



ОБРАБОТКА И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

при изготовлении
и восстановлении
деталей



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Научно-производственное объединение «Центр»
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля

ОБРАБОТКА И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

при изготовлении
и восстановлении
деталей

Под общей редакцией М.Л. Хейфеца и С.А. Клименко



Минск
«Беларуская навука»
2013

УДК 621.81:621.9.04

Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.] ; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 463 с. – ISBN 978-985-08-1630-6.

Рассмотрены технологии, оборудование и инструменты для изготовления и восстановления деталей машин. Проведен анализ основных методов размерной обработки деталей лезвийными и алмазно-абразивными инструментами, поверхностным пластическим деформированием и комбинированными электро-физико-химическими методами. Приведены рекомендации по выбору способов обработки деталей с покрытиями, инструментальных материалов и геометрических параметров инструментов.

Предназначена для научных работников и инженеров, а также для студентов и аспирантов, изучающих технологии и оборудование машиностроения.

Табл. 157. Ил. 219. Библиогр.: 83 назв.

А в т о р ы:

В. И. Бородавко, В. С. Ивашко, С. А. Клименко, М. Л. Хейфец

Р е ц е н з е н т ы:

академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор П. А. Витязь,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор А. Ф. Ильюшенко

ISBN 978-985-08-1630-6

© Оформление. РУП «Издательский дом
«Беларуская навука», 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Упрочнение поверхностей и нанесение защитных покрытий обеспечивают возможности изготовления деталей, обладающих высокой долговечностью и достаточной надежностью, повышают эксплуатационную стойкость деталей машин и инструментов, позволяют восстанавливать размеры и свойства изношенных поверхностей. Нанесение покрытий дает возможность получить необходимые жаростойкость, износостойкость, коэффициент трения и другие характеристики, а также сократить расход дефицитных и дорогостоящих металлов, используемых для объемного легирования [10, 69]. Такая технология позволяет получить сочетание прочного, износостойкого, твердого поверхностного слоя с пластичной и вязкой трещиностойкой основой. Так как слои защитных покрытий на базе легирующих компонентов наносятся лишь на рабочие поверхности деталей, их расход определяется размерами этих поверхностей, а не объемом деталей. При этом в тонком поверхностном слое можно обеспечить такие высокие физико-механические свойства, каких практически невозможно достичь для всего объема детали.

Проблеме упрочнения поверхностей и нанесения защитных покрытий уделяется большое внимание. Разработаны методы скоростной химико-термической обработки деталей, наплавки композиционных твердых сплавов, газотермического нанесения покрытий из порошков сложного состава, процессы физического и химического осаждения из паровой фазы и многие другие. Длительное время при разработке технологических процессов изготовления деталей с покрытиями основное внимание уделяли операциям нанесения покрытий, а обеспечению необходимой точности размеров и формы поверхностей деталей с покрытиями, в том числе их размерной обработке, уделялось недостаточное внимание. При этом методы, приемы и режимы размерной обработки деталей с покрытиями часто выбирались такими же, как при обработке аналогичных деталей без покрытия, и не учитывались их специфические особенности. К ним относятся прежде всего структурная неоднородность, нестабильность физико-механических свойств, пористая структура, высокая твердость многих покрытий, в ряде случаев сравнимая или даже превышающая твердость некоторых инструментальных материалов, а также относительно низкая прочность сцепления покрытия с основным металлом, значительно ограничивающая интенсификацию обработки покрытий.

Кроме того, при обработке покрытий возникает сложное напряженно-деформированное состояние, связанное с особенностями структуры покрытий,

наличием переходной зоны между покрытием и основным металлом детали, а также возникновением термических напряжений вследствие различных коэффициентов термического расширения покрытия и основного металла детали. При этом имеет место сложная картина распространения тепловых потоков, связанная с различными теплофизическими свойствами материалов покрытия и основы детали. Во многих случаях необходимо также учитывать физико-химические процессы, имеющие место в зоне контакта инструмента и обрабатываемого покрытия.

К основным тенденциям развития технологии нанесения защитных высокопрочных покрытий относятся использование концентрированных источников энергии (лазерных и электронных пучков, низкотемпературной плазмы и др.), создание новых композиций материалов покрытий, комплексная механизация, автоматизация и роботизация технологических процессов получения покрытий. Так как во многих случаях не удается получить за одну стадию нанесения слоя материала требуемое качество покрытий, часто их подвергают дополнительной упрочняющей обработке – термической, химико-термической, термомеханической и др.

Несмотря на важность проблемы упрочнения и обработки деталей с покрытиями, до настоящего времени системно и комплексно не излагались современные достижения в технологиях обработки и упрочнения при изготовлении и восстановлении деталей машин и механизмов.

1.1. Восстановление и упрочнение деталей машин

Сущность восстановления изношенных деталей состоит в возвращении им свойств, заложенных во время изготовления и утраченных при эксплуатации. Такими свойствами являются твердость и износостойкость трущихся поверхностей, структура и сплошность материала, форма, размеры, взаимное расположение и шероховатость рабочих поверхностей, усталостная прочность, жесткость и распределение массы детали относительно оси вращения. Многократно повторяющийся процесс восстановления детали должен быть построен рациональным образом с оптимизацией критерия расхода производственных ресурсов (материальных, трудовых и энергетических).

Изношенная деталь ремонтного фонда превращается в годную деталь в результате технологических воздействий на нее исполнителей и средств восстановления и может при этом находиться в следующих состояниях: исходная заготовка, ремонтная заготовка, восстановленная деталь. Исходная заготовка в общем случае превращается в ремонтную заготовку путем создания восстановительных слоев материала на восстанавливаемых поверхностях, а ремонтная заготовка в деталь – в результате механической, термической, химико-термической и других видов обработки. При этом используют комплекс основных технологических операций (табл. 1.1) [78].

Таблица 1.1. Схема технологического процесса восстановления деталей

Определение устранимых повреждений исходных заготовок и комплектование		
Определение маршрутов восстановления		
Формирование партий исходных заготовок		
Запуск партий деталей на восстановление		
Предварительная механическая обработка		
Создание припусков на обработку:		
нанесением покрытий	установкой и закреплением ДРД	использованием изношенного приповерхностного слоя
Термическая обработка		
Черновая механическая обработка		
Термическая или химико-термическая обработка		
Чистовая механическая обработка		
Обработка ППД		
Отделочная обработка		
Очистка от технологических загрязнений		
Контроль		

Механической обработкой, предшествующей нанесению восстановительных покрытий или установке дополнительной ремонтной детали (ДРД), придают правильную геометрическую форму восстанавливаемым поверхностям.

Современное восстановительное производство располагает множеством способов наращивания слоев материала на восстанавливаемых поверхностях. Это различные способы и материалы для различных видов наплавки, газотермического напыления, нанесения гальванических покрытий, припекания, пластического деформирования и др. Некоторые детали (валы, гильзы, поршни и др.) допускают восстановление под ремонтные размеры их шеек, отверстий и плоскостных элементов.

На стадии создания ремонтной заготовки в основном формируют структуру рабочих поверхностей детали, что определяет ее послеремонтную надежность. Необходимая износостойкость и другие свойства поверхностей достигаются выбором материала покрытия, термической, химико-термической и другими видами упрочняющей обработки.

Технологические операции восстановления, сопровождающиеся существенным тепловложением в основной материал детали, должны быть отделены от последующих операций «технологическим барьером» в виде термической обработки. Ее назначение – снятие внутренних напряжений, уменьшение размера зерна материала и стабилизация формы и размеров детали [68, 71].

Технологические задачи механической обработки разделяются на три группы. Первая группа связана с обеспечением требуемого взаимного расположения поверхностей детали, вторая – формы геометрических элементов, третья – формирования в поверхностном слое детали требуемого по условиям эксплуатации состояния. Точность взаимного расположения поверхностей обеспечивают выбором технологических баз и соответствующей установкой детали относительно движущегося инструмента. Точность формы и состояние поверхностного слоя после обработки достигаются соответствующей жесткостью и точностью оборудования, выбором инструмента и расчетами режимов обработки.

При черновой механической обработке снимают основную часть операционного припуска. Заданную точность размеров и шероховатость поверхностей, близкую к нормативной, достигают в результате чистовой обработки. Чистовая обработка для шеек валов в большинстве случаев выполняется абразивным инструментом, для отверстий чаще применяют тонкое растачивание и хонингование. Детали, испытывающие при эксплуатации знакопеременные нагрузки, после чистовой обработки проходят операцию поверхностного пластического деформирования, назначение которой – закрыть микротрещины и создать наклепанный слой с внутренними напряжениями сжатия.

Отделочные операции (полирование, суперфиниширование, хонингование) предназначены для снятия разупрочненного при механической обработке слоя и обеспечения требуемой высокой чистоты поверхностей.

Каждый метод обработки отличается кинематикой процесса, формой поверхностей резания, образующихся при движении режущих кромок относительно

заготовки. С переходом от предварительных методов к чистовым и отделочным кинематика процесса, как правило, усложняется, увеличивается число режущих элементов на рабочей поверхности инструмента, что в свою очередь приводит к усложнению формы поверхностей резания и росту их числа на единицу площади обрабатываемой поверхности. Так, при переходе от точения к шлифованию число поверхностей резания на единицу площади увеличивается с 8–30 до 20 000 (табл. 1.2), при переходе от шлифования к суперфинишированию с учетом уменьшения зернистости инструмента – с 1000–20 000 до 2000–40 000 [61].

Таблица 1.2. Влияние метода обработки на число поверхностей резания

Метод обработки	Число режущих элементов на рабочей поверхности инструмента	Число поверхностей резания на 1 мм ² обрабатываемой поверхности
Обтачивание:		
черновое	1	1–4
чистовое	1	4–8
тонкое	1	8–30
Фрезерование:		
черновое	8–50	2–8
чистовое	8–50	8–16
Шлифование:		
черновое	1–5*	2–100
чистовое	5–50*	100–1000
тонкое	50–1000*	1000–20000
Суперфиниширование	100–10000*	2000–40000

* Число элементов на 1 мм² поверхности инструмента.

На деталях после обработки находятся технологические загрязнения (стружка, зерна абразивного инструмента, остатки СОЖ, полировальные пасты и др.), которые могут в течение нескольких часов работы вывести из строя систему смазки отремонтированной машины или машину в целом. Поэтому детали, направляемые на сборку, должны быть очищены от этих загрязнений. Особое внимание необходимо уделять очистке масляных каналов и внутренних полостей.

Контрольные операции необходимы для установления соответствия состояния восстановленной детали требованиям технической документации (чертежа, карты технического контроля). Контрольные операции оснащают средствами для измерения геометрических параметров, значений физико-механических свойств и других характеристик. Контроль геометрических параметров некоторых точных деталей (шатунов, поршней, поршневых пальцев и др.) выполняют в термостатных помещениях при температуре 17–23 °С.

Консервационная защита деталей до 3–5 дней обеспечивается техническими моющими средствами, применяемыми для очистки деталей от технологических загрязнений. Для более длительного хранения необходима специальная консервация маслами, промасленной бумагой, парафиносодержащими и другими средствами.

1.2. Размерная обработка деталей машин

При разработке технологических процессов изготовления и восстановления деталей с покрытиями необходимо учитывать не только особенности операций нанесения покрытий, но и специальные требования по обеспечению необходимой точности размеров и формы поверхностей с покрытиями и их расположения относительно других поверхностей. При этом методы, приемы и режимы размерной обработки деталей с покрытиями часто, как правило, отличаются от таковых при обработке аналогичных деталей без покрытий. При разработке технологии необходимо учитывать специфические особенности покрытий. К ним относятся прежде всего структурная неоднородность, нестабильность физико-механических свойств, пористая структура, высокая твердость многих покрытий, в ряде случаев сравнимая или даже превышающая твердость некоторых инструментальных материалов, а также относительно низкая прочность сцепления покрытия с основным металлом, значительно ограничивающая интенсификацию обработки.

Кроме того, при обработке покрытий возникает сложное напряженно-деформированное состояние, связанное с особенностями структуры покрытий, наличием переходной зоны между покрытием и основным металлом детали, а также возникновением термических напряжений вследствие различных коэффициентов термического расширения покрытия и основного металла детали при обработке. Имеет место сложная картина распространения тепловых потоков, связанная с различными теплофизическими свойствами материалов покрытия и основы детали. Во многих случаях необходимо также учитывать физико-химические процессы, имеющие место в зоне контакта инструмента и обрабатываемого покрытия.

Для достижения заданных формы, размера, взаимного расположения поверхностей, шероховатости поверхностей и физико-механических свойств поверхностных слоев детали применяют различные методы обработки: резание лезвийными и абразивными инструментами, поверхностное пластическое деформирование, электрофизические, электрохимические, термические и другие методы.

При механической обработке заготовок (деталей) припуск обычно снимается частями, на различных операциях, с постепенным уменьшением величины операционного припуска по мере приближения размера обрабатываемой поверхности к заданному размеру по чертежу. Поэтому обработку заготовок подразделяют на несколько видов: обдирочная, черновая, получистовая, чистовая, тонкая, отделочная. В технологических процессах восстановления и упрочнения деталей следует также различать обработку, предшествующую нанесению покрытия, и обработку покрытий или модифицированных поверхностей. Рассмотрим основные характеристики этих видов обработки в порядке последовательности их использования.

Обдирка. В восстановительной и упрочняющей технологии применяется редко. В общем случае применяется для заготовок крупных деталей 16–18-го ква-

литета точности (поковок, отливок 3-го класса точности). Она уменьшает погрешности формы и пространственных отклонений грубых заготовок. Обдиркой достигается точность 15–16-го качества, а шероховатость поверхности $Ra > 100$. Иногда применяется для обработки крупных наплавленных деталей.

Черновая обработка. Используется для заготовок, подвергшихся обдирке, а также крупных штампованных заготовок 2–3-й группы точности и для отливок 2-го класса точности (соответствует 15-му качеству точности). Черновая обработка выполняется в большом диапазоне точности 12–16-го качества. Шероховатость поверхности – в пределах значений $Ra 25–100$.

Получистовая обработка. Этот вид обработки назначается для заготовок, у которых при черновой обработке не может быть снят весь припуск. Кроме того, ее назначают для заготовок, к точности которых предъявляются повышенные требования, что вызывает необходимость уменьшения операционных припусков и увеличения количества операций обработки (вводится получистовая обработка). Точность этого вида обработки 11–12-й качество, шероховатость поверхности $Ra 12,5–50$.

Чистовая обработка. Применяется как окончательный вид обработки для тех поверхностей, заданная точность которых укладывается в точность, достигаемую чистовой обработкой. Она применяется в виде однократной обработки поверхностей заготовок, полученных точными методами (высокоточным литьем, точной штамповкой и др.). Операция чистовой обработки может быть также включена в технологический процесс как промежуточная под последующую тонкую или отделочную обработку. Точность чистовой обработки 8–11-й качество, а шероховатость поверхности $Ra 2,5–12,5$. Применяется также в качестве промежуточной обработки под последующую отделку. Однократной чистовой обработке подвергают заготовки и поверхности, полученные точными методами (кокильное литье, штамповка по первой группе точности и др.), на режимах, близких к режимам чистовой обработки.

Тонкая обработка. Это один из видов обработки, окончательно формирующей высокую точность поверхностей заготовки. Выполняется при весьма малых значениях операционного припуска и весьма малых подачах (0,05–0,15 мм/об), высоких скоростях резания и малых глубинах резания (0,05–0,5 мм), что обеспечивает высокую точность. Шероховатость поверхности обработанной заготовки из стали $Ra 0,63–2,5$.

Отделочная (финишная) обработка. Применяется в основном для получения заданной шероховатости поверхности заготовки. На точность заготовки влияния почти не оказывает. Выполняется, как правило, в пределах допуска предшествующей обработки. Отделочная обработка при различных методах и обрабатываемых материалах обеспечивает получение шероховатости поверхности $Ra 0,16–0,63$.

Существуют различные методы: обработка лезвийными и абразивными инструментами, обработка поверхностным пластическим деформированием, электрофизическая и электрохимическая обработка.

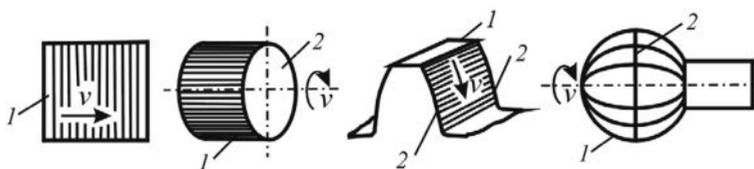


Рис. 1.1. Схемы образования поверхностей деталей

Лезвийным инструментом в большинстве случаев можно выполнять экономически обоснованную обработку металлов с твердостью до 45HRC, а абразивными инструментами более целесообразно вести обработку материалов высокой твердости. Однако современные лезвийные инструменты, оснащенные сверхтвердыми материалами, позволяют обрабатывать поверхности и заготовки с твердостью и выше 45 HRC.

Детали машин имеют в основном плоские, плоские линейные, цилиндрические, конические, сферические и винтовые поверхности. Даже в том случае, если поверхность детали имеет более сложную форму, она может быть с достаточной точностью представлена совокупностью нескольких перечисленных поверхностей. Поверхности обрабатываемых заготовок можно рассматривать как непрерывное множество последовательных положений одной производящей линии 1, называемой образующей, движущейся по другой производящей линии 2, называемой направляющей (рис. 1.1).

Различают *реальную* геометрическую поверхность, полученную в результате обработки заготовки на станке, и *идеальную*. На отклонение реальной поверхности от заданной влияют различные факторы – как случайные, так и систематического характера, например принятый метод формообразования поверхности.

Существуют четыре метода формообразования поверхностей: копирования, огибания, следа и касания.

Метод *копирования* – форма режущей кромки инструмента соответствует производящей линии, например получение фасонной поверхности на токарном станке методом врезания (рис. 1.2, а) или обработка на фрезерном станке шлицев вала (рис. 1.2, б).

Метод *огибания* – образующая линия получается как огибающая последовательного ряда положений режущей кромки инструмента в результате его

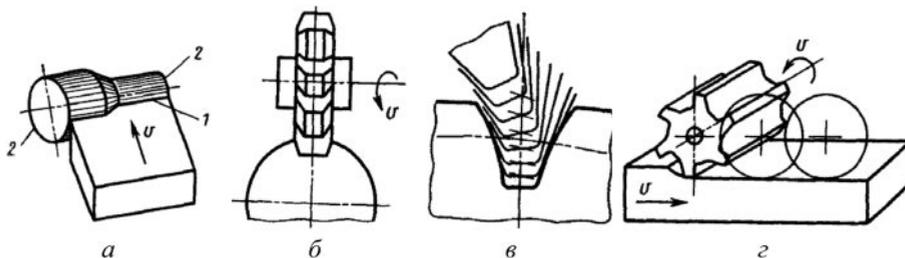


Рис. 1.2. Методы образования производящих линий

перемещения относительно обрабатываемой поверхности заготовки, например при нарезании зубьев цилиндрического колеса (рис. 1.2, в).

Метод *следа* – образующая линия является траекторией движения вершины режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой заготовки, а направляющая – траекторией движения соответствующих точек заготовки (например, обтачивание цилиндрических поверхностей).

Метод *касания* – направляющей линией является касательная к ряду геометрических вспомогательных линий, образованных траекторией движения режущих кромок инструмента (рис. 1.2, з).

Исполнительные движения, обеспечивающие цикл работы станка, делят на формообразующие, установочные и делительные: *установочные* – обеспечивают требуемое положение заготовки и инструмента с целью получения заданного размера; *делительные* – предназначены для поворота заготовки или инструмента на заданный угол. Формообразующие движения заготовки и инструмента, при которых происходит резание металла, принято разделять на главное движение резания и движение подачи.

1.3. Технологии обработки деталей с покрытиями

Технологический процесс изготовления детали с покрытием, с точки зрения обеспечения требуемой точности, значительно отличается от процесса обработки деталей из однородных материалов [41]. Предварительно заготовка подвергается так называемому уточнению – обработке для придания формы и размеров, максимально приближающихся к готовой детали. Степень этого приближения зависит от возможности искажения геометрии заготовки в процессе последующей обработки, включая нанесение покрытий, а также от требуемой толщины покрытия.

Величина увеличения точности заготовки определяется расчетным путем как отношение допусков на размеры поверхностей до и после обработки [55].

На этапе предварительной обработки заготовки увеличение точности

$$\varepsilon_1 = \delta_{31} / \delta_{32},$$

где δ_{31} , δ_{32} – допуски на размеры исходной заготовки и после предварительной обработки.

На этапе нанесения покрытия

$$\varepsilon_2 = \delta_{32} / (\delta_{32} + K\delta_n),$$

где δ_n – допуск на толщину наносимого покрытия; K – коэффициент, учитывающий расположение покрытия относительно детали (при одностороннем расположении покрытия относительно контролируемого размера поверхности $K = 1$, при двухстороннем $K = 2$).

На этапе обработки покрытия

$$\varepsilon_3 = (\delta_{32} + K\delta_n) / \delta_d,$$

где δ_d – допуск на размер поверхности с покрытием.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Технологии и оборудование для изготовления и восстановления деталей	5
1.1. Восстановление и упрочнение деталей машин	5
1.2. Размерная обработка деталей машин	8
1.3. Технологии обработки деталей с покрытиями	11
1.4. Обработка деталей резанием	14
1.4.1. Кинематические параметры процесса резания	14
1.4.2. Геометрические параметры режущего инструмента	17
1.4.3. Стружкообразование в процессе резания металлов	20
1.4.4. Силы резания и тепловые явления при обработке материалов	22
1.4.5. Износ режущих инструментов	27
1.5. Оборудование для обработки резанием	30
1.5.1. Токарные станки	32
1.5.2. Шлифовальные станки	33
1.5.3. Многоцелевые станки	38
1.5.4. Станки с параллельной кинематикой	40
1.6. Состояние поверхностного слоя детали после обработки	43
Глава 2. Лезвийная обработка конструкционных материалов	47
2.1. Инструментальные материалы	47
2.1.1. Инструментальные стали	49
2.1.2. Твердые сплавы	50
2.1.3. Керамика	54
2.1.4. Сверхтвердые материалы	56
2.1.5. Покрытия рабочих поверхностей инструментов	59
2.2. Лезвийные инструменты	62
2.2.1. Технологические возможности лезвийной обработки	66
2.2.2. Резцы и расточные инструменты	69
2.2.3. Фрезерные инструменты	74
2.2.4. Сверла, зенкеры и развертки	78
2.2.5. Резьбообразующие инструменты	83
2.3. Тенденции развития технологий лезвийной обработки	85
2.4. Обработка инструментами, оснащенными быстрорежущими сталями, твердыми сплавами и керамикой	90
2.4.1. Обработка наружных цилиндрических поверхностей	90
2.4.2. Обработка внутренних и торцовых поверхностей	97
2.4.3. Обработка плоских и фасонных поверхностей	99
2.5. Обработка инструментами с режущими элементами из природных алмазов	106
2.6. Обработка инструментами с режущими элементами из синтетических алмазов	114
2.7. Обработка инструментами с режущими элементами на основе плотных модификаций нитрида бора	121

Глава 3. Лезвийная обработка деталей с покрытиями	130
3.1. Материалы для оснащения лезвийных инструментов, применяемых при обработке покрытий	130
3.2. Обработка резанием высокопрочных покрытий	139
3.2.1. Назначение припуска при обработке деталей с покрытиями.	140
3.2.2. Выбор условий обработки деталей с покрытиями	144
3.2.3. Механика процесса резания покрытий	148
3.2.4. Температура резания при обработке покрытий	153
3.2.5. Стойкость инструмента при обработке покрытий	155
3.3. Режимы резания при обработке деталей с покрытиями	158
3.4. Применение инструментов, оснащенных сверхтвердыми материалами	163
3.4.1. Точение деталей с покрытиями	164
3.4.2. Фрезерование деталей с покрытиями	169
3.4.3. Резьбонарезание, сверление, зенкерование и развертывание	172
3.5. Методы повышения работоспособности режущего инструмента	176
3.5.1. Управление условиями процесса резания	176
3.5.2. Управление свойствами инструментальных материалов	180
Глава 4. Абразивная обработка конструкционных материалов	182
4.1. Технологии и инструменты абразивной обработки	182
4.1.1. Области применения абразивной обработки	183
4.1.2. Микрорезание единичным зерном и рабочей поверхностью инструмента	191
4.1.3. Изнашивание абразивных инструментов	194
4.1.4. Кинематика и динамика абразивной обработки	198
4.1.5. Тепловые явления при шлифовании	203
4.1.6. Выбор характеристик абразивного инструмента	206
4.1.7. Качество шлифованной поверхности	215
4.2. Круглое шлифование	218
4.2.1. Виды круглого шлифования	219
4.2.2. Инструменты и режимы круглого шлифования	220
4.3. Плоское шлифование	224
4.3.1. Виды плоского шлифования	224
4.3.2. Технологические особенности плоского шлифования	229
4.3.3. Выбор инструментов и режимов плоского шлифования	235
4.3.4. Обдирочное и глубинное шлифование	239
4.3.5. Торцовое планетарное шлифование	242
4.4. Обработка эластичными абразивными инструментами	246
4.4.1. Ленточное шлифование и полирование	247
4.4.2. Обработка фибровыми дисками и лепестковыми кругами	251
4.5. Отделочная абразивная обработка	254
4.5.1. Хонингование	254
4.5.2. Суперфиниширование	259
4.5.3. Притирка	262
Глава 5. Алмазно-абразивная обработка деталей с покрытиями	267
5.1. Инструменты для шлифования покрытий	267
5.2. Обработка газотермических покрытий	271
5.3. Обработка наплавленных покрытий	280
5.4. Обработка гальванических покрытий	285
5.5. Ленточное шлифование покрытий	290
5.6. Обработка покрытий эластичным инструментом	294
5.7. Хонингование, суперфиниширование и притирка деталей с покрытиями	297

Глава 6. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием	302
6.1. Классификация методов обработки ППД	302
6.2. Статические методы обработки ППД	305
6.2.1. Обкатывание и раскатывание	305
6.2.2. Поверхностное выглаживание	310
6.2.3. Вибрационное накатывание и выглаживание	318
6.2.4. Поверхностное дорнирование	319
6.3. Ударные методы обработки ППД	320
6.3.1. Наклепывание и чеканка	321
6.3.2. Вибрационная ударная и пульсирующая обработка	325
6.4. Упрочняющее формоизменение поверхностей	327
Глава 7. Комбинированные методы обработки деталей	330
7.1. Совмещение технологических воздействий	330
7.2. Обработка с нагревом и охлаждением	334
7.2.1. Использование тепла наплавки	335
7.2.2. Обработка термомеханическая, с нагревом ТВЧ и с электроконтактным подогревом	338
7.2.3. Электромеханическая и легирующе-деформирующая обработка	340
7.2.4. Плазменно-механическая обработка	344
7.2.5. Ротационная обработка с плазменным нагревом	350
7.2.6. Обработка с охлаждением	352
7.3. Обработка с ультразвуком	353
7.3.1. Безразмерная и размерная ультразвуковая обработка	353
7.3.2. Механическая обработка с ультразвуком	355
7.4. Обработка потоком свободных абразивных частиц	357
7.4.1. Обработка разреженным потоком	358
7.4.2. Обработка уплотненным потоком	362
7.4.3. Магнитно-абразивная обработка	363
7.5. Электрофизико-химические методы обработки	366
7.5.1. Электроискровая обработка	367
7.5.2. Электроимпульсная обработка	369
7.5.3. Электроконтактная обработка	371
7.5.4. Термомеханическая очистка	374
7.5.5. Электроабразивная и электроалмазная обработка	375
7.5.6. Алмазная электролитическая обработка катодами	379
7.5.7. Абразивное электроэрозионное шлифование	381
7.5.8. Алмазно-искровое шлифование	386
7.5.9. Электрохимическое полирование и анодно-механическая обработка	389
7.5.10. Электрофизико-термическая обработка	392
Глава 8. Технологические методы обеспечения качества деталей с покрытиями	393
8.1. Технологическое наследование эксплуатационных свойств	393
8.2. Подготовка поверхностей деталей под нанесение покрытий	397
8.2.1. Механические способы подготовки поверхностей	400
8.2.2. Способы абразивной подготовки поверхностей	407
8.2.3. Электрофизико-химические способы подготовки поверхностей	413
8.3. Геометрические характеристики поверхностей деталей с покрытиями после механической обработки	415
8.3.1. Лезвийная обработка покрытий	415
8.3.2. Шлифование покрытий	422
8.3.3. Обработка покрытий инструментами из абразивных лент	426

8.4. Физико-механическое и химическое состояние поверхностного слоя	432
8.4.1. Структурно-фазовые превращения и химический состав поверхностного слоя	432
8.4.2. Остаточные напряжения в поверхностном слое	435
8.5. Комплексная оценка параметров состояния поверхностного слоя	439
8.6. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей с покрытиями	444
8.6.1. Работоспособность деталей в зависимости от параметров состояния по- верхностного слоя	445
8.6.2. Износостойкость деталей с высокопрочными покрытиями	448
Заключение	454
Литература	456

Научное издание

Бородавко Владимир Иванович
Ивашко Виктор Сергеевич
Клименко Сергей Анатольевич
Хейфец Михаил Львович

**ОБРАБОТКА И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ**

Редактор *И. Л. Дмитриенко*
Художественный редактор *Т. Д. Царева*
Технический редактор *О. А. Толстая*
Компьютерная верстка *С. Н. Костюк*

Подписано в печать 22.11.2013. Формат 70 × 100¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 37,7. Уч.-изд. л. 32,3. Тираж 120 экз. Заказ 235.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».
ЛИ № 02330/0494405 от 27.03.2009. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.