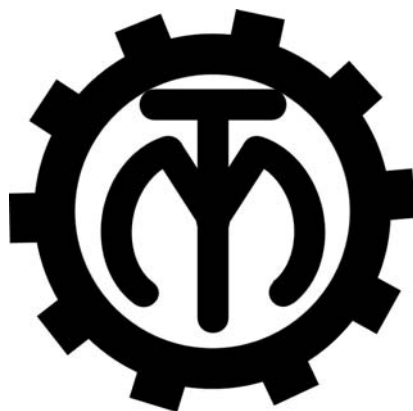


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
15.03.03 «Прикладная механика» очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.7  
ББК 34.44  
Т38

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «21» февраля 2023 г.,  
протокол № 10

Составители: канд. техн. наук, доц. В. М. Шеменков;  
ст. преподаватель М. А. Рабыко

Рецензент канд. техн. наук, доц. Д. М. Свирепа

В методических рекомендациях изложены перечень и содержание практических работ по дисциплине «Технологические методы повышения износостойкости и восстановления деталей машин». Даны рекомендации по их выполнению.

Учебное издание

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Ответственный за выпуск	В. М. Шеменков
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2023

## Содержание

1 Практическая работа № 1. Расчет режимов обработки при поверхностном дорновании.....	4
2 Практическая работа № 2. Расчет режимов обработки при алмазном выглаживании .....	17
3 Практическая работа № 3. Обоснование и выбор способа восстановления деталей машин .....	22
4 Практическая работа № 4. Разработка вариантов технологических процессов восстановления деталей машин.....	26
Список литературы.....	34

# 1 Практическая работа № 1. Расчет режимов обработки при поверхностном дорновании

**Цель работы:** приобретение практических навыков расчета режимов обработки при поверхностном дорновании.

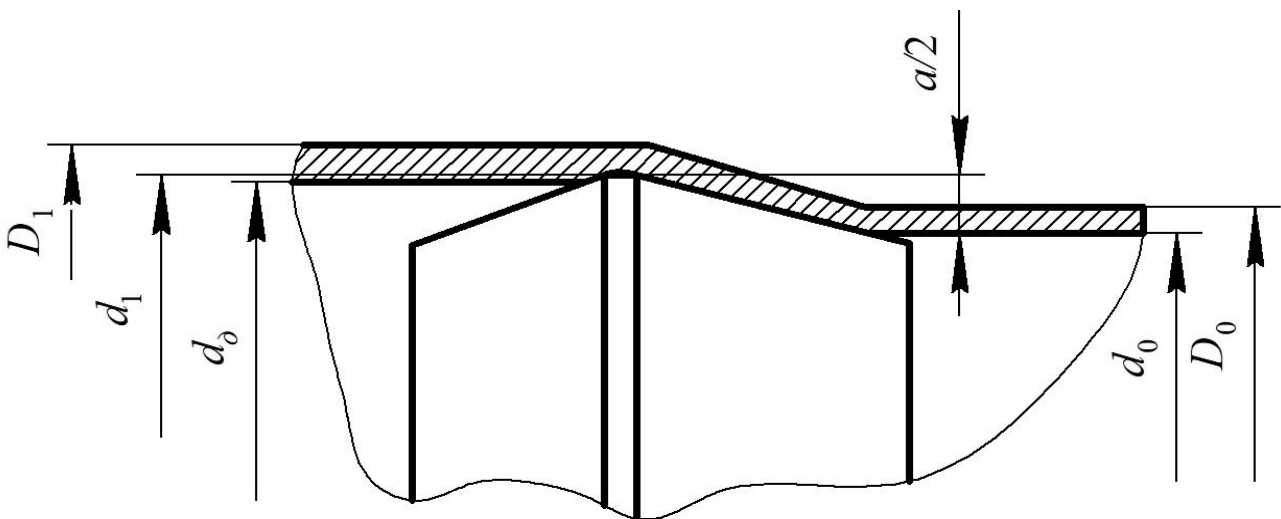
## 1.1 Краткая характеристика, технологические возможности и область применения процесса дорнования

На практике точная обработка отверстия оказывается более сложной, чем обработка наружной поверхности.

При обработке отверстий, в связи с ограниченностью рабочего пространства в нём, приходится уменьшать размеры поперечного сечения режущего инструмента, т. е. снижать его жесткость и допускать появление вибраций в процессе резания. Кроме того, обработка усложняется плохим выводом стружки [1].

Следовательно, из-за перечисленных выше проблем для точной обработки отверстий выгодно применять дорнование. После данного процесса шероховатость отверстия уменьшается. Кроме того, при данном методе отсутствует снятие стружки, поскольку это метод ППД (поверхностного пластического деформирования).

Сущность процесса дорнования заключается в перемещении рабочего инструмента дорна в отверстии заготовки с натягом (рисунок 1.1).



$d_0, d_1$  – диаметр отверстия заготовки до и после дорнования;  $d_d$  – диаметр дорна;  $D_0, D_1$  – наружный диаметр детали до и после дорнования;  $a$  – натяг

Рисунок 1.1 – Схема дорнования

В процессе обработки за счёт натяга обеспечивается упрочнение металла в поверхностном слое, сглаживание исходной шероховатости, а также улучшается точность отверстия. При дорновании поверхность отверстий,

выполненных в металлических деталях, подвергают пластической деформации в холодном состоянии, за счет чего на них формируется слой, отличающийся исключительными механическими характеристиками (рисунок 1.2) [2].

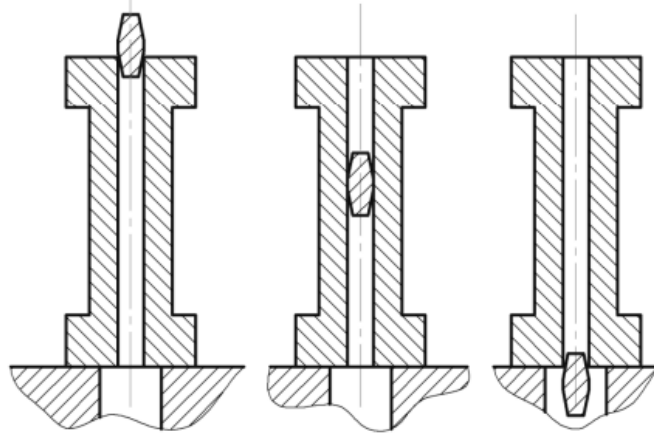


Рисунок 1.2 – Схема процесса дорнования

Дорнование глубоких отверстий малого диаметра (с  $d = 1...3$  мм), выполняемое с использованием больших суммарных натягов (до  $0,1d$ ) твердосплавными дорнами, является простым и производительным методом их отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающим высокую точность и качество поверхностного слоя отверстий, в том числе полученных сверлением спиральными сверлами.

Дорнование может быть использовано, кроме упрочнения, и для специальных целей – повышения статической прочности различных деталей типа цилиндров [3].

Поверхностное дорнование обеспечивает обработку отверстий с точностью IT 6...9 и шероховатостью  $Ra = 0,32...0,04$  мкм. При поверхностном дорновании пластически деформируется поверхностный слой. Поверхностное дорнование относят к методам ППД.

Объемное дорнование относят к методам обработки металлов давлением, пластическое деформирование происходит по всему поперечному сечению обрабатываемой детали. При объемном дорновании в заготовках за один рабочий ход многозубого дорна можно получить отверстия точностью IT11 и шероховатостью обработанных поверхностей –  $Ra = 0,63...0,04$  мкм.

В дальнейшем в работе будет рассматриваться только метод поверхностного дорнования.

### ***Схемы и режимы обработки при дорновании***

Известны три основные схемы дорнования.

1 Дорнование отверстий с осевым «сжатием» заготовки (рисунок 1.3, а). Применяют для изготовления втулок, гильз с отношением  $L/d5$  между дорнами устанавливают опорные кольца. Опорные кольца уменьшают прогиб образующей дорнованного отверстия. Заготовки в виде колец и коротких втулок

обрабатывают пуансонами, прошивками либо протяжками в наборе по несколько деталей.

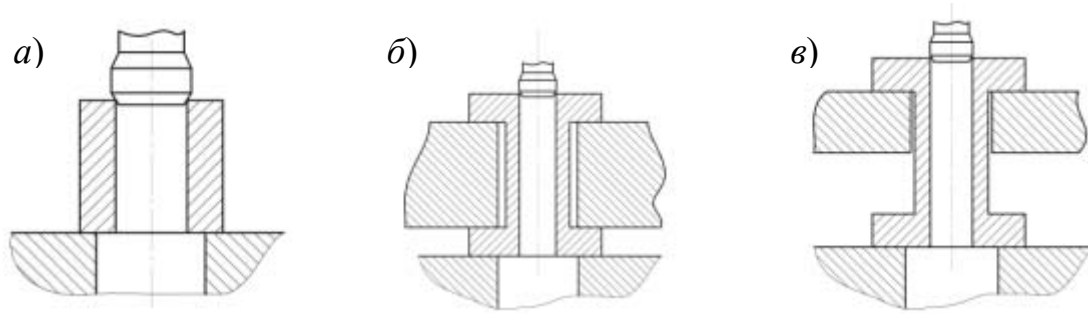


Рисунок 1.3 – Схемы дорнования

При деформации отверстия в передающем сечении заготовки возникают осевые сжимающие напряжения, величина которых ограничена потерей устойчивости тонкостенных длинных труб [4].

2 Дорнование отверстий в длинных, тонкостенных гильзах с отношением  $L/d > 8 \dots 10$  производится по схеме с растяжением детали (рисунок 1.3, б). При этом деталь опирается на технологический фланец, бурт, выточку, предварительно образуемую на трубной заготовке. В отверстиях таких деталей со стороны фланца предусматривается коническая заходная часть либо выточка, что исключает деформацию фланца в процессе дорнования.

В передающей зоне детали возникают осевые растягивающие напряжения, снижающие вероятность появления прогиба образующих, а наличие фланца значительно повышает допускаемую раздачу отверстия до момента появления признаков разрушения металла [4].

Данная схема рекомендуется для обработки отверстий дорнованием в гильзах с фланцами.

3 С осевым заневоливанием (рисунок 1.3, в).

В зависимости от величины и направления действующих на заготовку осевых сил различают схемы дорнования с осевым сжатием (схема сжатия), с осевым растяжением (схема растяжения) и с дополнительным натяжением свободного конца заготовки (схема с противонатяжением). Схемы сжатия применяют в основном для обработки сравнительно коротких изделий с отношением, а схемы растяжения и с противонатяжением – для обработки длинных изделий типа гильз и корпусов гидроцилиндров.

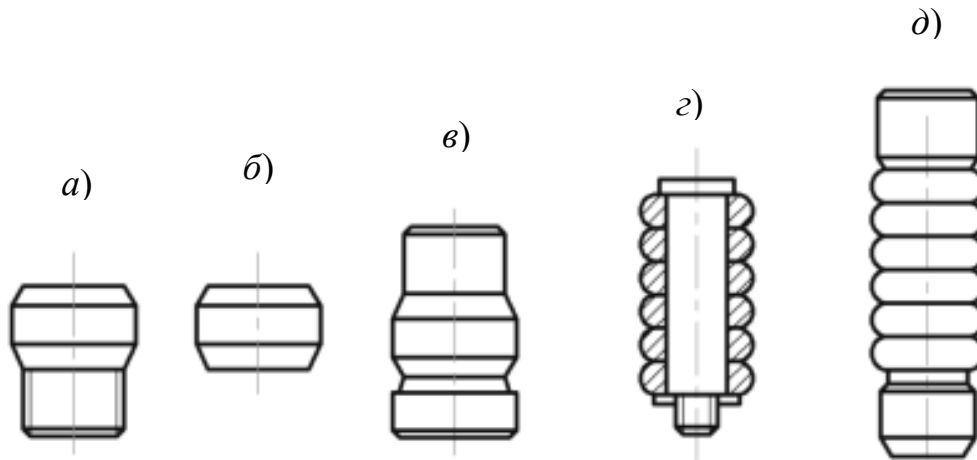
Дорн – инструмент для дорнования. Дорны могут быть однозубые и многозубые, цельные и набранные из отдельных зубьев.

По конструктивному оформлению дорны бывают самых различных типов (рисунок 1.4) [3].

При дорновании однозубым дорном по схеме сжатия заготовка устанавливается на неподвижную опору, дорнование производится со стороны свободного торца. По сравнению с другими схемами дорнования характеризуется наименьшим утонением стенки и наибольшим укорочением заготовки.

Дорнование однозубым дорном по схеме растяжения производится со

стороны опорного торца. Схема предпочтительнее предыдущей, т. к. обеспечивает более высокую точность обработки отверстия заготовки. Утонение стенки более интенсивное, укорочение минимальное.



*a* – однозубый с хвостовиком для работы на протяжном станке; *б* – однозубый без хвостовика для работы на прессе; *в* – однозубый без хвостовика с направляющим пояском; *г* – наборный дорн; *д* – цельный многозубый дорн

Рисунок 1.4 – Виды дорнов

Дорнование с противонапряжением осуществляется с помощью специального натяжного устройства, обеспечивающего определенный уровень осевых напряжений в стенках заготовки. Натяжение заготовки существенно изменяет условия деформирования. Схема дорнования с противонапряжением может быть использована для управления деформациями с целью получения заданного изменения толщины стенки.

Дорнование многозубыми дорнами применяется с целью совмещения дорнования с калиброванием отверстия заготовки для получения точного отверстия и малой шероховатости обработанной поверхности. Осуществляется по схемам сжатия, растяжения или противонапряжения.

Осевые напряжения при многозубом дорновании всегда переменны по длине заготовки. Распределение этих напряжений зависит от принятой схемы дорнования, числа деформирующих зубьев дорна и их относительного расположения, величины суммарного натяга дорнования и схемы его распределения по зубьям дорна и других факторов. У поверхности отверстия образуются благоприятные в эксплуатации сжимающие остаточные напряжения.

К дорнам применяют жёсткие требования при их изготовлении, поскольку после дорнования шероховатость обработанной поверхности должна уменьшаться и достигается точность диаметра обрабатываемого дорнованием отверстия. Рабочие поверхности дорнов обрабатываются с шероховатостью  $Ra = 0,08 \dots 0,04$  мкм, которая обычно формируется доводкой [6].

Для изготовления дорнов используют стали и сплавы инструментальные (У10А и У12А); легированные (ХВГ, ШХ15, Х12Ф и ХВ5); быстрорежущие (Р18), высокомарганцовистая сталь ЭИ-256 показала хорошие результаты по

износостойкости, твёрдые сплавы (BK8, BK10, BK15). Стальные дорны могут успешно применяться при обработке цветных сплавов. Для повышения стойкости дорнов на их рабочую поверхность наносят износостойкие покрытия, например, из нитрида хрома (CrN) или нитрида титана (TiN) [6].

Их применение позволяет обеспечить высокую стойкость инструментов и в большинстве случаев избавиться от нежелательного явления схватывания материалов инструмента и обрабатываемой детали.

Рабочая часть зубьев дорна может быть выполнена в виде сферы или тора, а также в виде двух усеченных конусов, соединенных у их больших оснований 14-цилиндрической ленточкой. Вследствие высокой технологичности наиболее распространенными являются дорны с рабочей частью последнего вида. Один из конусов является рабочим и осуществляет пластическое деформирование материала детали, а второй – обратным, и обеспечивает плавный выход дорна (зуба) из очага пластической деформации. Цилиндрическая ленточка, соединяющая эти конусы, формирует диаметр получаемых отверстий. Углы рабочего и обратного конусов обычно принимают равными и выбираются из соображений обеспечения минимального усилия, необходимого для проталкивания (протягивания) дорна через отверстие. Их оптимальные значения находятся в пределах  $6^\circ \dots 12^\circ$ . Оптимальная ширина цилиндрической ленточки –  $0,1 \dots 3$  мм. Находят применение также инструменты с нанесенным на их рабочую поверхность регулярным микрорельефом. Твердосплавные шары, как инструменты, имеют ряд достоинств, к которым относятся: точность формы, высокая прочность и стойкость. Однако их изготовление возможно лишь на специализированном оборудовании. Значительным недостатком шаров, проявляющимся при дорновании отверстий малых диаметров, является невозможность работы с большими натягами. Например, чтобы углы контакта шара диаметром 2 мм с обрабатываемым отверстием не превышали  $10^\circ$ , натяг должен быть меньше 0,03 мм.

После закалки и отпуска достигаемая твёрдость рабочей поверхности стальных дорнов доходит до HRC 62...65. Стальные дорны, покрытые тонким слоем хрома, толщиной 0,005...0,012 мм, или азотированные на глубину 0,5...0,7 мм, имеют стойкость в 2–4 раза больше. Опытным путём было установлено, что наилучшие результаты по стойкости дают твёрдосплавные дорны [1].

### **Режимы дорнования.**

Для успешной реализации процесса дорнования следует соблюдать следующие требования.

#### **1 Выбор оптимального натяга.**

Основным параметром режима дорнования является натяг. От его величины зависит величина остаточного деформирования, степень и глубина наклепа, величина и глубина распространения остаточных напряжений и т. д. В свою очередь, величину оптимального натяга следует выбирать с учетом ряда факторов: механических свойств обрабатываемого металла, равномерности и



толщины стенок заготовки, размера отверстия, величины и направления следов исходной шероховатости, качества смазывающей жидкости и др.

Считается, что при  $D/d > 3$  усилия дорнования (и контактные давления) сохраняются постоянными, наружная область деталей независимо от натяга дорнования всегда находится в упругом состоянии, а вытесняемый из отверстия металл в основном смещается в виде наплывов на торцы деталей, как показали предварительные эксперименты, нельзя распространять на область больших натягов дорнования. Вполне очевидно, что влияние указанного геометрического параметра на процесс дорнования отверстий нужно рассматривать во взаимосвязи с другими геометрическими параметрами полых цилиндров – диаметром отверстий  $d$  и относительной высотой  $L/d$ , а также режимами дорнования, его схемами и механическими свойствами металла деталей. Для обоснованного проектирования операции дорнования глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах нужно располагать математическими зависимостями для оценки усилий дорнования, усадки отверстий и деформаций наружной поверхности цилиндров, которые в настоящее время отсутствуют.

## 2 Выбор скорости дорнования.

На сегодняшний день известно, что скорость слабо влияет на результат процесса дорнования. Таким образом, скорость дорнования выбирается максимальной исходя из возможности оборудования, но образование нароста при увеличении скорости вследствие повышенного выделения теплоты в зоне контакта увеличивается. Особенно это сказывается при дорновании вязких материалов. Поэтому для них рекомендуется принимать скорость дорнования равной 0,03...0,08 м/с, а для менее пластичных материалов – 0,08...0,11 м/с. Для данного процесса может применяться различное оборудование. Чаще всего используются персы, протяжные станки, в частных случаях модифицируют станки.

## 3 Тяговые усилия.

Тяговые усилия при изготовлении полых цилиндров из трубы являются важной характеристикой процесса пластического деформирования цилиндрических поверхностей, значение которой необходимо для выбора оборудования требуемой мощности и усилия; расчёт инструмента и деформирующих элементов на жёсткость и прочность и т. д.

Так как от угла  $\alpha$  напрямую зависит величина прилагаемого тягового усилия и последующая чистота поверхности, необходимо выбирать его с особой тщательностью. При неудачном выборе этого угла в сторону уменьшения необходимо приложить большую силу дорнования, что вызывает значительный сдвиг поверхностных слоев металла, разрывает масляную подушку и создает царапины и надирь на обрабатываемой поверхности. Значительное увеличение угла может привести к тому, что заборная часть дорна проскользнет в отверстие и ею не будет выполнена основная часть работы, которая приходится на рабочий конус. В результате чего дорн может повести в отверстие, т. к. вся деформация будет происходить в зоне цилиндрической ленточки и, как следствие, выход инструмента из строя.

На процесс дорнования, кроме формы рабочего профиля дорна, оптимального натяга и скорости дорнования, влияют следующие факторы: механические свойства материала обрабатываемой детали, её размеры и степень точности предварительной обработки отверстия.

### **Смазывающий материалы для дорнования.**

Необходимо отметить важную роль смазывающего материала в процессе дорнования. При обработке отверстий методом дорнования неправильный выбор смазки может резко ухудшить качество обрабатываемой поверхности, привести к понижению стойкости инструмента и увеличению тягового усилия в процессе дорнования. Отсутствие смазки в процессе дорнования приводит к налипанию металла на поверхность дорна, что может вызвать его заклинивание.

Смазка должна образовывать на деформируемой поверхности тончайшую плёнку, разделяющую металлические поверхности (инструмент–заготовка), что уменьшает коэффициент трения и равномернее распределяет давление на рабочей поверхности дорна.

При выборе смазочного материала необходимо исходить из условия получения наилучшей чистоты обработанной поверхности. Как правило, при дорновании применяются жирные кислоты, соединения глицерина с пальмитиновой кислотой, эмульсия Укринол, эмульсия Аквол-2, масло МР-1 (для омедненных поверхностей).

Для мало- и среднеуглеродистых сталей при обработке дорнами с небольшими относительными натягами (до 0,006 мм) применяются индустриальное и веретенное масла, эмульсии, сульфозфрезол и другие, а при дорновании более прочных сталей с большими относительными натягами – смеси минеральных и растительных масел с олеиновой кислотой, мылами, также минеральные масла с наполнителями – графитом, серой, тальком.

Использование порошкообразного дисульфита молибдена или в смеси с минеральным маслом в соотношении 2:1 дает весьма хорошие результаты. Чугун хорошо обрабатывается керосином, сплавы на медной основе – эмульсиями и минеральными маслами, а алюминиевые сплавы – мыльной водой и смесью минеральных и растительных смазок и жиров. Для сплавов на медной основе используются минеральные масла и эмульсии.

Правильно подобранный смазочный материал способен уменьшить параметр  $Ra$  обработанной поверхности и снизить коэффициент трения.

### **Остаточные напряжения при дорновании.**

После дорнования в зоне отверстия реализуется сложное напряженное состояние. Следует отметить, что в результате дорнования остаточные напряжения распределяются по высоте отверстия неравномерно. Причиной данной особенности является наличие «корсетности» отверстия и образования напыла на свободном крае.

При дорновании глубоких отверстий малого диаметра, выполняемого с большими натягами, в полых толстостенных цилиндрах формируются весьма

значительные окружные, радиальные и осевые остаточные напряжения.

Около отверстия напряжения являются сжимающими. Увеличение степени толстостенности полых цилиндров вызывает существенное повышение всех компонентов остаточных напряжений. При этом особенно сильно возрастают осевые остаточные напряжения.

Нежелательным является создание при дорновании слишком высоких напряжений окружного сжатия на внутренней поверхности после выхода дорна из очага деформации. В случае, если это окружное сжатие превзойдёт первоначальный предел текучести материала, на внутренней поверхности цилиндра после удаления давления появится неупругая деформация обратного знака.

В обработанных дорнованием с большими натягами заготовках формируются весьма значительные окружные, радиальные и осевые остаточные напряжения. Наибольшими являются окружные остаточные напряжения, значения которых вблизи отверстия близки к пределу текучести материала заготовок. Все компоненты остаточных напряжений возрастают с увеличением степени толстостенности заготовок, натяга и числа циклов дорнования.

### **Методы снятия остаточных напряжений.**

В некоторых случаях возникает необходимость в уменьшении или полном снятии остаточных напряжений в изделии. Для этого могут быть использованы различные способы приложения к детали (имеющей остаточные напряжения) усилий, вызывающих пластическую деформацию, различные виды термических обработок и т. д.

Наиболее распространённым способом для этого считают термическую обработку. Один из методов термической обработки для уменьшения остаточных напряжений является высокий отпуск изделий, суть которого состоит в нагревании их с последующим медленным охлаждением.

Для наиболее полного снижения остаточных напряжений в деталях после холодного пластического деформирования применяют отжиг.

Отжиг – вид термической обработки, заключающийся в нагреве до определённой температуры, выдержке в течение определенного времени при этой температуре и последующем, обычно медленном, охлаждении до комнатной температуры. При отжиге осуществляются процессы возврата (отдыха металлов), рекристаллизации и гомогенизации. Однако при такой обработке снимается сформированное после холодного пластического деформирования упрочнение, что во многих случаях недопустимо. Поэтому приходится либо мириться с недостаточно полным снятием остаточных напряжений при низких температурах отжига, либо идти на компромисс, добиваясь более существенного снятия остаточных напряжений при некотором ухудшении механических свойств.

Недостатком такого метода является ухудшение механических свойств стали ввиду роста зерна; появление вторичной неоднородности и пористости; возникновение коагуляции избыточных фаз. Достоинством такого метода является снятие внутренних напряжений, рекристаллизация, гомогенизация.

Сущность метода снятия остаточных напряжений путем приложения внешней нагрузки состоит в следующем: при приложении к детали внешней нагрузки напряжения, вызываемые ею, складываются с остаточными напряжениями, уже имеющимися в детали, и вызывают местную пластическую деформацию в местах наибольших остаточных напряжений. Пластическая деформация снимает остаточные напряжения в той или иной степени или приводит к их перераспределению по поперечному сечению детали.

## 1.2 Определение размеров заготовки и инструмента

Предельные размеры и шероховатость отверстия заготовки, предельные размеры наружного диаметра заготовки, предельные размеры диаметра дорна определяются предельными размерами и шероховатостью отверстия детали, предельными размерами наружного диаметра детали, заданной толщиной наклепанного слоя и заданными остаточными напряжениями, а также технологическими возможностями обеспечения точности размеров и шероховатости заготовки.

Отношение шероховатости отверстия заготовки  $Rza$  к шероховатости после выглаживания  $Rz$  определяет величину наименьшего давления при обработке  $P$ , обеспечивающего заданную чертежом шероховатость. Величина  $Rza$  определяется возможностью, экономичностью предварительной обработки отверстия. Используя формулу, запишем для процессов пластического деформирования [4] следующее:

$$P = Kc \cdot 10^{\frac{\frac{Rz}{Rza} - 1}{Kp(104 - \sigma_s)}}, \quad (1.1)$$

где  $Kp$  – коэффициент, зависящий от характера распределения напряжений в очаге деформации);

$Kc$  – коэффициент, зависящий от способа чистовой упрочняющей обработки.

Для процесса дорнования  $Kp = 0,0079$ ;  $Kc = 5,0$ . Поэтому имеем

$$P = 5 \cdot 10^{\frac{\frac{Rz}{Rza} - 1}{0,0079 \cdot (104 - \sigma_s)}}.$$

Таким образом, можно вывести формулу для определения получаемой шероховатости после процесса дорнования:

$$\frac{P}{5} = 10^{\frac{\frac{Rz}{Rza} - 1}{0,0079 \cdot (104 - \sigma_s)}};$$

$$\log_{10} \frac{P}{5} = \frac{\frac{Rz}{Rza} - 1}{0,0079 \cdot (104 - \sigma_s)},$$

Отсюда получим

$$Rz = Rza \cdot \left( 1 + 0,0079 \cdot (104 - \sigma_s) \cdot \log_{10} \frac{P}{5} \right).$$

Давление  $P$  обеспечивается расчетным натягом, который при упруго-пластическом нагружении, упругой разгрузке и упругопластическом нагружении, упругопластической разгрузке равен

$$i = \frac{2(1-\nu) \cdot \sigma_s \cdot r_s^2}{\sqrt{3} \cdot G \cdot a}. \quad (1.2)$$

При расчетных случаях пластического нагружения, упругопластической разгрузки и пластического нагружения, упругой разгрузки расчетный натяг

$$i = \frac{2(1-\nu)}{(1-\lambda) \cdot G} \cdot \frac{ab^2}{b^2 - a^2} \cdot \left( p - \frac{2\lambda \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{b}{a} \right).$$

Исходя из формул (1.1) и (1.2), можно записать математическую модель натяга, требуемого для получения заданной шероховатости цилиндра при расчетных случаях пластического нагружения, упругопластической разгрузки и пластического нагружения, упругой разгрузки:

$$i = \frac{2(1-\nu)}{(1-\lambda) \cdot G} \cdot \frac{ab^2}{b^2 - a^2} \cdot \left( 5 \cdot 10^{\frac{\frac{Rz}{Rza} - 1}{0,0079 \cdot (104 - \sigma_s)}} - \frac{2\lambda \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{b}{a} \right).$$

Указанные давление  $P$  и натяг  $i$  обеспечивают определенную толщину наклепанного слоя, распределение остаточных напряжений, изменение размеров внутренней  $\Delta 2a$  и наружной поверхностей  $\Delta 2b$ .

Наименьший натяг, кроме шероховатости, может определяться заданным наименьшим радиусом  $r_s$  или заданными наименьшими остаточными напряжениями  $\sigma_{\theta}'$ .

Связь наименьшего и наибольшего натяга определим по схеме на рисунке 1.5, откуда

$$2a_{он\bar{b}} + i_{нм} + \Delta d_{н\bar{b}} + T_{II} = \Delta d_{нм} + i_{н\bar{b}} + 2a_{онм}, \quad (1.3)$$

где  $T_U$  – допуск на диаметры дорна;

$\Delta d_{нб}$ ,  $\Delta d_{нм}$  – упругая деформация дорна при наименьшем и наибольшем натягах.

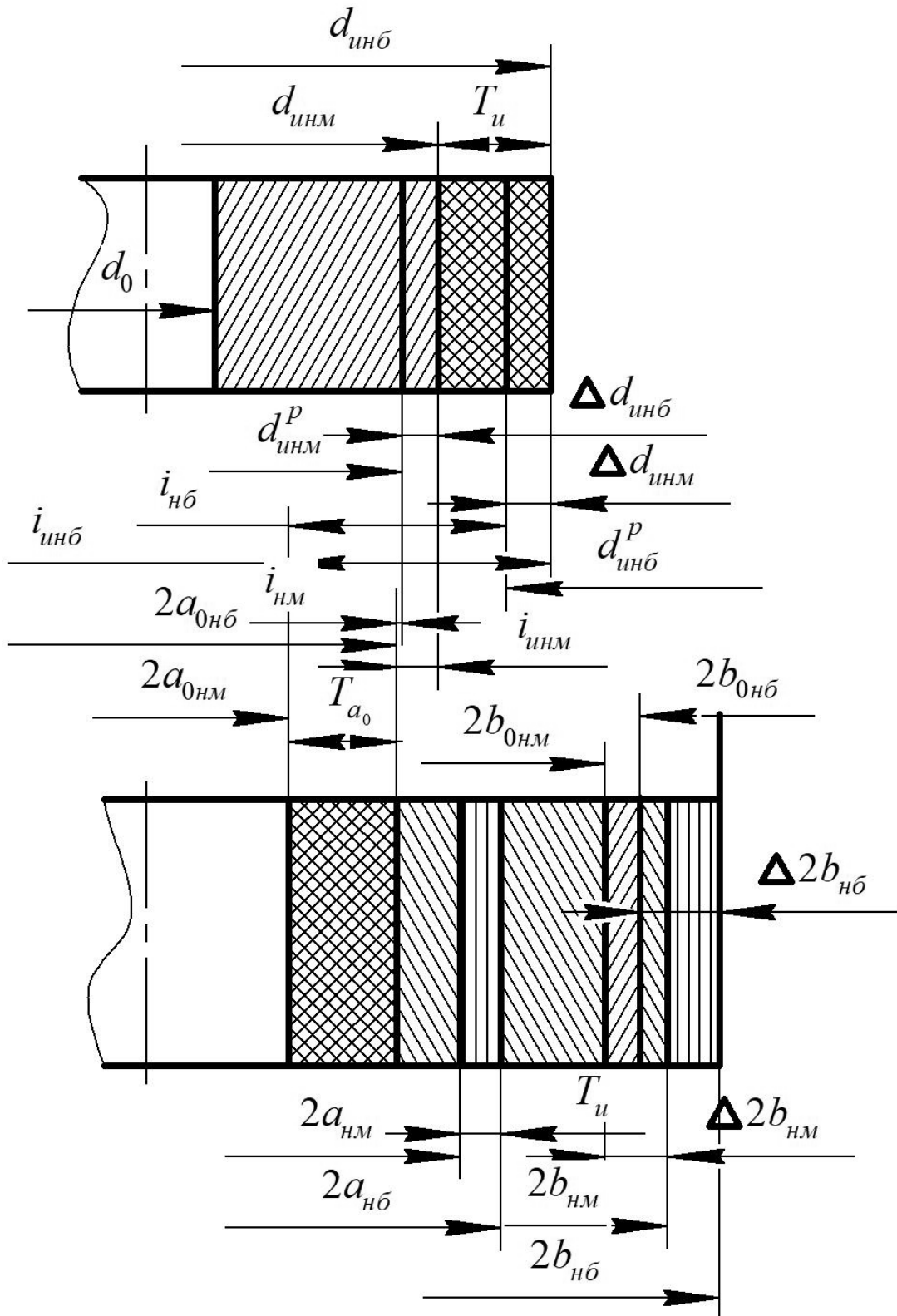


Рисунок 1.5 – Схема получаемых размеров при дорновании

Это позволяет записать следующее:

$$Ta_o + T_{II} = i_{нб} - i_{нв} + \Delta d_{нм} - \Delta d_{нб}; \quad (1.4)$$

$$Ta_o = 2a_{0нб} - 2a_{0нм}. \quad (1.5)$$

Записывая для схемы (см. рисунок 1.5)

$$2a_{0нб} + \Delta 2a_{0нм} = Ta_o + \Delta 2a_{0нб} + 2a_{0нм},$$

где  $2a_{0нб}$ ,  $2a_{0нм}$  – наибольший и наименьший предельные диаметры отверстия заготовки;

$Ta_o$  – допуск на отверстие детали по чертежу,

$$Ta_o = 2a_{0нб} - 2a_{0нм},$$

получим

$$Ta_o - Ta = \Delta 2a_{нб} - \Delta 2a_{нм};$$

$$Ta - T_{II} - \Delta 2a_{нм} - \Delta d_{нм} + i_{нм} = i_{нб} - \Delta a_{нб} - \Delta 2a_{нб}.$$

Назначив или рассчитав один из натягов, решением трансцендентного уравнения, получим другой натяг. Натяг, полученный при решении уравнения, обеспечивает при наибольшем допуске  $Ta_o$  на отверстие заготовки, получение отверстия в детали, соответствующее чертежу.

Натяг  $i_{II}$ , устанавливаемый по размеру инструмента, отличается от расчетного натяга на величину упругой деформации инструмента:

$$i_{II} = i - \Delta d. \quad (1.6)$$

Величина  $\Delta d$  для инструмента кольцевого сечения определяется по формуле Ламе-Гадолина:

$$\Delta d = p \frac{d}{E_{II}} \cdot \left( \frac{d^2 + d_0^2}{d^2 - d_0^2} - \nu_{II} \right), \quad (1.7)$$

где  $d$  – наружный диаметр дорна;

$d_0$  – диаметр отверстия дорна;

$E_{II}$ ,  $\nu_{II}$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала инструмента.

Для сплошного сечения

$$\Delta d = p \frac{d}{E_{II}} \cdot (1 - \nu_{II}).$$

Предельные отклонения дорна определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} d_{нм} &= 2a_{0нб} + i_{нм} + \Delta d_{нм}; \\ d_{нб} &= d_{нм} + T_{II}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Предельные размеры отверстия заготовки определяются по формулам:

$$\begin{aligned} 2a_{0нб} &= 2a_{нб} - \Delta 2a_{нм}; \\ 2a_{0нм} &= 2a_{нм} - \Delta 2a_{нб}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Необходимо заметить, что при расчете наибольшего изменения диаметра при обработке следует использовать наименьшее значение предела текучести из регламентированного условия поставки для материала заготовки, что уточняет расчет, однако уменьшает величину допуска  $Ta_0$  на заготовку. При расчете наименьшего изменения соответствующего диаметра следует использовать наибольшее значение предела текучести.

### **1.3 Порядок выполнения работы**

По заданию преподавателя рассчитать режимы дорнования деталей с целью получения заданных характеристик.

Исходные данные:  $a = 10$  мм;  $b = 21,29$  мм;  $\sigma_s = 270$  МПа;  $\lambda = 0,97$ ;  $r_s = 12$  мм;  $T_{II} = 110$  мкм;  $2a_{0нб} = 10$  мм;  $2a_{0нм} = 9,57$  мм;  $E_{II} = 20000$  МПа;  $\nu_{II} = 0,3$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $G = 77000$  МПа;  $Rz_a = 40$  мкм;  $P = 50$  МПа;  $P' = 70$  МПа;  $Ta_0 = 110$  мкм.

### **1.4 Содержание отчёта**

Отчет по практической работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- 1) название практической работы;
- 2) цель работы;
- 3) описание конструкции и принципа действия обработки дорнованием;
- 4) результаты расчета;
- 5) выводы.



### ***Контрольные вопросы***

- 1 Перечислите основные методы ППД.
- 2 Импульсно-ударная и пневмовибродинамическая упрочняющая обработка.
- 3 Что такое дорнование?

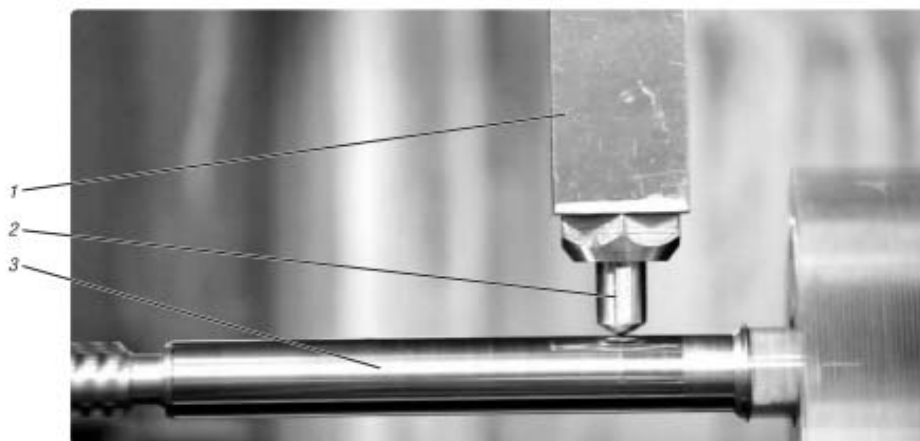
## **2 Практическая работа № 2. Расчет режимов обработки при алмазном выглаживании**

***Цель работы:*** приобретение практических навыков использования режимов обработки при алмазном выглаживании.

### ***2.1 Основные теоретические положения***

Процесс отделочно-упрочняющей обработки методом алмазного выглаживания является эффективным средством повышения эксплуатационных свойств деталей машин [5]. Алмазное выглаживание обеспечивает благоприятное сочетание параметров шероховатости, микрорельефа поверхности, микротвердости и значительной глубины упрочненного слоя при изготовлении деталей, работающих в условиях высоких скоростей и повышенного износа [5–9].

Алмазное выглаживание заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем с алмазным наконечником (рисунок 2.1). Поверхностное пластическое деформирование методом алмазного выглаживания выполняют, как правило, инструментом со сферической рабочей частью после механической обработки точением или шлифованием. В результате на поверхности детали сглаживаются неровности предшествующей обработки и формируется новый поверхностный слой с другими геометрическими и физико-механическими характеристиками.



1 – державка; 2 – выглаживатель; 3 – обрабатываемая деталь

Рисунок 2.1 – Процесс алмазного выглаживания

Условия контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при алмазном выглаживании определяются многими факторами и параметрами, под влиянием которых формируются показатели качества поверхностного слоя детали. Основными значимыми факторами наряду с технологическими параметрами являются удельная сила контактного взаимодействия и трение на контактной поверхности выглаживателя и детали в зоне деформации. Удельная сила контактного взаимодействия определяется силой выглаживания, отнесенной к площади контакта выглаживателя с заготовкой, пропорциональна глубине вдавливания и определяет толщину упрочненного слоя. Таким образом, сила выглаживания является одним из наиболее важных параметров процесса, позволяющим регулировать в широких пределах качество поверхности. Поэтому выбор оптимальной силы является актуальной задачей при реализации технологии отделочно-упрочняющего алмазного выглаживания.

### **Методика определения оптимальной силы выглаживания и коэффициента трения.**

В процессе выглаживания сила  $P$  раскладывается на несколько составляющих: нормальную  $P_y$ , тангенциальную  $P_z$  и силу подачи  $P_x$ .

На основании приближенного решения задачи о скольжении жесткого радиусного выглаживателя по пластической поверхности зависимости  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  можно представить следующими уравнениями:

$$P_x = C_x \cdot R^{0,5} \cdot h^{1,5} \cdot \sigma_T; \quad (2.1)$$

$$P_y = C_y \cdot R \cdot h \cdot \sigma_T; \quad (2.2)$$

$$P_z = C_z \cdot R^{0,5} \cdot h^{1,5} \cdot \sigma_T, \quad (2.3)$$

где  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$  – коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки;

$R$  – радиус рабочей части выглаживателя, мм;

$h$  – глубина внедрения выглаживателя, мм;

$\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала, Па.

Основной является составляющая  $P_y$ , значение которой и принимаем за силу выглаживания.

Заменив в формуле (2.2) абсолютную глубину внедрения выглаживателя  $h$  относительной глубиной внедрения  $\varepsilon = h/R$ , получаем

$$P = C \cdot \varepsilon \cdot R^2 \cdot \sigma_T. \quad (2.4)$$

Так как величина предела текучести  $\sigma_T$  не всегда известна, воспользуемся величиной твердости по Виккерсу, позволяющей определить твердость как твердых, так и мягких материалов в единицах одной шкалы. Для учета масштабного фактора, связанного с соотношением радиусов инструмента и

обрабатываемой детали, заменим в формуле (2.4) радиус инструмента  $R$  приведенным радиусом

$$R = \frac{DR}{D + R}, \quad (2.5)$$

где  $D$  – диаметр обрабатываемой детали, мм.

После преобразований получаем следующее выражение:

$$P = C \cdot \varepsilon \cdot HV \cdot \left( \frac{DR}{D + R} \right)^2, \quad (2.6)$$

в котором  $C$  – коэффициент,  $C = \pi$ .

Нормальное протекание процесса выглаживания происходит при определенных значениях относительной глубины внедрения  $\varepsilon$  инструмента в обрабатываемую поверхность. При относительной глубине внедрения, меньшей определенной величины  $\varepsilon_1$ , инструмент с обрабатываемой поверхностью имеет упругую связь и выглаживания не происходит. При относительной глубине внедрения, большей определенной величины  $\varepsilon_2$ , пластическое течение материала прекращается и начинается разрушение поверхностного слоя детали. Нормальное протекание процесса обеспечивается при  $\varepsilon_2 > \varepsilon > \varepsilon_1$ .

Для перехода от упругой деформации к пластической воспользуемся условием по данным И. В. Крагельского:

$$\varepsilon = \frac{h}{R} = 240 \frac{\sigma_T^2}{E^2}. \quad (2.7)$$

Расчеты показывают, что практические значения  $\varepsilon_1$ , при которых начинается процесс выглаживания, равны 0,002...0,004 для закаленных сталей и 0,0002...0,0007 – для мягких материалов. Эксперименты показали, что относительную глубину внедрения  $\varepsilon_2 = 0,01...0,02$  можно считать предельной. Необходимая величина относительной глубины внедрения выбирается между минимальной и максимальной на основании рекомендаций, приведенных далее. Рассчитанная таким образом сила выглаживания  $P$  должна обеспечить получение заданного качества поверхности.

В процессе выглаживания в зоне контакта инструмента с деталью возникают силы трения, которые влияют на процесс протекания пластической деформации, нагрев инструмента и детали, качество обрабатываемой поверхности. Трение возникает вследствие деформирования тонкого поверхностного слоя материала обрабатываемой детали внедрившимся инструментом и преодоления адгезионных связей, возникающих между инструментом и обрабатываемой поверхностью. Установлено, что в случае трения в условиях пластического контакта коэффициент трения можно определить следующим образом:

$$f = f_{\text{деф}} + f_{\text{адг}}, \quad (2.8)$$

где  $f_{\text{деф}}$  – деформационная составляющая коэффициента трения,

$f_{\text{адг}}$  – адгезионная составляющая коэффициента трения,  $f_{\text{адг}} = 0,01 \dots 0,05$ .

Изменение коэффициента трения при различных режимах выглаживания происходит за счет деформационной составляющей, т. к. адгезионная составляющая зависит только от обрабатываемого материала и его шероховатости и не зависит от режимов обработки.

Деформационная составляющая коэффициента трения может быть рассчитана по формуле

$$f_{\text{деф}} = \frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{P}{\text{HV}}} \quad (2.9)$$

или

$$f_{\text{деф}} = 0,55 \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (2.10)$$

Приравняв правые части уравнений (2.9) и (2.10), получим

$$\frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{P}{\text{HV}}} = 0,55 \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (2.11)$$

После некоторых преобразований выражение (2.11) можно записать в виде

$$\frac{0,1 \cdot P}{R \cdot \text{HV}} = 0,3h, \quad (2.12)$$

откуда сила выглаживания

$$P = 3 \cdot h \cdot R \cdot \text{HV}. \quad (2.13)$$

Подставляя в формулу (2.13) выражение для  $h$  из зависимости относительной глубины внедрения  $\varepsilon = h/R$ , получим выражение для определения силы выглаживания

$$P = 3 \cdot \varepsilon \cdot R^2 \cdot \text{HV}. \quad (2.14)$$

Рекомендуемые значения относительного внедрения  $\varepsilon$  для отделочно-упрочняющего режима обработки мягких материалов и закаленных сталей равны 0,0025 и 0,005 соответственно.

Таким образом, оптимальное значение силы выглаживания  $P$  для отделочно-упрочняющего режима можно определить по следующим формулам:

– для закаленных сталей и других материалов высокой твердости

$$P = 0,015 \cdot R^2 \cdot HV ; \quad (2.15)$$

– для материалов невысокой и средней твердости

$$P = 0,0075 \cdot R^2 \cdot HV . \quad (2.16)$$

При оптимальных значениях силы выглаживания исходные неровности полностью сглаживаются и образуется шероховатость, обусловленная самим процессом выглаживания. Дальнейшее увеличение силы выглаживания увеличивает пластические искажения, может привести к разрушению поверхностного слоя и появлению трещин на обработанной поверхности.

Представленная методика определения силы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью позволяет установить оптимальное значение силы выглаживания для отделочно-упрочняющего режима обработки. В качестве примера приведены результаты расчета силы выглаживания для некоторых марок мягких материалов (радиус наконечника  $R = 3,4$  мм) и закаленных сталей ( $R = 2,0$  мм), в том числе через деформационную составляющую коэффициента трения. Отмечается достаточная для практических целей сходимости результатов по двум вариантам расчета. С увеличением силы выглаживания увеличивается коэффициент трения за счет роста его деформационной составляющей, что иллюстрируется соответствующими графическими зависимостями. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии и внедрении процесса алмазного выглаживания в производство.

## ***2.2 Порядок выполнения работы***

По заданию преподавателя произвести расчет оптимальных значений сил выглаживания.

## ***2.3 Содержание отчета***

Отчет по практической работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- 1) название практической работы;
- 2) цель работы;
- 3) описание конструкции и принципа действия инструмента для алмазного выглаживания;
- 4) результаты измерений и расчета;
- 5) выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Перечислите основные методы ППД.
- 2 Что такое выглаживание, разновидности выглаживания.
- 3 Устройство магнитно-центробежного раскатника.
- 4 Устройство магнитно-динамического раскатника.

## **3 Практическая работа № 3. Обоснование и выбор способа восстановления деталей машин**

***Цель работы:*** закрепить теоретические знания и получить практические навыки в области восстановления валов методом ремонтных размеров.

### ***3.1 Общие сведения***

К выполнению практической работы допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности с росписью в журнале.

Находящиеся в лаборатории должны соблюдать правила внутреннего распорядка университета. В лаборатории запрещается хранить легковоспламеняющиеся вещества, курить. Запрещается производить перестановку оборудования, мебели, выносить из лаборатории что-либо.

Всем обучающимся запрещается заниматься действиями, непосредственно не связанными с выполнением лабораторной работы, включать станок.

Опасными факторами являются незакрепленные детали, вращающиеся детали и шлифовальный круг.

В случае обнаружения неисправности оборудования, приспособлений и инструмента немедленно доложить о случившемся преподавателю, ведущему занятия, и учебному мастеру.

Необходимо осмотреть оборудование, оснастку, инструмент. В случае обнаружения неисправностей необходимо их устранить.

Перед работой на станке необходимо застегнуть рукава одежды; убрать концы галстука, косынки; волосы должны быть под головным убором.

Помещение лаборатории и находящееся в ней оборудование должны содержаться в чистоте и порядке.

Запрещается производить замеры во время работы станка, пользоваться неисправным инструментом.

Запрещается переключать рукоятки станка во время работы.

Шлифовальный круг необходимо плавно подводить к детали. Запрещается стоять в плоскости вращения круга.

Рабочее место должно обеспечивать безопасность выполнения работ.

В случае нарушения установленного режима работы станка, поломки инструмента немедленно отключить станок от сети.

В случае возникновения пожара вывести людей в безопасное место, подручными средствами ликвидировать очаг огня и при необходимости вызвать пожарную команду по тел. 101.

Получившим травму оказать первую медицинскую помощь, а при необходимости вызвать скорую помощь по тел. 103. После выполнения работы отключить станок, очистить станок от стружки, удалить обтирочные материалы, смазать рабочие поверхности станка, сдать мерительный инструмент.

### 3.2 Теоретические сведения

В процессе эксплуатации валов возможно появление ряда дефектов, приведенных в таблице 3.1:

- повреждение резьбы;
- отклонение от прямолинейности (изгиб) вала;
- износ опорных шеек;
- износ шейки под зубчатое колесо;
- износ шпоночного паза по ширине.

Таблица 3.1 – Технические требования на капитальный ремонт вала 240-1006015А

Контролируемый дефект	Размеры, мм		Способ и средства контроля		Заключение
	по чертежу	допускаемые	наименование	обозначение или погрешность	
Повреждение резьбы	Вмятины, забоины, выкрашивания или срыв резьбы не допускаются		Осмотр	–	Болт браковать, отверстие ремонтировать
Отклонение от соосности (биение) средней шейки относительно крайних, не более	0,0025	0,05	Плита поверочная. Призмы поверочные. Индикатор часового типа. Штатив универсальный для индикатора	2-2-100×630 11-21 ИЧ-10 кл. 10 111.11Н.8	Ремонтировать
Износ опорных шеек	$50_{-0,089}^{-0,050}$	49,8	Микрометр	МК 50-2	Ремонтировать
Износ шейки под зубчатое колесо (проверить при ослаблении посадки колеса)	$32_{0,017}^{0,033}$	32,0	Микрометр или скоба	МК 25-2 8111-03200Д	Ремонтировать
Износ шпоночного паза по ширине (проверять при ослаблении посадки шестерни)	$6_{-0,060}^{-0,012}$	6,02	Шаблоны	КИ-4921	Ремонтировать

Выбраковочным параметром при устранении износов опорных шеек является их диаметр. Изношенные опорные шейки не превышают предельной величины, восстанавливаются механической обработкой – шлифованием.

Перед обработкой проверяют и, если необходимо, устраняют прогиб вала на прессе двойной правкой. Опорные шейки шлифуют в центрах круглошлифовального станка 3А433. Овальность и конусность поверхности шеек после ремонта допускаются не более 0,03 мм, шероховатость поверхности – не более 0,63 мм.

При восстановлении изношенных опорных шеек вала способом ремонтных размеров, исходя из предназначенности и конструктивных особенностей этих деталей, требуется соблюсти ряд координационно-кинематических размеров. К их числу относятся:

- соосность всех опорных шеек;
- концентричность опорных шеек цилиндрической поверхности под шестерню;
- соосность опорных шеек, кулачков и эксцентрика;
- заданный чертежом профиль кулачков и эксцентрика;
- угол расположения кулачков относительно шпоночного паза для шестерни.

Первые три размера получают выбором центровых отверстий в качестве установочной базы и осуществлением механической обработки всех шеек с одной установки детали.

Опорные шейки вала подвергают вначале черновому, а затем чистовому шлифованию. Шлифование ведется при обильной подаче охлаждающей жидкости (1,2-процентный водный раствор эмульсола). При обработке опорных шеек на станке модели 3А433 используются шлифовальные круги типа ПП600×50×305 24А 40 СМ1...СМ2 К5 35 м/с кл. I ГОСТ 2424–80.

Рекомендуется выполнять черновое и чистовое шлифование опорных шеек, кулачков и эксцентрика, соблюдая режимы, приведенные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Рекомендуемые режимы шлифования

Параметры шлифования	Чистовое шлифование	Черновое шлифование
Окружная скорость шлифовального круга $V$ , м/с	35	35
Окружная скорость детали, м/мин	12...15	15...25
Поперечная подача шлифовального круга, мм/об	0,02...0,07	0,005...0,01

Размеры опорных шеек вала контролируются микрометром на остановленном станке. Размеры и шероховатость окончательно обработанных шеек, кулачков и эксцентрика должны соответствовать техническим требованиям. Если износ опорных шеек превышает предельный износ, их восстанавливают одним из следующих способов: наплавка в среде  $CO_2$ , вибродуговая наплавка, напыление металлов и др. Затем их шлифуют в номинальный размер.

Посадочную поверхность под зубчатое колесо восстанавливают наплавкой в среде  $CO_2$ , вибродуговой наплавкой и другими способами с последующей обработкой в номинальный размер.



Заключительная операция в технологическом процессе восстановления – контрольная. Производят контроль размеров, шероховатости поверхностей и соответствия поверхностей техническим требованиям.

### **Краткая техническая характеристика станка 3А433.**

Тип – круглошлифовальный специальный.

Высота центров – 95 мм.

Расстояние между центрами – 1260 мм.

Размеры обрабатываемых распределительных валов:

– наибольший радиус вращения – 90 мм;

– наибольший подъем шлифовального кулачка – 15 мм;

– диаметр шейки, опираемый на люнет, – 30...75 мм.

Размеры шлифовального круга – 600 × (25...40) × 305 мм.

Частота вращения шпинделя – 16...32 мин<sup>-1</sup>.

Параметры электродвигателей:

– шлифовальной бабки –  $P = 4,5$  кВт,  $n = 1440$  мин<sup>-1</sup>;

– передней бабки –  $P = 1,0$  кВт;  $n = 930$  мин<sup>-1</sup>;

– насоса охлаждения –  $n = 2800$  мин<sup>-1</sup>.

Габариты – 2800 × 1700 × 1500 мм.

Масса – 4200 кг.

### **Нормирование технологического процесса восстановления.**

Технологическая норма времени на выполнение операций рассчитывается по формуле

$$T_{ум} = T_o + T_в + T_д + \frac{T_{нз}}{N}, \quad (3.1)$$

где  $T_{ум}$  – штучно-калькуляционное время, мин;

$T_o$  – основное время, мин;

$T_в$  – вспомогательное время, мин;

$T_д$  – дополнительное время, мин;

$T_{нз}$  – подготовительно-заключительное время, мин;

$N$  – количество обрабатываемых деталей в партии, шт.

Основное время для процесса шлифования опорных шеек и кулачков определяется по формуле

$$T_o = \frac{t \cdot k}{n \cdot S}, \quad (3.2)$$

где  $t$  – припуск на обработку, мм;

$k$  – коэффициент, учитывающий выхаживание,  $k = 1,0...1,25$ ;

$n$  – частота вращения детали, мин<sup>-1</sup>;

$S$  – поперечная подача шлифовального круга, мм/об.

### ***3.3 Порядок выполнения работы***

- 1 Изучить основные положения работы.
- 2 Проанализировать задание по работе.
- 3 Изучить технологию и оборудование для восстановления валов.
- 4 Произвести дефектацию вала.
- 5 Разработать технологический процесс восстановления вала. Приобрести практические навыки по восстановлению вала методом ремонтных размеров.
- 6 Оформить отчет о практической работе.

### ***3.4 Содержание отчета***

Отчет по практической работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- 1) название практической работы;
- 2) цель работы;
- 3) технологический процесс восстановления вала;
- 4) выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Перечислите основные дефекты валов и способы их выявления.
- 2 Какие дефекты вала можно устранить методом ремонтных размеров?
- 3 Как осуществляется базирование вала при шлифовании опорных шеек?
- 4 Какие координационно-кинематические размеры необходимо соблюдать при восстановлении валов?
- 5 Какие операции включает технологический процесс восстановления вала?
- 6 Изложите требования по технике безопасности при работе на металло-режущих станках.

## **4 Практическая работа № 4. Разработка вариантов технологических процессов восстановления деталей машин**

***Цель работы:*** закрепление и развитие значения, способов, средств и техники дефектации подшипников качения, приобретение практических навыков определения дефектов и их сочетания; закрепить теоретические знания и получить практические навыки по восстановлению деталей машин способом дополнительной ремонтной детали (ДРД).

### ***4.1 Теоретические сведения***

Подшипники, применяемые в опорах машин и механизмов, делятся на два типа: скольжения и качения. В опорах с подшипниками скольжения взаимно подвижные рабочие поверхности вала и подшипника разделены только

смазочным веществом, и вращение вала или корпуса происходит в условиях чистого скольжения. В опорах с подшипниками качения между взаимно подвижными кольцами находятся шарики или ролики, и вращение вала или корпуса происходит в основном в условиях качения.

При одинаковой грузоподъемности подшипники качения имеют (по сравнению с подшипниками скольжения) преимущества: вследствие меньшего трения в момент пуска и при умеренных частотах вращения – меньшие осевые силы (примерно в 2–3 раза); относительная простота обслуживания и подача смазки; низкую стоимость (особенно при массовом производстве подшипников качения малых и средних габаритов); малую амплитуду колебания; небольшое сопротивление вращения в процессе работы механизма.

Кроме того, при использовании подшипников качения в значительной степени удовлетворяется требование взаимозаменяемости и унификации элементов узла (при выходе подшипников качения из строя его легко заменить новым).

Недостатки подшипников качения заключаются в относительно больших габаритах и достаточно большом сопротивлении вращению при работе на высоких частотах вращения, по сравнению с подшипниками скольжения, работающими в условиях жидкой смазки, когда поверхности шейки вала и вкладыша разделены тонким слоем смазывающей жидкости. Поэтому при создании высокоскоростных машин иногда приходится прибегать к установке подшипников скольжения, работающих в условиях жидкой смазки, несмотря на значительные трудности в эксплуатации. Кроме того, в ряде случаев подшипники качения обладают меньшей жесткостью, т. к. не могут вызывать вибрацию вала вследствие ритмичного прокатывания тел качения через нагруженную зону опоры.

К недостаткам опор на подшипниках качения можно отнести и более сложный их монтаж по сравнению с опорами на подшипниках скольжения разъемного типа.

### **Классификация подшипников.**

Подшипники качения различают:

- по направлению воспринимаемой нагрузки относительно оси (радиальные, радиально-упорные, упорно-радиальные и упорные);
- по форме элементов качения (шариковые и роликовые, причем ролики могут быть цилиндрическими (короткими, длинными, игольчатыми), коническими, бочкообразными и витыми);
- по способу монтажа (устанавливаемые непосредственно на шейке вала и устанавливаемые на шейке вала с помощью закрепительной втулки);
- по способности самоустанавливаться при неточном выполнении расточек или при перекосе вала (самоустанавливающиеся и несамоустанавливающиеся);
- по конструктивным признакам (с цилиндрическим или конусным отверстием внутреннего кольца, одинарные или двойные, сдвоенные, строенные, счетверенные и т. п.).

В зависимости от отношений основных размеров, подшипники делятся на следующие серии: особо легкие, легкие, тяжелые и широкие. Долговечность подшипников зависит от правильного выбора посадок и монтажа подшипниковых узлов. Поля допусков подшипников в зависимости от вида нагружения приведены в таблице 4.1.

Неправильно выбранные посадки, перекосы при монтаже, повреждения и загрязнения при сборке могут вызвать преждевременный выход подшипника из строя.

Таблица 4.1 – Поля допусков подшипников в зависимости от вида нагружения

Нагружение колец	Поле допуска (по ГОСТ 25347–82)	
	вала под внутреннее кольцо	отверстия корпуса под наружное кольцо
<i>Радиальные подшипники</i>		
Местное	<i>h5; h6; js5; js6; g6; b6</i>	<i>H6; H7; H8; Js7; G7</i>
Циркуляционное	<i>n5; n6; m5; m6; k5; k6; js5; js6</i>	<i>K6; K7; M6; M7; N6; N7; P7</i>
Колебательное	<i>js5; js6</i>	<i>Js6; Js7</i>
<i>Радиально-упорные подшипники</i>		
Циркуляционное	<i>n6; m6; k6; js6; h6; g6</i>	<i>N7; M7; K7; Js7; P7; H7</i>

#### *Примечания*

1 Для упорных подшипников шариковых и роликовых всех типов следует применять поле допусков для валов.

2 При выборе посадок подшипников узлов для конкретных изделий следует руководствоваться ГОСТ 3526–87.

#### **Материал деталей подшипников.**

Кольца и тела качения подшипников изготавливаются в основном из сталей марок ШХ15, ШХ15СГ (ГОСТ 801–78) и марок ШХ20СТ, 15ХГТ и 20Х22Н4А (по специальности техническим условиям).

Кроме того, для особых условий эксплуатации детали подшипников изготавливают из коррозионно-стойких, жаропрочных и других марок сталей.

Твердость колец и тел качения у подшипников, работающих при температуре до 100 °С следующая:

- 1) 61–65 для ШХ-15 и 18 ХГТ;
- 2) 60–64 для ШХ 20 СТ ;
- 3) 60–64 для ШХ 15 СГ;
- 4) 58–65 для 20Х2 Н 4А.

Неоднородность кольца по твердости – не более 3 ед.

Для изготовления штампованных стальных сепараторов применяют стальную холоднокатаную ленту и листовую качественную углеродистую конструкционную сталь. Массивные сепараторы изготавливают из латуни, бронзовых и алюминиевых сплавов, магниевого чугуна, текстолита, а также из специальных сталей.

### **Условия обозначения подшипников.**

Система основных обозначений предусмотрена ГОСТ 3189–78.

Условными обозначениями характеризуется:

- диаметр вала в месте посадки подшипника (внутренний диаметр подшипника или втулки);
- серия подшипника, т. е. один из установленных стандартами нормальных рядов подшипников, отмечающихся по наружному диаметру и ширине при одинаковой конструкции и одинаковых диаметрах отверстия;
- тип подшипника, т. е. совокупность признаков, определяющих его основные свойства (направление воспринимаемой нагрузки и формы поверхностей тел качения);
- конструктивные особенности подшипника;
- точность подшипника.

В пределах диаметра от 20 до 495 мм внутренние диаметры подшипников определяются умножением двух правых цифр на 5. Для подшипников с внутренним диаметром от 10 до 20 мм это правило не действует.

### **Вид и характер дефектов.**

Условия работы подшипника зависят от типа и места установки. В общем случае, условия работы определяются воздействием сил трения, коррозии, температуры, вибрации и переменной по величине многократной контактной нагрузки.

В процессе работы у подшипников возникают износы, механические и коррозионные повреждения тел качения, рабочих и посадочных поверхностей, увеличиваются зазоры и неравномерность вращения, трещины и сколы наружных и внутренних колец подшипника. Большинство подшипников (75 %) выбраковываются из-за увеличения зазоров выше предельных значений, из-за износа посадочных поверхностей – 21 %. Повреждения рабочих поверхностей дорожек и тел вращения встречаются у 11 % подшипников, а поломки – у 9 %.

### **Проверка подшипников качения перед монтажом.**

Перед сборкой подшипники должны быть очищены от защитной смазки, грязи и посторонних частиц. Для этого их тщательно 2–3 раза промывают в 6-процентном растворе минерального масла, бензине или в горячих (70 °С...75 °С) антикоррозионных водных растворах. Для снятия статического заряда рекомендуется добавлять в бензин антистатическое вещество – сигбол. Для очистки мелких подшипников применяют ультразвуковой способ. После промывки подшипник проверяют на легкость вращения и шум. Для этого удерживают за внутреннее кольцо, в горизонтальном положении вращая наружное кольцо. Вращение должно быть легким и плавным.

При внешнем осмотре проверяются видимые дефекты, а именно на рабочих поверхностях подшипника не допускаются темные пятна или раковины, забоины, вмятины, глубокие риски или царапины, выкрашивание, шелушение, трещины и сколы.

На монтажных поверхностях допускаются: выработка не более 60 % рабочей поверхности на одном торце кольца (в пределах допуска на его ширину): следы зачистки мелких забоин и ржавчины; единичные грубые шлифовальные риски; единичные мелкие токарные риски, охватывающие  $2/3$  окружности кольца, длиной каждая не более  $1/2$  окружности; пучок мелких токарных рисок общей шириной не более  $1/2$  ширины кольца и длиной не более  $1/2$  окружности; чернота размером не более 10 % площади шлифовальной поверхности; ожоги, видимые без травления. Нельзя применять подшипники, имеющие коррозию и видимые на поверхности колец и тел качения ожоги, трещины, забоины, вмятины, чрезмерное провисание сепаратора, деформированные сепараторы, а также сепаратор с дефектной сваркой клепкой.

Зазор между кольцами и телами качения в подшипнике до посадки его на рабочее место называется начальным радиальным зазором и измеряется на специальном приборе.

Номинальный диаметр подшипника по отверстию определяется по условному обозначению подшипника, а действительный размер измеряется штангенциркулем. Если действительные значения параметров подшипника вышли за пределы допустимых, то такие подшипники выбраковываются.

### **Регулировка зазора в подшипниках.**

Работа подшипника в узле машин зависит от наличия в нем оптимального зазора между кольцами и телами качения.

В подшипниках радиальных типов (нерегулируемых) различают три вида радиальных зазоров:

1) начальный зазор – зазор в свободном подшипнике до его посадки на рабочее место;

2) посадочный зазор – зазор в подшипнике после посадки его на вал и в корпус узла машин; посадочный зазор всегда меньше начального зазора вследствие изменения диаметров колец подшипников из-за посадочных натягов;

3) рабочий зазор – зазор в подшипнике в его рабочем состоянии, т. е. под рабочей нагрузкой при установившемся температурном режиме.

У подшипников регулируемых типов необходимые зазоры (осевая игра) устанавливаются в процессе монтажа в узле механизма, при этом у радиально-упорных подшипников осевая игра может иметь как положительное значение, так и отрицательное при так называемом предварительном натяге. Имеющийся в шариковых радиально-упорных подшипниках повышенный начальный радиальный зазор обеспечивает возможность получения необходимого углового контакта между шариками и дорожками качения колец. Нормирование начальных радиальных зазоров, от которых в значительной мере зависят величины рабочих зазоров подшипников, имеет целью обеспечить радиальное распределение действующей на подшипник нагрузки между телами качения; необходимое при работе смещение вала (или корпуса) в радиальном и

осевом направлениях в пределах зазора в подшипнике; уменьшение вибрации и шума при работе подшипника.

При несоблюдении величины осевой игры расчетная долговечность подшипников не гарантируется.

Регулирование осевого зазора в радиально-упорных подшипниках (шарикоподшипниках), конических роликоподшипниках обеспечивается при монтаже путем осевого смещения одного кольца относительно другого. Это достигается установкой прокладок под крышку подшипника, применением подшлифованных колец или с помощью регулировочных винтов и гаек.

### **Разработка технологии восстановления размеров призматической детали.**

С помощью фигурных вставок можно ремонтировать трещины в головках и блоках цилиндров двигателей, корпусах коробок передач, задних мостах и других деталях. Этот метод позволяет избежать изменения структуры металла, возникновения остаточных напряжений и искажений геометрии восстанавливаемых корпусных деталей, обеспечивает гарантированную прочность соединения. Нецелесообразно применять его для трещин, проходящих через масляную магистраль, резьбовые отверстия, опоры коренных подшипников блоков цилиндров, посадочные места под подшипники, а также для трещин, расположенных в труднодоступных местах.

Фигурные вставки изготавливают из малоуглеродистой стали в виде цилиндров, соединенных между собой перемычками. Паз имеет форму вставки и представляет собой ряд цилиндрических отверстий, соединенных пропилом, по ширине равным перемычке вставки.

Устраняют трещины в корпусных деталях двумя видами фигурных вставок – уплотняющими и стягивающими.

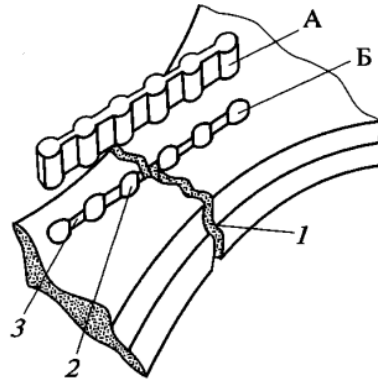
Уплотняющие вставки применяют для заделки трещин длиной более 50 мм с обеспечением герметичности как толстостенных, так и тонкостенных деталей. Их целесообразно применять для деталей с трещинами длиной не более 400 мм, шириной не более 1,5 мм, а толщина стенки детали не должна быть для тонкостенных деталей менее 5 мм, для толстостенных – 9 мм.

Стягивающие фигурные вставки применяют для стягивания трещин на плоских и внутренних цилиндрических поверхностях за счет разности шагов (0,1...0,3 мм) вставки и отверстий, просверленных по кондуктору в детали (рисунок 4.1). Трещины с шириной раскрытия до 0,3 мм стягивают фигурными вставками, а с шириной раскрытия больше 0,3 мм предварительно стягивают струбцинами, а затем вставками. При стягивании трещин длиной до 40 мм устанавливают посередине одну вставку. При стягивании трещин длиной свыше 40 мм вставки устанавливают на расстоянии 25...40 мм друг от друга.

В ремонт принимают детали с трещинами шириной до 0,3 мм, расположенными на плоскостях размером не менее 50 × 50 мм и на расстоянии не менее 25 мм от края.

Технологический процесс ремонта деталей состоит из следующих операций: дефектация; подготовка фигурного паза; запрессовка в него фигур-

ной вставки; зачистка отремонтированного участка; проверка качества ремонта.



А – фигурная вставка; Б – фигурный паз; 1 – трещина; 2 – отверстие; 3 – канавка между отверстиями

Рисунок 4.1 – Схема устранения трещин стягивающими фигурными вставками

Дефектуют детали с помощью лупы пятикратного увеличения. Зону трещины очищают от ржавчины и определяют ее границы. При подготовке фигурного паза сверлят по кондуктору перпендикулярно трещине шесть отверстий (по три с каждой стороны) диаметром 3,5 мм, шагом 4,2 мм, глубиной 10 мм; удаляют перемычки между просверленными отверстиями специальным пробойником шириной 1,8 мм; подготовленный паз обдувают сжатым воздухом. Затем в паз запрессовывают фигурную вставку до упора и зачищают отремонтированный участок заподлицо с основным металлом.

Качество ремонта проверяют визуально, а в случае необходимости – и на гидравлическом стенде.

#### **Способ замены части детали.**

Отделяется изношенная часть. На ее место присоединяется (как правило, сваркой) заготовка. Затем осуществляется механическая обработка. Восстановление деталей рассматриваемым способом является общедоступным и надежным. Этот способ отличается простотой технологического процесса, позволяет повысить ресурс деталей. Однако применение ДРД не всегда экономически оправдано. В ряде случаев снижаются механическая прочность, жесткость, повышается теплонапряженность, что ускоряет изнашивание деталей в процессе эксплуатации.

#### **4.2 Порядок выполнения работы**

- 1 Изучить основные положения работы.
- 2 Проанализировать задание по работе.
- 3 Ознакомиться с организацией рабочего места и проверить его комплектность.



4 Изучить конструктивно-технологическую характеристику подшипников качения и дефекты.

5 Подготовить подшипники к дефектации.

6 Определить состояние подшипников визуально.

7 Проверить подшипники на шум и легкость вращения.

8 Измерить радиальный зазор в подшипниках. Зазор определяют при трех положениях кольца через  $120^\circ$ . Наибольшее из полученных за цикл измерений записать в отчет.

9 Отметить посадочные поверхности колец.

10 Продефектовать деталь, выявить границы и размеры трещины. Выбрать и обосновать способ заделки трещины и тип фигурной вставки.

11 Проанализировать полученные результаты.

12 Составить отчет.

### ***4.3 Содержание отчета***

Отчет по практической работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- 1) название практической работы;
- 2) цель работы;
- 3) технологический маршрут заделки трещины фигурной вставкой, с обоснованием технических требований к выполняемым операциям и состав оборудования, приспособлений и инструмента;
- 4) выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Как расшифровываются условные обозначения подшипников качения?
- 2 Назовите типы подшипников качения и их детали.
- 3 Какие материалы применяются при изготовлении деталей подшипников качения?
- 4 Какие основные дефекты подшипников качения и причины их возникновения?
- 5 Как определить радиальный зазор подшипников качения и как он влияет на работу механизма?
- 6 В чем состоят преимущества и недостатки способа ДРД?
- 7 В чем заключаются технические требования на применение фигурных уплотняющих и стягивающих вставок?
- 8 Привести примеры использования способа ДРД при восстановлении рабочих органов машин. В чем их преимущества и недостатки?
- 9 Что такое бандажирование? Привести примеры его использования.

## Список литературы

- 1 Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю. К. Машков [и др.]. – Москва: Наука, 2002. – 280 с.
- 2 **Новиков, И. Н.** Теория термической обработки металлов / И. Н. Новиков. – Москва: Металлургия, 1978. – 392 с.
- 3 Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г. Н. Чернышев [и др.]. – Москва: Наука, 1996. – 240 с.
- 4 **Мазеин, П. Г.** Моделирование формирования остаточных напряжений и деформаций при поверхностном пластическом деформировании стальных деталей: дис. ... д-ра техн. наук / П. Г. Мазеин. – Челябинск, 1994. – 413 Л.
- 5 **Ивасышин, Г. С.** Определение остаточных напряжений и релаксации их в деталях произвольной формы методом профилированной координатной сетки. Новые методы расчетов / Г. С. Ивасышин // Межотраслевые вопросы науки и техники. – 1979. – Вып. 11. – С. 1–4.
- 6 **Проскуряков, Ю. Г.** Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорнованием / Ю. Г. Проскуряков // Вестн. машиностроения. – 1973. – № 7. – С. 58–60.
- 7 **Жолобов, А. А.** Технология машиностроения : учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1: Формообразование деталей и сборка узлов / А. А. Жолобов, А. М. Федоренко. – Минск : РИВШ, 2020. – 518 с. : ил.
- 8 **Елагина, О. Ю.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие / О. Ю. Елагина. – Москва : Университетская книга; Логос, 2020. – 488 с.
- 9 Технология, оснащение и организация ремонтно-восстановительного производства : учебник / В. А. Горохов [и др.] ; под ред. В. П. Иванова. – Старый Оскол : ТНТ, 2015. – 552 с.