению с нормальным Увеличение зазора до 0,3 мм для подшипников диаметром до 100 мм и до 0,4 мм для подшипников больших диаметров — Увеличение до 1—3% диаметра вала —
Подшипник скольжения	Наружный диаметр кольца Внутренний диаметр кольца Внутренний диаметр	Приборы Д-312, Д-313 Индикаторный нутромер Индикаторный нутромер	Увеличение номинального зазора в 2 раза (ответственные соединения) и в 3—4 раза (неответственные соединения) Увеличение зазора в 15—20 раз
Корпусные детали	Диаметр посадочных отверстий	Индикаторный нутромер	—
Сопряжение вал — втулка	Зазор между валом и втулкой	Шулы	—
Шлицевое соединение	Зазор между элементами соединения, элементы соединения	Индикаторный нутромер, штангенциркуль и другие измерительные инструменты	—
Цепь втулочно-роликотая	Суммарный износ цепи (увеличение шага цепи)	Линейка, штангенциркуль, клинья и др.	—
Звездочка цепной передачи	Толщина и высота зуба	Кромочный или тангенциальный зубомер, нормалемер, индикаторная скоба и др.	30% износа по начальной окружности для тихоходных передач и 3—10% для быстроходных
Зубчатое колесо	Толщина зуба	—	Износ до толщины 0,25 мм упорочного слоя
Фрикционный тормоз	Толщина фрикционных элементов	Штангенциркуль	Износ 3—6 мм толщины
Стальной канат	Состояние провололок, сердечника, прядей	—	Утрата равномерной свивки, обрыв прядей, обрыв на одном шаге свивки от 6 до 40 провололок

Исследование абразивного изнашивания

Таблица 31

Стенд	Характер контакта образца с абразивом	Форма образца	Вид абразива	Скорость движения образца
Шаровая мельница Выборостенд Барaban Центробежный стенд Крыльчатка Ротор	Изнашивание свободным абразивом	Шар Плоский	Ферросплавы Кварцевый песок Базальт, кварциты Кварцевый песок Кварцевая щебенка в воде Руда	22 об/мин 0,7—1,46 м/с 29—82 м/с 1,1 м/с 7,16 м/с
Гильза Буровой стенд Шпек Вращающаяся чаша	Изнашивание полужа закрепленным абразивом	Цилиндр Буровая колонка Резец Лезвие	Кварцевый песок Грунт в целлке Кварцевый песок и глина Гравий, глина, песок	0,29 м/с 120 об/мин 1,6 м/с 1,0 м/с
Шлифовальный круг Абразив — наждачная бумага Монолитный абразив	Изнашивание закрепленным абразивом	Цилиндр	Корундовый круг Бумага на диске Блок кварцита	0,4 м/с 0,16—0,67 м/с
Жернова Неподвижное кольцо Подвижная пластина Цилиндр — плунжер Втулка — палец	Изнашивание абразивной прослойкой	Плоский Цилиндр Втулка	Электрокорунд Кварцевый песок Электрокорунд в масле	175—330 об/мин 0,6 м/с 2,6 м/с 100, 126, 260 об/мин
Абразив в потоке газа Абразив в струе жидкости Свободнопадающий абразив Ротор — струя	Изнашивание струей абразива	Плоский Трансцендентный Плоский	Кварцевый песок Карбид кремния Чугунная дробь	5 м/с 20 м/с 3100 об/мин
Котер	Специальные методы	Плоский Цилиндр	Контртело (грунт 3 кг) Алмаз	45 уд./мин 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 м/с
Единый абразив	—	Плоский	Алмазная ленточка	1,0 м/с

на изнашиваемой поверхности. Разновидностью метода искусственных баз является метод негативных оттисков. Он заключается в том, что на поверхности детали делается лунка правильной геометрической формы. По мере изнашивания поверхности глубина лунки уменьшается, о чем свидетельствует разность высот оттисков пластического материала, заполняющего лунку до и после изнашивания (табл. 30).

Закономерности изнашивания устанавливают в результате опытно-статистических, эксплуатационных и стендовых испытаний. В табл. 31 приведены данные для исследования абразивного изнашивания материала деталей машин.

Глава 5

ТЕРМИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

5.1. Основные виды объемной термической обработки деталей

Одним из основных методов повышения долговечности деталей горных машин является правильный выбор и проведение термической обработки. Любой вид термической обработки описывают двумя параметрами: температурой нагрева и скоростью охлаждения.

В зависимости от температуры термическая обработка может быть полной (температура нагрева выше температуры верхнего превращения в твердом состоянии) или неполной (температура нагрева ниже температуры верхнего превращения в твердом состоянии, но выше температуры нижнего превращения в твердом состоянии) [15].

Температура нагрева для стали при полной термической обработке составляет $A_{c_2} + (30 \dots 50^\circ \text{C})$ и $A_{c_m} + (30 \dots 50^\circ \text{C})$, при неполной $A_{c_1} + (30 \dots 50^\circ \text{C})$ (рис. 17).

В зависимости от скорости охлаждения виды термической обработки могут быть следующие:

отжиг — скорость охлаждения $40\text{—}50^\circ \text{C/ч}$ с печью;

нормализация — скорость охлаждения $50\text{—}100^\circ \text{C/ч}$ на спокойном воздухе;

закалка — скорость охлаждения, препятствующая протеканию диффузионных процессов распада аустенита на ферритно-цементитную смесь (вода, масло, воздух и другие охлаждающие среды);

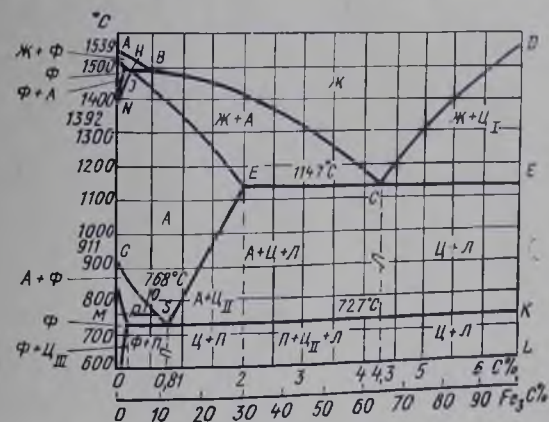


Рис. 17. Диаграмма состояния

Ориентировочные режимы термической обработки литья горных машин

Деталь	Сталь	Способ получения детали	Температура нагрева при отжиге, °С	Твердость НВ
Кожух, крышка, муфта, стакан, фланец, раструб и др.	20Л	Литье	880—900	1000
Корпус редуктора, рама машины, кронштейн, опора и др.	35Л		850—860	1400
Зубчатое колесо, лапа погрузочной машины, шкив и др.	45Л		850—870	1500

отпуск — охлаждение с произвольной скоростью (воздух, вода, масло).

Термическая обработка может быть простой или сложной, состоящей из многочисленных нагревов, прерывистого или ступенчатого нагрева, охлаждения в области отрицательных тем-



Рис. 18. Структура металла в литом состоянии

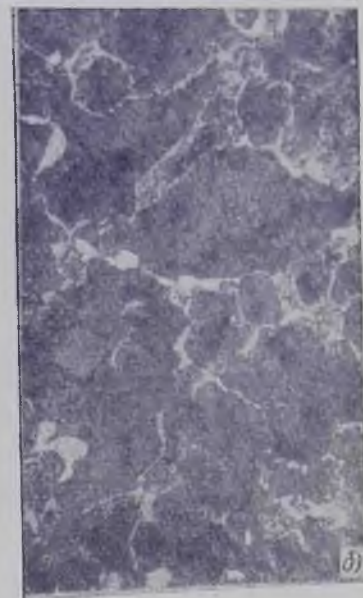
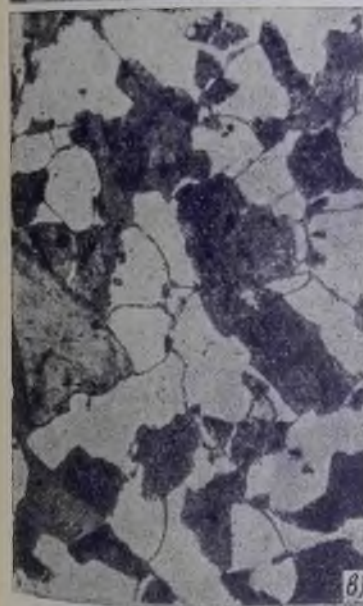


Рис. 19. Микроструктура стали с различным содержанием углерода, %:
а — 0,2; б — 0,45; в — 1,0



Рис. 20. Структура стали после литья

ператур и т. д. Такая термическая обработка может быть изображена в координатах температура — время.

Отжиг позволяет получить равновесную структуру с минимальными твердостью, прочностью и максимальной пластичностью. Отжиг применяют при предварительной термической обработке литья, поковок, штамповок и т. д. (табл. 32).

При литье структура и свойства материала по сечению неоднородны вследствие кристаллизации его в литейной форме (рис. 18).

Микроструктура отожженной углеродистой стали с различным содержанием углерода показана на рис. 19. Слитки этих сталей имеют ярко выраженную дендритную структуру (первичная кристаллизация), которая при последующей горячей пластической деформации дает волокнистое строение металла (рис. 20 и 21), в результате чего свойства вдоль и поперек волокна отличаются.

Нормализацию применяют для сокращения цикла термической обработки и улучшения механической обрабатываемости материала. При нормализации повышаются твердость и прочность и понижается по сравнению с отжигом пластичность в связи с изменением размера зерна. Это дает возможность по-

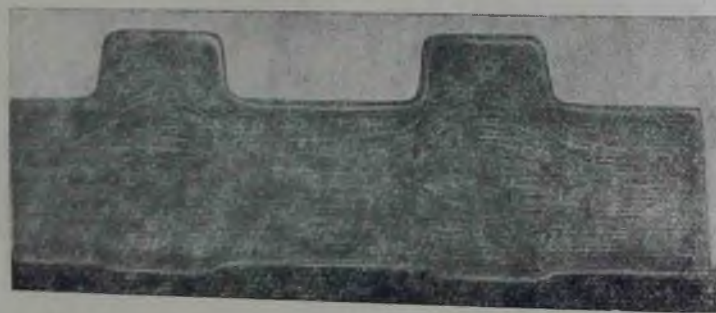


Рис. 21. Структура стали 30XНЗА после горячей пластической деформации

лучить ломкую, а не сдвижную стружку и уменьшить шероховатость поверхности. Режимы нормализации стали приведены в табл. 33.

Назначение отпуска закаленной стали: придание сталей детали требуемой структуры и свойств и снятие или ослабление внутренних закалочных напряжений.

Ориентировочные режимы нормализации для деталей горячих машин

Деталь	Сталь	Температура, С	Твердость, НВ	Примечание
			Диаметр отпечатка	
Зубчатое колесо, ролик, валик упор, палец, направляющая втулка, ось, рычаг, накладка	20	900—920	156	Предварительная термическая обработка перед цементацией
			4,8	
Ось, тяга, диск, крепежные детали, не требующие повышенной прочности	35	860—880	187	Окончательная термическая обработка
			4,4	
Зубчатое колесо, вал под подшипники качения, шлицевой валик, работающий при небольших скоростях и средних удельных нагрузках	45	840—860	170—217	Предварительная термическая обработка перед улучшением
			4,60—4,10	
Ось, тяга, крепежные детали, рештак	30Г	860—880	170	Окончательная термическая обработка
			1,60	
Пружина, шайба, пружинное кольцо для деталей повышенной прочности	65Г	810—830	250	Предварительная термическая обработка
			—	
Вал, зубчатое колесо, червяк, кулачковая муфта, муфта, втулка, валики, палец, работающий при больших скоростях, средних и высоких удельных нагрузках, при ударных нагрузках	18ХГТ	960—970	160—207	Предварительная термическая обработка перед цементацией
			4,72—4,20	
Вал, зубчатое колесо, червяк, вал шестерни для сильно нагруженных деталей с незначительными ударными нагрузками	30ХГТ	960—970	179—207	То же
			4,49—4,20	
Зубчатое колесо, вал шестерни, червяк, кулачковая муфта, валик, палец втулки с повышенной прочностью, работающей при ударных нагрузках	20ХГНР	800—890	179—197	>
			4,49—4,30	
Зубчатое колесо, вал оси, работающий при средних скоростях и удельных нагрузках	40Х	860—890	179—229	>
			4,49—4,00	

Отпуск проводят при температуре ниже критической (точка A_1). В зависимости от свойств получаемых металлов отпуск бывает трех видов: низкий, средний и высокий [23].

Низкий отпуск — температура 150—200°С с получением мартенсита отпуска — назначается для частичного снятия внутренних напряжений, повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения твердости.

Средний отпуск — температура 300—400°С с получением структуры троостита отпуска — назначается для повышения упругих свойств стали с некоторым снижением твердости, прочности и ударной вязкости.

Высокий отпуск — температура 500—650°С с получением структуры сорбита или перлита отпуска — назначается для полного снятия напряжений и дает наилучшее сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости.

Схема влияния температур отпуска на свойства стали приведена на рис. 22.

Скорость охлаждения не влияет на структуру материала после отпуска, но способствует образованию трещин и отпускной хрупкости, которая проявляется в двух температурных интервалах (рис. 23).

Отпускная хрупкость первого рода, необратимая отпускная хрупкость, проявляется при температурах 250—450°С и присуща всем без исключения сталям. Отпускная хрупкость второго рода, обратимая отпускная хрупкость, проявляется при температурах 500—650°С в легированных сталях и устраняется быстрым охлаждением после отпуска или введением в сталь 0,1—0,3% Мо.

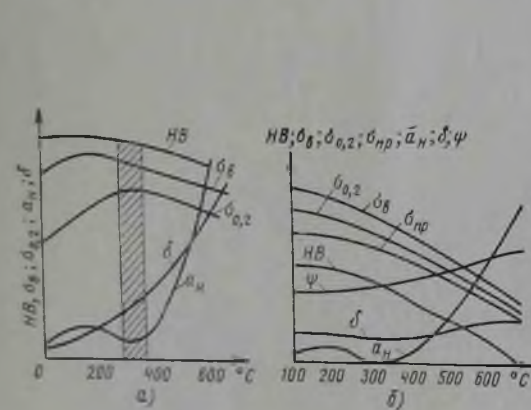


Рис. 22. Качественная зависимость механических свойств от температуры отпуска:
а — закаленная сталь; б — хромоникельмолибденовая сталь (заштрихованная область соответствует оптимальным температурам отпуска рессор и пружин)

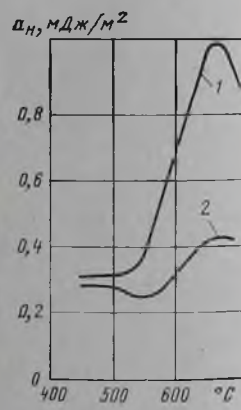


Рис. 23. Зависимость ударной вязкости стали от температуры отпуска:
1 — быстрое охлаждение;
2 — медленное охлаждение

Большинство деталей из углеродистых сталей, содержащих более 0,3% С, и все детали из легированных сталей подвергают закалке с последующим отпуском.

Закалку производят в тех случаях, когда требуется зафиксировать высокотемпературное состояние сплава. Сплав нагревают до температуры выше критической и затем резко охлаждают (рис. 24).

Закалка позволяет получить максимальные прочностные свойства сплавов (рис. 25).

В сплавах, подвергнутых закалке, даже при комнатной температуре могут происходить структурные изменения. При нагревании закаленного сплава до невысокой температуры подвижность атомов увеличивается и процессы, вызывающие переход в более равновесное состояние, получают большее развитие, т. е. происходит процесс отпуска.

Глубина закаленного слоя зависит от состава стали и способа ее получения.

Оценка глубины закаленного слоя ведется по прокаливаемости, т. е. образованию слоя, состоящего из 50% мартенсита и 50% троостита или 90% мартенсита и 10% троостита. Твердость полумартенситной зоны приведена на рис. 26.

Прокаливаемость зависит от степени легирования стали элементами, переходящими при нагреве в твердый раствор. Легирующие элементы, образующие карбиды, понижают прокаливаемость и размер зерна, а также влияют на прокаливаемость: крупнозернистые стали прокаливаются глубже, чем мелкозернистые.

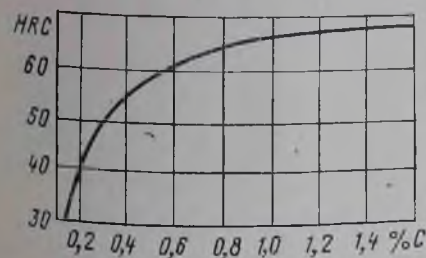


Рис. 25. Зависимость твердости мартенсита от содержания углерода в стали

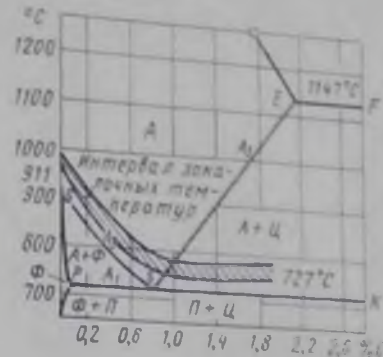


Рис. 24. Температура нагрева углеродистой стали при закалке

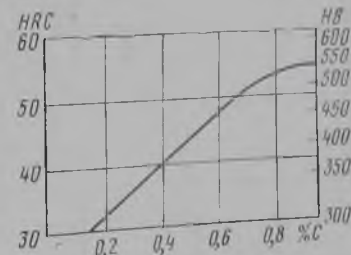


Рис. 26. Изменение твердости полумартенситной зоны от содержания углерода в стали

Таблица 34

Характеристика охлаждающих сред		Скорость охлаждения (°C/с) при температуре	
Охлаждающая среда		550—650° C	200—300° C
Вода (+20° C)		600	270
Вода (+50° C)		100	270
Вода (+74° C)		30	200
Водный 10%-ный раствор поваренной соли (+18° C)		1100	300
Водный 10%-ный раствор соды (+18° C)		800	270
Минеральное масло		100—150	20—50
Медная плита		60	30

Ориентировочные режимы закали

Деталь	Сталь	Сечение, мм	Режимы термообработки			
			Закалка		Отпуск	
			t, °C	Охлаждающая среда	t, °C	τ, ч
Ось, вал, зубчатое колесо, шлицевой вал, работающие при средних скоростях и средних удельных нагрузках	40X	До 100	830—850	Масло	500—550	1,5—2
		До 40	830—850		180—200	2—3
То же, но работающие с ударными нагрузками	40XH	100—300	820—840	Масло	560—600	1,5—2
		До 40	820—840		180—200	2—3
Вал, шлицевой вал, ось большого сечения, работающие с повышенными ударными нагрузками	40XHMA	200—400	850—860	Масло	600—620	1,5—2
Детали пружинного типа	65Г	До 20	790—810	Масло	370—400	2,0—3
Цилиндрические и специальные пружины с высокой нагрузкой гибких верхних концов	55C2	—	850—870	Масло, вода	440—460	2,0—3
	60C2A	—	850—870	Масло	440—460	2,0—3

Сквозная прокаливаемость необходима только в деталях, работающих в условиях растяжения, сдвига и сжатия; во всех остальных случаях сквозной прокаливаемости не требуется. При закалке используются различные охлаждающие среды. Они должны обеспечивать высокую скорость охлаждения в интервале температур 550—650° C, чтобы избежать образования ферритно-цементитных смесей, и низкую скорость при 200—300° C для предотвращения образования трещин при мартенситном превращении.

Характеристика наиболее часто применяемых охлаждающих сред приведена в табл. 34.

Превращение аустенита при различных температурах и ско-

Таблица 35

и отпуска деталей горных машин

Охлаждающая среда	Механические свойства					
	σ_B , МН/м²	σ_T , МН/м²	δ	ψ	σ_{HRC} , Дж/см	HRC
Воздух	800—950	650—750	10	40—50	60—70	23—30
	1500—1600	1300—1400	7	25	30	45—50
Вода, масло, Воздух	800—850	580—600	9—10	38—40	40—50	—
	1600	1400	7	40	40	48—54
Воздух	1100	950	12	50	80	—
	1500	1250	5	10	—	42—48
	1300	1200	6	30	—	39
	1600	1400	5	20	—	47

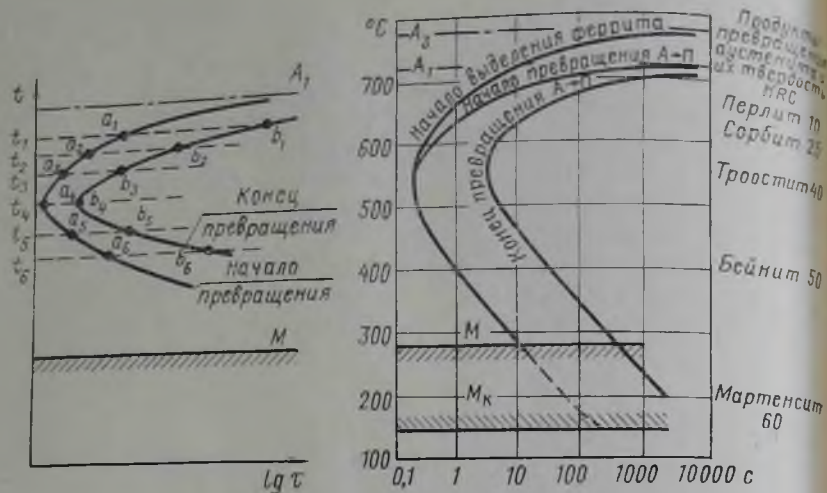


Рис. 27. Кривые изотермического превращения аустенита:
а — принципиальная схема; б — диаграмма изотермического превращения доэвтектоидной стали

ростях охлаждения описывается С-образными кривыми, построенными в координатах $t-\tau$ или $t-\lg \tau$.

На рис. 27, а приведена принципиальная схема превращения аустенита. Кривая $a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$ характеризует начало распада аустенита при различных температурах, кривая $b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6$ — конец распада аустенита. В этом температурном интервале аустенит распадается на ферритно-цементитные смеси различной степени дисперсности: перлит, сорбит, троостит. Наиболее грубое строение, различимое под микроскопом, имеет перлит, наиболее тонкое — бейнит (рис. 27).

При понижении температуры диффузионный распад аустенита становится невозможным и идет бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит, который представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. В связи с низкой температурой превращения и пересыщением твердого раствора углеродом, мартенсит характеризуется наибольшей твердостью из всех фазовых составляющих стали.

В зависимости от химического состава стали вид и положение кривой в координатах $t-\tau$ меняется.

Режимы объемной термической обработки марок стали, используемых для деталей горных машин, приведены в табл. 35.

5.2. Химико-термическая обработка деталей

Свойства поверхности и сердцевины деталей, работающих в условиях изгиба и кручения, не должны быть одинаковыми. Если на деталь действуют силы трения и контактные на-

грузки, то становится необходимым упрочнение поверхности. Поверхностные виды упрочнения можно разделить на две группы:

- 1) с изменением химического состава поверхностных слоев — химико-термическая обработка и специальные гальванические покрытия, придающие изделиям определенные физико-механические свойства с одновременной защитой от коррозии;
- 2) без изменения химического состава поверхностных слоев — поверхностная закалка и наклеп.

Химико-термическая обработка позволяет изменить химический состав поверхностных слоев в результате совместного действия температуры и активной среды.

Диффузионное насыщение состоит из трех элементарных процессов, повторяющихся последовательно в течение всего цикла химико-термической обработки: 1) диссоциация с образованием диффундирующего элемента в активном атомарном состоянии; 2) адсорбция активных атомов элемента поверхностью металла; 3) диффузия адсорбированных атомов в глубь металла.

Для осуществления и поддержания процесса диффузии необходимо, чтобы, во-первых, диффундирующий элемент был способен взаимодействовать с основным металлом; во-вторых, чтобы реагирующие атомы имели достаточную подвижность, зависящую от температуры, и, в-третьих, чтобы создавался определенный градиент концентрации диффундирующего элемента от поверхности к сердцевине.

Наибольшее распространение, для проведения поверхностного упрочнения деталей горных машин, получили следующие виды химико-термической обработки:

- цементация — насыщение стали углеродом;
- азотирование — насыщение стали азотом;
- нитроцементация или цианирование — совместное насыщение стали углеродом и азотом;
- диффузионная металлизация — хромирование, борирование, алитирование, силицирование и др.

Непосредственно перед химико-термической обработкой детали необходимо тщательно очистить от грязи, ржавчины, масла и других загрязнений (для равномерного течения процессов химико-термической обработки).

Наиболее широкое распространение получила цементация, которую можно проводить в различных насыщенных средах.

Основные марки стали, используемые при цементации и нитроцементации, приведены в табл. 36.

Для получения стали высокой твердости с вязкой сердцевиной содержание углерода должно быть не более 0,3%.

В процессе цементации и последующей термообработки возможно коробление деталей в пределах 0,05—0,15 мм, поэтому для точных изделий необходимо предусмотреть соответствующие

Стали, используемые для цементации и режимы их термической обработки

Деталь	Сталь	Температура цементации, °С	Режимы термической обработки, °С			Ориент. глубина, мм	Твердость, HRC		Предел выносливости, МПа*
			Отпуск	Закалка	Отпуск		поверхности	сердцевины	
Зубчатое колесо, вал—шестерня $m=7$ мм $m=21$ мм $m=24$ мм	12X2H4A 18X2H4MA 20XH3A 20XГНР 15X2Г2CBA	940	650	800	180	1,2—1,7	56—60	38—40	550 590 340 480 630
			—	800	180	1,4—1,6	58	38—42	79,8 69,5
Зубчатое колесо, вал—шестерня $m=8$ мм $m=12$ мм $m=66$ мм	20X2H4A 25X2HГTA 30XГT 18XГT	940	—	800	180	1,4—1,6	54—56	32—34	260
		910	650	810	150	1,4—1,6	54—56	32—34	260
Зубчатое колесо, шестерня, вал—шестерня $m=10$ мм $m=14$ мм $m=16$ мм	12X2H4A 12XH3A	910	650	810	150	1,3—1,6 1,1—1,2	54—56	32—34	650 500
			—	—	—	1,5—1,8	54—57	30—32	—
Палец, заборная часть Вал—шестерня Червяк	20X 20X 12X2H4A	—	—	—	—	1,5—1,8	54—57	30—32	—

У продолжение табл. 36

Деталь	Сталь	Температура цементации, °С	Режимы термической обработки, °С			Ориент. глубина, мм	Твердость HRC		Предел выносливости, МПа*
			Отпуск	Закалка	Отпуск		поверхности	сердцевины	
Шестерни: роторная ступенчатая промежуточная промежуточная угловая	12XH2A 12XH2A 15X 12XH2A 15X	850—870	Непосредственно с нитроцементного нагрева	—	—	0,3—0,6	53—57	28—30	—
							—	—	—
Костыль	20X	—	180—200	—	—	—	—	—	—
Храповый стержень Цилиндр Ствол	15X	—	—	—	—	—	—	—	—
Цилиндр Ствол	20X	—	—	—	—	—	—	—	—
Нижняя поворотная букса Поршень-ударник	12X2H4A 12X2H4A	—	—	—	—	1,5—2,0	54—58	30—32	—

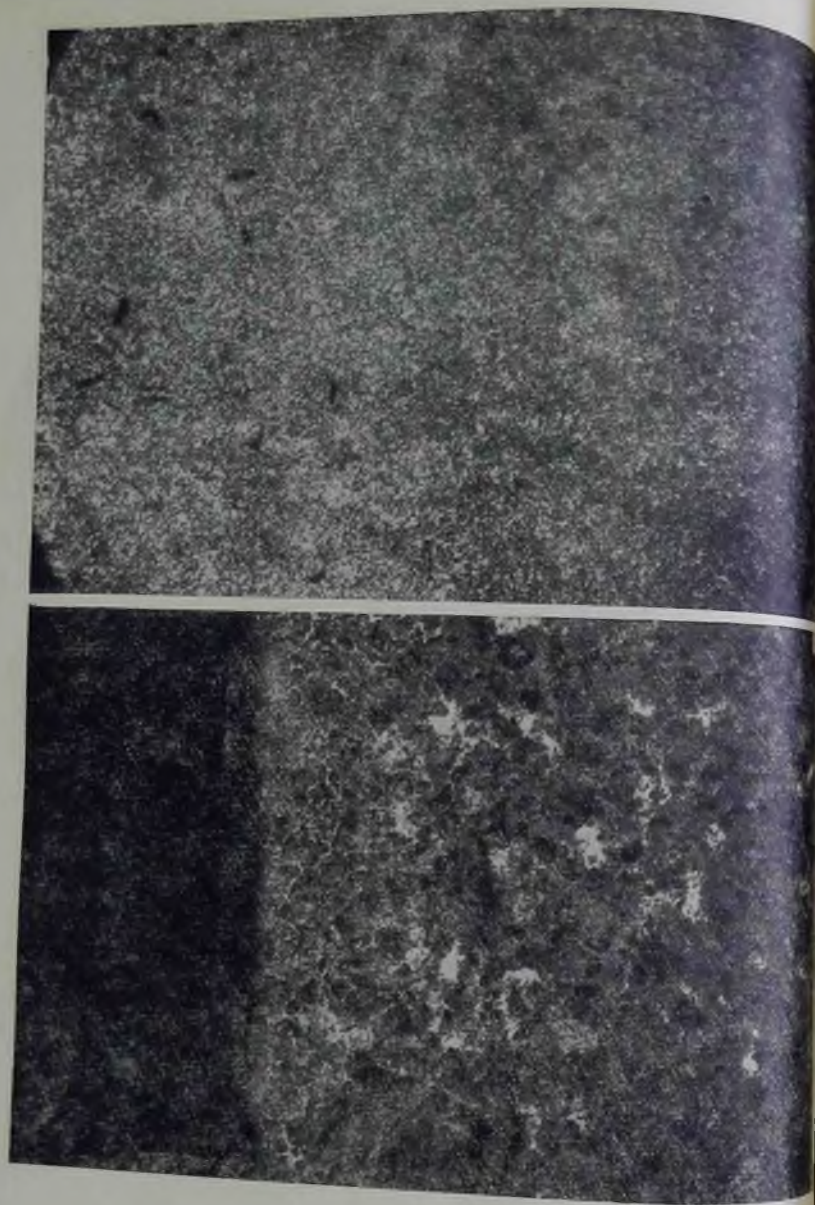


Рис. 28. Микро- и макро-
структура стали 12XН4А
после цементации:
а — поверхностный слой —
сорбит и цементитная сетка;
б — сердцевина — сорбит и
феррит

и отпуск на механическую обработку (шлифование, полирование).

Микро- и макроструктуры сталей, подвергнутых цементации и последующей термической обработке, показаны на рис. 28.

Для деталей с минимальной деформацией при химико-термической обработке и светлой поверхностью применяют нитроцементацию, которая позволяет повысить износостойкость обрабатываемых деталей и сделать процесс более рентабельным. Нитроцементация аналогична процессу газовой цементации, но проводят ее при более низких температурах. В качестве газовой среды используют газ с добавкой 2—10% аммиака. Цементирующий газ и аммиак вводят в рабочее пространство печи отдельно.

Основными преимуществами нитроцементации перед цементацией являются большая скорость насыщения (исметря на более низкую температуру); отсутствие сажи на поверхностях детали, кладке печи и нагревателей.

Наиболее рационально использовать комплексный жидкий диффузионатор — триэтанолламин $[(C_2H_5O)]OHN$, содержащий и углерод, и азот. Триэтанолламин вводят в рабочее пространство печи через специальные капельницы или же дозируют топливным насосом, что гарантирует постоянство расхода карбюризатора.

После нитроцементации проводят закалку (как правило, непосредственно из цементационной печи) и низкий отпуск. Для сложных деталей (например, зубчатых колес) наиболее совершенной является ступенчатая закалка в горячем масле (170—190°С) типа МК-22 или МС-20. Это позволяет снизить деформации при термической обработке до минимума и получить детали со светлой поверхностью. Качество диффузионного слоя при нитроцементации зависит от степени насыщения поверхности углеродом и азотом.

Суммарная концентрация углерода и азота в стали зависит от температуры процесса и времени выдержки и колеблется от 1,1 до 1,65%.

Макро- и микроструктура стали, подвергнутой нитроцементации, показана на рис. 29.

При нитроцементации в поверхностном слое образуется большее, чем при цементации, количество остаточного аустенита, но аустенит легирован азотом, в результате этого твердость поверхностного слоя сохраняется высокой (табл. 37).

Азотированию подвергают детали, работающие на износ и воспринимающие знакопеременные нагрузки. Азотированный слой обладает высокой твердостью, сохраняющейся при нагреве до 500—550°С, износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Азотирование из-за длительности процесса (30—60 ч) экономически целесообразно применять для деталей ответственного назначения, выходящих из строя при механическом износе.

Рис. 29. Микро- и макроструктура стали 12XН4А после закалки ($t = 780 \dots 800^\circ\text{C}$) и низкого отпуска ($t = 160 \dots 180^\circ\text{C}$);

а — поверхностный слой — мартенсит и тонкая разорванная карбидная сетка (HRC 58—60); б — сердцевина — сорбит (HRC 32—38)



Таблица 37

Ориентировочные режимы нитроцементации

Деталь	Сталь	Температура нитроцементации, $^\circ\text{C}$	Режим термической обработки, $^\circ\text{C}$		Глубина слоя, мм	Твердость HRC	
			Закалка	Отпуск		поверхности	сердцевины
Вал-шестерня	12X2Н4А 12XН3А	850—870	Непосредственно с нитроцементационного нагрева		0,7—0,9	54—57	30—34
Зубчатое колесо	12XН3А 20X				0,7—1,0	54—57	30—34
Золотник Втулка золотника	20X				1,0—1,3	56	30—34
	12X2Н3А 20X 12X2Н4А				—	—	—
	20X				1,0—1,5	54—57	30—34
Зубчатое колесо конического Вал-шестерня Зубчатое колесо							
Полумуфта электродвигателя Полумуфта редуктора							



Рис. 30. Микроструктура стали 38X2MЮА после азотирования

Антикоррозионное азотирование с незначительными выдержками (до 1 ч) наибольшее применение получило для деталей из углеродистой стали, работающих в атмосферных условиях. Высокую твердость азотированного слоя можно получить на

деталях из легированных сталей, содержащих алюминий, хром и молибден. Микроструктура стали 38X2MЮА, подвергнутой азотированию, показана на рис. 30.

Перед процессом азотирования детали, обработанные резанием, подвергают термической обработке (нормализации или закалке с высоким отпуском).

Окончательным процессом после азотирования является притирка или доводка. Тонкий азотированный слой после такой обработки не продавливается. При применении полирования после азотирования детали должны иметь соответствующую подготовку поверхности.

Коррозионная стойкость нитридного слоя объясняется способностью пассивирования с образованием защитной пленки. Повышение усталостной прочности объясняется образованием фаз в азотированном слое, обладающих большим объемом, в результате чего возникают напряжения сжатия.

Наиболее эффективно азотирование повышает предел выносливости деталей, имеющих концентраторы напряжений. Азотирование повышает сопротивление стали кавитации и эрозии и является способом повышения износостойкости аустенитных сталей. Азотированию в горных машинах подвергают червячные передачи из стали 38X2MЮА, работающие в паре с бронзой.

Хромирование — процесс диффузионного поверхностного насыщения хромом низкоуглеродистых сталей с целью повышения поверхностной твердости и износостойкости, коррозионной стойкости.

Известны три способа диффузионного хромирования: хромирование в порошкообразных смесях, обмазках, в соляных ваннах и газовое хромирование. Наибольшее распространение получило хромирование в твердой фазе, в порошках и обмазках.

В качестве насыщающей среды можно использовать смесь 60% хрома или феррохрома, 39% окиси алюминия и 1% хлористого аммония.

Температура хромирования 1100—1200°С, скорость хромирования 0,02 мм/ч, поверхностные слои насыщаются до 30—35% хрома.

Для повышения твердости сердцевины и улучшения ее механических свойств хромированные детали подвергают термической обработке: нормализации, закалке и отпуску.

На поверхностную твердость хромированного слоя термическая обработка не влияет. При хромировании деталей происходит изменение их размеров. Для сплошных деталей увеличение размеров составляет 0,01—0,02 мм на сторону. Это зависит от способа хромирования. Изменение размеров цилиндрических деталей происходит с уменьшением внутреннего и увеличением наружного диаметров.

Борирование представляет собой процесс насыщения стали бором с целью повышения поверхностной твердости, износостой-

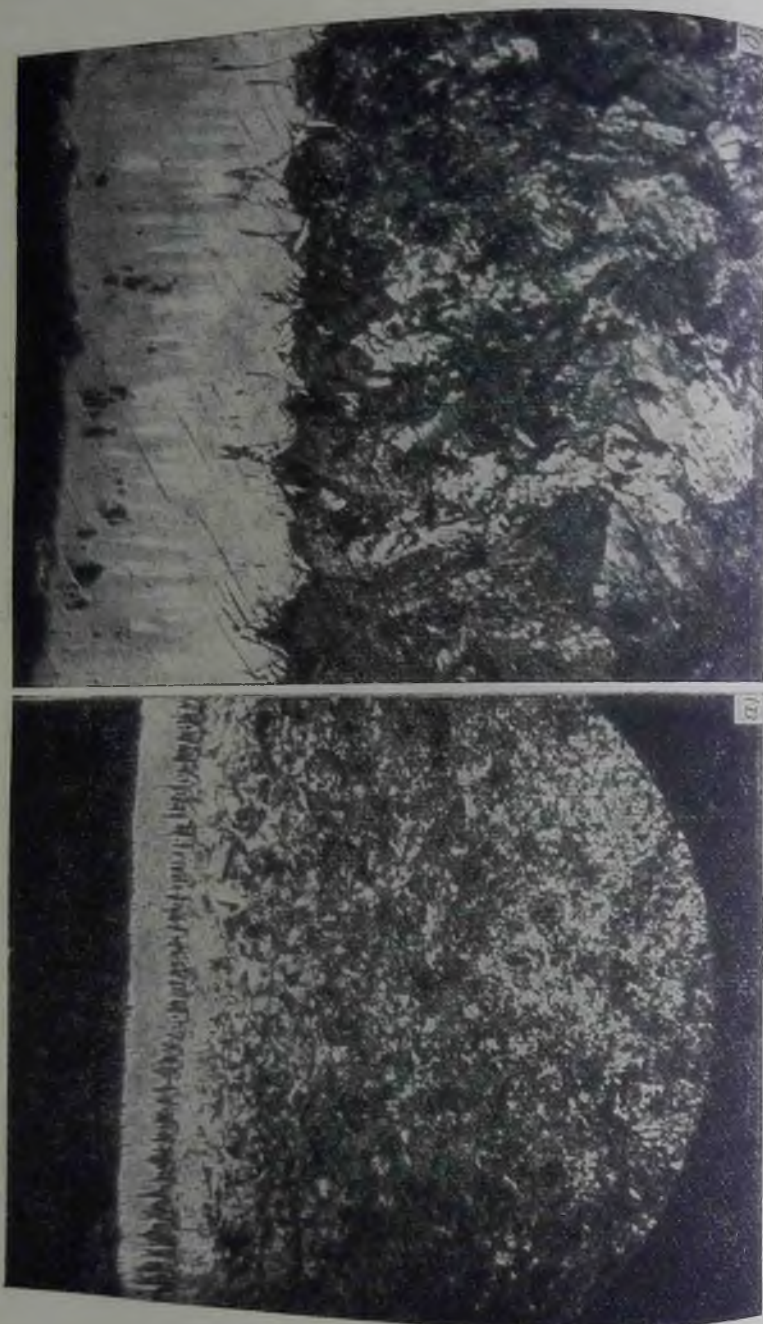


Рис. 31. Микроструктура сталей, прошедших борирование

кости, в основном для деталей, работающих в абразивных средах, а также для повышения теплостойкости и кислотостойкости [42].

Наиболее широкое распространение для деталей машин получило электролизное борирование в расплавах бора. Оно осуществляется в тигельной электрической ванне. Микроструктура борированных образцов показана на рис. 31.

Износостойкость деталей после борирования повышается в 4—10 раз при использовании в качестве контрообразца стали 40X [27].

Для повышения износостойкости деталей горных машин, выходящих из строя вследствие износа, было проведено борирование при литье сталей 35Л, 30ГЛ, 35ХГСНЛ, 35ХГСМА, 110Г13Л.

При обычном литье этих сталей наблюдается существенное обезуглероживание поверхности до феррита, что не может сказаться на износостойкости. Для исследования были отлиты цилиндрические образцы. Формовка осуществлялась вручную, в две опоки; в качестве формовочной смеси использовали песок с жидким стеклом. Формы высушивали, пропуская через нее углекислоту в течение 15 мин.

Окраску форм осуществляли двумя-тремя слоями вручную с последующей просушкой формы в течение 24 ч на воздухе. В качестве компонентов в краску вводили карбид бора и этилсиликат. После выбивки и дробеструйной очистки поверхности образцов приобретает матово-серый оттенок.

Исследование микроструктуры и микротвердости показало наличие боридного слоя на глубине до 2 мм. Испытания проводили на машине МИ-1М в условиях статической нагрузки 50 даН и трения скольжения с частотой вращения 428 об/мин. В качестве контрообразцов использовались сегменты стали 40X, чугуна СЧ12-28, бронзы ОСЦ 12-2-1. В место контакта образца и сегмента подавали масло с абразивом (кварцевый песок).

Критерием оценки износостойкости был принят относительный массовый износ. Результаты испытаний приведены на рис. 32.

Проведенные испытания показали, что износостойкость борированных образцов в 6 раз выше износостойкости образцов из термообработанной стали 40X (HB 480—520), в 10—12 раз — стали 35Л.

Для исследования износостой-

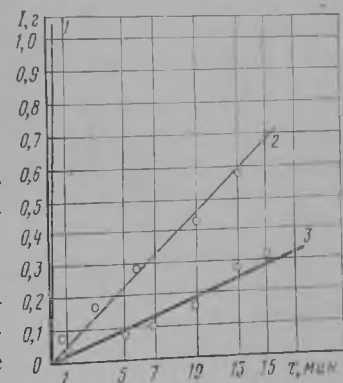


Рис. 32. Износ образцов из стали 35:

1 — неборированной; 2 — борированной; 3 — борированной закаленной и отпущенной

кости были отлиты детали с борированием изнашиваемых поверхностей. Эти детали проходят испытания на шахтах Донбасса и карьерах КМА.

Результаты измерения микротвердости структурных составляющих стали 110Г13Л и твердости сердцевины борированного и неборированного образцов в литом состоянии приведены в табл. 38.

Результаты измерения микротвердости структурных составляющих стали 35Л и твердости сердцевины борированного и

Таблица 38

Структура и твердость стали 110Г13Л после борирования

Структурные составляющие	Микротвердость Н	Твердость сердцевины НРС
Край образца (борированный слой): боридная эвтектика	1145, 1315, 1524, 1315, 1145, 1315, 1005, 1315, 1145, 1315	—
темные участки внутри эвтектики	447, 447, 447, 508 585, 508, 447, 508, 508, 508	—
Центр образца: основной металл (аустенит)	328, 328, 353, 353, 328, 353, 447, 328 328, 353	36, 36, 38, 38 36, 36, 38, 38 38, 38
структурная составляющая по границам аустенитных зернистого оттенка	713, 713, 891, 557 841, 643, 643, 713, 841, 713	—
боридные участки—светлые включения	1005, 1005, 1005 1145, 1145, 1005	—

Таблица 39

Структура и твердость стали 35Л после борирования

Структурные составляющие	Микротвердость Н	Твердость сердцевины НРС
Край образца (борированный слой): боридная эвтектика	945, 945, 891, 891 945, 945, 891, 891 841, 841 — —	— — —
основной металл внутри эвтектики (аустенит)	353, 353, 340, 353 353, 340, 340, 340	— —
мартенсит (обезуглероженный слой)	353, 340 — — 585, 585, 508, 508 585, 508, 508, 585 585, 508 — —	— — — —
Центр образца (основной металл—аустенит)	303, 340, 340, 328 328, 303, 328, 328 328, 340, 328, 307	25, 25, 26, 26, 26, 25, 26, 26, 26, 26

неборированного образцов после закалки приведены в табл. 39. Износостойкость борированной стали 110Г13Л увеличилась в 2—2,5 раза.

Окраску поверхности формы проводили вручную смесью карбида бора на поливинилбутиральном лаке. Формы и стержни сушили в камерной печи с газовым обогревом. Температура сушки 150°С, время повышения температуры до 300—350°С 1—1,5 ч, охлаждение при закрытых дверях и погашенных форсунках 3,5—4 ч, общая продолжительность сушки 7—8,5 ч. Дальнейшее изготовление отливок соответствовало технологическому процессу, принятому на заводе «Серп и молот».

Термическую обработку борированных отливок из стали 110Г13Л проводили до отрезки прибылей и заварки литейных дефектов.

5.3. Термомеханическая обработка деталей

Термомеханическая обработка (ТМО) является в настоящее время наиболее прогрессивной упрочняющей обработкой. Она позволяет получить технические сплавы наибольшей прочности (до 3200 МН/м², т. е. намного больше, чем при легировании и обычной термической обработке). При сравнительно высокой прочности термомеханическая обработка дает большие значения пластичности и вязкости, чем легирование и термическая обработка, т. е. повышает сопротивление износу и конструктивную прочность [3].

Разработка технологического процесса термомеханической обработки сводится к тому, чтобы в каждом конкретном случае был выбран оптимальный способ пластической деформации; наиболее эффективная степень деформации; наилучшая схема совмещения термической обработки и пластической деформации и режимы термической обработки (скорректированные в связи с использованием деформации).

Виды ТМО целесообразно классифицировать по последовательности проведения операций деформирования и термической обработки. Классификация видов термомеханической обработки приведена на рис. 33.

При любом виде термомеханического упрочнения необходимым элементом является пластическая деформация, которая при ВТМО, МТО, ММТО может осуществляться на стандартном оборудовании, для НТМО требуется специальное оборудование для деформации.

Упрочнение тяговых цепей горных машин было проведено способом ММТО.

Приведенный режим упрочнения позволил повысить предел выносливости, усталостную долговечность, статическую прочность цепного тягового органа на 25—40% (рис. 34).

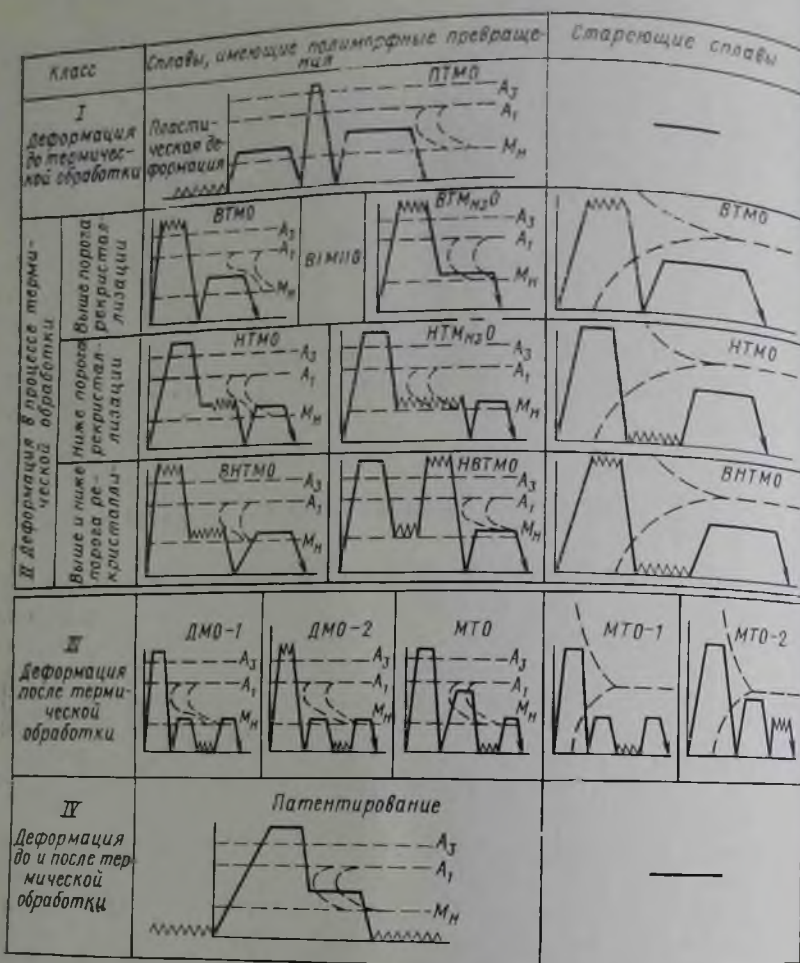


Рис. 33. Классификация термомеханической обработки

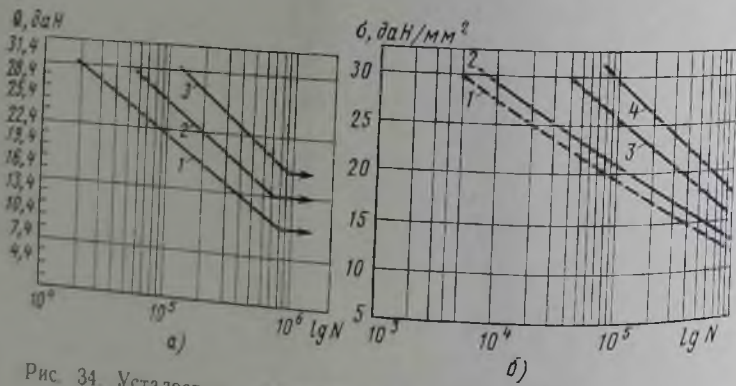


Рис. 34. Усталостная прочность крутлозвенных цепей, прошедших упрочнение МТО:
а — плоские звенья; б — шестизвенные отрезки; 1 — термообработка; 2 — холодная деформация; 3 — однократная МТО; 4 — двукратная МТО

Таблица 40
Технологические режимы термомеханической обработки

Вид упрочнения	Последовательность операций ТМО	Температура, °С		Степень деформации	Сталь	Изменение свойств в процессе ТМО
		нагрева	деформации			
ВМТО	Нагрев Деформация Закалка Отпуск	$A_{с3} + (30 \dots 50)$	$A_{с3} + (30 \dots 50)$	До 30	40, 40Х, 20ХН, 40ХНМ, 30ХГСА, 60С2, ШХ15	Возрастает временное сопротивление до 250 даН/мм² при относительном удлинении 7—12%; повышается равномерность свойств; снижается отпускная хрупкость первого рода
НТМО	Нагрев Деформация Закалка Отпуск	$A_{с3} + (30 \dots 50)$	450—550 200—500	70—80	37ХНЗА, 40ХНТС, 40ХНТСМ	Возрастает временное сопротивление до 500 даН/мм², предел текучести до 225 даН/мм²; отношение $\sigma_b/\sigma_{0.2}$ при $\sigma_b = 125$ даН/мм² возрастает с 0,3 до 0,5, при $\sigma_b = 220—270$ возрастает с 0,41 до 0,45
МТО	Закалка Отпуск Деформация Отпуск	—	— 20 —	5—7	09Х17Н10	Повышение жаропрочности
ММТО	Закалка Отпуск Деформация Отпуск Деформация Отпуск	— 20 20 20 20	— — — — —	3 3 — — 1	25Г2, 30ХМА, 30ХГСА, 30ХГСА	Повышение временного сопротивления на 25—30%, предела текучести на 30—35%, пластичности на 30—70%

Технологические режимы ТМО и характер изменения свойств в процессе ТМО приведены в табл. 40.

5.4. Виды брака при термической обработке деталей

Брак при термической обработке может быть вызван изменением температуры нагрева или скоростью охлаждения, нецелесообразным размещением деталей в печи при термической обработке и закалочных баках при охлаждении.

Основные виды брака, причины их возникновения и способы устранения приведены в табл. 41, 42.

5.5. Поверхностное упрочнение без изменения химического состава поверхности деталей

Поверхностную закалку можно осуществлять двумя способами: с применением внешних источников тепла — закалка газовым пламенем и в электролите и с применением внутренних источников тепла — закалка токами высокой частоты (ТВЧ) или контактный способ.

Наиболее широкое применение для деталей горных машин получили поверхностная закалка с нагревом ТВЧ и газовым пламенем.

Поверхностной закалке подвергают детали, изготовленные из средне- и высокоуглеродистых сталей и чугунов, прошедшие цикл механической обработки.

Для корпусов редукторов и крупногабаритных шиберов применяют упрочнение с нагревом газовым пламенем. При пламенной поверхностной закалке используют нагревательное пламя с высокой температурой, образующееся при сгорании различных горючих газов или паров, горючих жидкостей в кислороде. Смешение газа с кислородом и образование горючей смеси происходит в специальных горелках. Наиболее широкое применение для деталей горных машин имеет ацетилено-кислородное пламя с температурой 3150° С. Подготовка деталей перед пламенной закалкой заключается в предварительной термической обработке — нормализации, улучшении для получения мелкозернистой структуры, необходимой для достижения равномерной твердости и глубины слоя в процессе пламенной закалки.

Технологический процесс пламенной закалки состоит из следующих основных операций: выбор режимов обработки и подготовки оборудования, подготовка деталей для закалки, закалка и контроль.

Пламенную закалку можно осуществлять непрерывным и последовательным способами. Преимущество пламенной закалки особенно проявляется при обработке крупногабаритных деталей из стали и чугуна в индивидуальном производстве, так как любые режимы термического и химико-термического упрочнения в этом случае неприемлемы.

Таблица 41

Брак при термической обработке деталей горных машин

Вид брака	Характеристика брака	Основные причины брака	Метод определения	Способ предупреждения брака или устранения
Недогрев	Низкие свойства при сравнительно малом изломе	Заниженная температура или малая выдержка	Испытание образцов на растяжение, микромикроанализ	Повторный отжиг или нормализация при нормальных температуре и выдержке
Перегрев	Крупнозернистый излом, низкие пластические свойства, особенно ударная вязкость (из-за роста зерна)	Значительное превышение температуры или изменение длительности выдержки	Испытание образцов на растяжение и ударную вязкость с осмотром излома, микро- и макроанализ	Повторный отжиг при нормальных температуре и выдержке. При значительном перегреве двукратный отжиг (температура первого из 50—150° С выше нормальной)
Пержоги	Весьма крупнозернистый блестящий излом из-за окисления границ зерен	Нагрев стали в окислительной атмосфере при температуре, близкой к оплавлению	Излом и микроанализ	Брак неисправимый
Высокая твердость	Высокая твердость	Повышенная скорость охлаждения	Измерение твердости	Повторный отжиг с требуемой скоростью охлаждения
Обезуглероживание	Заниженное значение твердости на поверхности из-за понижения концентрации углерода в поверхностном слое	Окислительная атмосфера в печном пространстве и слишком длительная выдержка	Испытание на микро-твердость и твердость исследования структуры	Обработка с применением защитной атмосферы и металлическая обработка с правильным установлением припуска на термическую обработку
Окисление	Наличие на поверхности окисленного слоя	То же	То же	То же и удаление окисленного слоя пескоструйной обработкой, травлением и металлической обработкой

Виды брака при химико-термической обработке

Таблица 42

Характеристика	Основные причины брака	Метод определения	Способ предупреждения и устранения брака
Брак при цементации и нитроцементации стали: завышенная глубина слоя	Завышенное время выдержки и температуры применения активного карбюризатора	Микро- и макроанализ, фрактография (исследование изломов)	Брак неисправим. Для предупреждения брака необходимо выдерживать технологический режим по температуре нагрева и времени
недостаточная глубина слоя	Низкая температура цементации, недостаточное время выдержки, слабый карбюризатор или недостаточная подача его	Микро- и макроанализ, фрактография	Повторить цементацию при соблюдении технологического режима
неравномерная глубина цементации	Засоренная и грязная поверхность детали. Неправильная упаковка цементационных ящиков при цементации в твердом карбюризаторе	То же	Подготовить детали перед цементацией для обеспечения чистой поверхности и правильно упаковать их в цементационных ящиках
повышенная концентрация углерода в слое	Применение сильного карбюризатора, завышенное время выдержки	Микроанализ: наличие цементитной сетки	Соблюдать технологический режим обработки. Для исправления брака — закалка в масле или нормализация с последующей закалкой
пониженная концентрация углерода в слое	Применение слабого карбюризатора	Микроанализ, измерение микротвердости	Дополнительная цементация. Для предупреждения следует применять более сильный карбюризатор

Устранение брака 42

Характеристика	Основные причины брака	Метод определения	Способ предупреждения и устранения брака
поверхностное обезуглероживание	Термическая обработка в окислительной атмосфере, завышенная температура и время закали	Микроанализ с последующим замером микротвердости	Термическая обработка в защитной атмосфере, снятие шиховой обезуглероживающего слоя (припуск на шлифовку должен быть предусмотрен)
отложение сажи	Излишнее количество газа или керосина, вводимых в печь	Осмотр	Дозирование и контроль цементующего вещества
стекловидные наплывы на поверхности изделий	Наличие песка в карбюризаторе	Осмотр	Не допускать попадания песка в карбюризатор
разъедание поверхности отслаивание закаленного цементированного слоя	Наличие в карбюризаторе более 3% сернокислых солей. Резкий переход от цементованного слоя к сердцевине	Осмотр Осмотр, микроанализ	Не допускать нарушения состава карбюризатора Уменьшать активность карбюризатора, применять более легированную сталь
хрупкость — выкрашивание поверхностного слоя	Применение активного карбюризатора	Осмотр, микроанализ, измерение микротвердости	Не допускать нарушения состава карбюризатора
заниженная твердость закаленного цементованного слоя	Наличие в слое повышенного количества остаточного зусенита	Измерение твердости, микроанализ	Обработка холодом, наклеп, улучшение с последующей закалкой и отпуск
Брак при азотировании: коробление и деформация	Напряжения, вызываемые разницей удельных объемов азотированного слоя и сердцевины	Проверка размеров и биеция	Производить азотирование с наименьшей допустимой глубиной слоя, избегать провисания деталей в печи, равномерно нагревать и охлаждать детали

Характеристика	Основные причины брака	Метод определения	Способ предупреждения и устранения брака
растрескивание и шелушение слоя	Резкий переход от азотированного слоя к сердцевине	Осмотр	Медленное охлаждение после азотирования. При наличии брака все детали партии отпустить при 570—580°С в течение 4—5 ч в атмосфере диссоциированного аммиака
хрупкость — выкрашивание поверхности	Чрезмерное насыщение нитридами вследствие крупнозернистости структуры и обезуглероживания поверхности при предварительной термообработке	Осмотр, определение твердости НУ и проверка состояния опечатков	Ступенчатый процесс азотирования. При наличии брака все детали партии отпустить в атмосфере диссоциированного аммиака при 570—580°С в течение 2 ч
недостаточный или пористый слой (для антикоррозионного азотирования)	Малая выдержка и температура процесса и большая степень диссоциации аммиака	Осмотр, микроанализ. Погружение на 1 мин в 10%-ный водный раствор медного купороса	Вторичное азотирование. Для деталей с резкой браком устранить
Брак при закалке конструкционной стали; трещины. Наличие внутренней и внешней разрушенности сплошности металла	Напряжение, возникающее при превращении аустенита в мартенсит, при температурах мартенсита при превращении	Осмотр изделия, дефектоскопия флюоресцентным, ультразвуковым дефектоскопическим методом, методом цветной дефектоскопии, керосиновой пробы	Брак не исправим. Для предупреждения брака следует: применять изотермическую, ступенчатую или прерывистую закалку; избегать изготовления деталей с острыми углами и резкими переходами сечений, а при изготовлении таких деталей применять легированную сталь, допускающую меньшие скорости закалки;

Характеристика	Основные причины брака	Метод определения	Способ предупреждения и устранения брака
деформация	Структурные превращения, связанные с увеличением объема	Проверка размеров	не допускать попадания воды в масляный закалочный бак; медленно нагревать изделие при повторной закалке и отпуске. Применение мелкозернистой и легированной стали, прошедшей предварительную термическую обработку. Правильно назначать и выдерживать режим термообработки
коробление, нарушение формы	Неправильное охлаждение при закалке и внутреннее напряжение в изделиях перед нагревом под закалку	Проверка биения в центрах или шупом на плите	Проверка на кривизну перед закалкой, правильное погружение в закалочную среду, замедленное охлаждение в мартенситном интервале; шлифование, если коробление не вышло при горячем состоянии, или припуск; правка в холодном или горячем состоянии, выточка, отверстия у преса, резкие переходы изолировать асбестом, глиной
низкая твердость	Пониженная температура закалки, недостаточная выдержка, малая скорость охлаждения	Измерение твердости	Нормализация или отжиг с повторной закалкой с соблюдением нормального режима

Характеристика	Основные причины брака	Метод определения	Способ предупреждения и устранения брака
мелкие пятна (пятнистая твердость)	Неравномерное охлаждение, местное обезуглероживание, неравномерность пеллины зерна	Измерение твердости	Нормализация с последующей закалкой, обеспечивающей более равномерное охлаждение. Брак является неустраняемым при обезуглероживании
охрупчивание	Низкие значения ударной вязкости в результате крупнозернистого излома. Значительное превышение температуры закалилки или длительная выдержка	Испытание на ударную вязкость	Проведение повторной закалки с требуемой температурой и выдержкой
обезуглероживание	Значительное снижение твердости на поверхности закаленных изделий. Окислительная атмосфера и длительная выдержка	Испытания на микро- и макротвердость	Обработка с защитной средой или шлифованием. При значительной глубине обезуглероживания — большие припуски на шлифование, брак неустраняем
Брак при отпуске конструкционной стали; недоотпуск	Повышенная твердость и низкие пластические свойства. Пониженная температура или недостаточная выдержка	Испытания на твердость, растяжение и удар	Повторный отпуск при нормальном режиме
переотпуск	Пониженная твердость, низкое временное сопротивление и предел упругости. Завышение температуры	Испытания на твердость и растяжение	Отжиг, нормализация или высокий отпуск с последующим закалкой и отпуском при требуемой температуре
отпускная хрупкость	Пониженная ударная вязкость. Не выдержана температура отпуска	Испытания на ударную вязкость	Правильный выбор температуры и скорости охлаждения при отпуске. Применение сталей, содержащих W , Mn , P .

Зависимость глубины закаленного слоя от частоты тока

Таблица 43

Частота, Гц	Рациональная глубина закалилки, мм	Минимальный диаметр при нагреве, мм	
		полнотелый	заполненный
1000	3—17	22	14
2500	2—11	14	18
8000	1—6	8	16
70000	0,5—3	2,5	5

Полученный упрочненный слой обладает мелкокристаллической мартенситной или троостомартенситной структурой с плавным переходом к незакаленной части детали, что дает высокую прочность поверхностного слоя с остаточными сжимающими напряжениями. При этом способность материала сопротивляться переменным нагрузкам повышается.

При использовании ТВЧ основным параметром, определяющим процесс, является частота тока.

Глубина нагрева закаленного слоя вследствие теплопроводности больше глубины проникновения тока. В зависимости от требуемой глубины закаленного слоя выбирают частоту тока (табл. 43).

На свойства детали, закаленной с применением нагрева ТВЧ, большое влияние оказывает глубина закаленного слоя, которая изменяется от поверхности до полумартенситной зоны [14].

Оптимальные значения пределов выносливости и пропорциональности достигаются при отношении площади слоя к площади сердцевины, равном единице (рис. 35).

В связи с небольшим временем нагрева и быстрым охлаждением (10—100 с), поверхностный слой приобретает большую твердость по сравнению с объемной закалкой, при этом полностью отсутствует обезуглероживание поверхности. Высоко-

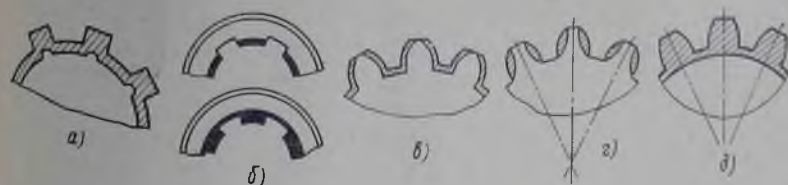


Рис. 35. Форма закаленного слоя при нагреве ТВЧ для наиболее распространенных деталей горных машин:

а — шлицевой вал; б — шлицевая втулка; в — зубчатое колесо с $m \geq 6$, закалка зубьев по контуру; г — зубчатое колесо с $m \geq 6$, закалка только рабочих поверхностей зубьев; д — зубчатое колесо с $m \leq 5$, сквозная закалка зубьев

Таблица 44
Состав сталей органической и регламентированной прокаливаемости

Сталь	C, %	Другие элементы, %						
		Mn	Si	Cr	Ni	Ti	P	S
55ГП 110ПП	0,55—0,63 1,05—1,15	0,2 —	0,3 —	0,15 —	0,25 0,025	— —	0,04 0,03	0,04 0,03
47ГТ	0,44—0,50	0,9—1,2	0,17	0,25	0,25	0,06—0,12	—	—
45Г	—	0,7—1,0	0,17—0,37	0,15	—	—	—	—

Таблица 45

Рекомендуемая глубина закаленного слоя шлицевых валов

Диаметр вала, мм	Глубина закаленного слоя, мм
До 40	0,5—1,5
41—80	0,6—2,0
81—250	2,0—3,0

Таблица 46

Рекомендуемая глубина закаленного слоя шлицевых втулок

Диаметр отверстия, мм	Длина шлицов, мм	Минимальная толщина втулки, мм	Глубина закаленного слоя, мм
81—200	До 400	10	0,5—2,0
20—30	До 50	—	1,0—2,0
31—60	До 100	—	1,0—2,0
61—80	До 200	20	1,5—2,0
81—200	До 500	—	2,0—3,0

частотная закалка способствует смещению порога хладоломкости в область более низких температур.

Состав специальных марок сталей для обработки с нагревом ТВЧ приведен в табл. 44.

Удельный расход мощности на установках для нагрева ТВЧ ЛГ-60 ЛНЗ-207 составляет 1—2 кВт/см².

Рекомендуемая глубина закаленного слоя при нагреве ТВЧ для наиболее распространенных деталей

Таблица 47
Рекомендуемая глубина закаленного слоя зубьев зубчатых колес в зависимости от модуля

Модуль, мм	Глубина закаленного слоя, мм
6—7	1,0—1,5
8—9	1,5—2,5
10 и выше	2,0—3,0

горных машин приведена в табл. 45, 46 и 47.

В горном машиностроении нагрев ТВЧ используют не только для закалки, но также и для отпуска сварных соединений. Нами был использован местный отпуск сварных соединений звеньев круговых тяговых цепей для повышения их износостойкости и долговечности. Режимы термической обработки цепей приведены в табл. 48.

Местный отпуск прямолинейных уча-

Таблица 48
Режимы термической обработки цепей

Режимы термической обработки	Твердость НВС участка зацепов цепи	
	криволинейных	прямолинейных
Закалка 900° С; отпуск 400—400° С (заводская цепь)	44—47	30—33
Закалка 900° С в соленую воду; низкий отпуск 200° С; местный отпуск с нагревом ТВЧ прямолинейных участков	39—44	27—29
Нитроцементация 9 ч; отпуск 180° С 2 ч; местный отпуск с нагревом ТВЧ прямолинейных участков	45—47	35—37
Объемная закалка 900° С в соленую воду, местный отпуск с нагревом ТВЧ прямолинейных участков	44—45	32—35

стков звеньев цепей проводили с использованием машинного генератора ПВВ-8000-100 со сквозным прогревом током частотой 8000 Гц в многовитковом индукторе конструкции ЗИЛ [40].

Изучение влияния местного отпуска с нагревом ТВЧ на структуру стали, подвергнутой объемной закалке, показало, что структура после отпуска с нагревом ТВЧ характеризуется большой равномерностью и мелкодисперсностью ферритно-цементитной смеси. Структуры сварного шва и околошовной зоны мало отличаются друг от друга и представляют собой зернистый сорбит.

В результате проведенной термической обработки (объемная закалка и местный отпуск с нагревом ТВЧ) получена эпюра твердости, которая в значительной степени обеспечивает выравнивание напряженного состояния звена цепи во время работы. Как структурное, так и напряженное состояние материала соответствуют требованиям, которые предъявляются к тяговому круглозвенным цепям, — высокая прочность, минимальные остаточные удлинения при достаточной ударной вязкости. Мартенсит по площадкам контактирования обеспечит высокую износостойкость, а рациональное распределение напряжений — высокую эксплуатационную прочность.

Стендовые испытания круглозвенных цепей (18×64 мм) для получения сравнительных данных по износостойкости цепей, работающих в условиях, имитирующих шахтные, были проведены в лаборатории испытания цепей ВНИИПТуглемаша по разработанной там же методике. В качестве оценки сравнительной износостойкости цепей был принят износ в шарнирах звеньев, оцениваемый увеличением шага цепи по зацеплению.

Для проведения экспериментальных работ был использован испытательный стенд ИЦ-30 конструкции ВНИИПТуглемаша. Опытные образцы испытывали в одном контуре с заводской

цепью. Режим работы стенда следующий: абразивное загрязнение — влажный уголь 80% + песок 20%; натяжение цепи 1500 даН; скорость движения цепи 0,53 м/с.

До начала испытаний через 5 ч работы стенда и далее через каждые 50 ч работы измеряли наружную длину звена А по зацеплению T_d . Час работы стенда соответствовал 50 ч работы скребкового конвейера длиной 150 м. Проведенные испытания в течение 285 ч соответствуют 14 200 ч работы скребкового конвейера длиной 150 м со скоростью движения цепи 0,8 м/с.

В результате установлено, что износостойкость цепей, подвергнутых объемной закалке и местному отпуску с нагревом ТВЧ прямолинейных участков, повысилась на 26% по сравнению с заводскими цепями. Замеры наружной длины звеньев А показали, что их величина практически оставалась постоянной, т. е. вытяжки не наблюдалось.

Так как для надежной работы скребковых цепей необходим целый комплекс свойств, то были также проведены натурные испытания этих же цепей на усталостную долговечность и статическую прочность.

Испытания на усталостную долговечность были проведены на машине МУА-100 при напряжениях цикла 25—127 МН/м² и частоте нагружений 640 цикл/мин. По сравнению с цепями, подвергнутыми упрочнению по заводской технологии, их усталостная долговечность на 70% выше.

Испытания на статическую прочность проводили на разрывной машине типа ГМС-50 согласно методике испытаний ОТУ 24-7-097—67. Снижение статической прочности не наблюдалось: она оставалась на уровне 0,42—0,43 МН до разрушения.

Анализируя полученные данные по износостойкости, статической прочности и усталостной долговечности, установлено, что объемная закалка и местный отпуск с нагревом ТВЧ прямолинейных участков является достаточно простым и эффективным способом упрочнения круглозвенных сварных цепей.

6.1. Классификация видов наплавки и выбор наплавочных материалов

Наплавка — один из наиболее эффективных способов повышения долговечности деталей машины. Она применяется для упрочнения поверхностей новых деталей (зубьев ковшей, режущих кромок и др.), а также для восстановления изношенных поверхностей. В ряде случаев это исключает необходимость использования легированных сталей для изготовления стойких деталей. В табл. 49 приведены наиболее распространенные способы наплавки деталей горных машин.

Производительность наплавки многоэлектродной лентой 10—30 кг/ч, а лежачим электродом (пластинчатым) до 12 кг/ч. Качество наплавленного слоя в значительной степени зависит от материала электрода и его покрытия, режима процесса, уровня подготовительных работ, технологии наплавки.

Режим наплавки устанавливают в зависимости от содержания углерода и легирующих элементов в материале детали. Все стали условно в зависимости от содержания углерода подразделяют на следующие группы: имеющие хорошую свариваемость ($<0,3\%$ С), удовлетворительную свариваемость (0,3—0,42% С), ограниченную свариваемость (0,42—0,55% С), плохую свариваемость ($>0,55\%$ С).

При выборе наплавочных материалов стремятся к тому, чтобы восстанавливаемые поверхности имели прочностные свойства первоначальные или выше первоначальных. В соответствии с ГОСТ 9466—75 электроды подразделяются по назначению: для дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами; для дуговой сварки конструкционных сталей; для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. В качестве электродов используются угольные или металлические стержни различных диаметров. Выпускают металлические электроды диаметром от 0,3 до 12 мм и длиной 450 мм (ГОСТ 2246—70). Электроды изготавливают из мало- и среднеуглеродистых сталей. Чаще применяют электроды из малоуглеродистой проволоки СВ-08, СВ-08А, СВ-10 и др., легированной марганцем, титаном и т. д. Покрытия электродов могут быть стабилизирующими (80—85% мела и 20—15% жидкого стекла) и защитными, которые в зависимости от составляющих их элементов делятся на фтористокальциевые, рутиловые, органические или газозащитные. Около 80% выпускаемых электродов имеют рутиловые по-

Способы наплавки деталей горных машин

Таблица 49

Наплавка	Толщина наплавляемого слоя, мм	Твердость наплавляемого слоя HRC, не более	Производительность процесса наплавки, кг/ч	Область применения наплавки
Ручная электродуговая	1,0—1,2	65	0,8—3,0	Упрочнение, восстановление деталей из углеродистых и легированных сталей всех марок, черных и цветных металлов, твердых сплавов, работающих при умеренных нагрузках
Электродуговая под слоем флюса	1,5—20,0	65	2,5—30,0	Упрочнение, восстановление плоских, цилиндрических, конических поверхностей деталей из черных и цветных металлов, работающих при любых нагрузках
Электродуговая в среде защитных газов	0,5—2,5	55	2,8—4,0	Упрочнение, восстановление тонкостенных деталей, внутренних поверхностей, деталей сложной конфигурации из черных и цветных металлов
Вибродуговая	0,5—2,5	65	1,3—2,3	Восстановление цилиндрических поверхностей деталей диаметром 15—80 мм, не испытывающих больших циклических нагрузок
Газовая	1,0—5,0	37	0,6—1,5	Восстановление поверхностей деталей сложной конфигурации из черных и цветных металлов
Электрошлаковая	Любая	55	12,0—50,0	Наплавка деталей из черных и цветных металлов
Плазменная	От 0,1 до нескольких мм	—	До 27	То же
Индукционная	До 2,5	—	1,0—20,0	Наплавка плоских и цилиндрических поверхностей деталей из черных и цветных металлов
Композиционная	1,0—10,0	72	3,5—10,0	Восстановление цилиндрических деталей, подвергаемых абразивному износу

крытия. Из фтористокальциевых покрытий получали распространение покрытия типа УОНИ-13, применяемые при наплавке легированных сталей.

Для восстановления деталей горных машин могут быть использованы электроды для обычной или износостойкой наплавки легированных сталей и чугунов, твердых сплавов, порошковая проволока и лента.

Восстановление деталей наплавкой проводят главным образом до номинальных размеров, в результате чего запас прочности деталей обычно не снижается. Технологический процесс наплавки в общем случае предусматривает очистку поверхностей от ржавчины, окалины, масла, грязи; наплавку и при необходимости последующую механическую обработку.

Детали с закаленными поверхностями перед наплавкой предварительно отжигают при температуре 750—900° С с последующим охлаждением. В результате этого уменьшается твердость стали, предел упругости и сопротивление разрыву, но увеличивается вязкость. Детали сложной конфигурации в процессе наплавки рекомендуется подвергать нагреву. Температура нагрева зависит от содержания углерода в стали наплавляемой детали. Так, при 0,4—0,8% С температура нагрева должна быть 250—400° С.

Таблица 50

Электроды для сварки и наплавки деталей машин [44]

Марка электрода	Тип электрода (ГОСТ 9467—75)	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Материал деталей, для которых рекомендуются электроды
ЦМ-7	Э42	10,6	Малоуглеродистые и низколегированные стали
ОЗЦ-1	Э42	9,0—9,5	
ОМА-2	Э42	9,0—11,0	
АНО-1	Э42	16,0—18,0	
ОЗС-3	Э46	16,0—18,0	
ОЗС-4	Э46	8,5—9,5	
МР-3	Э46	8,5—9,4	
АЩ-2	Э42	10,5	Углеродистые и низколегированные стали
УОНИ-13/45	Э42А	8,0—9,0	
УОНИ-13/55	Э50А	8,0—9,0	
УОНИ-13/65	Э60	8,0—9,0	
ДСК-50	Э50А	10,0	
УП-1/55	Э50А	10,0	
ЦЛ-18	Э85	8,5	Углеродистые и легированные стали повышенной прочности
ЦЛ-19-63	Э100	—	
УОНИ-13/85	Э85	10,0	
ВИ-10-6	Э100	10,0	

Таблица 51
Режимы наплавки деталей [44]

Толщина стенки детали, мм	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А
До 1	1,6—2	25—35
> 2	2—3	50—80
> 3	3	70—120
> 5	4—5	130—180
Св. 5	5—6	180—240

В зависимости от степени механизации процесса электрическую дуговую наплавку подразделяют на ручную, полуавтоматическую и автоматическую.

Ручная дуговая наплавка обеспечивает высокую производительность процесса, удовлетворительные механические свойства наплавленного металла. Вместе с тем в наплавленном слое наблюдаются включения и трещины, неравномерное распределение механических свойств и химического состава, большие потери на угар и разбрызгивание.

В табл. 50 приведены марки электродов, применяемых для ручной сварки и наплавки деталей горных машин, которые работают при умеренных нагрузках.

Рекомендуемое соотношение между толщиной наплавляемого слоя, диаметром электрода и силой тока дано в табл. 51.

Наплавки средней и высокой твердости на деталях из углеродистых и среднелегированных сталей работающих в условиях абразивного износа и умеренных ударов, могут быть получены с использованием электродов марок ОЗН-300, ОЗН-350, ОЗН-400, Т-590, Т-620 и др. (табл. 52, 53).

Таблица 52

Электроды для наплавки деталей средней и высокой твердости [52]

Марка электрода	Твердость наплавки HRC	Область применения электродов
ОЗН-300	27—36	Детали из углеродистых и легированных сталей 40, 45, 30X, 40X, 45X, Г13 (оси, валы и др.)
ОЗН-350	30—40	—
ОЗН-400	39—47	Стальные и чугунные быстроизнашивающиеся детали, подверженные абразивному износу (зубья ковшей, режущие кромки детали рудоразмольного и обогащательного оборудования и др.)
Т-590 Т-620	58—62 55—60	
ЦН-5	35—40	Детали из стали Г13, 110Г13Л (валы, оси и др.)
ЭН-60 ЦН-1 ЦН-4	55—60 40—45 45—50	Шлицы, шпоночные пазы, зубья шестерен и др.

Химический состав электродов

Таблица 53

Марка электрода	Содержание элементов, %			
	C	Mn	Ti	V
ОЗН-250	0,13—0,16	2,3—2,6	Следы	Следы
ОЗН-300	0,13—0,17	3,0—3,5	Следы	Следы
ОЗН-400	0,18—0,22	4,0—4,6	Следы	Следы

Поверхности, наплавленные твердыми сплавами (табл. 54), отличаются высокой твердостью и износостойкостью. Для наплавки применяют литые твердые сплавы (сормайт, стеллит, ПГ-ХН80), представляющие собой многокомпонентные сплавы, а также зернистые и порошковые смеси (вокар, сталинит, боридная смесь); являющиеся механической смесью металлов, которые при наплавке образуют твердые растворы их карбидов. Литые твердые сплавы изготовляют в виде прутков диаметром 3—8 мм или пластин.

Особо высокую твердость наплавленного слоя обеспечивает наплавка поверхностей твердыми сплавами типа сормайт № 1 и № 2, сталинит. Сормайт № 1 используется в ремонтном производстве для наплавки стальных деталей, работающих с умеренными ударами в условиях абразивного износа. Твердость наплавленного сормайтом № 2 слоя может быть повышена до HRC 56—62 после закалки. Наплавку сормайтом можно проводить газовой или электродуговой сваркой, постоянным или переменным током при короткой дуге. При постоянном токе принимается обратная полярность и толщина наплавляемого слоя не превышает 4 мм. В зависимости от состава покрытия электрода, отлитого из сормайта, определяется температура подогрева детали перед наплавкой и режим наплавки.

При покрытии электрода обычным составом [ферромарганец 6%, феррохром 10%, графит 4%, плавиковый шпат 30%, мрамор 50% жидкое стекло (к сумме сухих веществ) 30—35%] температура наплавляемой детали должна быть 600—700° С.

Для наплавки быстроизнашивающихся стальных и чугунных деталей, работающих при умеренных ударных нагрузках, но в условиях интенсивного абразивного износа, можно применять сталинит. Наплавку проводят постоянным током прямой полярности. При использовании угольного электрода диаметром 10—12 мм длина дуги при наплавке составляет 4—8 мм, а сила тока 120—140 А. Толщина наносимого слоя достигает 3—4 мм. В качестве флюса используют буру.

Кроме дуговой сварки и наплавки единичным электродом применяют сварку и наплавку пучком электродов, лежащим пластинчатым и трубчатым электродами.

Таблица 54

Характеристика твердых сплавов

Сплав	Содержание элементов, %										Твердость наплавленного слоя НВ
	Mn	Cr	C	W	B	Si	Co	Ni	Fe		
Сормайт № 1	1,5	25-31	2,5-3,3	—	—	2,8-4,2	—	3-5	Осталь- ное	49-54	
Сормайт № 2	1,0	13-17,5	1,5-2,0	—	—	1,5-2,2	—	1,3-2,2	Осталь- ное	40-45	
Стеллит В2К	1,0	27-33	1,8-2,5	13-17	—	1-2	47-53	До 2	До 2	46-48	
Стеллит В3К	—	28-32	1,0-1,5	4-5	—	2,5	58-62	До 2	До 2	42-43	
Сталлит	13-17	16-20	8-10	—	—	До 3	—	—	Осталь- ное	51-57	
Вокар	—	—	9-10	До 85	—	Не более 3	—	—	До 2	85-90	
Боридная смесь ПГ-ХН80	—	35 12-17	0,12 0,4-1,0	—	7,65 2-4	—	—	—	57,5 До 5	82-84 40-60	

Таблица 55

Химический состав плавящихся флюсов

Марка флюса	Содержание компонентов, %									
	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	K ₂ O и Na ₂ O	FeO	S	P
АН-1	36-38	15,3-16,5	11,3-12,7	2-3	13-15	16-18	—	—	—	—
АН-10	20-23	29,5-33,5	3-7	До 1,2	19-21	18-24	0,4-0,6	—	0,15	0,20
АН-20	22	До 0,5	5,0	11	30	29	2,7	1,0	0,08	0,05
АН-30	3	До 0,5	18,0	14,5	41,5	21	—	1,0	0,08	0,05
АН-348	42,4-45	31,5-35,5	6,5-9,5	0,7-3,5	До 2,5	6,0-7,5	—	До 1,5	0,15	0,15
АН-348-А	41-44	34-38	6,5	5,75	4,5	4-5,5	—	До 1,5	0,15	0,12
ОСП-45	38-44	38-47	6,5	2,5	4,5	6-9	—	До 1,5	0,15	0,15

Для ручной сварки и наплавки используют сварочные трансформаторы ТСП-1, ТС-300, ТД-300, СТШ-500, СТП-500, СТН-500, ВКС-500; сварочные выпрямители ВД-101, ВД-301, ВСС-300-3, и др.

При механизированной наплавке деталей под слоем флюса в результате увеличения скорости наплавки, плотности тока, коэффициента наплавки и дуги достигается большая производительность, высокое качество шва, экономия материала и энергии.

Применяемые флюсы в зависимости от способа изготовления делятся на плавящиеся и неплавящиеся (керамические). Большее применение на ремонтных фазах горных предприятий получили плавящиеся флюсы (табл. 55).

Флюсы АН-348-А и ОСП-45 используют для наплавки деталей углеродистой проволокой (до 0,6% С) и некоторыми марками легированной проволоки. Наплавленный с помощью флюса АН-348-А слой имеет твердость НВ 380. Флюс АН-30 применяют для наплавки деталей легированной проволокой с содержанием кремния более 0,5% или порошковой проволокой.

Керамические флюсы (табл. 56) используют для наплавки высоколегированных сталей с целью получения высокой износостойкости и других свойств.

Для наплавки под слоем флюса используют сплошную или порошковую проволоку или ленту. Сварку выполняют постоянным током обратной полярности или переменным одно- и трехфазным. В табл. 57, 58 и 59 приведены марки сплошных сварочных и наплавочных проволок, которые могут быть применены для наплавки деталей горных машин.

Для наплавки деталей под слоем флюса сплошной проволокой применяют автоматы АБС, А-874С, АДС-500, А-580М, АДС-1000-2 и др., а также полуавтоматы ПШ-5, ПШ-54, А-765, ПДШР-500, ПДШМ-500 и др. Источники питания те же, что и для ручной дуговой наплавки.

Таблица 56

Химический состав керамических флюсов

Марка флюса	Содержание компонентов, %							
	Мрамор	Плавиковый шпат	Диоксид титана	Кварцевый песок	Феррохром	Ферромарганец	Графит	Ферросилиций
ВКС-19	—	7	—	30	—	—	—	7,0
КС-30ХСНА	50,3	20	15	—	—	1,7	—	4,2
КС-С	35,8	20	5	—	2	0,5	—	4,7
КС-Х12Т	43,9	6	6	—	24	—	1,4	3,0
КС-Х12М	41,5	6	6	—	24	—	1,1	1,1
КС-Х14Р	39,5	10	—	—	25	—	0,5	0,5
							3,0	3,0

Химический состав наплавочной проволоки [43]

Проволока	Содержание элементов, %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P
не более						
Углеродистая:						
НП-30	0,27—0,35	0,5—0,8	0,17—0,37	До 0,25	0,25	0,04
НП-40	0,37—0,45	0,5—0,8	0,17—0,37	» 0,25	0,25	0,04
НП-65	0,60—0,70	0,5—0,8	0,17—0,37	» 0,25	0,25	0,04
НП-40Г	0,35—0,45	0,7—0,1	0,17—0,37	» 0,25	0,25	0,04
НП-65Г	0,6—0,70	0,9—1,2	0,17—0,37	» 0,25	0,25	0,04
Легированная:						
НП-30ХЗВД	0,27—0,35	0,3—0,6	0,17—0,37	2,8—3,3	0,50	0,04
НП-30ХГСА	0,27—0,35	0,8—1,1	0,9—1,2	0,8—1,1	0,40	0,04
НП-40ХЗГ2ВФ	0,35—0,45	1,3—1,8	0,4—0,7	3,3—3,8	0,40	0,04
НП-50ХФА	0,46—0,54	0,5—0,8	0,17—0,37	0,8—1,1	0,40	0,035
Высоколегированная:						
НП-Х15Н60	≤ 0,15	До 0,15	До 1,0	15—18	55—61	0,035
НП-ГВА	1,0—1,2	12,5—14,5	» 0,4	До 0,6	0,6	0,035
НП-4Х13	0,35—0,45	До 0,6	» 0,6	12—14	0,6	0,035

Таблица 58

Химический состав сварочной проволоки

Проволока	Содержание элементов, %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P
не более						
Углеродистая:						
СВ-08	До 0,10	0,35—0,60	До 0,03	0,15	0,30	0,04
СВ-08К	» 0,10	0,35—0,60	» 0,03	0,10	0,25	0,03
СВ-08ГА	» 0,10	0,80—1,10	» 0,03	0,10	0,25	0,03
СВ-10ГА	» 0,12	1,10—1,40	» 0,03	0,20	0,30	0,03
СВ-10Г2	» 0,12	1,50—1,90	» 0,03	0,20	0,30	0,04
Легированная:						
СВ-08ГС	До 0,10	1,40—1,70	0,65—0,85	0,20	0,25	0,03
СВ-12ГС	» 0,14	0,80—1,10	0,60—0,90	0,20	0,30	0,03
СВ-12Г2Х	0,10—0,15	1,60—1,90	До 0,30	1,20—1,50	0,25	0,03
СВ-10МХ	До 0,12	0,40—0,70	0,12—0,35	0,45—0,65	0,30	0,03
СВ-10ХГ2С	0,06—0,12	1,70—2,10	0,70—0,95	0,70—1,0	0,25	0,03
СВ-10Г0МТ	0,08—0,14	1,00—1,30	0,40—0,70	До 0,30	0,30	0,03
СВ-18ХГСА	0,15—0,22	0,80—1,10	0,90—1,20	0,80—1,10	0,30	0,03
Высоколегированная:						
СВ-02Х19Н9	До 0,04	1,0—2,0	0,50—1,0	18,0—20,0	8,0—10,0	0,025
СВ-06Х14	» 0,08	0,30—0,70	0,30—0,70	13,0—15,0	0,60	0,03

Порошкообразные проволоки для наплавочных работ

Наплавочная проволока	Содержание элементов, %								Твердость наплавленного металла HRC
	C	Cr	Mn	Si	Ti	P	S	Mo	
ПП-13А	0,9—1,2	—	14—16	0,6	—	0,03	0,04	—	—
ПП-У 15Х12М-0	1,4—1,7	11—12,5	0,6	0,6	0,1	—	—	0,4—0,8	40—42
ПП-АН124	2,2—2,6	16—18	0,4—0,6	0,4—0,6	0,3—0,4	—	—	—	40—44
ПП-АН103	1,8	12,0	0,6	0,6	—	—	—	0,8	40—44
ПП-АН104	1,8	12,0	0,6	0,6	—	—	—	—	40—44
ПП-АН101	3,0	25,0	0,6	3,5	—	—	—	—	48—55
ПП-АН125	2,0	15,0	1,0	1,5	0,3	—	—	—	52—60
ПП-АН120	0,18	1,8	1,8	0,6	—	—	—	—	37—42
ПП-АН170	0,7	20,0	0,6	0,6	0,2	—	—	—	60—65

При наплавке порошковая проволока и легирующие элементы переходят в сварную ванну и в результате этого наплавленный металл содержит до 30—35% легирующих элементов. Для наплавки порошковой проволокой могут быть использованы: автоматы АМ-580М, А-874Н и полуавтоматы А-1197, А-1030, А-1135 и др. Скорость наплавки автоматами достигает 116 м/ч.

Для механизированной сварки деталей из малоуглеродистых и низколегированных сталей в нижнем и наклонном положениях открытой дугой широко применяют порошковую проволоку марки ПП-АН3. Механические свойства шва, выполненного этой проволокой: временное сопротивление 500 МН/м², относительное удлинение 20%, ударная вязкость 130 МН/см², угол загиба 150°. Наплавку порошковой проволокой выполняют открытой дугой или с дополнительной защитой (газом или флюсом). Для деталей, работающих в условиях абразивного износа и значительных ударных нагрузках, применяют проволоку ПП-АН105, ПП-АН124 и др. Краткая характеристика порошковых проволок приведена в табл. 59.

В табл. 60 дан перечень деталей конусных дробилок, восстанавливаемых наплавкой.

Автоматическую наплавку в среде углекислого газа применяют для деталей из мало- и среднеуглеродистых сталей и чугуна диаметром до 100 мм при линейном износе до 2 мм. Наплавленный слой отличается высокой твердостью, плотностью и сравнительно низкими механическими свойствами. Наплавку проводят постоянным током обратной полярности автоматами

Таблица 60

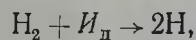
Детали конусных дробилок, восстанавливаемые наплавкой

Деталь	Материал	Марка наплавляемого металла или проволока	Тип дробилок
Станина, опорное кольцо, корпус регулирующего кольца, корпус чаши	35Л	ПП-АН3	КСД-2200, КМД-2200
Корпус эксцентрика	35Л	30ХГСА	КСД-2200
Корпус эксцентрика	Чугун ВЧ-45-5	18ХГСА	КМД-2200
Втулки эксцентрика (ци- линдрическая, коническая)	Ст3	ПП Бр.ОС 8—21	КСД, КМД, КМДТ
Распределительная тарель	35Л	ЭН-50, 13КН/ЛИВТ	КСД, КМД
Колпак траверсы	35Л	ОЗН-250, ОЗН-300	ККД
Футеровка конуса	110Г13Л	ОЗН-400, К-2-55 ПП-Г13Н4-0 (ПП-АН105)	КСД-2200

зов их смесей. Температура газовой струи с увеличением тока повышается и может достигать 18 000° С, что открывает большие возможности при восстановлении деталей.

6.2. Плазменная обработка

Плазменной обработкой называют обработку материала высокотемпературным газовым потоком, который получается в специальных устройствах — плазмотронах. Плазмотрон имеет два основных узла — катодный и анодный. При подаче напряжения между анодом и катодом зажигается электрическая дуга, которая нагревает подающийся в разрядную камеру рабочий газ до $(3-10)10^3$ К [8]. При этом газ превращается в плазму, которая характеризуется наличием нейтральных атомов, а также положительных ионов и электронов, причем концентрация ионов и электронов такова, что суммарный заряд такого газа равен нулю. Если рабочий газ двухатомный, то происходят следующие процессы. При температуре около 1000 К молекулярные связи разрушаются и газ переходит в атомарное состояние. Температура этого процесса, называемого диссоциацией, определяется давлением и родом газа. Происходящие при этом изменения описываются для водорода, например, уравнением



где I_d — энергия диссоциации, эВ (для водорода $I_d = 4,477$ эВ; для азота $I_d = 9,76$ эВ).

Наплавку производят по комбинированной схеме; неплавящийся вольфрамовый электрод образует дугу с деталью и водоохлаждаемым каналом. Для этого применяют установки типа УМП-4-64 или УМП-5-68. Источником питания могут служить сварочные преобразователи типа ПСО-500 или выпрямители ИПН-160/600. Выпускают плазменные горелки нескольких типов. Кроме гелия и аргона в качестве плазмообразующих газов могут быть применены водород, азот, кислород и воздух. При плазменной наплавке используют те же материалы, что и при электродуговой наплавке. В табл. 62 приведены марки порошков, которые дают наилучшие результаты наплавки.

Содержание в порошках бора и кремния позволяет получать тонкослойную (0,4 мм), твердую и износостойкую наплавку. Вместо порошка может быть использована сварочная проволока. Легкоплавкие металлы при плазменной наплавке можно наносить на более тугоплавкие (например, медь на сталь). В качестве плазмообразующих газов можно использовать одно-, двух- и многоатомные материалы. За счет плазмообразующего газа можно регулировать количество энергии, выделяющейся в дуге, и плотность тока в дуге. Одноатомные плазменные среды, например аргон, имеет низкую напряженность поля, в результа-

Химический состав порошков для плазменной наплавки

Таблица 62

Порошок	Содержание элементов, %					
	C	Cr	Si	B	Fe	Ni
ФБХ-6-2	3,5—5,5	32—37	1,0—2,5	1,5—2,5	Остальное	Остальное
ПГ-ХН80СР2	0,3—0,6	12—15	1,5—3,0	1,5—2,5	5	Остальное
ПГ-ХН80СР3	0,4—0,8	12—16	2,5—4,5	2,0—3,0	5	Остальное
ПГ-ХН80СР4	0,6—1,0	13—17	3,0—5,0	2,5—4,0	5	Остальное

те чего при одной и той же силе тока выделяется наименьшее количество теплоты [48].

Двухатомные газы, такие, как азот, имеют высокие теплопроводность, теплоемкость и коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую. Использование азота затруднено тем, что наличие 1—2% O_2 в нем приводит к образованию окисей вольфрама и вольфрамовый катод быстро разрушается. Использование двухатомного кислорода в качестве плазмообразующего газа ограничено его взаимодействием с обрабатываемой поверхностью, в результате чего идет ее окисление. Для материала катода наиболее часто используют вольфрам, лантанированный, торированный и итрированный вольфрам. Основные свойства этих материалов приведены в табл. 63.

Плазменную обработку применяют наиболее часто при напылении и наплавке. Плазменную наплавку применяют как при получении рабочих поверхностей с особыми физико-механическими свойствами, так и для восстановления поверхностей при ремонте [50].

К наплавленному слою могут предъявляться самые разнообразные требования: жаростойкость, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д. Основным условием наплавки материалов является определение таких режимов наплавки, которые

Таблица 63

Свойства катода для плазмотронов

Материал катода	Сила тока, А	Диаметр катода, мм	Диаметр сопла, мм
Вольфрам	450	3	3
» лантанированный	800	4	6
» итрированный	1250	5	9
» торированный	1800	6	13

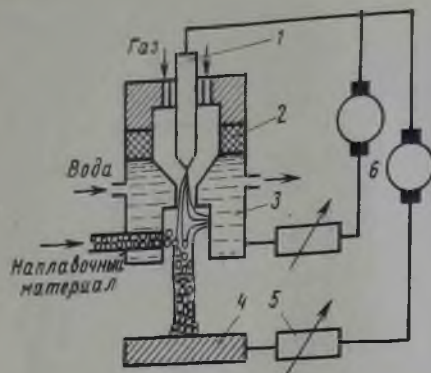


Рис. 36. Принципиальная схема плазменной наплавки:

1 — электрод; 2 — изотермическая прокладка; 3 — водоохлаждаемое сопло; 4 — изделие; 5 — балластное сопротивление; 6 — источник питания

обеспечивают минимальное проплавление основного металла и минимальную длительность контактирования твердой и жидкой фаз при наплавке. Эти режимы можно получить при наплавке порошком и токоведущей проволокой. При установлении режимов плазменной наплавки следует учитывать:

изменение состава металла наплавки по сравнению с наплавочными материалами из-за перехода элементов в основной металл;

образование зоны переменного состава между основным и наплавленным металлом;

наличие поля остаточных напряжений, которое вызвано теплофизическими и механическими свойствами металлов наплавки и основы.

В горном машиностроении процесс плазменной наплавки используют для повышения долговечности рештаков конвейеров. В этом случае не предъявляют жестких требований к расстоянию от плазмотрона до поверхности листа (рис. 36, 37). Для реализации процесса наплавки используют плазмотрон комбинированного действия. Небольшая толщина листа (3 мм) и выбранный для наплавки нелегированный чугунный порошок требуют быстрого местного нагрева и быстрого охлаждения.



Рис. 37. Установка для плазменной наплавки рештаков

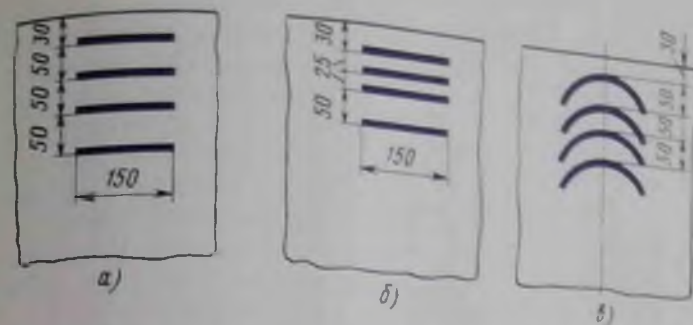


рис. 38. Форма и расположение полос при плазменной наплавке рештаков:

а — равномерное прямое; б — неравномерное прямое; в — равномерное криволинейное

Это достигается благодаря использованию концентрированного мощного источника тепла — плазменной дуги и быстрым перемещением горелки. Мощный источник тепла быстро разогревает поверхность листа до образования сварочной ванны, а быстрое продвижение позволяет получить высокую скорость охлаждения, предохранить лист от проплавления и прожогов. Упрочнением с использованием установки УМП-5, источника питания ВКМС-1000 и плазмообразующих газов аргона и азота наплавлена партия рештаков со стороны схода цепи с рештака. Три варианта геометрии наплавки показаны на рис. 38. Испытание конвейеров с рештаками, экспериментально упрочненными плазменной наплавкой, показало увеличение долговечности в 1,3 раза по сравнению с долговечностью рештаков, упрочненных наплавкой ТВЧ.

Народнохозяйственный экономический эффект от замены индукционной наплавки составит 1,9 р. на один рештак конвейера.

6.3. Хромирование и осталивание

Для деталей горных машин при изготовлении и ремонте широкое распространение получили различного вида электрохимические покрытия: хромирование, осталивание и др.

Хромовые покрытия обладают хорошей адгезией с основным металлом, высокой твердостью, коррозионной стойкостью и износостойкостью, но хромирование имеет и существенные недостатки: снижает усталостную прочность; покрытие плохо смазывается маслом и плохо прирабатывается; при толщине покрытия более 0,5 мм нередко происходит отслаивание хромового осадка; высокая стоимость процесса хромирования; большой расход электроэнергии.

В хромовых слоях толщиной 0,3 мм возникают остаточные напряжения до 400 МН/м² [53], под действием которых появля-

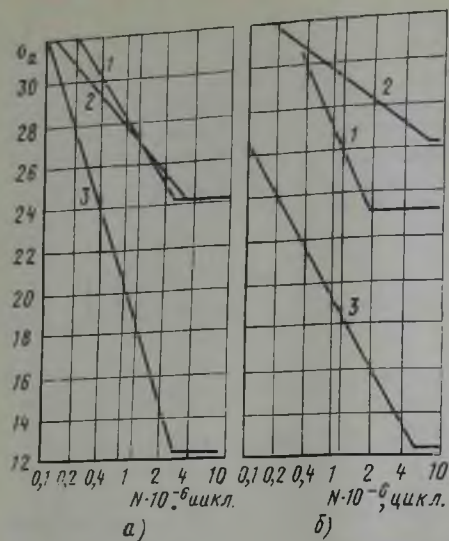


Рис. 39. Изменение предела выносливости при хромировании сталей:

а — 45; б — 40ХН; 1 — нехромированная; 2 — обкатанная перед хромированием; 3 — хромированная

тах для получения качественных $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 = 100 \pm 10$.

Используют концентрированные и разбавленные электролиты. Для концентрированных электролитов характерна высокая кроющая, но плохая рассеивающая способность и низкий выход по току. Для разбавленных электролитов — высокая рассеивающая способность, высокий выход по току (до 16%), высокая твердость осадков, но разбавленные электролиты имеют быстрое нарушение при электролизе $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$. Наиболее широко используют электролиты средней концентрации

Концентрацию CrO_3 в электролите вычисляют по плотности электролита, определяемому по ареометру. Продолжительность осаждения при известном значении выхода по току и требуемой толщине можно определить по формуле

$$\tau = 1314 \frac{\delta}{D_k \eta},$$

где δ — толщина, мкм; D_k — катодная плотность тока, А/дм²; η — выход по току, %.

Качественные осадки хрома получают при температурах 45—75°С и плотности тока 10—100 А/дм².

Меняя режим электролиза, можно получать различные осадки хрома: молочный, блестящий, серый. Молочные осадки имеют хорошую защитную способность, высокую пластичность

ются трещины, являющиеся очагом усталостных трещин. Некоторые исследователи считают, что понижение усталостной прочности связано с наводороживанием.

Предел выносливости при хромировании снижается на 13—80% в зависимости от толщины покрытия.

На рис. 39 показано изменение предела выносливости сталей 45 (а) и 40ХН (б).

Создание в поверхностном слое напряжений сжатия перед хромированием существенно расширяет возможности хромирования. Хромирование чаще всего проводят в сульфатных электролитах для получения качественных $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 =$

и невысокую твердость; блестящие покрытия — пониженную пластичность, сплошную сетку трещин и низкую защитную способность; серые осадки — высокую хрупкость.

Твердость хромовых покрытий колеблется от 5000 до 10 000 МН/м².

На рис. 40 показано влияние температуры и плотности тока на образование хромовых покрытий.

Для повышения износостойкости необходимо применять пористое хромирование. В этом случае осажденный хром подвергают анодному травлению. Увеличиваются число первоначальных трещин и их размеры. Режим анодного травления влияет на образование пористости: при повышении температуры травления увеличивается густота и уменьшается ширина каналов.

Наиболее часто используют режим анодного травления: 50—60°С, $D_k = 40 \dots 50$ А/дм², $\tau = 5—10$ мин в среднеконцентрированном электролите.

Известен способ получения покрытий хромом, обладающих и антикоррозионными свойствами и износостойкостью. Это двухслойное хромовое покрытие: молочный хром 20 мкм и блестящий хром 20—50 мкм.

Для интенсификации процесса хромирования используют саморегулирующиеся сульфатно-кремниевые электролиты, тетра-хроматный электролит, аноды свинца и сплавов свинца с сурьмой. Значительной интенсификации процесса добиваются в проточном электролите и при струйном хромировании.

Механическую обработку хромовых покрытий можно проводить шлифованием при обильном охлаждении кругами СМ-1-СМ2 с размером зерна 40—16.

Осталивание — получение электролитических осадков железа — дает возможность получить твердые и износостойкие покрытия.

Большой объем работ по изучению осталивания деталей горных машин выполнен Б. Н. Воробьевым на Рутченковском рудоремонтном заводе. Осталивание является более производительным процессом по сравнению с хромированием. Процесс идет в 6—12 раз быстрее хромирования.

Микротвердость полученных покрытий колеблется в пределах 1260—7250 МН/м² в зависимости от состава электролитов и режима ведения процесса.

Для осталивания чаще используются хлористые электролиты. Состав электролитов приведен в табл. 64.

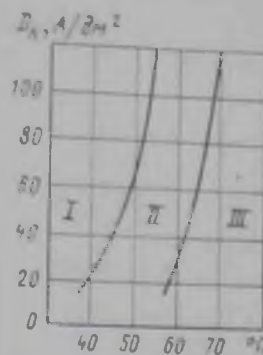


Рис. 40. Влияние температуры и плотности тока на образование хромовых покрытий: I — серые; II — блестящие; III — молочные

Таблица 64
Состав электролитов и режимы электролиза [12]

Электролиты	Состав	Режим электролиза	
		$D_{\text{к}}, \text{А/дм}^2$	$t, ^\circ\text{C}$
Хлористые: высококонцентрированные среднеконцентрированные малоконцентрированные Сульфатно-хлористые	600—800 г/л FeCl_2	20—40	60—80
	400—450 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		
	200—220 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	10—30	40—60
	200 г/л $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 200 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{pH}=1,0-1,1$		

Электролиты, применяемые для электролиза, агрессивны, поэтому для электролизных ванн следует использовать поливинилхлоридный пластикат.

Осталивание можно проводить как при переменном (температура может быть 18—25°C), так и при постоянном токе.

Физико-механические свойства покрытий существенно зависят от режимов подготовки поверхности перед осталиванием и режимов самого процесса осталивания.

Восстановление осталиванием различных деталей горных машин показывает целесообразность использования этого метода. При назначении метода осталивания следует иметь в виду, что наряду с повышением износостойкости происходит снижение предела выносливости на 30%.

Интенсифицировать процесс осталивания можно путем перемешивания электролита ультразвуком или использования анодно-струйного осаждения. Для выбора рациональных режимов осаждения следует применять методику плакирования эксперимента и уравнения, полученные Б. П. Воробьевым [12].

6.4. Электроискровое упрочнение

Электроискровое упрочнение — один из перспективных методов поверхностного упрочнения. Сущность его заключается в том, что под действием выпрямленного пульсирующего тока происходит перенос материала электрода на изделия. Материал электрода легирует металл детали, образуя износостойкий слой. Принципиальная схема электроискровой обработки приведена на рис. 41.

Обрабатываемая деталь служит катодом, упрочняющий электрод — анодом. При подводе упрочняющего электрода к детали возникает электрический разряд, металл нагревается

в точке до нескольких тысяч градусов Цельсия и быстро охлаждается. Частицы электрода диссоциируют в металл детали, образуя на ее поверхности упрочненный слой.

Упрочнение детали электроискровым методом проводят на установках, состоящих из генераторного агрегата или выпрямителя с конденсаторными батареями и вибрационного устройства.

Техническая характеристика установок для электроискрового упрочнения приведена в табл. 65.

При электроискровом упрочнении массу вещества, перешедшую с электрода на упрочняемую деталь, можно найти по формуле

$$M = KI t,$$

где M — масса перенесенного вещества; K — электроискровой эквивалент; I — сила тока; t — время.

При электроискровом упрочнении проходящий диффузионный процесс имеет ряд особенностей [49]. Во-первых, прогревается очень тонкий поверхностный слой. Во-вторых, этот слой очень сильно разогревается, поэтому образующийся диффузионный слой не глубок, но прочно связан с основным металлом.

Коэффициент глубины диффузионного слоя

$$D_0 = \frac{H_0}{H_1},$$

где H_0 — твердость слоя после электроискрового упрочнения; H_1 — твердость приращенного слоя.

Режимы электроискрового упрочнения в зависимости от получаемой шероховатости поверхности и толщины упрочненного слоя можно разделить на три группы (табл. 66).

Таблица 65
Техническая характеристика установки для электроискрового упрочнения

Страна-изготовитель	Напряжение, В	Максимальная сила тока, А	Емкость, мкФ
Англия СССР	90	1,2	116
	45	10	600
	220	1,5	120
ГДР Венгрия ЧССР	55	6	610
	40	8	400
	30, 60, 90		88

Режимы электронского упрочнения

Таблица 65

Режим	Напряжение холостого хода, В	Емкость, мкФ	Рабочая сила тока, А	Толщина слоя, мм	Параметр шероховатости, мкм
Грубый	50—80	30—60	0,25—0,8	900,01	$Ra=0,63...2,5$
Мягкий	80—120	60—150	1—2	0,01—0,04	$Rz=2...10$
Средний	150—220	150—350	2—3	0,04—0,09	$Rz \leq 80$

В мягком режиме рекомендуется проводить упрочнение мелкого инструмента — сверла до 6 мм, прорезные фрезы и т. д. В среднем режиме рекомендуется упрочнять инструмент среднего сечения: резцы 20×30 мм, фрезы диаметром 10—50 мм. В грубом режиме упрочняют инструмент, работающий на обдирке.

Структура материала, полученного электронским упрочнением, характеризуется наличием «белого» слоя (рис. 42) и подслоя, образованного вследствие диффузии.

На эксплуатационные свойства упрочненного слоя влияют физико-химические свойства упрочняющего электрода, электрический режим обработки, состояние поверхности изделия до упрочнения, продолжительность упрочнения; механические параметры процесса — вибрация, вращение детали, перемещение электрода.

Независимо от режима и рода «белого» слоя HRC 60—62, твердость подслоя на 5—7 единиц ниже.

Заряд энергии действует в течение 10^{-5} с на небольшой участок диаметром 0,3—0,5 мм, при этом на поверхности об-

Микротвердость упрочненных поверхностей при электронской обработке

Таблица 67

Место измерения микротвердости	Микротвердость Н
Упрочненный слой	841, 795, 713, 713, 713, 585, 713, 795, 643, 643
Граница между упрочненным слоем и основным металлом	585, 585, 508, 508, 508, 585, 508, 585, 508, 508
Основной металл: перлит	236, 236, 236, 229, 229, 229, 236, 229, 229, 236
феррит	210, 210, 176, 176, 176, 210, 176, 176, 210, 176
Упрочненный слой, наросты: белый нетравящий слой	891, 891, 841, 891, 891, 841, 891, 891, 891, 841
мелкодисперсная структура слоистая	643, 508, 585, 585, 585, 643, 643, 585, 564, 585
Граница	508, 508, 508, 487, 487, 487, 487, 508, 508, 487
Основной металл: перлит	229, 229, 236, 229, 236, 236, 229, 229, 236, 236
феррит	176, 210, 210, 176, 210, 210, 176, 176, 176, 210

Глубина электронского упрочнения

Таблица 68

№ упрочненного участка	Размеры упрочненного участка		Примечание
	Высота, мм	Длина, мм	
1	0,05	0,8	Упрочнение распространяется на глубину в основном металле, что видно по отпечатку микротвердости
2	0,08	0,9	
3	0,08	0,45	
4	0,07	1,0	
5	0,1	0,5	
1	0,25	0,8	Упрочнение в виде наростов, выступающих над поверхностью
2	0,13	0,25	
3	0,08	0,42	
4	0,2	0,45	С отпечатками микротвердости и белого нетравящего слоя глубиной 0,01 — 0,015 мм вблизи участка 6
5	0,12	0,5	
6	0,2	0,75	



Рис. 42. Макроструктура стали 35Л до электронского упрочнения (а) и микро- структура той же стали после электро- мского упрочнения (б)

разуется лунка. Чем интенсивней разряд, тем больше шероховатость поверхности. В большинстве случаев параметры шероховатости поверхности после различных режимов электроискрового упрочнения получаются следующими:

Грубый	$Rz=20 \dots 160$
Средний	$Rz=10 \dots 160$
Мягкий	$Ra=0,63 \dots 2,5$

Для уменьшения шероховатости поверхности упрочнение следует проводить на мягких режимах. Электроискровое упрочнение применяют в местах посадки подшипников в корпусных деталях горных машин. Нами проведено исследование твердости упрочненных мест под подшипники на приборе ПМГ-3 при нагрузке $P=50$ г. Полученные данные приведены в табл. 67 и 68.

6.5. Диффузионная металлизация

Процесс напыления покрытий состоит из трех стадий: 1) образование активных частиц напыляемого материала; 2) транспортирование напыляемого материала; 3) формирование покрытия. Характеристика каждой последующей стадии зависит от предыдущей, а условия формирования покрытия и его свойства — от фактического состояния основного материала.

Для напыления широкое применение нашли следующие источники высокотемпературных газовых струй: плазматрон, газоплазменная горелка и электродуговой металлизатор [18, 22]. Для получения высокотемпературной газовой струи в плазмотроне осуществляется ионизация одноатомных газов (аргона, гелия), диссоциация двухатомных (водорода, азота). Нейтральный газ, подающийся в плазмотрон, превращается в квазинейтральный ионизированный газ — плазму. Температура плазмы может достигать $50\,000^\circ\text{C}$ при содержании заряженных частиц $10^9\text{—}10^{10}$ с теплосодержанием $7000\text{—}30\,000$ ккал/кг.

Схема плазмотрона приведена на рис. 43.

Процесс плазменного напыления имеет ряд преимуществ.

1. Температура плазменной струи позволяет напылять любые материалы, которые не разлагаются и плавятся конгруэнтно.

2. Безокислительная среда позволяет напылять материалы без их окисления.

3. Высокая энергия и энтальпия плазменной струи позволяют получить покрытия с высокой плотностью и адгезионной прочностью с основным материалом.

4. Высокая производительность процесса.

5. Напыляемая поверхность не подвержена термическому влиянию из-за низкой температуры.

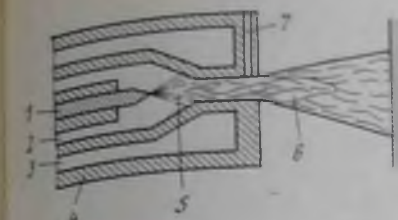


Рис. 43. Схема плазмотрона:
1 — катод; 2 — ввод плазмообразующих газов; 3 — ввод воды; 4 — анод; 5 — дуга; 6 — струя; 7 — ввод порошка

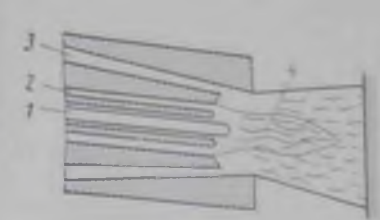


Рис. 44. Схема газовой горелки:
1 — проволока; 2 — слой гелий-кислородной смеси; 3 — ввод сжатого воздуха; 4 — струя

Высокотемпературный поток может быть получен и в газовой горелке (рис. 44). Продукты сгорания плавят проволоочный или порошковый материал, и он сжатым воздухом выдувается. Газоплазменное напыление осуществляется с использованием простой аппаратуры, имеет низкий уровень шума. Наличие окислительной атмосферы, взрывоопасность кислородо-ацетиленовой смеси, низкое теплосодержание и невысокая скорость истечения струи ограничивают применение этого процесса.

При электродуговой металлизации формирование потока осуществляется дугой в потоке сжатого воздуха. Температура дуги 6000°C , скорость истечения потока $100\text{—}300$ м/с (рис. 45).

Все методы напыления имеют свои преимущества и недостатки. Однако если сравнить термический КПД, то самым высоким (57%) обладает электродуговой метод, затем идет плазменно-дуговой с использованием проволоки — 17%, газоплазменный — 13%, плазменно-дуговой с использованием порошка — 12%.

Конструктивные особенности современных генераторов высокотемпературных струй позволяют вводить в них материалы в виде порошков, проволок, гибких шнуров. Форма порошковых частиц должна быть близка к сферической, размер частиц $20\text{—}200$ мкм. Имеются данные и о возможности напыления более мелкодисперсными порошками с размером частиц $1\text{—}5$ мкм. Проволочные материалы имеют преимущества перед порошковыми: большая производительность, полная расплаваемость. Гибкие шнуры являются относительно новыми материалами. В них используется органическая пленка, которая при сгорании не оставляет продуктов пиролиза.

Наибольшее распространение для увеличения износостойкости

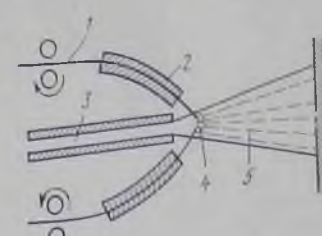


Рис. 45. Схема электродугового металлизатора:
1 — проволока; 2 — направляющая; 3 — ввод сжатого воздуха; 4 — дуга; 5 — струя

деталей получило электродуговое и газопламенное напыление из проволок следующих металлов и сплавов: алюминия, олова, меди, цинка, железа, никеля, бронзы, латуни, баббитов и др.

В результате напыления изменяются свойства материалов. Это изменение связано с взаимодействием распыляемого материала с атмосферой, что ведет к изменению химического состава и газонасыщению; появлением границ с ослабленной связью и повышенным содержанием окислов и других фаз; появлением пористости из-за гетерогенной структуры расплавленных частиц путем их последовательной укладки с деформацией при ударе и высокой скоростью кристаллизации; возникновением микро- и макронапряжений в покрытии.

Прочность на отрыв напыленных покрытий невысокая и составляет от нескольких Па до нескольких десятков Па. Прочность связи при напылении является сложной функцией

$$\sigma_a = f(T_k \tau_k p),$$

где T_k — температура в контакте частица — основа; τ_k — длительность удара и затвердевания частицы; p — давление при ударе.

Силу удара в условиях плазменного напыления можно оценить, учитывая, что скорость частицы 100—150 м/с, время действия 10^{-8} — 10^{-9} с, следовательно, возникает импульсное давление около 1500 МПа. Однако регулировать силу удара в условиях напыления трудно, поэтому важнейшим фактором повышения адгезионной прочности становится термическая активизация частицы. К недостаткам термической активности следует отнести сильное окисление и перегрев напыляемой поверхности. Самую высокую прочность сцепления имеют плазменные напыленные слои. Твердость металлических покрытий, как правило, увеличивается вследствие окисления, закалки и наклепа [19].

Износостойкость напыленных покрытий в 1,5—3 раза выше износостойкости чистых напыляемых материалов. В табл. 69 приведен состав наиболее часто применяющихся самофлюсующихся сплавов. При оптимальных режимах оплавления самофлюсующихся сплавов, когда пористость практически исчезает, структура напыленного слоя представляет собой смесь легкоплавкой эвтектики с твердым раствором компонента, с карбидными и карбонитридными включениями. Имея твердость HRC 60 при мелкодисперсных твердых включениях в мягкой матрице, эти покрытия обладают высокими антифрикционными свойствами наряду с повышенной износостойкостью. Дальнейший поиск материалов для напыления идет по пути создания композитных материалов на основе Ni—Cr—B—Si [11].

Износостойкие, антизадириные и антифрикционные покрытия могут быть созданы с использованием экзотермически реаги-

Таблица 69

Химический состав самофлюсующихся материалов

Страна	Сплав	Содержание элементов, %								
		C	B	Si	Ni	Cr	Fe	WC	W	Mo
СССР	ПГ-ХН80С _{р2}	0,3—0,6	1,5—2,5	1,5—4	Основа	12—15	5,0	35 70	111111	111111
	ПГ-ХН80С _{р3}	0,4—0,8	2,0—3,0	2,4—4,5		12—16	5,0			
	ПГ-ХН80С _{р4}	0,6	2,5—4,0	3,0—5,0		13—17	2,0			
	СНГН	0,5—1,2	2,0—4,7	3,0—5,0		12—20	1,3			
	ВСНГН-35 ВСНГН-70	0,5—1,2, 1,0	2,0—4,7 2,5	3,0—5,0 4,0		12—20 17	3,5 4			
США	12С	0,15	2,5	2,5	Основа	10	2,5	11111	11111	11111
	15С	0,1	3,5	4		17	4			
	16С	0,5	4	4		16	2,5			
	17С	0,5	4	3		17	3			
	31С	0,5	2,5	2,5	46 14 2	11	2,5	35 80	11111	11111
	41С	0,1	0,8	0,8		3,5	0,8			
	42С	0,2	—	—		16	Основа			
	4	0,45	2,0—3,0	2,0—3,5		8—14	3,0			
	5	0,65	2,0—4,0	3,5—4,0	Основа	10—17	4,5	11111	11111	11111
	6	0,75	2,7—4,7	4,0—4,5		13—20	3,5—5			
	7	0,75	3—5	3,0—4,0		11—15	4—5			
14—17										
Швейцария	10009	1,0	3,0	3,0	Основа	14	1,0	11111	11111	11111
	10680	1,0	3,0	2,5		—	—			

рующих плакированных материалов. Для процесса напыления используют плазменные установки типа УПУ, УМП.

Характеристика плазменной установки УМП-5-68

Мощность, кВт	35
Производительность напыления, кг/ч:	
вольфрам	5
окись алюминия	4
диоксид циркония	3
Масса плазменной установки, кг	120
Масса плазменной горелки, кг	0,7
Максимальный размер горелки, мм	70
Емкость бака питания, л	5
Рекомендуемый режим:	
сила тока, А	320—340
напряжение, В	85—95
расход азота, м ³ /ч	3,5
давление охлаждающей воды, МПа	0,25
расход воды, л/мин	3,5

Питание установки от двух сварочных преобразователей ПСО-500.

Для газопламенного напыления наиболее широкое распространение получила горелка типа ГАЛ-2-63.

Режимы газопламенного напыления приведены в табл. 70.

Комплекс аппаратуры для электродуговой металлизации КДМ-1 состоит из металлизационного аппарата ЭМ-14, выпрямителя, приспособлений для транспортировки проволоки.

Техническая характеристика электродугового металлизатора

Производительность, кг/ч:	
алюминия	8
стали	10
молибдена	8
Диаметр проволоки, мм	1,5—2
Давление воздуха, МПа	0,4—0,6
Скорость подачи проволоки, м/мин	1—12
Мощность, кВт	10

Таблица 70

Режимы газопламенного напыления

Параметр напыления	Номер наконечника		
	3	4	5
Дистанция, мм	50—75	75—100	100—150
Давление, МПа:			
кислорода	0,2—0,4	0,2—0,4	0,2—0,5
ацетилен	0,1—0,25	0,1—0,25	0,1—0,25
Расход, л/ч:			
кислорода	250—440	440—750	1150—1750
ацетилен	230—400	400—700	1050—1750
Расход порошка, г/мин	30	40	60

Для контроля качества напыленных покрытий по толщине слоя и адгезии наиболее целесообразным является метод вихревых токов. Для стопроцентного контроля адгезии наиболее приемлем ультразвуковой метод — метод фиксации отраженного ультразвукового эхо-импульса. Использование высокочастотные генераторы, с частотой более 1 МГц. Напыление можно применять вместо электролитического хромового покрытия с твердостью 9000—10 000 МН/м². Плазменное напыление поршневых колец хромом зернистостью 40—50 мкм позволяет получить высокие свойства покрытия. Это обусловлено пористостью, создающей эффект «самосмазывания», и демпфирующий каркас для воспрепятствования деформированию и задирам покрытием. Износ плазменных покрытий ниже, чем у электролитических, причем с повышением скорости эта разница увеличивается. Напыление молибденом дает возможность получить высокую износостойкость поверхностного слоя. Структура молибденовых покрытий зависит от способа и режимов напыления. Газоплазменное, электродуговое и плазменное напыление формирует чешуйчатую структуру покрытия. При плазменном напылении покрытие менее анизотропно и более прочно. Окисление молибдена при напылении приводит к снижению пластичности и прочности покрытия, но кислород понижает поверхностное натяжение и увеличивает стабильность распыляемых частиц, улучшает адгезию. В случае напыления молибдена на железоуглеродистые сплавы возникает тонкая интерметаллидная прослойка Fe₇Mo₆. Наличие окислов молибдена в покрытии увеличивает его твердость и улучшает антифрикционные свойства. При плазменном напылении с расстояния 80—90 мм от среза накала сопла содержание воздуха достигает 90%. При расстоянии 70 мм, содержание кислорода 13% и микротвердость 650. В этом случае формируется молибденовое покрытие без ярко выраженной анизотропии. Молибденовые покрытия упрочняются наклепом в процессе трения.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

7.1. Общие положения

Долговечность деталей горного оборудования, работающего в условиях интенсивного износа, можно значительно повысить применяя поверхностное пластическое деформирование. Этот вид обработки чаще всего используют для восстановления поверхности деталей, реже — для упрочнения новых.

Пластическая деформация сопровождается увеличением объема поверхностного слоя металла, чему препятствуют ниже лежащие недеформированные слои. При этом поверхностные слои оказываются под действием остаточных напряжений сжатия, а ниже лежащие — под действием растягивающих остаточных напряжений. Высокие напряжения от действия внешних сил и концентраторы напряжений приводят к разрушению поверхностного слоя в процессе эксплуатации.

В зависимости от характера прилагаемой нагрузки поверхностное пластическое деформирование может быть статическим или ударным. К видам статического поверхностного деформирования относится поверхностное упрочнение обкатыванием и раскатыванием, к видам ударного поверхностного деформирования — обработка дробью, чеканка, центробежная обработка и упрочнение взрывом.

Схемы основных видов поверхностного пластического упрочнения деталей приведены на рис. 46 и 47. Применение этих способов позволяет в результате улучшения физико-механических свойств и микрогеометрии поверхностей деталей значительно повысить их долговечность и предел выносливости.

Наиболее простым и доступным средством повышения усталостной прочности деталей как при изготовлении, так и при их ремонте является накатывание поверхностей роликами или шариками. Этот способ используют в качестве предшествующей операции при нанесении гальванических покрытий или окончательной операции в комбинации с термическим или химикотермическим упрочнением.

Для деталей, работающих при статических нагрузках, применяют обычно обработку дробью, при динамических — поверхностное обкатывание, обработку дробью и чеканку; для деталей, работающих в условиях абразивного износа, — обработку дробью, накатывание, упрочнение взрывом; при трении скольжения — поверхностное обкатывание; при работе в коррозион-

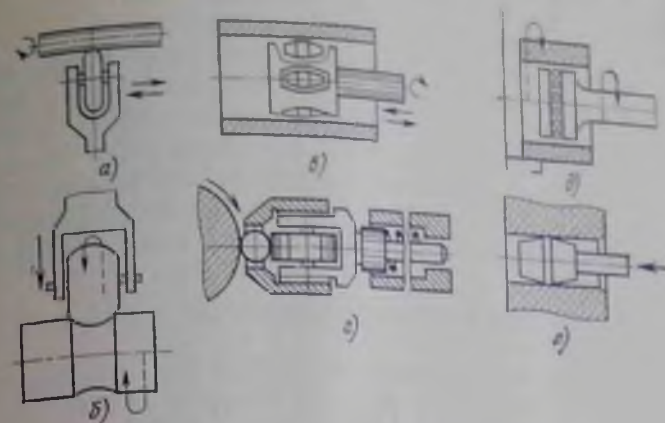


Рис. 46. Схемы статического поверхностного пластического деформирования деталей горного оборудования:

а, б — обкатывание роликом; в — раскатывание отверстия роликами; г — обкатывание шариком; д — раскатывание отверстия шариками; е — поверхностное дорнирование

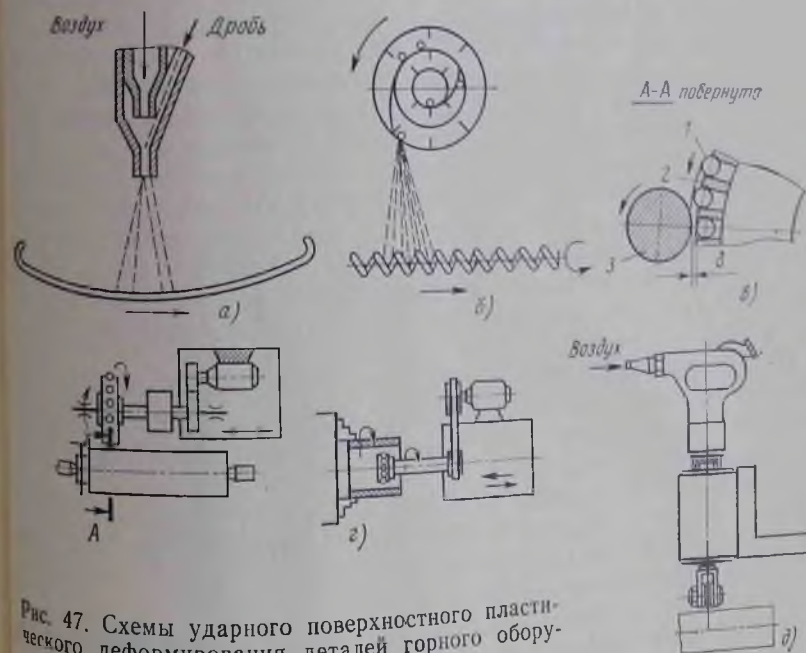


Рис. 47. Схемы ударного поверхностного пластического деформирования деталей горного оборудования:

а, б — обработка дробью; в, г — центробежная обработка; д — вибрационная ударная обработка

ных средах — обработку дробью и при повышенных температурах — поверхностное обкатывание.

При поверхностном пластическом деформировании глубина упрочнения составляет 0,05—10 мм, микротвердость увеличивается на 20—50%, шероховатость существенно снижается.

Пластическое деформирование сопровождается изменением параметров кристаллической решетки, дроблением блоков мозаики, упрочнением поверхностных и подповерхностных слоев детали, возникновением сжимающих остаточных напряжений.

7.2. Упрочнение деталей обработкой дробью

Сущность процесса обработки дробью заключается в пластическом деформировании рабочей поверхности детали, прошедшей механическую и термическую обработку, потоком дробы. В результате этого повышаются твердость и прочность поверхностного слоя детали, а также изменяется характер распределения напряжения. Соответственно увеличивается срок службы деталей. Так, срок службы зубчатых колес после обработки дробью увеличивается в 5—6 раз, коленчатых валов в 10—30 раз, спиральных пружин в 13 раз, сварных швов в 3 раза.

Обработку дробью можно применять для упрочнения поверхностного слоя различных деталей горных машин. Особенно ее целесообразно использовать для деталей, работающих в условиях переменного изгиба и кручения, а также деталей, имеющих такие конструктивные элементы, как канавки, галтели, посадочные места и др., уменьшающие усталостную прочность. Обработка дробью деталей с концентраторами напряжений повышает предел выносливости при симметричном изгибе на 30—60%. В ряде случаев наклеп позволяет вместо легированных сталей применять простые и исключать трудоемкие отделочные операции, а также уменьшать массу деталей. Можно использовать дробеструйный наклеп для предотвращения растрескивания деталей из цветных металлов и сплавов.

Технологический процесс обработки дробью включает в себя подготовку установки и поверхностей детали, установление режимов обработки, обработку дробью и контроль упрочненных поверхностей.

Подготовка поверхностей под обработку дробью заключается в контроле исходной твердости и размеров деталей. Это необходимо в тех случаях, когда форма детали в процессе наклепа изменяется значительно.

Основными показателями, характеризующими наклеп поверхности, являются ее твердость, шероховатость, глубина наклепа и остаточные напряжения. Они зависят от следующих технологических факторов: скорости дробы при встрече с обра-

батываемой поверхностью; направления потока дробы (угол атаки); длительности обработки; расхода, размера и качества дробы; расстояния от места вылета дробы до обрабатываемой поверхности; вида обрабатываемого материала; плотности обработки поверхности дробью.

Изменение каждого из указанных факторов при неизменных остальных оказывает различное влияние на качество поверхности и характер распределения напряжений. Правильно обработанные поверхности должны иметь равномерно распределенные лунки от ударов дробы и соответствующее их насыщение, которое проверяют с помощью пластины-образцов, обработанных на специальной установке с теми же режимами, что и обрабатываемая деталь. Глубина наклепа, которая может быть получена при обработке дробью, 1,5 мм. Это значение уменьшается с увеличением твердости материала и увеличивается с увеличением скорости, угла атаки и расхода дробы на единицу поверхности. С уменьшением диаметра и скорости дробы, угла атаки и увеличением твердости материала шероховатость поверхности уменьшается.

Энергию удара дробинки, зависящую от ее массы m , скорости v , объема V , удельного веса γ , определяют по формуле [20]

$$A_{\text{дин}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\gamma V v^2}{2g} = \frac{\pi \gamma}{12g} D^3 v^2,$$

где D — диаметр дробинки; g — ускорение свободного падения. Глубину наклепа определяют по формуле

$$h_{\text{накл}} = \frac{Dv \sin \alpha}{\sqrt{H_{\text{дин}}}} K,$$

где α — угол атаки; $H_{\text{дин}}$ — динамическая твердость материала; K — коэффициент пропорциональности.

Угол атаки дробы, обеспечивающий наиболее высокие результаты при наклепе, равен 70—90°. Наиболее эффективной обработка дробью оказывается при расстоянии между обрабатываемой поверхностью и местом вылета дробы 250—300 мм и скорости до 60 м/с. Увеличение скорости ведет к значительному увеличению количества осколков дробы. Необходимое количество поверхности при наклепе обеспечивается при содержании в установке расколовшейся дробы не более 5%. В сталях, содержащих большое количество остаточного аустенита, повышение твердости при наклепе особенно эффективно. Остаточные напряжения связаны с глубиной наклепа и определяются физико-механическими свойствами материала. С известным приближением их средние значения можно считать пропорциональными динамической твердости материала, скорости, диаметром динамической твердости материала, скорости, диа-

метра и плотности материала дробы остаточные напряжения увеличиваются.

Продолжительность обработки поверхности, так же как и расход дробы на единицу поверхности при наклепе, уменьшается с увеличением угла атаки и скорости и увеличивается с увеличением твердости, диаметра дробы и расстояния от обрабатываемой поверхности до места вылета дробы.

При непродолжительной обработке поверхностей и значительных концентраторах напряжений увеличение скорости дробы существенно влияет на предел выносливости. С увеличением продолжительности дробеструйной обработки, а также при отсутствии концентраторов напряжений это влияние ослабевает.

Наиболее интенсивно происходит процесс упрочнения в первоначальный период, а затем по мере увеличения плотности наклепа упрочнение уменьшается.

Выбирая режимы наклепа, необходимо иметь в виду, что перенаклеп более опасен, чем недонаклеп. При чрезмерно длительном наклепе возможно шелушение поверхностного слоя и снижение предела выносливости.

При дробеструйном наклепе шероховатость поверхности может быть получена от $Ra=2,03$ мкм до $Ra=0,08$ мкм на поверхностях с $HRC\ 50-60$. С увеличением диаметра дробы и ее скорости шероховатость поверхности увеличивается.

Для наклепа стальных деталей применяют дробь из отбеленного чугуна. Детали из цветных сплавов, для исключения электролитической коррозии от внедрения частиц стальной или чугунной дробы в обрабатываемую поверхность, наклепываются алюминиевой или стеклянной дробью. Диаметр дробы выбирают в зависимости от размеров, материала и требуемой шероховатости поверхностей деталей. В настоящее время применяют дробь диаметром $0,4-2,0$ мм. Расход стальной дробы в $30-60$ раз меньше, чем чугунной, а стоимость в $4-5$ раз выше. Скорость стальной дробы, исходя из ее прочности, в $1,5-2,0$ раза больше скорости чугунной дробы (90 м/с). Однородность по размерам, твердость, динамическая прочность (способность выдерживать удары о поверхность, не разрушаясь) существенно влияют на технологические свойства дробы.

При обработке деталей с глубокими концентраторами напряжений на рабочей поверхности радиус дробы должен быть меньше радиуса концентратора.

Прочность дробы определяют по результатам испытания на статическое раздавливание между шлифованными плитками или по силе удара бойка.

Для обработки дробью используют специальные установки пневматического или механического действия. В пневматических установках дробь получает необходимую скорость под

действием струи сжатого воздуха, а в механических — под действием центробежной силы, возникающей во вращающемся роторе. Дробеметы механического действия более производительны, экономно расходуют энергию, обеспечивают стабильный процесс обработки и поэтому получили широкое применение.

На рис. 48 приведен универсальный дробемет ДУ-1. Загружаемая в бункер 1 дробь элеватором 2 поднимается в бункер 3 и из него через питатель 4 по вертикальному трубопроводу поступает к ротору 5 и от него на поверхность обрабатываемой детали 6.

После удара о деталь дробь по наклонной поверхности перемещается вновь в загрузочный бункер 1. Осколки дробы удаляются с помощью воздушной струи. Подача и вращение деталей производится специальным устройством.

В механических дробеметах частота вращения ротора изменяется от 2000 до 3500 об/мин.

Основными частями пневматического дробемета являются рабочая камера, бункер, элеватор и сепаратор. В рабочую камеру устанавливают деталь, которая приводится во вращение электродвигателем. Поступающая из бункера в форсунку дробь сжатым воздухом под давлением $0,5-0,6$ МПа направляется на обрабатываемую деталь. Изменяя давление, расход воздуха и число форсунок, можно регулировать производительность установки. Такие дробеметы наиболее эффективны для обработки внутренних поверхностей деталей.

Для получения наклепа небольшой глубины в деталях, деформация которых нежелательна, используют гравитационные установки, в которых используется энергия удара дробы при падении с высоты $5-10$ м.

На заводах находятся в эксплуатации дробеметы, построенные специально для наклепа пружин, зубчатых колес и др. Принцип их действия аналогичен универсальным.

Наклеп пружин выполняют в установках барабанного типа производительностью до 1500 спиральных пружин в час. В минуту ротор такой установки выбрасывает около 100 кг дробы. Предел выносливости пружин повышается до $30-50\%$. Особенно целесообразно повышение долговечности зубчатых колес технологическими методами упрочнения материала,

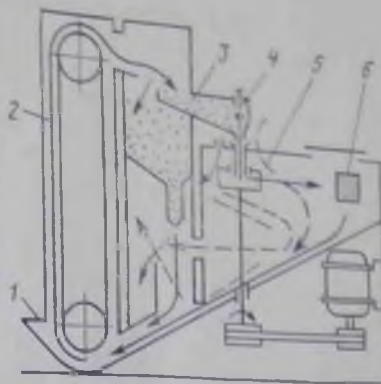


Рис. 48. Схема универсального дробемета ДУ-1.

1, 3 — бункеры; 2 — элеватор; 4 — питатель; 5 — ротор; 6 — деталь, подвергаемая обработке (сплошными стрелками показано движение дробы, пунктирными — движение воздуха)

которые позволяют увеличить нагрузку в 6 раз, тогда как геометрические усовершенствования могут увеличить нагрузочную способность только в 1,5—2 раза [17]. Очень перспективным является упрочнение особенно тяжело нагруженных зубчатых колес комплексным упрочнением, т. е. химико-термической обработкой (цементацией, нитроцементацией и др.) с последующим упрочнением дробью, обкаткой роликами, чеканкой бойками и т. д. Дробеструйная обработка позволяет упрочнять зубчатые колеса различной формы и размеров.

Наклеп дробью зубчатых колес после цементации или цианирования повышает их эксплуатационные свойства и вызывает частичный распад остаточного аустенита в слое и соответственно повышение твердости, увеличение объема и появление остаточных сжимающих напряжений.

Известны исследования, показывающие, что наклеп цементованных зубчатых колес из стали 18ХНВА повышает прочность зубьев и уменьшает выкрашивание их рабочих поверхностей при приработке зубчатой пары. Предел выносливости зубчатых колес с $m=7$ из стали 20Х2Н4А при наклепе дробью повышается на 21% [1].

Долговечность зубчатых колес, подвергаемых после химико-термической обработки наклепу дробью, повышается примерно в 12 раз.

Хорошие результаты дает сочетание дробеструйного наклепа с закалкой всего профиля зубьев или только впадин.

Поверхностное пластическое деформирование восстанавливает исходное значение предела выносливости деталей, утраченное при восстановлении деталей, а в ряде случаев и повышает его. Это происходит в результате упрочнения поверхностного и подповерхностного слоев детали, возникновения в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений и образования поверхности с меньшей шероховатостью. Так, предел выносливости деталей из стали 40Х, осталенных без наклепа, равен 400 МН/м², а осталенных наклепанных 700 МН/м².

Детали после дробеструйной обработки для улучшения механических свойств можно подвергать термической обработке.

Обработка дробью повышает коррозионно-усталостную прочность деталей из стали в воде до предела выносливости.

Для деталей горных машин, работающих в агрессивных средах (шахтной воде и др.), особенно эффективно сочетание упрочнения с последующим нанесением защитных покрытий (цинкования, кадмирования, обрезинивания жидким наиритом типа НТ). Так, если упрочнение дробью пружин, работающих в шахтной воде, позволяет увеличить их долговечность в 3—5 раз, то последующее нанесение покрытий увеличивает долговечность пружин в 5—8 раз.

На Ворошиловградском заводе угольного машиностроения

им. Пархоменко упрочнению подвергались пружины резонансных и вибрационных грохотов типа ГРД, ГРД, ГИД. Упрочнение проводилось чугунной дробью диаметром 0,9—1,2 мм со скоростью 45—55 м/с и углом атаки дробы 75—90°. Частота вращения ротора установки 2880—3500 об/мин. Продолжительность упрочнения составляла 5—12 мин. Пружины с защитными покрытиями цинком, кадмием и обрезиненные жидким наиритом типа НТ испытывали в шахтной воде.

В ряде случаев витые цилиндрические пружины можно обрезинивать гуммировочным составом на основе наирита НТ, состоящим из 50%-ного раствора резиновой смеси в смешанном растворителе (%): сольвент—7, скипидар—19, бутылочный спирт—5. Так как наиритовые покрытия не обладают необходимой адгезией к металлу, их наносят на промежуточную прослойку хлорнатриевого грунта, имеющего вязкость 18—20 с по вискозиметру. Грунт, нанесенный после пескоструйной обработки и обезжиривания в два слоя, сохраняется в течение суток. Вулканизацию покрытия проводят при температуре 20—23°С.

Обработке дробью подвергали также пружины парашютного устройства вагонеток для перевозки людей в шахтах по наклонным выработкам.

Брони дробилки КМД-2200 из стали 110Г13Л на ЮГОКе подвергали обработке в камере ДК-10 стальной дробью диаметром 3—5 мм. Глубина наклепанного слоя составляла 1,5—1,7 мм, а твердость повысилась от НВ 180—210 до НВ 350—420.

В процессе эксплуатации брони дробилок получают также наклеп от ударов кусков руды и упрочняются естественным путем.

Донецким проектно-конструкторским технологическим институтом исследовано упрочнение напайного горнорезущего инструмента (зубков ЗН2-5,5) дробью [31]. Для этого твердосплавный инструмент подвергали наклепу дробью диаметром 0,8—1,2 мм в течение 2,5—2 мин. Скорость дробы достигала 75—85 м/с. При этих режимах ударная вязкость сплава повышалась в 1,6 раза и долговечность в условиях ударного нагружения до 10 раз. В результате упрочнения происходило благоприятное изменение структуры обеих фазовых составляющих твердого сплава — карбида вольфрама и кобальтовой фазы. Результаты исследований показали, что фактический удельный расход упрочненных стальной дробью зубков на 1000 т добытого угля по сравнению с серийным снижается до 35%, а интенсивность изнашивания уменьшается до 40%.

Режим упрочняющей обработки дробью деталей, восстановленных электродуговой наплавкой, приведен в табл. 71. Для повышения предела выносливости деталей, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, применяют на-

Режимы обработки деталей стальной дробью*

Таблица 71

Твердость поверхности детали НВ	Скорость дробь, м/с	Расход дробь, кг/мм	Диаметр дробь, мм	Время наклепа, мин
180—380 400—600	54 78—80	80—100 100—120	0,6—0,8 0,8—1,2	1,5—2,0 2,5—3,0

* По данным МГИ.

клеп центробежными упрочнителями (для внутренних и наружных поверхностей деталей из черных и цветных металлов, таких, как коленчатые валы, гильзы цилиндров, втулки, вкладыши подшипников и т. п.).

Схема приспособления для наклепа поверхностей центробежными упрочнителями приведена на рис. 47. Шарик 1 свободно перемещается в отверстиях сепаратора 2. При вращении приспособления вокруг детали 3 под действием центробежной силы шарики, выдвигаясь из гнезд сепаратора, наносят удары по поверхности детали, деформируя ее. Встречное направление вращения детали и приспособления, постоянство скорости и продольной подачи позволяют получить равномерный наклеп. Глубина наклепа деталей из мягких материалов составляет 0,8—1,5 мм, а из материалов средней твердости 0,3—0,8 мм. Остаточные напряжения после наклепа около 8 МПа. Шероховатость поверхности повышается при неизменной точности формы.

Приспособления для центробежного упрочнения можно устанавливать на токарных, шлифовальных и других станках общего или специального назначения.

Качество упрочняемой поверхности зависит от окружной скорости приспособления и детали, величины выдвигания шариков из сепаратора, числа и диаметра шариков, подачи, числа проходов, материала детали.

С увеличением диаметра шарика, величины его выхода из сепаратора, а также подачи шероховатость поверхности увеличивается. Исходная шероховатость поверхности не влияет на степень наклепа.

С увеличением частоты вращения детали и приспособления, диаметра шарика и величины его выхода из сепаратора глубина и степень наклепа, а также остаточные напряжения увеличиваются.

Рекомендуемые режимы наклепа центробежными упрочнителями приведены в табл. 72.

Для центробежной обработки применяют 20—60 шариков диаметром от 5 до 16 мм. Для этих целей могут использоваться также ролики.

Режимы центробежной обработки поверхностей центробежными упрочнителями

Таблица 72

Материал детали	Скорость в точке контакта		Подача на 1 об., мм	Выход шарика из гнезда, мм	Число проходов	Полученная твердость поверхности, НВ
	приспособления, м/с	детали, м/мин				
Сталь	15—40	25—90	0,04—0,16	0,1—0,25	2—3	17—55
Бронза	8—15	20—60	0,02—0,2	0,05—0,1	1—2	25—45
Чугун	15—20	30—50	0,08—0,1	0,1—0,2	2	30—60
Дюралюминий	9—13	6—30	0,02—0,15	0,05—0,15	1—2	25—45

Биевание упрочняемой поверхности в процессе обработки не должно превышать 0,03 мм.

Твердость поверхностей детали из стали 25 после наклепа повышается на 45%, чугуна на 30—60%, из латуни на 60%.

Для смазки тел качения и упрочняемой поверхности в процессе наклепа применяют веретенное или машинное масло в смеси с 50% керосина.

Упрочнение чеканкой заключается в ударном действии инструмента бойка по упрочняемой поверхности и ее пластическом деформировании. В результате этого в поверхностном слое детали создаются остаточные напряжения сжатия до 100 МН/м², твердость повышается примерно на 50%, шероховатость поверхности уменьшается.

Чеканкой упрочняют галтели валов, сварочные швы металлоконструкций, зубчатые колеса и др.

Основными параметрами режима чеканки являются энергия удара и скорость бойка, шаг чеканки и число проходов. Выбор режимов определяется формой, размерами и материалом детали, глубиной наклепа и шероховатостью поверхности. При чеканке глубина наклепа может достигать 35 мм.

Для упрочнения галтелей крупных валов применяют бойки со сферическими наконечниками. При одноканавочной чеканке радиус сферы бойка соответствует радиусу галтели, а с увеличением числа канавок радиус сферы уменьшается. При упрочнении ступенчатых валов чеканкой галтели и гладкие части приобретают равнопрочность и несущая способность валов повышается.

После чеканки иногда для получения нужной шероховатости поверхности применяют механическую обработку на гребину до 0,5 мм.

Применение чеканки для упрочнения впадин крупномодульных зубчатых колес показывает, что их предел выносливости увеличивается на 33, а твердость на 35%.

Чеканочные приспособления могут иметь механический, пневматический или электромеханический привод. При механическом приводе чеканное приспособление устанавливают в суппорте токарного станка, а деталь, вращающуюся с постоянной скоростью, закрепляют в патроне.

Для чеканки поверхностей крупногабаритных конструкций, а также труднодоступных мест используют пневматические молотки. В ЦНИИТмаше создан ряд пневматическо-чеканочных приспособлений ЧМ-1, ЧМ-2, ЧМ-3 с энергией удара соответственно 3,0; 3,4; 4,5 даН. Для изготовления приспособлений с пневматическим приводом используют пневматические молотки типов РМ-6, СМ-3 и др.

Известны чеканочные приспособления, устанавливаемые непосредственно на деталях при упрочнении их поверхностей.

На Уралмашзаводе выполнены исследования по упрочнению шлицев полуоси экскаваторов ЭКГ-5 из стали 35ХНМ чеканкой с энергией удара 18 Дж, что повысило долговечность полуосей в 2 раза. Этим же способом с энергией удара 32 Дж проведено упрочнение резьбы валов конусных дробилок крупного дробления из сталей 40 и 35ХГНМ, в результате чего увеличился предел их выносливости при изгибе на 50%.

Режим упрочняющей чеканки деталей восстанавливаемых электродуговой наплавкой:

Твердость поверхности детали	НВ 180—600
Энергия удара, Дж	12—18
Диаметр ролика, мм	50
Профильный радиус ролика, мм	12
Число проходов	1

При упрочняющей чеканке и обработке дробью происходит изменение микроструктуры поверхностного слоя. При упрочнении стали 20Х2Н4А после цементации, закалки и низкого отпуска уменьшается размер блоков ($с 2,6 \cdot 10^{-6}$ до $0,6 \cdot 10^{-6}$), происходит распад остаточного аустенита и уменьшается его количество с 45 до 20%, что приводит к увеличению микротвердости с 650 до 900.

Для повышения долговечности зубьев ковшей экскаваторов, футеровок конусных дробилок и других деталей применяют упрочнение взрывом.

Согласно рекомендациям СО АН СССР при упрочнении взрывом между упрочняемой поверхностью и взрывчатым веществом должен находиться инерционный слой толщиной 1,5 мм. Это создает вблизи упрочняемой поверхности условия, близкие к всестороннему сжатию, и исключают растрескивание поверхностей деталей при взрыве [25].

Упрочнение деталей из стали 110Г13Л взрывом, выполненное в институте ВостНИГРи, показало, что их срок службы увеличивается в 1,5—2 раза.

В Криворожском горнорудном институте разработана опытно-промышленная установка для упрочнения футеровки дробящего конуса дробилок КСД-2200 и КМД-2200 взрывом. Установка работает следующим образом. Броню, подлежащую упрочнению, устанавливают на посадочном месте конуса, поверхность которого предварительно смазывают толстым слоем солидола для герметизации полости между броней и конусом. Полость заполняется водой, а рабочая поверхность покрывается слоем взрывчатого вещества. Во время взрыва вода работает как жесткое тело, предохраняя футеровку от деформации, позволяя производить локальное упрочнение брони без предварительной герметизации. В связи с тем, что скорость распространения возмущений в воде значительно меньше, чем в металле, выдавливание воды из полости происходит после завершения процесса деформации брони. Давление, передаваемое на конус, при взрыве воспринимается амортизатором.

В качестве взрывчатого вещества использовалось пластинчатое ВВ марки ПВВ-805, наносимое в нижней части упрочняемой зоны слоем 12 мм и в верхней — 6 мм.

При работе дробилки с неупрочненной футеровкой подвижного конуса было переработано 108,2 тыс. т руды. Линейный износ брони составил 50 мм, а интенсивность износа 0,462 мм/т. После упрочнения взрывом футеровки было переработано 177,2 тыс. т руды и линейный износ не превышал 49 мм. Интенсивность износа брони при этом составляла 0,282 мм/т.

Высоколегированные аустенитные стали типа 110Г13Л обладают наибольшей объемной усадкой и газонасыщенностью. Усадочные раковины стали не имеют строго очерченных границ полости и простираются на значительную величину в виде усадочной пористости. Повышение физико-механических свойств стали может быть достигнуто путем уплотнения металла, заваривания микротрещин, т. е. улучшения его сплошности и однородности в процессе горячей деформации. При этом с увеличением степени деформации происходит измельчение структуры металла и повышается его износостойкость.

При обработке взрывом сталь 110Г13Л, не теряя своей пластичности, приобрела высокую твердость. Скорость износа упрочненной брони в 1,6 раза меньше скорости износа неупрочненной. Изменение механических свойств брони приведено в табл. 73.

Таблица 73

Механические свойства стали 110Г13Л до и после упрочнения взрывом

Сталь	Давление $p \cdot 10^{-5}$, Па	Твердость HВ	Предел теку- чести, МН/м ²	Временное сопротивле- ние, МН/м ²	Удлинение, %
Неупроч- ненная	140	205	350	800	50
Упрочнен- ная	140	380	840	1200	40
	330	500	990	1380	28
	420	580	1100	1470	19

При взрывной обработке аустенитных сталей упрочнение происходит вследствие релаксации касательных напряжений за фронтом ударной волны, которая сопровождается потерей устойчивости метастабильной решетки аустенита и перестройкой ее в более устойчивую решетку мартенсита.

7.3. Упрочнение деталей поверхностным обкатыванием

Поверхностное обкатывание — один из наиболее распространенных способов упрочнения поверхностей деталей, которое осуществляется путем перемещения одного или нескольких свободно вращающихся роликов или шариков по обрабатываемой поверхности под давлением. В результате этого в поверхностном слое металла возникают остаточные напряжения, повышается твердость, изменяется структура металла и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Поверхностному обкатыванию могут подвергаться детали из углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных металлов и сплавов, пластмасс, металлокерамики и других материалов, которые в холодном состоянии деформируются без разрушения и имеют исходную твердость не выше HВ 400.

Поверхностное обкатывание можно проводить одно-, двух-, трех- и многороликовыми или шариковыми приспособлениями с механическим, пневматическим, гидравлическим и пневмогидравлическим приводом. В универсальных однорولیковых накатках конструкции ЦНИИТмаша усилие на ролик создается пружинно-штоковой системой (10—200 кН) и пружинно-рычажно-штоковой системой (40—60 кН). Роликовые обкатки конструкции ЦНИИ МПС с пневматическим приводом создают усилие 1—2 кН, а с гидравлическим приводом 50—100 кН.

Детали с цилиндрическими поверхностями обкатывают на токарных и револьверных станках, с плоскими — на строгальных. В ряде случаев обкатку выполняют на специализирован-

ных станках, например, для обтачивания и обкатки колесных пар и т. д.

При поверхностном обкатывании шарики в отличие от роликов не имеют принудительной оси вращения, что позволяет получать меньшую шероховатость поверхности. Однако, в связи с меньшими подачами, производительность шариковых накаток ниже, чем роликовых. Их применяют при отделке и упрочнении нежестких, а также малопрочных деталей.

Однорولیковые накатки используют для обработки жестких конструкций, но при этом возникает большое одностороннее радиальное усилие, увеличивается износ станка и снижается точность обработки. Этих недостатков нет у накаток с несколькими роликами.

Поверхностное обкатывание можно проводить при упрочняющих и упрочняюще-сглаживающих режимах. Упрочняющую обкатку выполняют при высоких удельных нагрузках. При этом получается большая глубина наклепа и возникают значительные остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое, повышаются шероховатости поверхности. Упрочняюще-сглаживающее поверхностное обкатывание сопровождается увеличением предела выносливости и обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности.

В качестве рабочих элементов можно использовать ролики и шарики, стандартные или специально изготовленные, определенной формы.

Профили и размеры роликов определяются формой обрабатываемых поверхностей. Так, есть ролики для обработки только одних элементов, например цилиндрических поверхностей, галтелей, канавок или одновременно нескольких поверхностей. Изготавливают ролики со сферическим контуром (радиус R); с цилиндрическим поясом на средней части контура; с комбинированным профилем и т. д. На роликах с цилиндрическим поясом углы заборной части примерно равны 5°. Размеры роликов (ширина, диаметр) назначают в основном по конструктивным соображениям. М. А. Елизветин [17] рекомендует для деталей диаметром до 75 мм принимать отношение диаметра ролика к диаметру детали не более 4. Детали диаметром 75 мм и более следует накатывать роликом, диаметр которого равен или меньше диаметра обрабатываемой детали. Для поверхностного обкатывания деталей больших диаметров можно также при выборе размеров ролика руководствоваться следующими данными:

Диаметр детали, мм	160—194	195—285	285
Диаметр ролика, мм	110—150	130—150	180—200

Для некрупных и нежестких деталей ширина упрочняющего пояса на ролике составляет 2—6 мм для крупных и жестких деталей 10—15 мм. Профильный радиус ролика при обкатке

галтелей валов должен быть на 0,5—2,0 мм меньше радиуса галтелей [20]. При определении профильного радиуса ролика можно руководствоваться следующими данными:

Усилие обкатывания, даН	1500	1800	2000	2200	2400
Радиус галтели вала, мм	13—15	16—18	19—21	22—25	25
Профильный радиус, мм	12	15	18	20	24

С уменьшением диаметра ролика и радиуса рабочего профиля увеличивается глубина наклепа и уменьшается шероховатость поверхности.

Ролики изготавливают из сталей марок ШХ15, 30ХМ, Х12, Х12М, ХВГ, У10А, У12А, ЭХ12 и других с последующей термической обработкой. Твердость их рабочих поверхностей не должна быть ниже HRC 60. При необходимости твердость поверхности роликов может быть повышена наплавкой твердыми сплавами. Шероховатость поверхности рабочих элементов должна быть не ниже, чем та, которую необходимо получить после поверхностного обкатывания.

Для снижения коэффициента внешнего трения, увеличения коэффициента скольжения, уменьшения шероховатости поверхности при поверхностном обкатывании используют следующие виды смазки: машинное 40% и веретенное 60%, трансформаторное масло 95% и олеиновую кислоту 5%, сульфозфрезол, машинное масло и др.

Основные режимы поверхностного обкатывания (усилие обкатывания, продольная подача, припуск, скорость обкатывания, число проходов) обуславливают степень упрочнения, шероховатость поверхности, физические свойства материала и производительность всего процесса. Режимы выбирают в зависимости от назначения обработки и свойств упрочняемого материала.

Режим поверхностного обкатывания должен быть оптимальным, в противном случае может быть или недостаточное упрочнение или ведущее к браку переупрочнение поверхностного слоя детали.

При обкатывании усилие (давление на ролик) должно быть меньше временного сопротивления металла, в противном случае может произойти его разрушение.

Требуемая шероховатость поверхности и точность размеров должны обеспечиваться соответствующим усилием. С увеличением давления значительно увеличиваются твердость поверхностного слоя и глубина наклепа, а шероховатость поверхности уменьшается.

Увеличение диаметра ролика и радиуса его сферы приводят к уменьшению твердости поверхностного слоя и глубины наклепа.

Продольная подача инструмента зависит главным образом от свойств материала, и ее увеличение приводит к уменьше-

Число шариков в накатке	Диаметр ролика, мм				
	6	10	20	40	100
1	0,10	0,15	0,20	0,25	0,40
2	0,20	0,30	0,40	0,50	0,80
3	0,30	0,45	0,60	0,75	1,20

нию твердости поверхностного слоя и глубины наклепа. При подаче на 1 оборот более 2 мм шероховатость поверхности увеличивается в несколько раз. Для роликов с цилиндрическим поясом подачу на 1 оборот рекомендуется принимать 0,4—0,8 мм. Многороликовые и многошариковые инструменты работают при больших значениях подачи. В табл. 74 приведены значения подачи в зависимости от диаметра и числа шариков, обеспечивающие получение шероховатости $R_z = 0,8$ мкм (исходная шероховатость $R_z = 10$ мкм).

Скорость поверхностного обкатывания, как правило, не оказывает существенного влияния на основные параметры режимов обкатывания. Ее увеличение приводит к повышению температуры в зоне контакта и снижению долговечности инструмента.

Число проходов при правильно установленных режимах обработки не должно быть больше одного. При низком качестве исходной поверхности или нежестких деталях проходов может быть несколько. С увеличением числа проходов глубина наклепа не изменяется, но увеличивается твердость поверхностного слоя. Остаточные же напряжения при одном проходе приближаются к максимальным. При двух—трех проходах остаточные напряжения увеличиваются незначительно, а шероховатость не изменяется.

Припуск устанавливают в зависимости от исходной шероховатости. Так, рекомендуется для получения $R_z = 0,4 \dots 1,6$ мкм припуск назначать в пределах 0,025—0,055 мм при исходной шероховатости $R_z = 40$ мкм и 0,01—0,035 мм — при исходной шероховатости $R_z = 10 \dots 20$ мкм.

При упрочняющем режиме обработки глубина наклепа должна быть равной 0,02—0,04 диаметра, а повышение твердости составлять 24—40%. Глубина наклепа при сглаживающем режиме должна быть не более 0,01 диаметра детали. При механической обработке наклепанного слоя эффект упрочнения снижается и при снятии 25% толщины слоя он

полностью теряется. Шероховатость упрочненного слоя при механической обработке повышается.

Выполненные исследования [33] по установлению влияния усилия накатывания на остаточные напряжения в полых деталях показали, что характер распределения напряжений в полых деталях такой же, как и в сплошных, но усилие проявляется в более резкой форме.

В начальный период обкатывания с увеличением усилия увеличиваются остаточные напряжения сжатия, а затем при переходе через максимум они снижаются. Это объясняется перенаклепом или глубоким наклепом поверхности детали.

Уменьшение толщины стенок характеризуется увеличением остаточных напряжений. При неизменной толщине стенок с увеличением наружного и внутреннего диаметров остаточные напряжения увеличиваются. Оптимальное отношение внутреннего диаметра детали к наружному 0,4—0,7.

Изменение механических свойств распространенной в горном машиностроении стали 110Г13Л при накатывании роликом и глубине упрочнения 13 мм дано в табл. 75.

В процессе поверхностного пластического деформирования деталей, восстановленных электролитическим осталиванием, необходимо обращать внимание на скорость деформирования. При малых скоростях деформирования хрупкость металла, обусловленная присутствием водорода, проявляется особенно сильно, при скорости деформирования 0,2 м/с и более она исчезает.

Детали, восстанавливаемые электродуговой наплавкой, могут подвергаться упрочняющему обкатыванию. Рекомендуемые режимы обкатывания приведены в табл. 76.

На рис. 49 показано приспособление для обкатывания роликовых дорожек лапы бурового долота, применяемое на Куйбышевском долотном заводе. Приспособление устанавливают в резцедержателе токарного станка. Шарик к обрабатываемой поверхности подводят, перемещая поперечный суппорт, давление регулируют поперечным винтом и контролируют по шкале, нанесенной на поверхность штока при тарировке пружины. Включая продольную подачу, производят упрочнение поверхности. Обкатывание производят при следующих режимах:

Таблица 75

Изменение механических свойств стали 110Г13Л в результате упрочнения поверхности детали накатыванием

Состояние поверхности	$\sigma_{в},$ МПа	$\sigma_{т},$ МПа	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$\theta, \text{МПа}$
Неупрочненная	629	421	19,5	17,5	137
Упрочненная (НВ 500)	701	539	15,6	16,2	112

Таблица 76

Режим упрочняющего обкатывания восстанавливаемых деталей

Марка электродной проволоки	Обкатывание шариками				
	Нагрузка, кН	Подача на 1 оборот, мм	Диаметр, мм	Линейная скорость детали, м/мин	Число проходов
<i>Электродуговая наплавка*</i>					
Нп30ХГСА	2—2,5	0,1—0,3	15—20	60	1—3
Нп30ХГСА	3,5—3,8	0,1—0,3	15	60	1—2
Св-08А	2,2—2,7	0,1—0,2	10—15	60	1—3
Св-08А	2,8—3,0	0,1—0,2	10—15	60	1—2
Св-08А	2,5—3	0,1—0,2	10—15	60	1
<i>Вибродуговая наплавка</i>					
Нп-70	2—2,5	0,1—0,2	10—15	60	1—3
Св-08Г2С	2—2,5	0,2	15—20	60	1—3

Продолжение табл. 76

Марка электродной проволоки	Обкатывание роликами					
	Нагрузка, кН	Подача, на 1 оборот, мм	Диаметр ролика, мм	Профиль радиуса ролика, мм	Линейная скорость детали, м/мин	Число проходов
Электродуговая наплавка						
Нп30ХГСА	2,5	0,1—0,28	60	12—15	50	1—3
Нп30ХГСА	4	0,1—0,2	60	10	50	1—3
Св-08А	2,7—3	0,1—0,2	60	10	50	1—2
Св-08А	3—3,3	0,1—0,2	60	10	50	1—3
Св-08А	—	—	—	—	—	—
Вибродуговая наплавка						
Нп-70	2,2—2,7	0,1—0,2	60	10	50	1—3
Св-08Г2С	2,5—3,0	0,1—0,3	60	10—15	50	1—2

* Данные ЦНИИТмаш и ЛСХИ.

нагрузка 700—1000 Н; подача на 1 оборот 0,1 мм; частота вращения детали 125 об/мин; диаметр шарика 4,7 мм; число проходов 1 [28].

Для увеличения предела выносливости конусов буровых штанг их поверхность упрочняют обкаткой на приспособлении, которое показано на рис. 50. Оси, на которых вращаются ро-

Результаты испытания буровых штанг

Параметр	Обработка конуса	
	токарная	токарная и наклеп
Число испытанных штанг	15	15
Число пробуренных шпуров	143	226
Длина пробуренных шпуров, м	215	325
Средняя длина шпуров на штангу, м	14,3	22,4

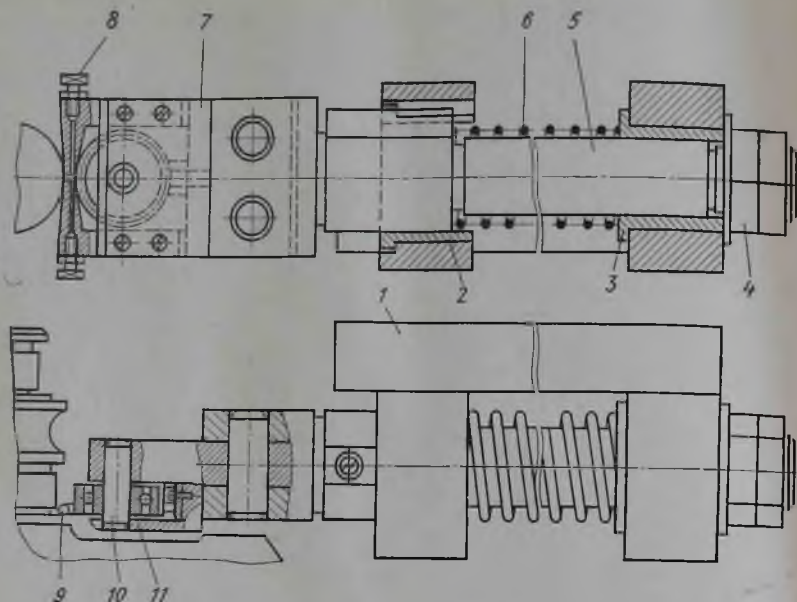


Рис. 49. Приспособление для обкатывания роликовых дорожек лапы бурового долота:

1 — корпус; 2, 3 — втулка; 4 — гайка; 5 — шток; 6 — пружина; 7 — рабочая головка; 8 — установочный винт; 9 — шарик; 10 — ось; 11 — шарикоподшипник

лики 3, изготовлены из стали У7А и подвергнуты термической обработке до твердости HRC 40—43. Фасонные ролики изготовлены из стали Р18 и после термической обработки имеют твердость HRC 60—65. Обкатку производят на токарно-револьверном станке. Конус обкатывается на длине 25—30 мм под давлением 15—20 МПа. Шероховатость поверхности после обкатывания снижается, а долговечность штанг в результате упрочнения концов повышается примерно в 2 раза [37].

Результаты испытания буровых штанг из стали 55С2 при бурении в рудах ($f=16...18$) приведены в табл. 77.

Работы по упрочнению крупных деталей ведутся на Старо-

Краматорском заводе, Уралмашзаводе и др. Здесь глубины наклепа получают до 35 мм. На Уралмашзаводе обкатку производят на токарных, карусельных, расточных, строгальных и фрезерных станках при упрочнении наружных, внутренних, плоских и фасонных поверхностей. Упрочнение обеспечивает увеличение предела выносливости на 50—80% при изгибе, а обработка корня зубьев ($m=30$ мм) конических шестерен привода конусных дробилок мелкого и среднего дробления (сталь 34ХН1М) увеличивает их долговечность в 2—10 раз. Обкатку валов конусных дробилок диаметром 480 мм из стали 40 производят при следующих режимах: давление 40 МПа, подача на 1 оборот 0,5 мм, число проходов 1, диаметр ролика 105 мм, радиус профиля 7 мм.

При обработке роликов сферы ($R=1100$ мм, диаметр 1340 мм) корпуса конусной дробилки (сталь 35Л) шероховатость поверхности достигает $Rz=6,3$ мкм (предварительная обработка — обтачивание $Rz=20$ мкм). Поперечное обкатывание на специальном станке с номинальным усилием 13000 Н корня зубьев ($m=26$ мм) бортовых зубчатых колес экскаватора ЭКГ-4,6 (сталь 30ХМЛ) увеличивает их долговечность в 2—4 раза, а обкатыванием с усилием 5000—25000 Н галтелей $R=8, 10, 15, 20$ центральной цапфы, валов редуктора поворота и осей (сталь 40, 40Х) увеличивает предел выносливости на 30—50%. Обкатка роликом винтовых ручьев ($R=35$ мм, на диаметре 3100 мм и длине 5860 мм) карнатного барабана драговых лебедок (сталь 35Л) снижает шероховатость до $Rz=6,3$ мкм (предварительная обработка — обтачивание).

Для упрочнения галтелей крупных валов, а также резьбы можно использовать вибрирующий ролик, который вдавливаются в упрочняемую поверхность под действием пружинного механизма и передает удары от пневматического устройства. Обкатывание роликами используют для образования резьбы на болтах и шпильках диаметром 20—50 мм, а также упрочнения предварительно нарезанной резьбы. Такая резьба имеет

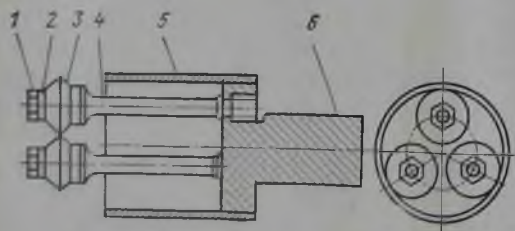


Рис. 50. Приспособление для обкатывания конусов буровых штанг:

1 — гайка; 2 — шайба; 3 — ролик; 4 — стержень; 5 — кожух; 6 — хвостовик

значительно больший предел выносливости, чем нарезная. В зоне впадин повышается твердость металла, возникают сжимающие остаточные напряжения.

7.4. Упрочнение отверстий в деталях

Отверстия в деталях упрочняют преимущественно тремя способами: поверхностным раскатыванием, поверхностным дорнованием, калиброванием шариком. Качество поверхности при этих способах обработки определяется теми же факторами, что и при упрочнении обкатыванием.

При раскатывании упрочнение поверхности происходит в результате качения роликов или шариков относительно обрабатываемой поверхности. Раскатывание применяют после чистового и получистового растачивания, развертывания отверстий, в результате чего получается поверхность с $Rz=0,4$ мкм. Более высокую точность обработки и глубину наклепа (до 5 мм) дают жесткие раскатки. В качестве рабочих элементов у раскаток применяются шарики или конические и цилиндрические ролики, закрепленные в стальных или бронзовых обоймах. Обычно раскатки имеют 10—12 роликов, которые изготавливают из быстрорежущей стали или стали ШХ15 и подвергаются термообработке до твердости HRC 60—63. Шероховатость поверхности роликов должна быть не более $Rz=0,8$ мкм. Раскатывание проводят при относительных скоростях 20—150 м/мин, подачах 0,1—2,7 мм, припуске на сторону не более 0,1 мм и числе проходов 1. Раскатыванием упрочняют отверстия из черных и цветных металлов на токарных, револьверных, расточных и сверлильных станках. В процессе раскатывания рабочее движение может сообщаться заготовке или инструменту. Раскатки используют часто для упрочнения поверхностей гидроцилиндров, цилиндров двигателей и других деталей с диаметром отверстия более 60 мм. Отверстия при раскатывании смазывают машинным маслом.

Роликовую раскатку (рис. 51) для упрочнения цилиндров двигателей внутреннего сгорания закрепляют в шпинделе сверлильного станка. Ролики на рабочий размер устанавливают регулировочной гайкой 8. Раскатывание цилиндров из стали 45, 40Х выполняют при следующих режимах: частота вращения 250 об/мин, подача на 1 оборот 0,7—1,2 мм, число проходов 1. После раскатывания шероховатость поверхности $Rz=1,6$ мкм.

При калибровании шарик из стали ШХ15 проталкивается через обрабатываемое отверстие. Это позволяет получить шероховатость поверхности $Rz=0,4$ мкм и повысить ее твердость на 60%. Калибрование применяют при упрочнении отверстий диаметром 30 мм на длине (0,5—3,0) d . Калибрование чаще всего выполняют на прессах, оборудованных специальными приспособлениями. Для компенсации упругой деформации

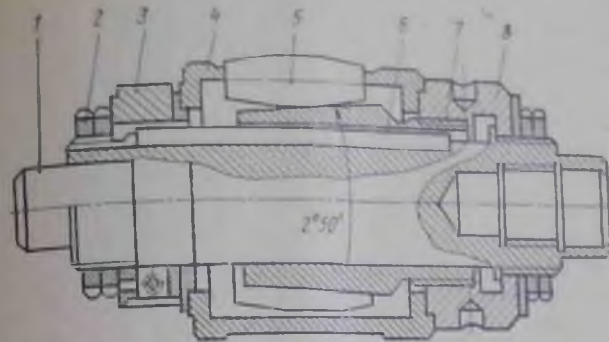


Рис. 51. Роликовая раскатка:

1 — вал; 2 — гайка; 3 — втулка; 4 — сепаратор; 5 — ролики; 6 — шпиндель; 7 — коническая втулка; 8 — регулировочная гайка

диаметр шарика должен быть несколько больше диаметра отверстия. Отверстия при обработке смазывают машинным маслом или смесью масла с графитом.

Таблица 78

Применение поверхностного пластического деформирования для повышения долговечности деталей горного оборудования

Детали	Способ упрочнения
Цилиндрические пружины резонансных и вибрационных грохотов, парашютных устройств; брони конусных дробилок; горно-режущий инструмент (зубки); рессорные листы; рычаги; тяговые и конвейерные цепи и др.	Наклеп дробью
Коленчатые и цилиндрические валы; гильзы; втулки; вкладыши подшипников; вал-шестерни; штоки цилиндров и др.	Центробежно-шариковый наклеп
Крупномодульные зубчатые колеса, шлицы полуосей экскаваторов ЭКГ-5; резьбы валов конусных дробилок; галтели валов; корпуса редукторов, швы сварных конструкций экскаваторов (поворотные платформы, стрелы, балки рукоятей); валы; вал-шестерни и др.	Упрочнение вибрирующим роликом, чеканка
Зубья ковшей экскаваторов; футеровки конусных дробилок и др.	Упрочнение взрывом
Валы редукторов поворота, оси и бортовые шестерни экскаваторов ЭКГ-4,6; корпуса, валы (подступичные части), кольца сепараторов и шестерни привода дробилок; барабаны драговых лебедок (ручьи); втулки шатунов буровых насосов, конуса буровых штанг, штоки цилиндров; гильзы; клапаны; вал-шестерни и др.	Обкатывание, раскатывание

При поверхностном дорновании происходит значительное пластическое деформирование поверхностного слоя отверстия детали, при котором изменяется как шероховатость поверхности, так и физико-механические свойства. Качество обработки определяется натягом, который равен разности диаметров дорна и исходного отверстия. С увеличением натяга увеличивается диаметр отверстия и твердость упрочняемого слоя и снижается шероховатость поверхности. Поверхностное дорнование применяют для упрочнения сквозных отверстий небольшой длины и глубоких отверстий (глубина от 5 до 40 диаметров). Упрочнение отверстий может происходить в результате протягивания или проталкивания дорна. Небольшие отверстия с малыми натягами обрабатывают протягиванием дорна на протяжных станках, а большие — продавливанием на прессах. Материал дорнов роликов для обкатки должен быть одинаков. Отверстия в деталях из сталей обрабатывают с применением касторового масла, а из чугуна — с керосином и глицерином.

Таблица 79

Повышение долговечности деталей поверхностным пластическим деформированием [7]

Детали	Поверхность упрочнения	Способ упрочнения	Эффект упрочнения
Валы конусных дробилок крупного дробления (сталь 40)	Упорные резцы с шагом 12—24 мм; подступичные части диаметром 400—600 мм	Чеканка вибрирующим роликом с энергией удара 32 Дж	Увеличение предела выносливости на 50% при изгибе
Конические шестерни привода конусных дробилок мелкого и среднего дробления	Корень зубьев ($m=30$ мм)	Обкатывание винтовыми роликами на специальном станке с номинальным усилием 7000 Н	Увеличение долговечности в 2—10 раз
Корпуса конусов конусных дробилок (сталь 35Л)	Сфера $R=1100$ мм, диаметром 1340 мм	Обкатывание роликом	Шероховатость поверхности обкатки $Rz=40$ мкм (предварительная обработка—обтачивание $Rz=20$ мкм)
Кольца сепараторов конусных дробилок (латунь Л62)	Сферическая фаска $R=40$ мм в отверстиях диаметром 41 мм	Раскатывание роликом	Шероховатость поверхности после обкатывания $Rz=3,2$ мкм (предварительная обработка—зенкерование)

Скорость поверхностного дорнования при обработке материала выбирают в пределах от 2 до 8 м/мин. Поверхностное дорнование повышает долговечность деталей, работающих при циклических нагрузках, в 2 раза.

Одновременное поверхностное дорнование отверстия и обкатывание наружной поверхности роликом детали из пластического материала обеспечивает максимальное повышение ее предела выносливости.

В табл. 78 даны примеры применения способов пластического деформирования для повышения долговечности деталей горного оборудования.

Уралмашзаводом совместно с ЦНИИТмашем выполнены исследования по повышению долговечности деталей конусных дробилок методом поверхностного пластического деформирования (табл. 79).

8.1. Основные положения по технической диагностике

Техническая диагностика применяется для решения многих задач, в том числе повышения ресурса и сокращения продолжительности ремонта горных машин.

Объектами технической диагностики могут быть машины, оборудование или их составные части — агрегаты, сборочные единицы, детали, техническое состояние которых подлежит определению.

К параметрам, используемым при диагностике, относятся мощность, температура, давление, уровень звуковой мощности и вибрации, количество газов, прорывающихся в картер, и др. К параметрам, характеризующим свойство структуры, системы или ее отдельных элементов относятся размеры, геометрическая форма, взаимное расположение и сопряжение элементов, шероховатость их поверхностей, микроструктура материала и др.

Системы диагностирования применяются при производстве изделия, в процессе наладки и приемки; техническом обслуживании; использовании по назначению, хранении, транспортировании и ремонте.

Диагностика применительно к горным машинам представляет наибольший интерес в связи с повышенной сложностью технических осмотров перед ремонтами. При осмотрах часто применяют простые практические методы диагностики, выработанные в результате длительного опыта эксплуатации горных машин и узаконенные инструкциями по их эксплуатации. Целесообразно также применять методы и средства диагностики, которые уже применяются в смежных областях.

Диагностика представляет собой совокупность действий, в результате которых устанавливается фактическое техническое состояние деталей или сборочных единиц, определяющих работоспособность соответствующей горной машины. Процесс диагностики горных машин состоит из следующих функциональных подпроцессов: получение информации о техническом состоянии объекта, переработка информации, установление технического состояния объекта.

Функциональный процесс получения диагностической информации включает в себя измерение диагностических параметров, формирование диагностической информации, передачу

диагностической информации. Формирование диагностической информации представляет собой трансформирование измеренных диагностических сигналов в вид, удобный для дальнейшей передачи и переработки. Функциональный процесс переработки информации представляет собой получение по определенному алгоритму необходимых вариантов решений о техническом состоянии объекта и включает в себя ввод диагностической информации, ее обработку и вывод информации. Ввод диагностической информации — процесс размещения данных о техническом состоянии объекта в памяти управляющей системы. Обработка диагностической информации — процесс последовательного выполнения логических операций с целью определения фактического технического состояния объекта. Вывод информации — процесс передачи полученных результатов из памяти управляющей системы. Функциональный процесс установления состояния представляет собой выработку информации о фактическом техническом состоянии объекта на момент контроля с учетом полученных данных. Основными элементами этого процесса являются систематизация информации, сопоставление информации и выдача информации о техническом состоянии машин. Систематизация информации — упорядочение полученной информации по определенному признаку.

Технология диагностирования горных машин включает три этапа: подготовительный, основной и заключительный. Во время подготовительного этапа на машине монтируется измерительная аппаратура и датчики. Во время основного этапа после установления режима работы машины замеряют параметры технического состояния и фиксируют их в документации. Это позволяет сопоставить их с ранее измеренными параметрами и определить степень изменения за определенный период работы машины.

На заключительном этапе ставят диагноз, в результате которого определяют характер и объем работ для поддержания работоспособности машины, а также время отправки узлов и агрегатов в ремонт. По диагнозу определяют, какой вид ремонта следует произвести. Так как техническое состояние узлов и агрегатов горных машин характеризуется большим числом параметров, определить которые довольно трудно, то для постановки диагноза можно использовать только основные оценочные параметры.

Использование технической диагностики для контроля качества сборки и приработки машин в процессе изготовления дает возможность обеспечить технически обоснованные гарантийные эксплуатационные сроки и технический ресурс. Для этого необходимо создание конструктивных предпосылок для диагноза машин (установка измерительных приборов или датчиков, наличие приспособлений или мест для их установки).

Техническая диагностика создает условия для сокращения времени ремонта, позволяет увеличить пропускную способность ремонтных предприятий, вследствие чего лучше используются производственные площади.

На специализированных ремонтных предприятиях техническая диагностика может быть использована для контроля качества ремонтных работ. Для этого сопоставляются результаты испытаний технического состояния машин после ремонта и при их изготовлении. Эти же данные принимаются в качестве исходных при постановке диагноза в процессе эксплуатации машин.

Использование технической диагностики, разработанной для определенного типа машин, позволит без предварительной дефектовки выбрать рациональную технологию ремонта и тем самым снизить его стоимость.

В будущем для горных машин и оборудования необходимость выполнения ремонта будет определяться не по опытно-статистическим показателям, а на основе диагностики, т. е. по фактическому состоянию.

Применение технической диагностики для горных машин позволит снизить простои машин в результате правильно установленных ресурсов безотказной работы деталей, узлов и своевременной их замены; обоснованно устанавливать виды и объемы ремонтов; правильно планировать работу ремонтных служб; снизить трудоемкость ремонтов в результате сокращения разборочно-сборочных и ремонтных работ.

Экономическая целесообразность использования средств технической диагностики применительно к горным машинам ожидается прежде всего от сокращения простоев машин и возможности избежать обусловленных ими расходов.

Эффективность диагностики будет возрастать по мере приспособленности машин к ее проведению и разработке для этих целей методов и средств, основанных на современных достижениях науки и техники.

8.2. Методы и средства контроля технического состояния горных машин

Общую диагностику можно выполнять для определения технического состояния горных машин перед постановкой на ремонт или после ремонта для контроля качества. При этом применяют несколько методов. Наиболее распространенным из них является метод оценки эксплуатационных характеристик, представляющий собой совокупность нескольких локальных методов (по показателям эффективности, по расходу энергии, по тепловому состоянию, по расходу продуктов сгорания и др.). Для общей оценки технического состояния двигателей,

редукторов, подшипников качения может быть применен метод контроля по величине колебательных процессов.

Локальную диагностику проводят для установления степени выработки отдельными элементами машин технического ресурса. По ее результатам отправляют сборочные единицы машин на ремонт. Методы контроля, используемые при оценке технического состояния элементов машин, связаны с изменением внешних размеров деталей и применяются для выявления внутренних дефектов в деталях.

Для небольших деталей часто применяют весовой метод. Износ детали определяют по результатам взвешивания. Метод отпечатков применяют в основном для измерения местного износа. Метод вырезания лунок аналогичен методу отпечатков, разница лишь в способе получения лунок. Метод микрометрирования заключается в измерении деталей с помощью измерительных приборов. Метод профилографирования применяют для определения износа в пределах высоты микропериодностей с помощью снятых профилограмм.

Акустический метод контроля применяют в основном для определения технического состояния отдельных деталей и сборочных единиц. Виброакустический метод контроля за техническим состоянием машин — один из наиболее прогрессивных методов, применяемых в настоящее время. Сущность его состоит в том, что при работе машины каждая кинематическая пара является источником виброакустического сигнала, параметры которого зависят от технического состояния данной пары. При этом виброакустический сигнал от каждой кинематической пары отличается временем прихода в точку контроля, амплитудой и спектральным составом. Контроль при этом сводится к выделению сигнала от исследуемой кинематической пары и оценке по параметрам этого сигнала значения износа.

Таблица 80

Основные типы датчиков, применяемых при виброакустическом методе

Датчик	Частотный диапазон, Гц	Максимальное значение измеряемой величины			Масса, г	Погрешность измерения, %
		см	см/с	см/с ²		
Индукционный	1—500	$2 \cdot 10^3$ —2	—	—	2,5—35	5—10
Пьезоэлектрический	5—20 000	—	—	0,003—200	До 3 кг	2—10
Индуктивный	0—500	—	0,7—200	—	0,48—25	4—15
Емкостной	10—20 000	$2 \cdot 10^3$ —0,5	—	—	5	5
Токовых	5—50 000	$1 \cdot 10^3$ —2	—	—	7—25	10—20

Этим методом можно проводить как интегральную оценку износа машины, так и контроль износа отдельных кинематических пар. В табл. 80 приведены основные типы применяемых датчиков.

В последнее время для определения степени износа деталей разработаны радиоиндикаторный метод и дифференциальный метод радиоактивных индикаторов. Дифференциальный метод радиоактивных индикаторов основан на регистрации изменения активности поверхностного слоя детали в результате износа по сравнению с активностью образцов (эталонов). В табл. 81 дана характеристика методов технической диагностики.

Диагностику самосвалов, бульдозеров, скреперов, рыхлителей и других мобильных горных машин можно выполнять как на стационарных диагностических пунктах, так и на передвижных установках, оснащенных (кроме специальной аппаратуры) комплектами соответствующих диагностических приборов.

Для проверки состояния металлоконструкций и сварных швов можно применять ультразвуковой, рентгеновский, люминесцентный и цветной методы. Широко используют для этой цели дефектоскопы УЗД-7Н, УЗД-НИИМ5, ДУК-13 и др.

Таблица 81

Характеристика методов технической диагностики

Метод	Время контроля, мин	Точность измерений, мм	Возможность поэлементной оценки	Обеспеченность приборами	Область применения	Возможная связь с ЭВМ
Акустический	5—10	0,5—1,5	Частично	Полностью	Детали редукторов, двигателей внутреннего сгорания	Технологическая
Радиоиндикаторный	3—5	До 0,001	Возможно	Ограничена	Подвижные сопряжения	Кинематическая
Радиоактивных индикаторов	2—6	До 0,0001	»	То же	То же	То же
Вибрационный	2—6	До 0,001	»	Полностью	»	»
Микрометрирования	2—5	0,002	»	То же	Легкодоступные детали	Технологическая
Отпечатков и вырезанных лунок	2—5	0,02	»	»	То же	То же
Профилографирования	2—5	0,01	»	»	»	»
По показателям эффективности	30—40	—	Нет	Ограничена	Основные агрегаты автомобилей	Кинематическая

Для люминесцентного метода используют проникающую жидкость следующего состава: 50% керосина, ≈ 25% бензина, ≈ 25% трансформаторного масла и 0,02—0,03% флуоресцирующего вещества, состоящего из концентрата углеводородов с ярким желто-зеленым свечением в ультрафиолетовых лучах.

Для цветной дефектоскопии используют проникающие жидкости, имеющие различные составы:

состав 1: бензол 950 мл, трансформаторное масло 50 мл, алюминиевый темно-красный краситель (судан IV) 10 г;

состав 2: керосин 800 мл, бензол 200 мл, судан IV 10 г;

состав 3: коллодий на эфирно-спиртовой основе 700 мл, цинковые белила 50 г, бензол 200 мл, уксус 100 мл;

состав 4: коллодий на ацетоне 600 мл, бензол 400 мл, цинковые белила 50 г.

Для контроля элементов металлоконструкций используют также переносной дефектоскоп 77ДМК-3М.

Фирма SKF (Швеция) выпускает переносной измерительный прибор МЕРА 10А для проверки подшипников качения. Прибор работает по принципу замера ударных импульсов, возникающих в подшипнике и передающихся корпусу.

Широкое применение в США получили системы автоматической диагностики с применением электронных машин для различных видов оборудования. Для контроля технического состояния горного оборудования используют несколько типов электронно-вычислительных машин: «Бендикс С-20», IBM-650, IBM-1401, СА-301 и др.

Для выявления внутренних дефектов в валах приводов роторных экскаваторов длиной до 5 м и диаметром до 400 мм используют ультразвуковой дефектоскоп ДУК-6В. При этом используют специально изготовленную фотографическую приставку для фотографирования осциллограмм контролируемых валов с экрана ультразвукового дефектоскопа перед их установкой в редуктор.

Выпускаемые в настоящее время приборы и приспособления для диагностики, как правило, не дают комплексной оценки состояния горных машин, а сложность их присоединения, высокая стоимость, отсутствие плановой системы тарировки остаются нередко сдерживающим фактором применения диагностики. При этом точность методов испытаний пока остается еще недостаточной.

8.3. Диагностика зубчатых передач и подшипников качения виброакустическим методом

Качество зубчатых передач и подшипников качения после ремонта, а также их техническое состояние в процессе эксплуатации, т. е. необходимость ремонта, можно определять виброакустическим методом.

* В подготовке материала принял участие Г. Н. Логвинов.

На уровень вибраций зубчатых колес и подшипников качения оказывает влияние значительное число факторов: износ рабочих профилей, вязкость масла, частота вращения, наличие примесей в масле. В качестве примера рассмотрим влияние этих факторов на уровень вибрации зубчатых колес и подшипников качения редуктора КН-500 привода конвейера роторного комплекса. Характеристика редуктора: $i=16,5$; $M_{кр}=71\,000$ Н·м; для первой пары $m=12$, $z_1=11$ и $z_2=41$; для второй пары $m=8$, $z_1=23$ и $z_2=100$. Испытательный стенд состоял из двигателя, коробки передач и редуктора со сменными зубчатыми колесами. Иммитацию нагрузок проводили с помощью пружинного механизма, установленного в корпусе редуктора. Частота вращения входного вала редуктора: 100, 250, 500, 750, 1000 об/мин. Для смазки использовались следующие типы масел: промышленное 30Л и 35Л, цилиндрическое 11, автотракторное АК-10, П-28, автотракторное АК-15, цилиндрическое 38.

Износ зубьев зубчатых колес измеряли штангензубомером и с помощью оттисков. Замеряли 15—25% зубьев и определяли среднее значение износа. Износ подшипников определяли специальным приспособлением индикаторного типа. Точность измерений 0,001 мм. Блок-схема измерительной аппаратуры (рис. 52) состояла из датчика, анализирующего устройства и блока регистрации.

Для преобразования механических колебаний в электрические использовался пьезоэлектрический датчик КД-21, который был установлен в точках, дающих наиболее полную информацию о состоянии кинематических пар, т. е. на гнездах подшипников входного, промежуточного и выходного валов. Для выделенных точек, в которых флуктуации виброакустического сигнала независимы, были определены следующие частотные полосы: 40—500, 500—1000, 1000—3200, 3200—5000 Гц.

Зависимость уровней и амплитуд виброакустического сигнала зубчатых колес и подшипников качения от их износа приведены в табл. 82 и 83 и на рис. 53, а и 54, а.

Акустическая энергия, излучаемая при качении шарика, пропорциональна суммарной нагрузке на контактную поверхность при полном давлении. При смазке происходит обволакивание

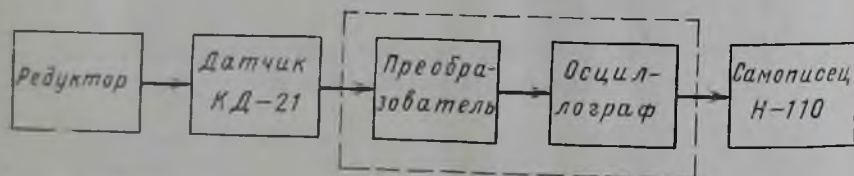


Рис. 52. Блок-схема аппаратуры для анализа и записи виброакустического сигнала

Таблица 82
Значения виброакустического сигнала зубчатых колес при различном износе зубьев ($m=12$)

Износ зубьев, мм	Уровень виброакустического сигнала (дБ) в диапазонах частот, Гц				
	0—500	500—1000	1000—1500	1500—2000	2000—2500
0,1	10,1	11,5	10,1	13,0	11,4
0,15	10,8	11,5	10,8	14,1	12,3
0,2	12,9	15,8	15,3	16,3	13,9
0,4	15	18,0	20,1	18,7	14,3
0,6	16,1	18,7	22,4	23,9	15,0
0,8	17,3	20,3	23,6	28,7	19,4
1,0	19,4	21,4	23,9	31,4	20,6
1,2	20,3	22,4	24,6	34,2	21,8
1,5	23,5	23,6	25,8	37,8	23,7

шероховатостей тел качения, но так как применяемые в редукторах масла имеют относительно малую вязкость, шарик продавливает масляную пленку и контакт с поверхностью не нарушается. Однако образующаяся в месте контакта масляная пленка уменьшает коэффициент трения скольжения и нагрузку из-за увеличения пятна контакта шарика с беговой дорожкой подшипника. Уменьшение нагрузки ведет к уменьшению вибрации. Масляная пленка, обволакивающая микронеровности, смягчает удары при зацеплении, что также уменьшает вибрацию.

Значения уровня и амплитуды виброакустического сигнала при использовании масел различной вязкости и количества примесей в масле даны в табл. 84 и на рис. 53, б, в и 54, б, в.

Таблица 83
Значения виброакустического сигнала подшипников качения при различном износе ($m=12$)

Износ подшипника (мм)	Уровень виброакустического сигнала (дБ) в диапазонах частот, Гц				
	0—500	500—1000	1000—1500	1500—2000	2000—2500
0,02	11,2	11,1	11,15	11,9	11,3
0,04	11,3	11,8	12,50	14,6	12,2
0,06	12,4	12,7	14,20	15,2	12,8
0,08	12,8	13,1	16,0	15,4	13,0
0,10	13,9	13,3	17,4	15,8	13,4
0,12	15,1	13,9	18,3	16,2	14,0
0,14	15,6	14,5	19,2	16,4	14,4
0,16	17,0	15,1	21,0	16,6	15,8
0,18	18,4	16,3	22,0	16,9	16,2
0,20	19,6	18,4	25,7	17,2	16,4

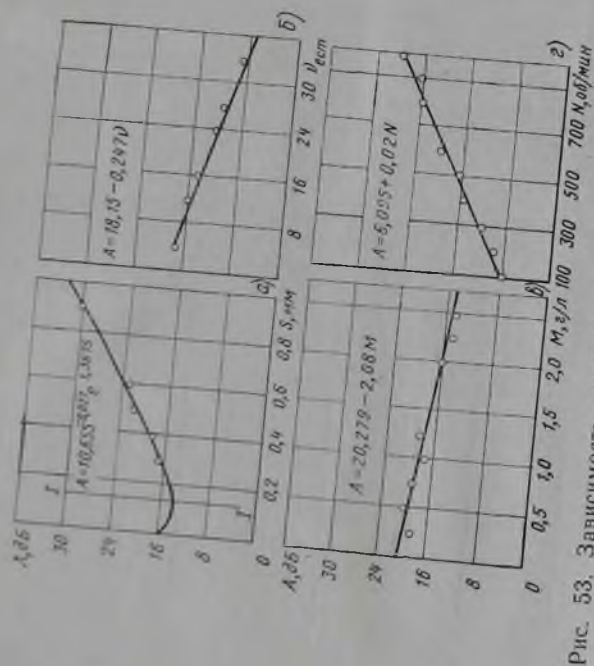


Рис. 53. Зависимость амплитуды виброакустического сигнала от износа зубьев; б) — от вязкости масла; в) — от загрязненности масла; г) — от частоты вращения

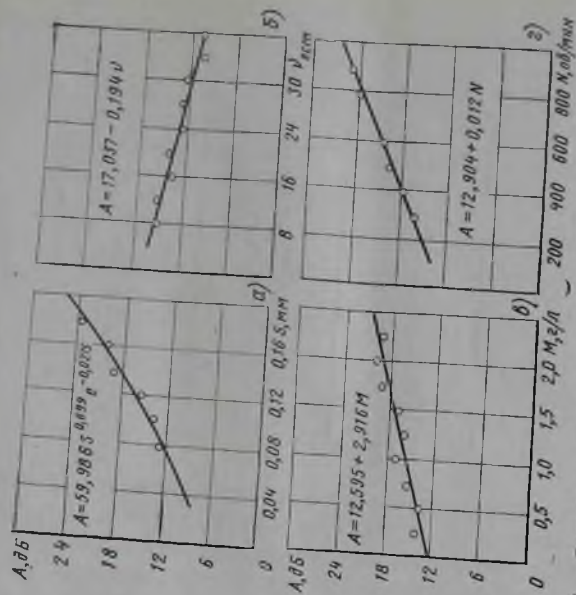


Рис. 54. Зависимость амплитуды виброакустического сигнала подшипников качения: а) — от износа тел качения; б) — от вязкости масла; в) — от загрязненности масла; г) — от частоты вращения

Таблица 84
Значение виброакустического сигнала зубчатых колес при применении различных марок масел и количества в них примесей

Масло	Примеси, г/л	Уровень виброакустического сигнала (дБ) в диапазоне частот, Гц				
		0—500	500—1000	1000—1500	1500—2000	2000—2500
Автотракторное АК-10	1,0	11,4	12,0	14,3	17,4	15,4
Цилиндровое 11	1,5	9,3	10,9	14,1	15,6	13,8
Автотракторное АК-15	2,00	8,4	9,1	13,2	14,1	13,4
Индустриальное 45	2,5	7,3	7,4	10,6	10,8	8,7
П-28	2,75	6,8	6,2	9,8	8,5	8,2
Цилиндровое 40	3,0	5,7	6,0	8,1	8,9	6,8

Уровни вибрации с увеличением количества примесей в масле уменьшались во всем диапазоне частот (от 0 до 2500 Гц).

С повышением температуры уровень вибрации повышался так же, как и с повышением частоты вращения зубчатых передач (рис. 53, г) и подшипников качения (рис. 54, г). Данные получены для радиальных роликоподшипников с внутренним диаметром 80—200 мм. Всего было исследовано 102 подшипника качения и 60 зубчатых пар. Полученные зависимости показывают влияние различных факторов на уровень вибрации зубчатых колес и подшипников качения. Для оценки их технического состояния рассматривалась совокупность факторов. Для этого применяли множественный корреляционно-регрессионный анализ. При этом устанавливали формы корреляционной связи, т. е. виды функции регрессии (линейной, параболической, гиперболической и т. д.); оценивали корреляционную связь.

В качестве независимых переменных принимали:

для зубчатых колес — износ S , мм; вязкость масла $v_{\text{ест}}$; частоту вращения N , об/мин; загрязненность масла M , г/л; для подшипников качения — износ S , мм; температура нагрева t , °C; вязкость масла $v_{\text{ест}}$; частоту вращения N , об/мин; загрязненность масла M , г/л.

В качестве зависимой переменной в обоих случаях принимали амплитуду виброакустического сигнала. При этом устанавливали зависимости:

$$\text{для зубчатых колес } H_{\text{з.к}} = f(S, v, N, M);$$

$$\text{для подшипников качения } A_{\text{п.к}} = f(S, v, N, M, t).$$

Для определения вида корреляционной связи была принята гипотеза о наличии множественной линейной корреляции. Уравнение регрессии в этом случае имеет вид:

для зубчатых колес $y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4$;
для подшипников качения $y = a_{01} + b_{11}x_{11} + b_{21}x_{21} + b_{31}x_{31} + b_{41}x_{41} + b_{51}x_{51}$, где y — зависимая переменная; $x_1, \dots, x_4$; $x_{11}, \dots, x_{51}$ — независимые переменные; $a_0, a_{01}, b_1, \dots, b_4, b_{11}, \dots, b_{51}$ — чистые коэффициенты регрессии.

Для вычисления коэффициентов регрессии составляли систему линейных уравнений, решение которой позволило получить коэффициенты регрессии $b_1, b_{11}, \dots, b_{51}$.

Свободный член уравнения регрессии определяли из выражений

$$a_0 = \bar{y} - b_1\bar{x}_1 - b_2\bar{x}_2 - b_3\bar{x}_3 - b_4\bar{x}_4;$$

$$a_{01} = \bar{y}_1 - b_{11}\bar{x}_{11} - b_{21}\bar{x}_{21} - b_{31}\bar{x}_{31} - b_{41}\bar{x}_{41} - b_{51}\bar{x}_{51},$$

где $\bar{y}; \bar{y}_1; \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_4; \bar{x}_{11}, \dots, \bar{x}_{51}$ — средние значения наблюдаемых величин; $b_1, \dots, b_5; b_{11}, \dots, b_{51}$ — коэффициенты регрессии.

В табл. 85 и 86 приведены результаты вычисления показателей множественной линейной корреляции для зубчатых колес и подшипников качения указанных приводов конвейеров роторного комплекса. На основании данных таблиц получены уравнения регрессии:

для зубчатых колес

$$A = 5,9 - 0,29 \cdot 10^{-4}v - 0,128 \cdot 10^{-3}M + 0,02N + 0,01S;$$

Таблица 85

Показатели множественной линейной корреляции для зубчатых колес

Фактор	Обозначение фактора в модели	Среднее значение фактора	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент регрессии a_i	Частный коэффициент корреляции		Коэффициент регрессии b_i
					Значение	Показатели значимости, определенные по критерию Стьюдента	
A	y	15,9	1,15	—	—	—	5,9
v	x_1	9,98	4,73	0,0012	0,093	0,021	$0,29 \cdot 10^{-4}$
M	x_2	2,09	0,548	0,061	0,84	0,0084	$0,128 \cdot 10^{-3}$
N	x_3	495,0	57,66	0,10	0,11	0,083	0,02
S	x_4	0,265	0,057	0,14	0,159	0,159	0,01

Примечание: 1. Коэффициент множественной корреляции $R = 0,99$. 2. Стандартная ошибка множественного уравнения регрессии $S = 0,0108$. 3. Показатель значимости коэффициента R по F -распределению равен 129,18.

Таблица 86

Показатели множественной линейной корреляции для подшипников качения

Фактор	Обозначение фактора в модели	Среднее значение фактора	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент регрессии a_i	Частный коэффициент корреляции		Коэффициент регрессии b_i
					Значение	Показатели значимости, определенные по критерию Стьюдента	
A	y	14,75	1,43	—	—	—	11,4
S	x_1	0,095	0,012	0,172	0,73	2,14	19,56
M	x_2	0,741	0,460	0,240	0,69	1,95	0,74
v	x_3	12,39	7,04	-0,097	-0,43	-0,96	-0,019
N	x_4	156,2	109,55	0,18	0,75	2,31	0,0024
t	x_5	37,59	20,54	0,30	0,65	1,75	0,021

Примечание: 1. Коэффициент множественной корреляции $R = 0,98$. 2. Стандартная ошибка множественного уравнения регрессии $S = 0,0957$. 3. Показатель значимости коэффициента R по F -распределению равен 87,67.

для подшипников качения

$$A = 11,4 + 19,56S + 0,74M - 0,019v + 0,24 \cdot 10^{-2}N + 0,021t.$$

Адекватность полученных уравнений регрессии оценена подстановкой независимых переменных в уравнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальтер М. А. Упрочнение деталей машин. М., Машиностроение, 1968. 194 с.
2. Банатов П. С. Износ и повышение долговечности горных машин. М., Недра, 1970. 252 с.
3. Берштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. М., Металлургия, 1968, т. 1, 2. 1166 с.
4. Бескровный Н. Т. Экономика и оптимизация надежности ремонта горношахтного оборудования. М., Недра, 1974. 214 с.
5. Богачев И. Н., Журавлев Л. Г. Исследование износостойкости сталей при абразивном изнашивании.— В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев, Изд-во АН УССР, 1960, т. 1, с. 472—475.
6. Богомолов М. С. Оценка экономической эффективности модернизации машин, проводимой с целью повышения их надежности. Научные труды ВОСТНИГРИ, Барнаул, 1973, вып. XII, с. 70—75.
7. Бреславский В. М. Обкатка роликами как метод повышения качества крупных деталей.— В кн.: Производство крупных машин. М., Машиностроение, 1975, вып. XXV, с. 230—232.
8. Вайнерман А. Е. Плазменная наплавка металлов. Л., Машиностроение, 1969. 323 с.
9. Ветров Ю. А. Изнашивание экскаваторных зубьев как фактор сопротивления грунтов резанию.— В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев, Изд-во АН УССР, 1960, т. 2, с. 282—285.
10. Ветров Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами. М., Машиностроение, 1971. 360 с.
11. Волков Д. П., Николаев С. Н., Марченко И. А. Надежность роторных траншейных экскаваторов. М., Машиностроение, 1972. 207 с.
12. Высокотемпературные неорганические покрытия /Под ред. Д. Гуменика. М., Металлургияиздат, 1968. 340 с.
13. Георгиев М. Н., Попова Л. В. Сравнение методов разделения ударной вязкости.— Заводская лаборатория, 1969, № 5, с. 605—610.
14. Головин Г. Ф., Замятин М. М. Высокочастотная термическая обработка. Л., Машиностроение, 1968. 228 с.
15. Гуляев А. П. Металловедение. М., Металлургия, 1977. 643 с.
16. Долговечность буровых станков и механических лопат. Отчет ИГД МЧМ СССР, Свердловск, 1975. 76 с.
17. Елизаветин М. А., Сателъ Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. М., Машиностроение, 1969. 400 с.
18. Журков А. В. Влияние методов выплавки на качество стали 12ХНЗМА. М., Металлургия, 1976, т. 1, с. 15—17.
19. Ками Н. В. Металлизация распылением. М., Машиностроение, 1966. 200 с.
20. Коновалов Е. Г. Чистовая и упрочняющая обработка поверхностей. Минск, Высшая школа, 1968. 363 с.
21. Конструкционные материалы. Под ред. А. Т. Туманова. Советская энциклопедия, 1969, т. 3. 527 с.
22. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики, пластмасс. М., Машиностроение, 1966. 432 с.
23. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. М., Металлургия, 1976. 408 с.
24. Макеев А. М., Найдено Ю. М., Соколов Ю. В. Вскрышные работы на осадочных месторождениях. М., Недра, 1978. 120 с.
25. Метелин Е. П. Выбор методов и режимов восстановления изношенных деталей оборудования угольных и горнорудных предприятий. Днепрпетровск, изд. Днепропетровского горного института, 1976. 104 с.
26. Методы повышения долговечности деталей машин /Под ред. В. Н. Ткачева. М., Машиностроение, 1971. 272 с.
27. Минкевич А. Н., Улыбин Г. Н. Хромирование и борирование стали при нагреве ТВЧ.— МнТОМ, 1959, № 4, с. 19—21.
28. Морозов В. И., Морозов Г. И. Способы повышения долговечности восстановленных деталей горного оборудования. М., Цветметинформация, 1974. 72 с.
29. Основы ремонта машин /Под ред. Ю. Н. Петрова. М., Колос, 1972. 527 с.
30. Петров И. В., Домбровская И. К. Повышение долговечности рабочих органов дорожных машин наплавкой. М., Транспорт, 1970. 105 с.
31. Пикус Е. А., Туманов В. С., Устименко Н. П. Дробеметное упрочнение напайного горнорезающего инструмента в угольной промышленности. М., ЦНИЭуголь, 1975. 175 с.
32. Положение о планово-предупредительных ремонтах (ППР) механического оборудования предприятий черной металлургии СССР. Тула, Приокское книжное изд-во, 1973. 369 с.
33. Полые оси и валы /Л. М. Школьник, Ю. Е. Коновалов, Н. И. Мартынов и др. М., Машиностроение, 1968. 179 с.
34. Ратнер М. Л. К определению эффективности повышения долговечности деталей и узлов машин. М., Вестник машиностроения, 1965, № 2, с. 46—47.
35. Ремонт забойных машин /Б. П. Воробьев, В. П. Воробьев, Ю. Л. Ковенский и др. М., Недра, 1976. 216 с.
36. Русихин В. И., Алексеев Е. Б. К вопросу о техническом обслуживании комплекса «Лауххаммер». Научные труды МГИ, М., 1973, с. 216—220.
37. Русихин В. И., Иголкин А. Н., Гуля Н. И. Повышение усталостной прочности конусов буровых штанг методом обкатки.— Горный журнал, 1974, № 3, с. 53—54.
38. Русихин В. И. Износ зубьев ковшей карьерных экскаваторов непрерывного действия.— В кн.: Физические и химические процессы горного производства. М., изд. МГИ, 1976, с. 149—151.
39. Солод В. И., Гетопанов В. Н., Штильберг И. Л. Надежность горных машин и комплексов. М., изд. МГИ, 1972. 198 с.
40. Солод Г. И., Шахова К. И., Мотовилова Л. И. Технологические способы повышения качества круглозвенных цепей забойных конвейеров. М., НИИинформтяжмаш, 1971, с. 2—13.
41. Солод Г. И., Титиевский Е. М., Русихин В. И. Исследование износа броней конусных дробилок.— Горный журнал, 1975, № 2, с. 45—48.
42. Сорокин Л. М. Упрочнение деталей борированием. М., Машиностроение, 1972. 62 с.
43. Справочник сварщика /Под ред. М. Степанова. М., Машиностроение, 1971, т. 4, 275 с.
44. Степанов В. А., Бабусенко С. М. Современные способы ремонта машин. М., Колос, 1972. 335 с.
45. Тененбаум М. М. Износостойкость деталей и долговечность горных машин. М., Госгортехиздат, 1960. 246 с.
46. Технологическая инструкция для машинистов экскаваторов с емкостью ковша от 4 до 8 кубометров. Свердловск, 1972. 178 с.
47. Типовой проект научной организации труда на ремонт экскаваторов. М., 1976, 18 с.
48. Усов Л. Н., Борисенко А. И. Применение плазмы для получения высокотемпературных покрытий. М.—Л., Наука, 1965. 86 с.

49. Физические основы электроискровой обработки материалов / Под ред. Б. А. Карасюк. М., Наука, 1966. 212 с.
50. Хосуй А. Техника напыления. М., Машиностроение, 1975. 288 с.
51. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование абразивного изнашивания сталей при трении об абразивную поверхность.— В кн.: Трение и износ в машинах. М., Наука, 1970, с. 240—242.
52. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания металлов. М., Изд.-во АН СССР, 1960. 35 с.
53. Черкез М. Б. Хромирование. Л., Машиностроение, 1971, с. 79—92.
54. Шадричев В. А. Ремонт автомобилей. М., Высшая школа, 1970. 480 с.
55. Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М., Машиностроение, 1972. 288 с.
56. Эксплуатационная надежность и техническое обслуживание экскаваторов ЭКГ-8 и ЭКГ-8И/В. А. Голубев, А. Е. Троп, Н. М. Карасев и др. Свердловск, изд. Свердловского горного института, 1971. 122 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Оценка качества горных машин	5
1.1. Систематизация средств механизации добычи полезных ископаемых	5
1.2. Требования к методике оценки качества и функциональная мощность горных машин	11
1.3. Методика оценки качества горных машин	14
1.4. Оценка качества горных машин	19
Глава 2. Оценка качества материала	26
2.1. Методика оценки качества материала по химическому составу	26
2.2. Методика оценки качества стали по механическим свойствам	29
2.3. Оценка качества стали по механическим свойствам	31
2.4. Взаимосвязь качества стали по составу и механическим свойствам	33
Глава 3. Условия эксплуатации и долговечность деталей горных машин	35
3.1. Условия эксплуатации и требования к долговечности горных машин	35
3.2. Общие сведения по долговечности машин	38
3.3. Долговечность горных машин	42
3.4. Экономическая эффективность повышения долговечности деталей горных машин	52
Глава 4. Основные виды разрушения деталей горных машин	57
4.1. Классификация видов разрушения сопряженных деталей	57
4.2. Абразивный износ деталей горных машин	65
4.3. Изнашивание типовых деталей и сопряжений горных машин и методы их измерения	74
Глава 5. Термическое и химико-термическое упрочнение деталей горных машин	79
5.1. Основные виды объемной термической обработки деталей	79
5.2. Химико-термическая обработка деталей	88
5.3. Термомеханическая обработка деталей	101
5.4. Виды брака при термической обработке деталей	104
5.5. Поверхностное упрочнение без изменения химического состава поверхности деталей	104
Глава 6. Наплавка и гальванические покрытия	115
6.1. Классификация видов наплавки и выбор наплавочных материалов	115
6.2. Плазменная обработка	128

6.3. Хромирование и осталивание	131
6.4. Электроискровое упрочнение	134
6.5. Диффузионная металлизация	138
Глава 7. Повышение долговечности деталей методом холодного пластического деформирования	144
7.1. Общие положения	144
7.2. Упрочнение деталей обработкой дробью	146
7.3. Упрочнение деталей поверхностным обкатыванием	156
7.4. Упрочнение отверстий в деталях	164
Глава 8. Техническая диагностика горных машин	168
8.1. Основные положения по технической диагностике	168
8.2. Методы и средства контроля технического состояния горных машин	170
8.3. Диагностика зубчатых передач и подшипников качения виброакустическим методом	173
Список литературы	180

ИБ № 657

**Григорий Иванович Солод, Кира Ивановна Шахова,
Валентин Иванович Русихин**

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГОРНЫХ МАШИН

Редактор *О. Ф. Корсун*

Технический редактор *Н. В. Тимофеевко*

Корректор *А. П. Озерова*

Обложка художника *В. А. Бондарева*

Сдано в набор 13.03.79. Подписано в печать 05.07.79. Т-13224.

Формат 60×90^{1/16} Бумага типографская № 2

Гарнитура литературная Печать высокая

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 11,8. Тираж 1370 экз. Заказ 205. Цена 60 к.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, ГСП-6,
1-й Басманный пер., 3.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР

по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.