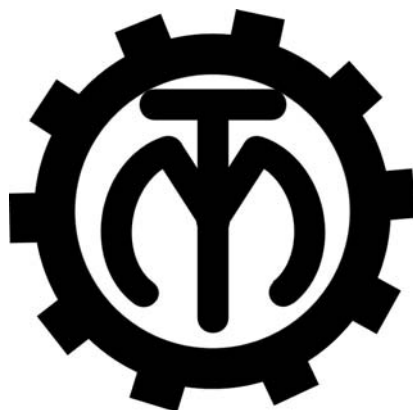


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Методические рекомендации к лабораторным работам
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 лабораторных 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 Лабораторная работа № 1. Изучение основ обработки поверхностей методами поверхностно-пластическим деформированием.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование конструкции инструментов и технологических возможностей пневмовибродинамической обработки	17
3 Лабораторная работа № 3. Исследование конструкции технологических возможностей магнитно-динамических и магнитно-центробежных раскатников	19
4 Лабораторная работа № 4. Изучение влияния ионно-плазменной обработки на эксплуатационные характеристики деталей машин	26
5 Лабораторная работа № 5. Изучение процесса наплавки при восстановлении деталей машин	34
Список литературы.....	40

1 Лабораторная работа № 1. Изучение основ обработки поверхностей методами поверхностно-пластическим деформированием

Цель работы: приобретение практических навыков использования методов обработки поверхностей деталей поверхностно-пластическим деформированием.

1.1 Общие сведения об оборудовании

Основные методы поверхностно-пластического деформирования (ППД)

ППД – это обработка деталей давлением (без снятия стружки), при которой пластически деформируется только их поверхностный слой. ППД осуществляется инструментом, деформирующие элементы (ДЭ) которого (шарики, ролики или тела иной конфигурации) взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схемам качения, скольжения или внедрения.

Поверхностное пластическое деформирование:

- повышает плотность дислокаций в упрочненном слое;
- измельчает исходную структуру;
- повышает величину твердости поверхности;
- уменьшает величину шероховатости;
- повышает износостойкость деталей;
- увеличивает сопротивление схватыванию;
- увеличивает предел выносливости.

Методы пластического деформирования делятся на три класса [1–3]:

1) отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, виброобработка, динамическое упрочнение, электромеханическая и комбинированная обработка различных поверхностей деталей машин);

2) формообразующая обработка пластическим деформированием (накатывание зубьев, шлицев, резьб, фасонных поверхностей);

3) отделочно-упрочняющая обработка пластическим деформированием (калибрование наружных и внутренних поверхностей вращения и дорнование).

Выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхности пластическим деформированием и заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем, закрепленным в оправке алмазным кристаллом, который обладает следующими свойствами:

- высокой твердостью;
- низким коэффициентом трения;
- высокой степенью чистоты;
- высокой теплопроводностью.

Выглаживание производится для уменьшения шероховатости поверхности (отделка), упрочнения поверхностного слоя, повышения точности размеров и форм деталей (калибрование).

На рисунке 1.1 показана деформация поверхностного слоя при движении выглаживателя в направлении скорости. Прижатый к обрабатываемой поверхности с силой P_y инструмент внедряется в нее на глубину R_0 и при своем движении сглаживает исходные неровности. Высота шероховатости в направлении скорости (продольная шероховатость) обычно значительно меньше, чем высота поперечной шероховатости (в направлении подачи). После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности на величину $\Delta_{упр}$. Контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью в сечении происходит по дуге abc . Вследствие того, что впереди выглаживателя образуется валик пластически деформированного металла, передняя поверхность выглаживателя нагружается гораздо больше (контакт по дуге bc), чем задняя поверхность (контакт по дуге ab). По этой причине, а также вследствие адгезионного взаимодействия между деталью и инструментом в процессе выглаживания возникает тангенциальная составляющая силы P_z .

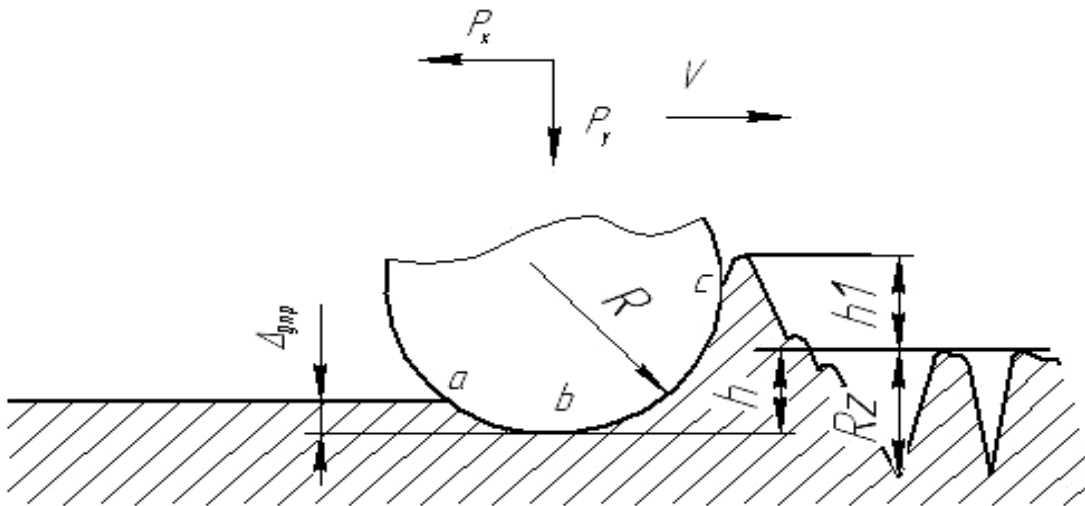
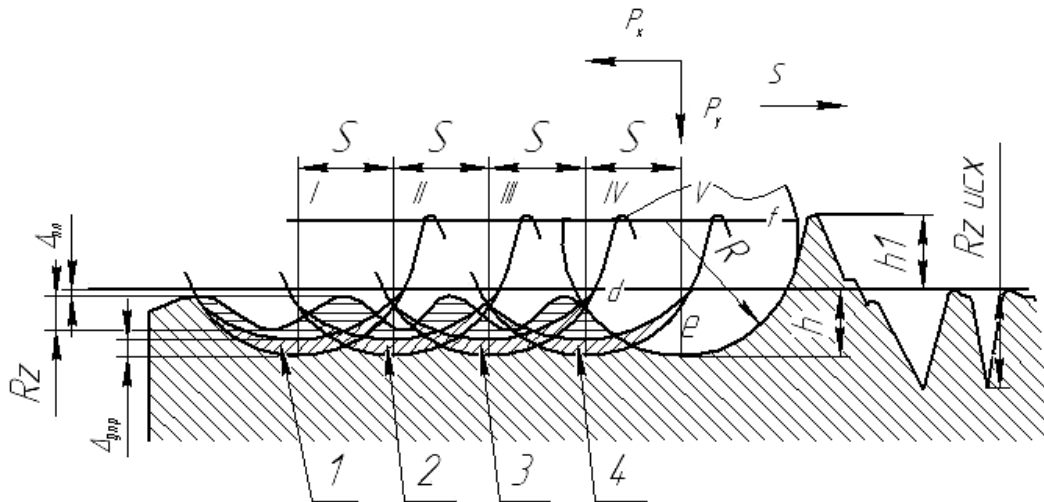


Рисунок 1.1 – Схема деформации поверхности при выглаживании

Рассмотрим теперь деформацию поверхностного слоя в направлении подачи (рисунок 1.2).

При продольном перемещении выглаживатель раздвигает металл деформируемых поверхностных неровностей в стороны. При этом со стороны исходной поверхности образуется валик деформированного металла h_B , а со стороны выглаженной поверхности происходит искажение профиля канавок, появившихся при предыдущих оборотах детали, в результате пластического течения металла, выдавливаемого из-под выглаживателя в сторону выглаженной поверхности. В наибольшей степени искажается профиль канавки, образованной на предыдущем обороте.



$I-V$ – последовательные положения выглаживания после каждого оборота детали; I – профиль следа положения выглаживателя; 2 – фактический профиль выглаженной поверхности; 3 – упругое восстановление поверхности; 4 – пластическое искажение профиля

Рисунок 1.2 – Схема деформации поверхности при выглаживании

После каждого оборота обрабатываемой детали канавка – след выглаживателя перемещается в осевом направлении на величину подачи S . При этом происходит многократное перекрытие ее при последующих обработках обрабатываемой детали, т. к. ширина канавки больше величины подачи. Контакт выглаживателя с обрабатываемой поверхностью происходит по дуге def . Вследствие того, что со стороны невыглаженной поверхности образуется валик деформированного металла h_B , правая полуповерхность (в направлении подачи) нагружена гораздо больше (контакт по дуге ef), чем левая (контакт по дуге de). Поэтому в процессе выглаживания возникает осевая сила P_x .

В результате пластического деформирования обрабатываемой поверхности происходит сглаживание исходных неровностей и образование нового микрорельефа поверхности со значительно меньшей высотой неровностей R_z . Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации. На величину и форму образующихся неровностей влияют также неоднородность шероховатости поверхности и твердости обрабатываемой поверхности, колебания силы выглаживания, обусловленные биением детали, и др. Это вызывает отклонение реального микрорельефа от полученного.

Образующийся в результате алмазного выглаживания микрорельеф поверхности обуславливается следующими факторами:

- кинематикой процесса (направлением взаимного перемещения инструмента и обрабатываемой детали);
- величиной исходной шероховатости;
- формой и размером рабочей части алмаза;
- величиной внедрения алмаза в обрабатываемую поверхность;
- пластическим течением материала, обуславливающим появление вторичной шероховатости;
- шероховатостью рабочей части алмаза;

- величиной упругого восстановления поверхности после выглаживания;
- вибрациями технологической системы.

Формирование поверхностного слоя при алмазном выглаживании происходит вследствие пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Под действием радиальной силы, действующей на поверхность контакта алмаза с деталью, возникают контактные давления. Если их величина превышает предел текучести, возникает пластическая деформация тонких поверхностных слоев. При пластической деформации поверхностный слой имеет специфическое волокнистое строение (текстуру), исходная кристаллическая решетка искажается.

Эффективность алмазного выглаживания различных материалов в значительной мере определяется их исходной структурой.

Исследованиями установлено, что при выглаживании наиболее интенсивно возникает деформация в феррите, менее интенсивно – в перлите и мартенсите.

Высокая эффективность упрочнения объясняется более высокой плотностью дефектов, образующихся в поверхностном слое, за счет концентрации дислокаций. При этом создается тонкое структурное состояние металла, которое обеспечивало бы максимальную задержку дислокаций и минимальный их выход на поверхность. При алмазном выглаживании плотность дислокаций в поверхностном слое близка к предельному значению. С увеличением расстояния от поверхности плотность дислокаций уменьшается. Особенность процесса алмазного выглаживания: если при других видах упрочнения полностью или частично удаляется слой металла, деформированный на предыдущей операции, то при алмазном выглаживании этот слой не удаляется, а претерпевает дополнительную упругопластическую деформацию.

Оптимальное усилие $P_y = 300 \dots 200$ Н. При P_y более 300 Н возрастает глубина упрочненного слоя, увеличивается микротвердость в нижних слоях, однако уменьшается микротвердость в верхнем тонком поверхностном слое за счет уменьшения пластичности.

Инструменты для выглаживания. В качестве выглаживателей могут использоваться природные и синтетические алмазы или твердосплавные гладилки. Алмаз предпочтительней, т. к. имеет уникально малый коэффициент трения при высокой контактной твердости.

Стойкость природных и искусственных алмазов примерно одинакова.

Инструмент со сферической формой заточки (рисунок 1.3, а) позволяет обрабатывать наружные, внутренние и плоские поверхности как методом выглаживания, так и вибровыглаживанием.

Цилиндрическую форму (рисунок 1.3, б) применяют только для обработки наружных цилиндрических поверхностей.

Тороидальная форма (рисунок 1.3, в) широкого применения не нашла из-за отсутствия природных и синтетических алмазов большого размера.

Конический выглаживатель (рисунок 1.3, г) работает большой поверхностью конуса.

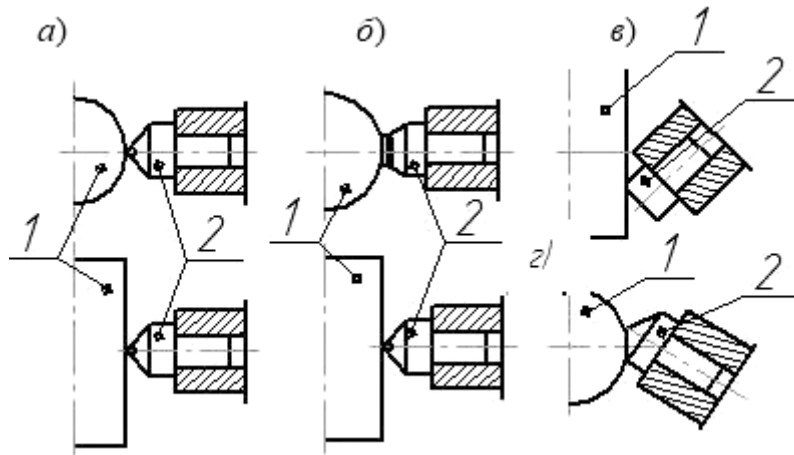


Рисунок 1.3 – Схема установок выглаживателей при обработке цилиндрической поверхности

Алмазным выглаживателем можно обрабатывать почти все применяющиеся в промышленности металлы и сплавы, за исключением титана, циркония и ниобия, т. к. они налипают на его рабочую часть.

Детали для обработки: все виды поверхностей (наружные, внутренние, плоские, профильные) валов, штоков, цилиндров, поршневых пальцев и т. д. Нельзя использовать для деталей, имеющих неравномерную твердость.

Вибровыглаживание и вибронакатывание

При вибрационном выглаживании инструменту в виде сферы (другие формы заточки неприменимы) дополнительно придается возвратно-поступательное перемещение по поверхности детали (рисунок 1.4).

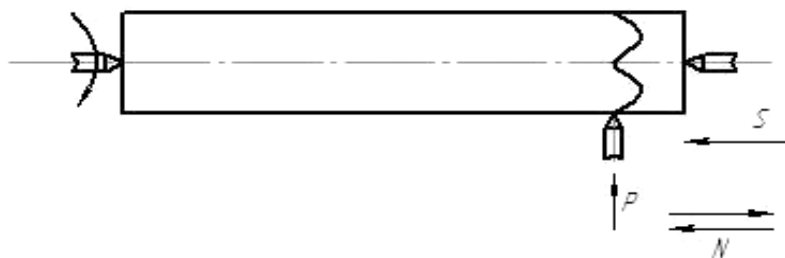


Рисунок 1.4 – Схема вибровыглаживания

В результате на поверхности образуется синусоидальный канал. При обработке инструмент скользит либо по исходной, либо по частично выглаженной поверхности, а при каждом двойном ходе изменяется направление движения инструмента и дуга его контакта с обрабатываемой поверхностью.

Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании, по характеру и плотности синусоидальных каналов подразделяется на четыре вида:

- 1) каналы не касаются друг друга (рисунок 1.5, а);
- 2) каналы касаются друг друга (рисунок 1.5, б);
- 3) каналы пересекаются (рисунок 1.5, в);
- 4) каналы накладываются (рисунок 1.5, г).

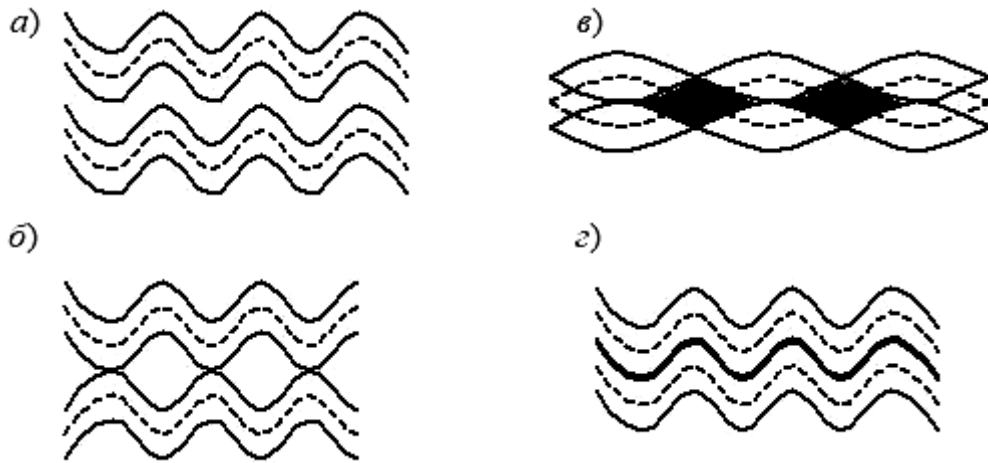


Рисунок 1.5 – Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании

Варьирование форм, размеров и расположения микронеровностей по поверхности достигается изменением режимов обработки:

- скорости вращения детали;
- подачи инструмента;
- амплитуды и частоты его колебаний;
- силы поджима инструмента к детали;
- радиуса сферической части инструмента.

В качестве инструмента здесь применяют шарики диаметром 4...10 мм и сферические наконечники из алмазов. В первом случае обработку ведут трением качения (вибронакатывание), во втором – трением скольжения (вибровыглаживание).

Преимущества перед выглаживанием:

- остаточные напряжения больше в 1,3–1,7 раза;
- длина канала увеличивается в 1,5–2 раза;
- повышение износостойкости детали в 1,5 раза;
- возможность изготовления любого микрорельефа для контактирующих тел;
- возможность удержания масляной пленки в каналах при трении.

Центробежно-шариковая ударная обработка

Способ упрочнения центробежно-шариковым наклепом (рисунок 1.6) основан на использовании центробежной силы стальных шариков, свободно перемещающихся в гнездах специального приспособления, вращающегося со скоростью 20...40 м/с над обрабатываемой поверхностью. Встречая на своем пути деталь, движущуюся навстречу шарикам со скоростью 30...90 м/мин,

каждый шарик с силой ударяется по обрабатываемой поверхности, в результате чего происходит ее наклеп и сглаживание шероховатостей.

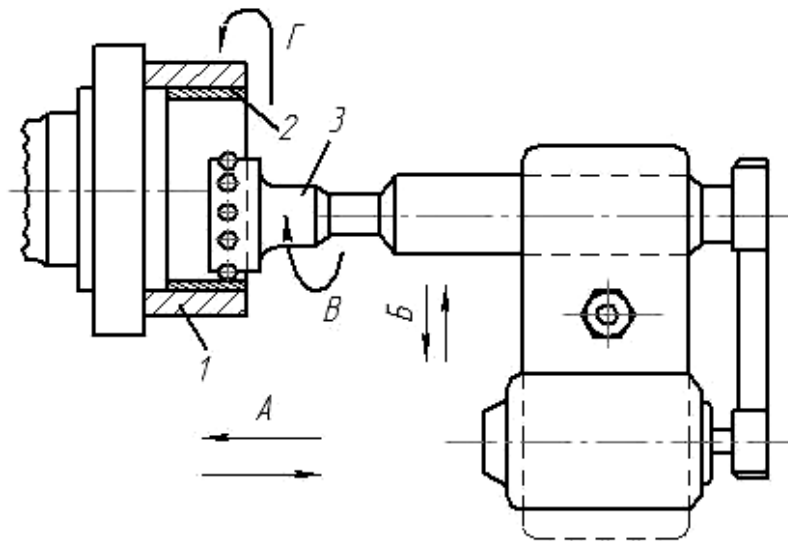


Рисунок 1.6 – Схема ППД динамическим способом внутренних цилиндрических поверхностей

В зависимости от режимов и условий обработки сепаратор может закрепляться либо на шпинделе шлифовального станка, либо получать вращение от автономного двигателя.

Иногда в качестве привода используются электрошпиндели с частотой вращения 14400 и 20000 об/мин. Скорость вращения сепаратора часто лимитируется прочностными характеристиками материала, из которого он изготовлен, а также наличием большого количества концентраторов напряжений в конструкции (конические отверстия по периферии) и циклическим характером приложения нагрузки.

Для повышения долговечности устройства, а также получения стабильных конечных результатов обработки сепаратор перед работой должен пройти статическую и динамическую балансировку. Биение шариков относительно оси вращения не должно превышать 0,03...0,04 мм. Деталь также необходимо установить как можно точнее, допуская биение относительно оси вращения не более 0,03 мм. Процесс наклепывания центробежно-шариковым способом не изменяет геометрической формы детали. Для обработки наклепыванием не требуется специального припуска на обработку. Если чистота поверхности соответствует $Ra = 0,63$ мкм, то диаметр изделия после наклепа изменяется лишь на 0,002 мм. В случае более грубой поверхности диаметр может изменяться на +0,01 мм – при обработке отверстия и на –0,01 мм – при обработке наружной поверхности.

От чистоты исходной поверхности зависит поверхностная твердость. В случае грубо подготовленной поверхности гребешки препятствуют ударному воздействию шариков на основной слой металла.

Наклепываемую поверхность перед началом обработки следует смазать керосином. Сепаратор приспособления с шариками смазывается составом из

веретенного масла с 60 % керосина через каждые 5...10 мин, смазку можно производить на ходу с помощью волосяной щетки. При работе со смазкой не происходит заметного торможения шарика сепаратором, и процесс протекает равномерней.

Центробежно-шариковыми упрочнителями можно обрабатывать как закаленные стали, так и цветные металлы и сплавы, соответственно подбирая режимы ударной обработки. Особого внимания требует выбор режимов обработки при упрочнении чугунных поверхностей, т. к. чугуны легко перенаклепываются.

Для наклепывания цветных металлов и сплавов требуется примерно в 2 раза меньшая ударная сила шарика, чем для наклепывания конструкционной стали. Поверхностная твердость всех металлов и сплавов (за исключением баббита) с улучшением чистоты поверхности возрастает. При наклепе поверхности образца из латуни ЛС-591, проточенной проходным резцом до $Ra = 2,5$ мкм, получается чистота поверхности $Ra = 0,32$ мкм. Твердость поверхностного слоя увеличивается на 61 %.

Ударная обработка с применением магнестрикционных устройств

Использование магнестрикционного и пьезоэлектрического эффектов для возбуждения механических колебаний позволяет конструировать устройства с частотой ударов бойка до нескольких десятков килогерц (рисунок 1.7). В большинстве случаев эти устройства конструируются в виде систем с распределенными параметрами, работающих в диапазоне резонансных частот, и предназначаются для ультразвуковой обработки. Такая обработка эффективна для закаленных, неравножестких и тонкостенных деталей. Ультразвуковые колебания целесообразно применять в комбинации с другими видами упрочнения, в частности, с алмазным выглаживанием.

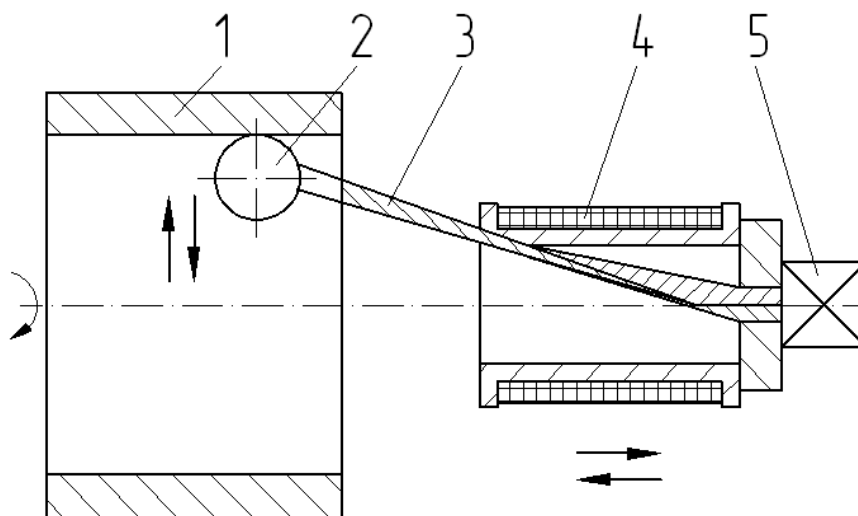


Рисунок 1.7 – Схема биметаллического магнестрикционного устройства для упрочнения отверстий

Магнитострикционный преобразователь – наиболее приемлемый тип возбудителя колебаний при виброобкатке ППД разнообразных деталей. Обычно используется резонансный режим продольных колебаний стержневого магнитостриктора, изготовленного из пластин никеля, пермендюра, алфера и других материалов, обладающих достаточно сильным эффектом магнитострикции.

При наложении на боек (шарик или ролик) колебаний ультразвуковой частоты, направленных перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, процесс упрочнения значительно интенсифицируется, что позволяет при весьма малых статических усилиях обкатывания обеспечить высокие эксплуатационные характеристики обработанных поверхностей. Возможность снижения усилий обкатывания объясняется и высокой температурой процесса, достигающей $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом упрочнение сводится к термопластическому деформированию материала поверхностного слоя инструментом, вибрирующим с частотой $18 \dots 25\text{ кГц}$.

Магнитострикционные биметаллы не боятся перегрузки, что выгодно отличает их от термобиметаллов, которые даже при кратковременной тепловой перегрузке приобретают необратимую деформацию. Существенным положительным свойством магнитострикционного биметалла является его практическая инерционность по отношению к магнитному полю.

Сущность упрочнения пластическим деформированием

Поликристаллические твердые тела состоят из большого числа зерен (кристаллов), разделенных между собой границами. Каждое зерно содержит дефекты. Зерна имеют различную ориентировку (рисунок 1.8).

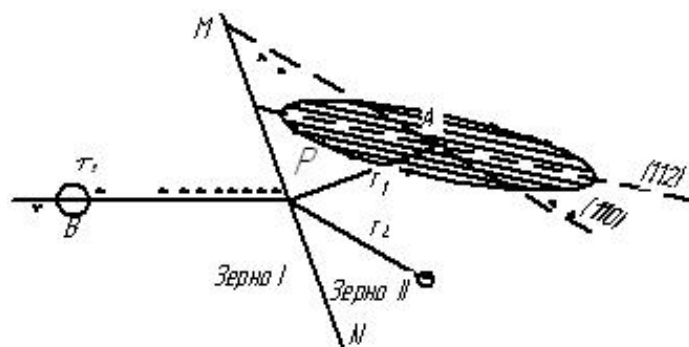


Рисунок 1.8 – Схема инициирования скольжения (или двойникования) в соседнем зерне поликристалла в некоторой точке A , удаленной от вершины плоского нагромождения дислокаций p на расстояние r_1

При приложении внешнего напряжения к металлу пластическая деформация в первую очередь произойдет в зерне, наиболее благоприятно ориентированном к внешнему напряжению (т. е. с наибольшим касательным напряжением). С ростом внешнего напряжения наблюдается постепенное вовлечение остальных зерен в процессе пластической деформации при сохра-

нении сплошности зерна. На рисунке показана схема передачи пластической деформации от зерна к зерну. Под действием внешнего сдвигающего напряжения τ_s дислокации, генерируемые активным источником B , приходят к границе зерна и задерживаются около нее. По мере накопления дислокаций у точки P растет напряжение. Однако этого недостаточно, чтобы перейти из одного зерна в другое через границу MN . Поэтому распространение скольжения от одного зерна к другому осуществляется за счет того, что при достижении определенного значения напряжения в точке P возбуждается источник дислокации в соседнем зерне, например в точке A .

Движение дислокаций, генерируемых источником A , будет происходить по наиболее благоприятно ориентированной плоскости скольжения.

Рассмотренный механизм торможения дислокаций у границ зерна называется барьерным упрочнением.

Упрочнение более интенсивно происходит на границах зерен; мелкое зерно упрочняется интенсивнее крупного.

Напряжение текучести τ_T в зерне диаметром d , в соответствии с соотношениями Холла – Петча, зависит от составляющих:

$$\tau_T = \tau_0 + kd^{0,5}, \quad (1.1)$$

где τ_0 – напряжение как результат сопротивления движению дислокаций в теле зерна, не зависящего от размера зерна (внутреннее трение);

k – константа, характеризующая трудность эстафетной передачи пластической деформации от зерна к зерну.

Напряжение текучести τ_T (сопротивление деформации) возрастает с уменьшением размера зерна не из-за наличия границы самой по себе, а из-за взаимодействия между зернами, разделенными этой границей.

Если дислокация надежно задерживается границей и возможности эстафетной передачи деформации ограничены, то деформация локализуется в микрообъемах, а напряжение текучести возрастает.

Существенная локализация деформаций повышает концентрацию напряжений, что приводит к преждевременному разрушению, т. е. снижению пластичности.

Наряду с величиной зерна на деформационное упрочнение металлов большое влияние оказывают количество и размер внутризеренных блоков (ячеек). С повышением степени деформации и роста плотности дислокаций происходит дробление зерна на блоки по плоскостям скопления дислокаций.

Наряду с дроблением зерна на блоки происходит разориентация блоков по границам на некоторый угол θ . При $\theta = 2,5^\circ \dots 5^\circ$ граница блоков оказывает сопротивление движению дислокаций.

По типу сопротивления дислокаций «леса». Если $\theta = 2^\circ \dots 5^\circ$, то границы блоков становятся местом скопления дислокаций, повышающими деформирующее напряжение.

Расчет глубины деформационного упрочнения поверхностного слоя

Упрочненный слой – это слой, параметры состояния которого отличаются от параметров основного материала. Однако граница раздела упрочненного и основного материала сильно размыта из-за того, что контролируемый параметр изменяется вблизи этой границы с весьма малым градиентом. Поэтому толщина упрочненного слоя определяется всегда с погрешностью, величина которой зависит от метода измерения и присущих ему погрешностей. Совершенно ясно, что первые признаки искажения кристаллической структуры будут обнаружены физическими методами исследования на большей глубине, чем первые признаки увеличения микротвердости или искажения координатной сетки. В связи с этим понятие толщины упрочненного слоя является достаточно условным, а числовые значения, приведенные в различных источниках, могут отличаться на десятки процентов.

С позиций механики деформирования глубина упрочнения определяется границей очага деформации. Таким образом, для точного прогнозирования глубины упрочнения имеет значение адекватность теоретической модели и связанная с ней конструкция поля напряжений (деформаций).

На рисунке 1.9 показана упрощенная схема поля напряжений.

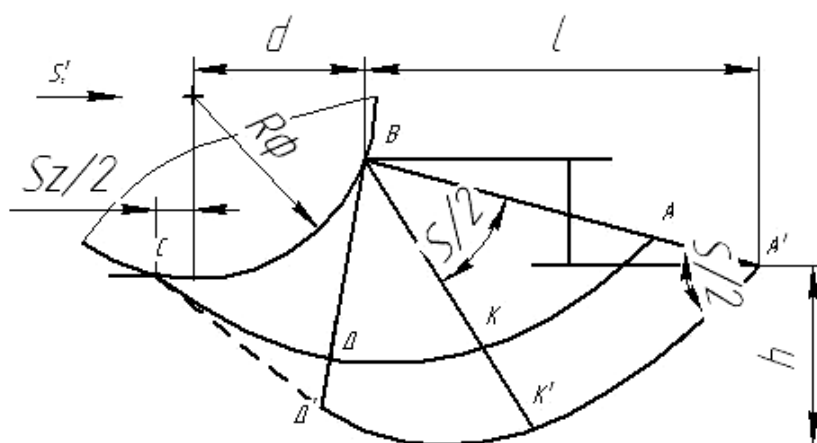


Рисунок 1.9 – Упрощенная схема поля напряжений

Точка A' , которая легко выявляется профилографированием очага деформации, определяет длину L передней внеконтактной поверхности волны BA' . $A'K'D'C'$ – граница области развитых пластических деформаций, нижняя точка которой определяет толщину упрочняемого слоя h . Поля деформаций, расположенные ниже этой точки, не вызывают заметного изменения сопротивления металла пластическим деформациям. Линии BK' и KA' подходят к BA' под углом $\pi/4$. Из геометрических соображений имеем

$$h = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(h_b^2 + l^2)} - h_b. \quad (1.2)$$

При наиболее часто применяемых режимах обработки $l \gg h_b$.

Тогда

$$h \approx 0,7l. \quad (1.3)$$

Исследованиями установлено, что

$$l = 2,1d^{0,5}. \quad (1.4)$$

Подставляя (1.4) в (1.3), получим

$$h = 1,5\sqrt{d}. \quad (1.5)$$

Расчет приближенного значения накопленной деформации поверхностного слоя

$$\Gamma = \frac{B \cdot d}{R_{np}},$$

где Γ – значение накопленной деформации поверхностного слоя;

B – коэффициент, $B = 4,5 \dots 5,4$;

R_{np} – профильный радиус инструмента;

d – параметр, получаемый при вдавливании инструмента в металл; связан с размером площади контакта инструмента с деталью и силой P_Y .

Определение подачи S_z :

$$d + \frac{d_1}{S_z} \geq (1,5 + 8);$$

$$d_1 = A \cdot d^B;$$

$$A = 0,39 \text{ при } 0 < d < 4 \text{ мм}; A = 0,34 \text{ при } 0 < d < 0,6 \text{ мм};$$

$$B = 0,9 \text{ при } 0 < d < 4 \text{ мм}; B = 1 \text{ при } 0 < d < 0,6 \text{ мм}.$$

Определение диаметра ролика: $D_p = 40 \dots 100$ мм. D_p должен быть кратным диаметру детали и по возможности меньшим.

Определение силы обкатывания:

$$P_Y = 1,05\sigma_n \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2l_{\max} \cdot R_p \cdot R_d}{R_p + R_l}} \left[1 + 0,35 \sqrt{\frac{R_p + R_d}{R_l}} \right],$$

где R_p – радиус ролика;

R_d – радиус детали;

$$L_{\max} = \sqrt{R_{np}^2 - (d - S_z)} - \sqrt{R_{np}^2 - d^2}$$

или

$$L_{\max} = S_z \cdot d / R_{np};$$

σ_n – напряжение на площадке контакта, МПа;

$$\sigma_n = \frac{5,2 \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}};$$

σ_s – степень деформации, определяется из рисунка 1.10.

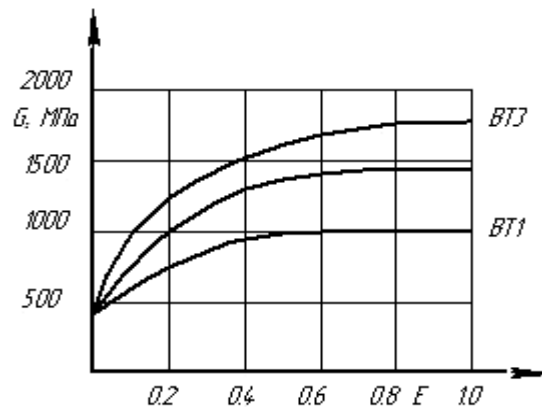


Рисунок 1.10 – Кривые упрочнения титановых сплавов

Расчет глубины деформационного упрочнения поверхностного слоя

$$E = \frac{\Gamma}{\sqrt{3}},$$

где Γ – накопленная деформация поверхностного слоя.

1.2 Порядок выполнения работы

По заданию преподавателя подобрать метод ППД и режимы упрочнения деталей с целью получения заданных характеристик: глубина упрочнения, результирующая шероховатость, наличие-отсутствие результирующего макрорельефа: предложить тип применяемого оборудования и оснастки; рассчитать режимы упрочнения и время обработки.

Исходные данные: материал детали, твердость, эскиз детали, исходная шероховатость.

1.3 Содержание отчета

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

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цель работы;
- 3) описание конструкции и принципа действия выбранного метода;
- 4) результаты измерений и расчета;
- 5) выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные методы ППД.
- 2 Устройство и принцип работы магнитно-динамического раскатника.
- 3 Устройство и принцип работы магнитно-центробежного раскатника.
- 4 Способы ППД поверхностей термоупрочненных деталей.

2 Лабораторная работа № 2. Исследование конструкции инструментов и технологических возможностей пневмовибродинамической обработки

Цель работы: приобретение практических навыков использования инструментов и технологических возможностей пневмовибродинамической обработки.

2.1 Основные теоретические положения

Импульсно-ударная и пневмовибродинамическая упрочняющая обработка

На рисунке 2.1 представлен импульсно-ударный шариковый раскатник для обработки внутренних поверхностей, состоящий из корпуса *1*, на котором две боковых шайбы *2* образуют камеру, имеющую форму кольцевой канавки, где свободно размещены приводящие шары *4* и шары-бойки *5*. Регулировка ширины камеры осуществляется осевым перемещением боковой шайбы *2* относительно корпуса *1*, после чего диск фиксируется на корпусе гайкой *3* крепления боковых шайб.

Для подвода сжатого воздуха в корпусе *1* выполнено осевое отверстие, с которым камера соединена тангенциальными каналами-соплами.

При работе импульсно-ударного инструмента корпус *1* помещается в оправку, закрепленную, например, в задней бабке токарного станка, а обрабатываемая деталь – в его патроне. Обрабатываемой детали сообщается вращение, а в осевое отверстие корпуса *1* подается сжатый воздух. Поступая через тангенциальные каналы-сопла в камеру, сжатый воздух приводит в круговое движение по призматическим направляющим камеры приводящие шары *4*. При круговом перемещении приводящие шары осуществляют периодическое ударное воздействие на шары-бойки *5*, размещенные во

внешней кольцевой канавке. Шары-бойки в свою очередь наносят удары по обрабатываемой поверхности, в результате чего на ней образуется своеобразный микрорельеф в виде стенки лунок. Под воздействием приводящих шаров 4 и отработанного сжатого воздуха шары-бойки 5 также получают круговое перемещение относительно оси инструмента, но со значительно меньшей скоростью, чем приводящие шары. Ввиду наличия кругового перемещения шаров-бойков оказывается возможной обработка импульсно-ударным инструментом невращающихся, например корпусных, деталей. При обработке импульсно-ударным инструментом сжатый воздух, наряду с функцией привода шаров, выполняет функцию охлаждающей среды.

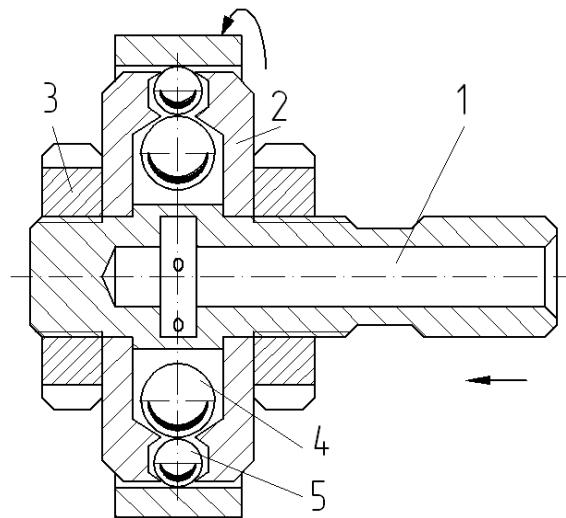


Рисунок 2.1 – Упрощенная схема импульсно-ударного инструмента

2.2 Порядок выполнения работы

По заданию преподавателя подобрать метод пневмовибродинамической обработки и режимы упрочнения деталей с целью получения заданных характеристик: глубина упрочнения, результирующая шероховатость, наличие-отсутствие результирующего макрорельефа: предложить тип применяемого оборудования и оснастки; рассчитать режимы упрочнения и время обработки (аналогично расчёту, приведенному в подразделе 1.1).

Исходные данные: материал детали, твердость, эскиз детали, исходная шероховатость.

2.3 Содержание отчета

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

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цель работы;
- 3) описание конструкции и принципа действия пневмовибродинамической обработки;

- 4) результаты измерений и расчета;
- 5) выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные методы ППД.
- 2 Импульсно-ударная и пневмовибродинамическая упрочняющая обработка.
- 3 Устройство импульсно-ударного инструмента.
- 4 Какую функцию выполняет сжатый воздух.

3 Лабораторная работа № 3. Исследование конструкции технологических возможностей магнитно-динамических и магнитно-центробежных раскатников

Цель работы: приобретение практических навыков использования технологических возможностей магнитно-динамических и магнитно-центробежных раскатников.

3.1 Общие сведения

Магнитно-центробежная и магнитно-динамическая обработка

Большой научно-практический интерес представляет новый метод магнитно-динамического упрочнения (МДУ), при котором упрочнение поверхности деформирующими элементами осуществляется за счет энергии магнитного поля. Деформирование проводят свободно установленными в кольцевой камере деформирующими элементами, не имеющими механической связи с корпусом инструмента. Согласно методу на деформирующие элементы воздействуют вращаемым (постоянным или переменным) магнитным полем и перемещают их вдоль упрочняемой поверхности.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности втулок обеспечивает достижение следующих характеристик:

- снижение исходной шероховатости поверхности с $Ra = 12,5 \dots 6,3$ до $Ra = 1,25 \dots 0,1$;
- упрочнение поверхностного слоя детали на глубину $0,1 \dots 2$ мм;
- увеличение диаметрального размера на $10 \dots 60$ мкм при обработке втулок из пластичных материалов.

Метод МДУ позволяет осуществлять упрочнение деталей с исходной твердостью поверхностного слоя до HRC 50 с подачами инструмента $20 \dots 800$ мм/мин.

Конструкция магнитно-динамического инструмента зависит от типа производства, в котором он используется, вида упрочняемой поверхности

детали и его технологического назначения.

В условиях единичного, мелкосерийного и среднесерийного производств для осуществления процесса МДУ инструменты проектируют под конкретный тип металлообрабатывающего оборудования.

В крупносерийном и массовом производствах МДУ целесообразно осуществлять без применения металлорежущих станков на специальной установке, содержащей инструмент, а также привод вращения и подачи инструмента.

В настоящее время разработаны конструкции магнитно-динамических инструментов для обработки отверстий, валов и плоских поверхностей.

На рисунке 3.1 изображен магнитно-центробежный раскатник для станков фрезерно-расточной группы, содержащий: корпус 1; деформирующие элементы 2, свободно установленные в кольцевой камере 3; магнитопроводные диски 4, 5; источник магнитного поля 6 – электромагнит или модуль с постоянными магнитами.

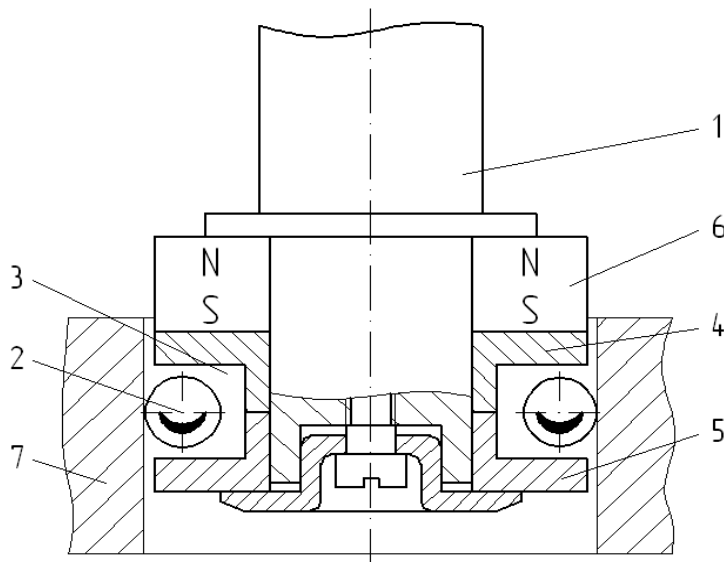


Рисунок 3.1 – Магнитно-центробежный раскатник

Корпус 1 инструмента закрепляют в шпинделе станка. Инструмент вводят в полость отверстия детали 7, сообщают ему вращение и перемещают с подачей S вдоль обрабатываемой поверхности. В процессе обработки источник магнитного поля 6 и магнитопроводные диски 4, 5 фокусируют магнитное поле в кольцевой камере 3 в зоне расположения деформирующих элементов 2. Вращаемое магнитное поле перемещает деформирующие элементы в окружном направлении кольцевой камеры 3. Возникающая центробежная сила прижимает деформирующие элементы 2 к обрабатываемой поверхности.

Одновременно на деформирующие элементы 2 действует магнитная сила, имеющая постоянную и динамическую составляющие. Наличие динамической составляющей магнитной силы обусловлено магнитным трением при перемещении деформирующих элементов в магнитном поле, а также периодическим перераспределением магнитного потока в зоне кольцевой камеры инструмента, вызываемым колебательными перемещениями деформирующих элементов.

Под действием динамической магнитной силы деформирующие элементы приобретают высокочастотные колебания, интенсифицирующие процесс упрочнения.

В результате деформирование поверхности осуществляется под действием центробежной и магнитной сил. Причем магнитная динамическая сила существенно превышает центробежную.

На рисунке 3.2 схематично изображен магнитно-динамический раскатник, предназначенный для одновременного упрочнения поверхностного слоя детали и формирования регулярного рельефа. Инструмент состоит из оправки 1; дисков 2, 3; деформирующих элементов 4, установленных в кольцевой камере 5; магнитного модуля 6 с источниками магнитного поля – постоянными магнитами 7, расположенными с равномерным угловым шагом α в нижней части кольцевой камеры 5.

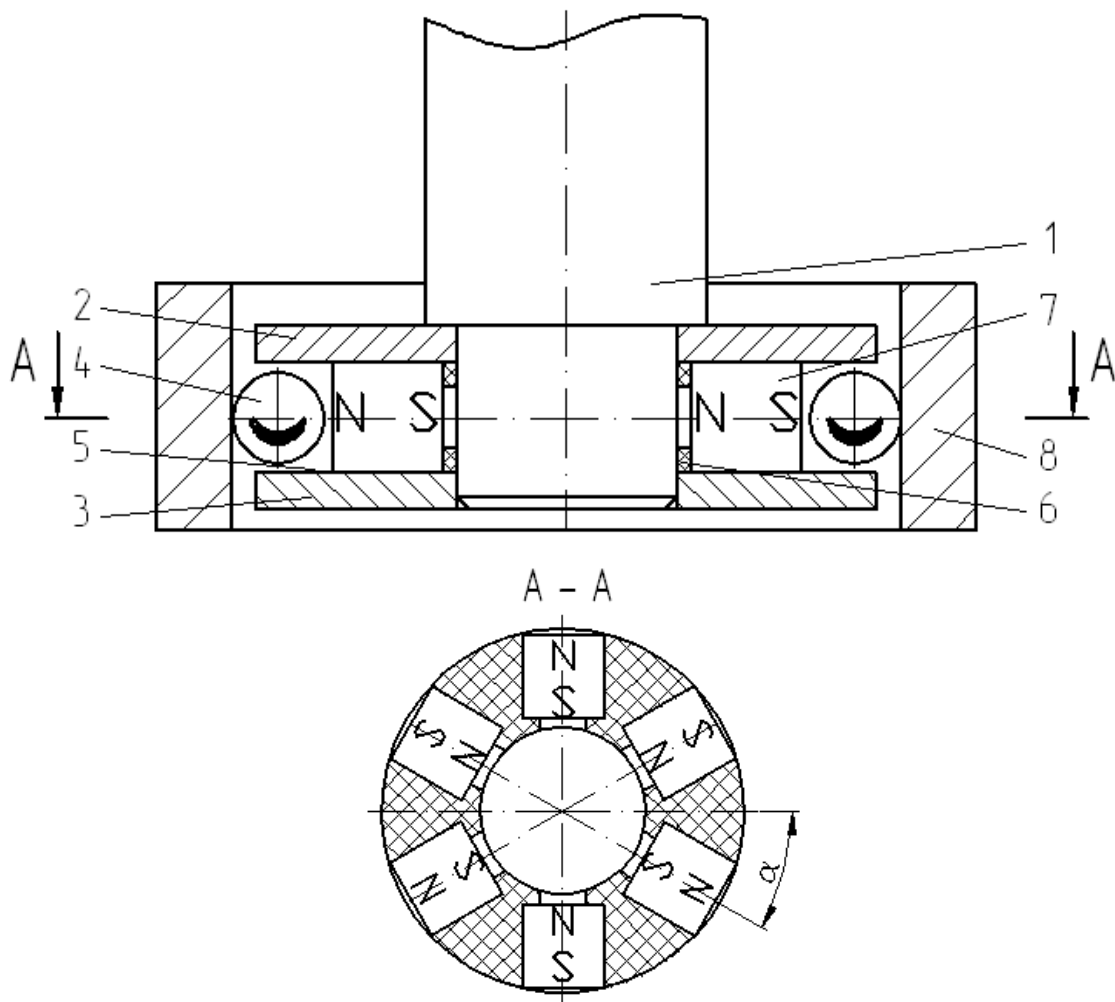


Рисунок 3.2 – Магнитно-динамический раскатник

Оправку 1 инструмента устанавливают в шпинделе станка. Инструмент вводят в отверстие упрочняемой детали 8, сообщают ему вращение и перемещают с рабочей подачей.

Магнитное поле от магнитов 7 перемещает деформирующие элементы 4

в окружном направлении кольцевой камеры 5. Скорость вращения магнитов 7 превышает скорость вращения деформирующих элементов 4. При этом на деформирующие элементы 4 действует центробежная сила, прижимающая их к поверхности детали 8, и периодическая магнитная сила, отрывающая их от упрочняемой поверхности и направленная к магнитам 7.

В результате инструмент обеспечивает ударное взаимодействие деформирующих элементов 4 с деталью 8, упрочнение поверхностного слоя и формирование регулярного рельефа.

Весьма эффективными являются двухрядные магнитно-динамические инструменты для упрочнения отверстий (рисунок 3.3). Инструмент имеет: ротор 1 из немагнитопроводного материала; источник магнитного поля 2 с постоянными или дискретными характеристиками; внутренние шайбы 3, 4 из магнитопроводного материала; наружные щечки 5, 6 из немагнитопроводного материала; кольцевые камеры 7, 8; деформирующие элементы 9; шары-ударники 10.

Ротор 1 закрепляют на оправке фрезерного или расточного станка. Инструмент вводят в полость обрабатываемой детали 11, сообщают ему вращение и движение осевой подачи. Под действием вращаемого магнитного поля от магнита 2 шары-ударники 10 осуществляют колебательное движение в радиальном и окружном направлениях и ударяют по деформирующим шарам 9. Деформирующие элементы 9 при этом внедряются на определенную глубину в поверхность детали 11 и оставляют на ней ряд лунок. Лунки, перекрываясь между собой, образуют регулярный рельеф, повышающий эксплуатационные характеристики поверхностного слоя. Инструмент обеспечивает высокое удельное давление в зоне контакта деформирующих элементов 9 с деталью 11, что интенсифицирует процесс упрочнения.

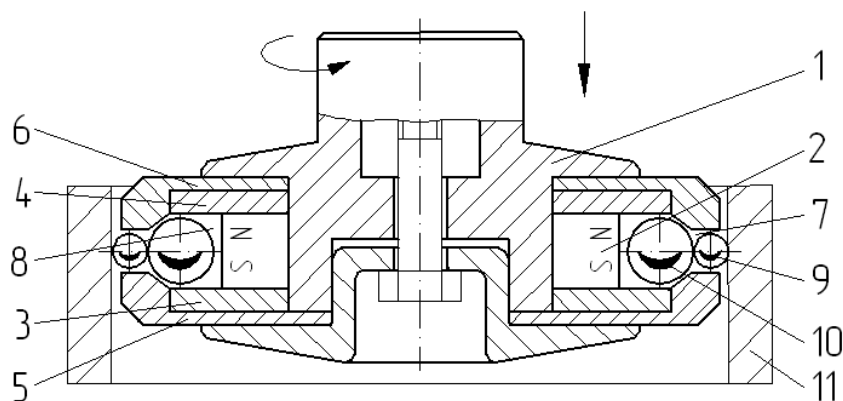


Рисунок 3.3 – Двухрядный магнитно-динамический раскатник

На рисунке 3.4 представлен магнитно-динамический инструмент для упрочнения поверхности вала. Инструмент имеет корпус 1 и устройство для намагничивания поверхности детали в виде постоянных магнитов 2, 3. В корпусе 1 выполнены две кольцевые камеры 4, 5, расположенные в одной плоскости симметрии 6. Кольцевая камера 4 внутренней стороной выходит в полость

отверстия 7 корпуса 1, а наружной – соединена с кольцевой камерой 5. В кольцевой камере 4 установлены деформирующие шары 8 малого диаметра, а в камере 5 – шары-отражатели 9 большого диаметра. Магниты 2, 3 выполнены с радиальной намагниченностью, удалены от кольцевой камеры 4 и не оказывают магнитного воздействия на деформирующие элементы 8. Источники магнитного поля 2, 3 установлены симметрично относительно плоскости 6 и имеют противоположное расположение полюсов, т. е. S – N и N – S.

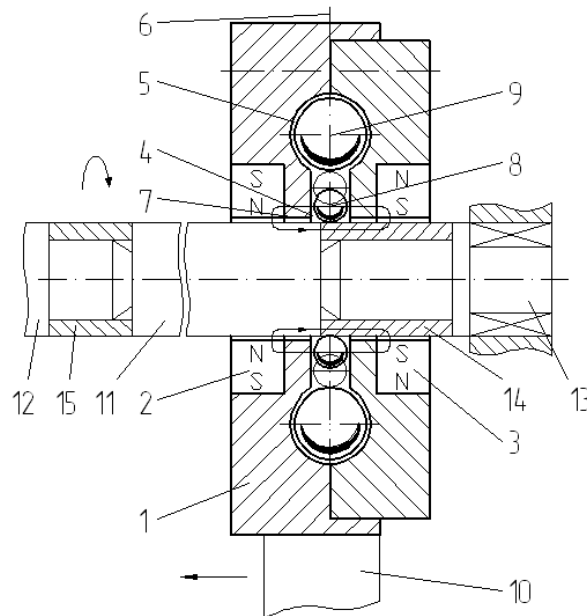


Рисунок 3.4 – Магнитно-динамический инструмент для упрочнения валов

Корпус 1 инструмента закрепляют в резцедержателе 10 станка. Отверстие 7 корпуса 1 располагают соосно оси центров станка. В полость отверстия 7 инструмента вводят упрочняемый вал 11 и закрепляют в центрах 12, 13 станка. Центры 12, 13 снабжены втулками 14, 15 из магнитопроводного материала. Плоскость симметрии 6 инструмента совмещают с торцом вала 11. Магнитный поток от источников магнитного поля 2, 3 посредством магнитопроводной втулки 14 (или втулки 15 в конце обработки) равномерно замыкается на поверхностный слой вала 11. Поверхность вала 11 приобретает магнитные свойства и притягивает к себе деформирующие элементы 8.

Валу 11 сообщают вращение и перемещают инструмент вдоль обрабатываемой поверхности. При вращении вала 11 деформирующие элементы 8 разгоняются магнитным полем вала в окружном направлении кольцевой камеры 4. Под действием возникающей центробежной силы деформирующие элементы 8 расходятся в радиальном направлении и периодически сталкиваются с шарами-отражателями 9. При столкновении деформирующие элементы 8 изменяют траекторию движения в направлении к обрабатываемой поверхности, ударяют по ней и осуществляют поверхностное пластическое деформирование.

Разработана конструкция двухрядного инструмента для обработки плоских поверхностей (рисунок 3.5).

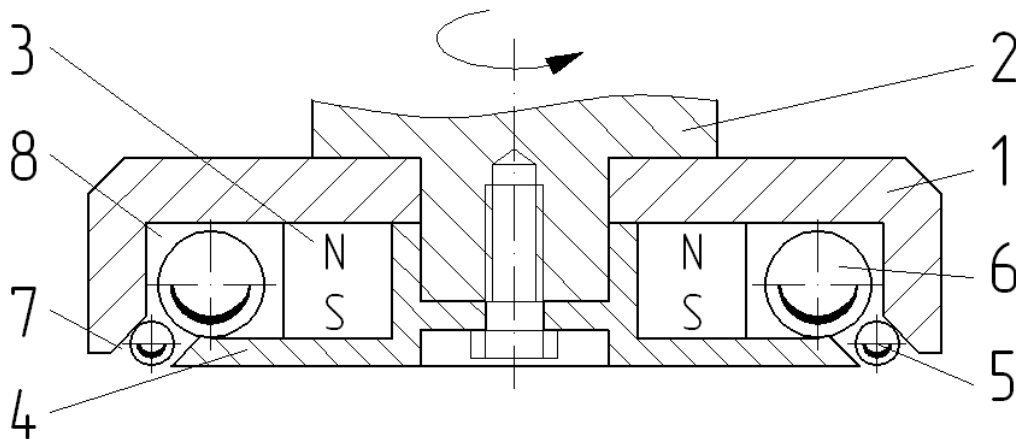


Рисунок 3.5 – Двухрядный инструмент для магнитно-динамического упрочнения плоских поверхностей

Инструмент содержит корпус *1*, оправку *2*, кольцевой магнит *3*, опорный стакан *4*, деформирующие элементы *5* и шары-ударники *6*, расположенные соответственно в нижней кольцевой камере *7* и в верхней кольцевой камере *8*.

Оправку *2* инструмента закрепляют в шпинделе вертикально-фрезерного станка. Инструменту сообщают вращение, а детали – движение подачи. При вращении инструмента шары-ударники *6*, расположенные в верхней кольцевой камере *8*, под действием вращаемого магнитного поля разгоняются в окружном направлении. Деформирующие элементы *5*, вследствие наличия меньшей массы, чем у шаров ударников *6*, удаленности от источника магнитного поля *3*, взаимодействия с поверхностью детали, «проскальзывают» относительно корпуса *1* инструмента и имеют незначительную скорость (на порядок отличающуюся от окружной скорости шаров-ударников *6*). Перемещаясь в окружном направлении кольцевой камеры *8*, шары-ударники *6* сталкиваются с деформирующими элементами *5*, расположенными в нижней кольцевой камере *7* инструмента. В процессе удара деформирующие элементы *5* получают импульс силы от шаров-ударников *6* и отскакивают от них в сторону обрабатываемой поверхности. При взаимодействии деформирующих элементов *5* с деталью происходит упругопластическое деформирование поверхностного слоя.

Накопленный опыт в области проектирования инструментов для МДУ позволяет классифицировать существующие разновидности их конструкций по ряду признаков:

- **по виду упрочняемых поверхностей:** для отверстий, для наружных поверхностей вращения, для плоских поверхностей, для фасонных поверхностей;

- **по типу магнитной системы:** с постоянными магнитами (феррит бария, редкоземельные, металлокерамические), с электромагнитами, комбинированные;

- **по месту расположения магнитной системы:** в зоне кольцевой камеры, за пределами кольцевой камеры, за пределами инструмента;
- **по принципу создания крутящего момента для разгона деформирующих элементов:** гистерезисные, реактивные, активные;
- **по типу регулирования магнитного поля:** бесступенчатое, ступенчатое, нерегулируемое;
- **по методу разгона деформирующих элементов:** вращением источника магнитного поля, вращением намагниченной детали, «бегущей волной» магнитного поля;
- **по принципу взаимодействия деформирующих элементов с деталью:** непрерывное (с изменением исходного размера, без изменения исходного размера), периодическое (низкочастотное, высокочастотное);
- **по месту приложения магнитного поля:** на деформирующие элементы, на деталь, совмещенное воздействие на деталь и деформирующие элементы;
- **по виду магнитного поля:** непрерывное, дискретное;
- **по методу управления:** без управления, с адаптивным управлением;
- **по форме источников магнитного поля:** в виде «звездочки», кольцевые, цилиндрические, пластинчатые;
- **по числу и расположению кольцевых камер:** однорядные, многорядные;
- **по технологическому назначению:** для упрочняющей обработки, для размерно-упрочняющей обработки, для формирования регулярного рельефа, для получения триботехнических покрытий;
- **по виду достигаемого упрочняющего эффекта:** за счет поверхностного пластического деформирования, за счет перемагничивания поверхностного слоя детали, за счет комбинированного упрочнения ППД в магнитном поле и перемагничивания поверхностного слоя детали.

3.2 Порядок выполнения работы

По заданию преподавателя подобрать магнитно-динамические или магнитно-центробежные раскатники и режимы упрочнения деталей с целью получения заданных характеристик: глубина упрочнения, результирующая шероховатость, наличие-отсутствие результирующего макрорельефа: предложить тип применяемого оборудования и оснастки; рассчитать режимы упрочнения и время обработки (аналогично расчёту, приведенному в подразделе 1.1).

Исходные данные: материал детали, твердость, эскиз детали, исходная шероховатость.

3.3 Содержание отчета

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

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цель работы;

- 3) описание конструкции и принципа действия магнитно-динамических и магнитно-центробежных раскатников;
- 4) результаты измерений и расчета;
- 5) выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные методы ППД.
- 2 Преимущества метода магнитно-динамического упрочнения.
- 3 Устройство магнитно-центробежного раскатника.
- 4 Устройство магнитно-динамического раскатника.
- 5 Классификация инструментов для МДУ, существующие разновидности их конструкций.

4 Лабораторная работа № 4. Изучение влияния ионноплазменной обработки на эксплуатационные характеристики деталей машин

Цель работы: ознакомление с устройством и конструкцией вакуумной установки; освоение методики исследования твердости и износостойкости образцов.

4.1 Теоретические сведения

Механизмы, приводящие к модифицирующей обработке материалов в тлеющем разряде, сходны с процессами, протекающими при низкотемпературной ионной имплантации, с той лишь разницей, что в качестве источника ионов используется среда остаточных атмосферных газов.

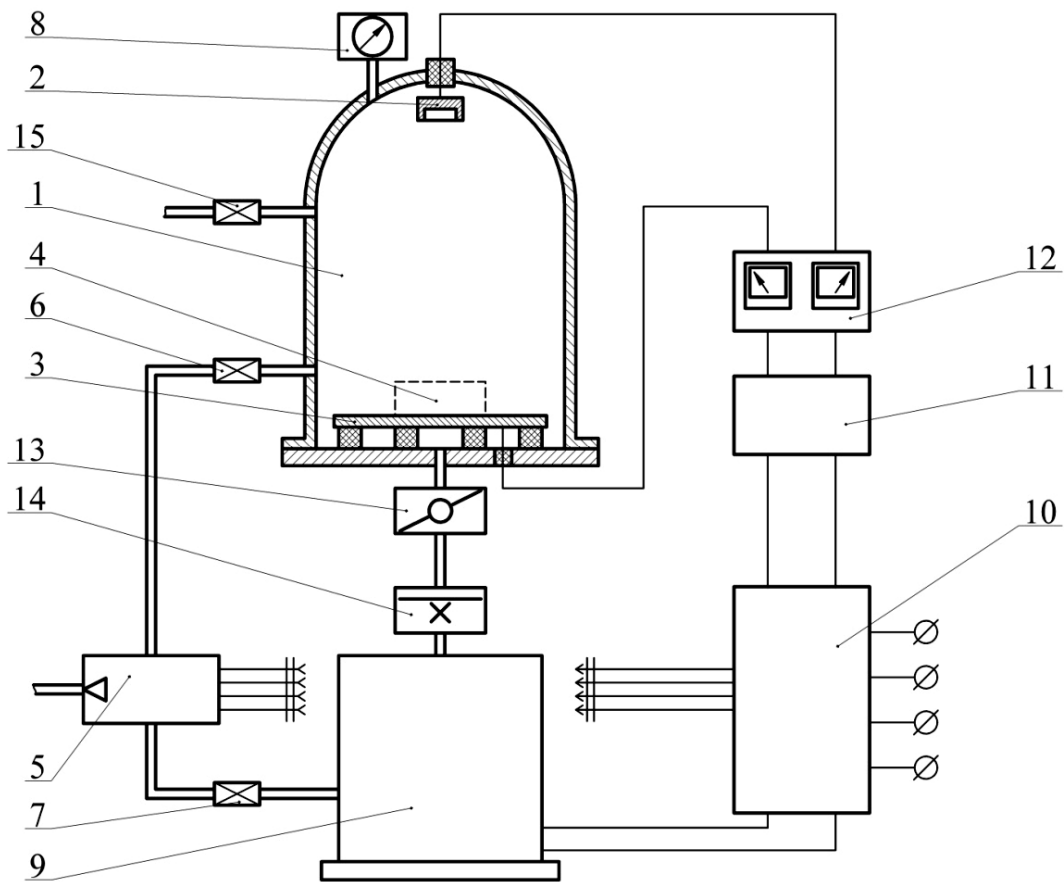
Исследования механизмов, протекающих при ионной имплантации, позволили выявить ряд характерных особенностей [4, 6]. Во-первых, имплантационная обработка приводит к образованию в приповерхностной области материала атомных смесей, состав которых не лимитируется принципами равновесной термодинамики. Во-вторых, одновременно с ионным легированием генерируется большое количество смещенных атомов формирующих дефекты структуры, которые сильно влияют на расположение вводимых атомов в решетку кристалла и могут вызывать перемещения атомов как на малые, так и на большие расстояния. В-третьих, поскольку ионная имплантация является атермическим процессом, сопутствующие термоактивируемые процессы могут регулироваться температурой мишени независимо. Это позволяет с высокой степенью контролируемости и воспроизводимости создавать в поверхностной области имплантируемого материала слои с различными свойствами.

Также было отмечено, что если обработку проводить при температуре, когда междоузельные атомы и вакансии мишени подвижны, то система стремится к термодинамическому равновесию. В этом случае выделение фаз

происходит в соответствии с диаграммами состояний, а дефекты структуры отжигаются.

Следует отметить, что при реализации метода в режиме низких температур существенным фактором фазообразования при ионной имплантации является сходство исходной и образующейся кристаллических решеток. Низкотемпературная ионная имплантация благоприятствует фазовым переходам, но сохраняются жесткие кинетические ограничения.

Для осуществления процесса модификации (рисунок 4.1) на стол 3, который является катодом, помещают изделие 4. Из камеры откачивают воздух до давления 1,3 Па при помощи форвакуумного насоса 5 при открытых клапанах 6 и 7, контролируя величину разряжения вакуумметром 8.



1 – камера; 2 – анод; 3 – стол (катод); 4 – изделие; 5 – форвакуумный насос; 6, 7, 15 – клапан; 8 – система измерения давления; 9 – диффузионный насос; 10 – блок питания; 11 – преобразователь высокого напряжения; 12 – блок измерения электрических параметров разряда; 13 – заслонка; 14 – азотная ловушка

Рисунок 4.1 – Схема установки для осуществления модифицирующей обработки

Заслонку 13 паромасляного диффузионного насоса 9 закрывают и включают цепь питания преобразователя высокого напряжения 11, благодаря чему между анодом 2 и катодом 3 создается разность потенциалов, величину которой устанавливают в пределах 1...5 кВ при помощи специального блока измерения 12 и блока питания 10. В результате этого возникает пробой разрядного

промежутка с возникновением высоковольтного тлеющего разряда. Далее устанавливают величины давления остаточных газов, напряжения горения разряда и плотности тока. Ловушка 14 препятствует проникновению в рабочую область камеры паров масла из нагреваемого паромасляного диффузионного насоса. После окончания обработки в камеру 1 напускают воздух путем открытия клапана 15.

В процессе модификации регулирование рабочего давления в установленных пределах осуществляется при помощи заслонки 13 диффузионного насоса.

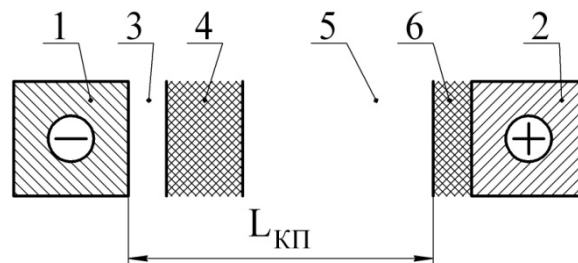
Система измерения остаточного давления 8 включает термопарный преобразователь давления и ионизационный вакуумметр.

Блок измерения электрических параметров разряда 12 состоит из киловольтметра и миллиамперметра, посредством которых измеряются напряжение горения и сила тока тлеющего разряда.

Блок измерения электрических параметров может использоваться в качестве модуля автоматического управления процессом модифицирования.

Явления, протекающие в межэлектродном пространстве в процессе обработки

При создании разности потенциалов в межэлектродном газовом промежутке возникает высоковольтный аномальный тлеющий разряд, имеющий структуру, показанную на рисунке 4.2.



1 – катод; 2 – анод; 3 – Катодное темное пространство; 4 – катодное свечение; 5 – катодное темное пространство; 6 – анодное свечение

Рисунок 4.2 – Структура тлеющего разряда

Наиболее важными для существования тлеющего разряда являются процессы, происходящие в катодных частях и непосредственно на самом катоде. Кроме этого, очевидно, что характер воздействия тлеющего разряда на изделия, установленные на рабочий стол – катод, главным образом определяется этими процессами. Поэтому рассмотрим их более подробно.

С одной стороны, в результате бомбардировки катода положительными ионами, быстрыми нейтральными атомами и квантами света катод эмитирует электроны. Положительные ионы, большей частью, возникают в результате ионизации газа электронным ударом в области катодного темного пространства и отрицательного тлеющего свечения. Кроме этого, при значительных

значениях катодного падения потенциала и низких давлениях имеет место ионизация газа положительными ионами и быстрыми нейтральными атомами.

Быстрые атомы, бомбардирующие катод, образуются в результате перезарядки, которая заключается в следующем. Ускоренный в электрическом поле положительный ион движется к катоду. Столкнувшись с атомом, он обменивается с ним зарядом, при этом передавая лишь незначительную часть от своей энергии. Далее ион, превратившись в нейтральный атом, продолжает свое движение к катоду по инерции. В результате перезарядки имеет место определенное распределение частиц, бомбардирующих катод, по энергиям. По данным работ, в зависимости от режима разряда энергетический спектр частиц, бомбардирующих поверхность катода, определяется частицами четырех типов. К первому типу частиц относят положительные ионы, которые пролетают всю область катодного падения потенциала без столкновений с атомами газа. При этом ионы ускоряются до максимально возможной энергии. Ко второму типу частиц относят быстрые нейтральные атомы, образовавшиеся в результате перезарядки. Их энергия определяется «ускоряющим» расстоянием до перезарядки за вычетом энергии, передающей быстрым атомам в результате столкновений с другими атомами на пути к катоду. Третий тип частиц – положительные ионы, претерпевающие на пути к катоду ряд упругих столкновений с атомами газа, не теряя при этом своего заряда. И, наконец, четвертый тип частиц – это ионы или атомы перезарядки, сталкивающиеся у поверхности катода и практически не ускоряющиеся, находящиеся непосредственно в электрическом поле катодного потенциала. Такие частицы имеют энергию, не превышающую тепловую энергию их хаотического движения, составляющую десятые доли электрон-вольта.

Фотоэмиссия электронов с катода, главным образом, происходит под действием квантов излучения из светящихся частей разрядного промежутка.

С другой стороны, эмитируемые катодом электроны вызывают возбуждение и ионизацию атомов газа в соответствующих частях разряда, благодаря чему происходит, соответственно, излучение квантов света и возникновение положительных ионов, вызывающих эмиссию электронов.

В состав ионов, бомбардирующих поверхность катода, входят как однозарядные, так и многозарядные ионы. Учитывая то, что доля многозарядных ионов мала по сравнению с общим числом ионов, можно сделать допущение, что бомбардировка осуществляется в основном однозарядными ионами.

Таким образом, поверхность металлических частей рабочего стола – катода и изделий подвергается воздействию потока частиц, энергия каждой из которых в этом потоке может принимать значение от нуля до энергии в несколько килоэлектрон-вольт.

Наличие объемного заряда вокруг изделий, установленных на рабочий стол – катод, обеспечивает постоянство катодного падения потенциала и ширины его области. Благодаря этому лежащие между поверхностью изделия и темным катодным пространством вектора напряженности электрического поля имеют направления, почти перпендикулярные поверхности изделия во всех точках, и абсолютные значения этих векторов практически одинаковые.

Все вышеперечисленное обеспечивает постоянство по всей поверхности изделий средней энергии частиц, бомбардирующих эту поверхность, и плотность потока этих частиц.

Исходя из этого, можно сделать обоснованный вывод, что в результате обработки в реализуемом нами тлеющем разряде изделия практически независимо от их формы подвергаются воздействию потока частиц равномерной плотности по всем поверхностям.

Методика исследования поверхностной микротвердости

Измерение твердости рабочей поверхности образцов из штамповых сталей осуществлялось по методу Виккерса. Измерение осуществлялось в соответствии с требованиями методики, путем вдавливания алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями 136° в образец под действием нагрузки, приложенной в течение 10 с, и измерения диагоналей отпечатка, оставшегося на поверхности после снятия нагрузки. В результате проведенных испытаний была выбрана нагрузка вдавливания алмазного наконечника в пределах 0,98 Н.

Измерение микротвердости рабочей поверхности образцов проводилось на микротвердомере Zwick Roell ZHV 1M, инв. № 01333253 (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Твердомер Zwick Roell ZHV 1M

Для получения наиболее достоверных результатов исследования изменения микротвердости ее определение проводили по результатам измерения 10 отпечатков до обработки и 10 отпечатков после.

Микротвердость рабочей поверхности образцов HV определялась из выражения

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d_{CP}^2}, \quad (4.1)$$

где F – нагрузка на индентор, Н;

d_{CP} – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Методика исследования поверхностной износостойкости

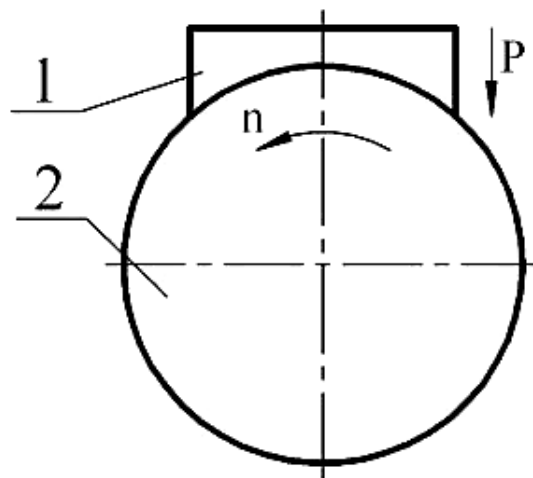
В качестве исследуемого параметра при проведении испытаний на износостойкость был принят коэффициент износостойкости k_L , который показывает, во сколько раз происходит повышение ($k_L > 1$) или понижение ($k_L < 1$) износостойкости образца после обработки в тлеющем разряде по отношению к необработанному.

В качестве основных факторов, влияющих на приращение коэффициента износостойкости так же, как и при определении зависимости приращения поверхностной твердости, выбраны такие составляющие процесса модифицирования, как напряжение тлеющего разряда U , кВ, плотность тока тлеющего разряда J , А/м², и время, затраченное на обработку, T , мин.

Для установления зависимости приращения коэффициента износостойкости от основных факторов процесса модифицирующей обработки в тлеющем разряде зависимость $k_L = f(U, J, T)$ также аппроксимировали полиномом второй степени. Эксперимент проведен по программе центрального композиционного ротатбельного планирования второго порядка.

Исследование влияния обработки в тлеющем разряде на износостойкость производилось на модернизированной установке на базе серийной машины для испытания материалов на трение и износ СМТ-1.

Испытания образцов из различных материалов на износостойкость осуществлялись в режиме сухого трения в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.4. Образцы 1 испытывались в паре с круглым контртелом 2. Сверху на образец прикладывали нагрузку. Такая схема испытаний позволила имитировать пары трения, подобные реальным.



1 – образец; 2 – контртело

Рисунок 4.4 – Принципиальная схема испытаний

В процессе испытаний фиксировалась скорость вращения вала с контртелом, число оборотов контртела и момент трения.

Контртело изготовлено из алмазного шлифовального круга 2720-0037 ГОСТ 16167–90 с относительной концентрацией алмазов 150 и соответствует размерам, указанным на рисунке 4.5, а. Образцы для испытаний по форме и размерам соответствовали размерам и форме, указанным на рисунке 4.5, б.

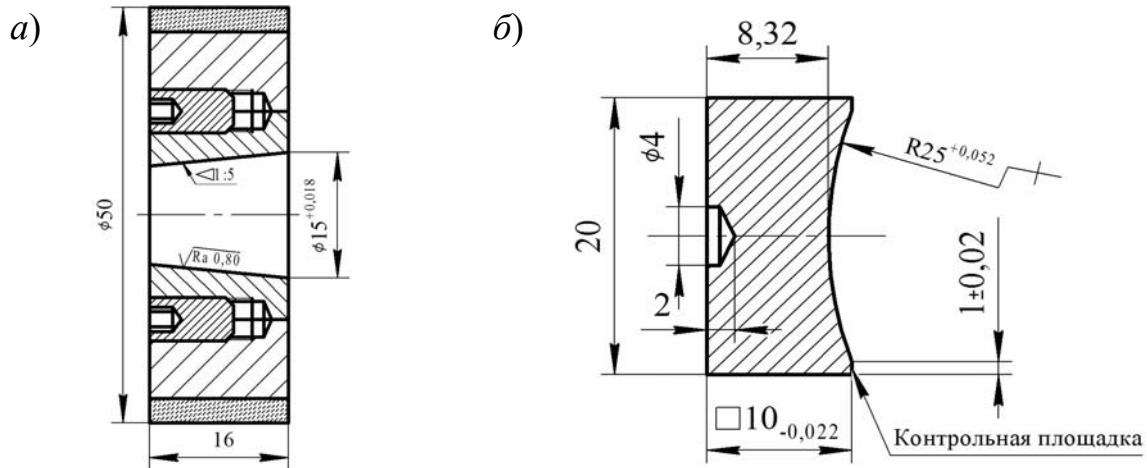


Рисунок 4.5 – Образец (а) и контртело (б) для испытаний на износостойкость

Перед испытаниями проводится приработка поверхностей трения образцов, которая заканчивается по достижении постоянства момента трения и при образовании следов приработки на площади, равной 80%...85% номинальной поверхности трения измерительной площадки ($1 \pm 0,02$) мм (см. рисунок 4.5, б), алмазным кругом при частоте вращения 8 с^{-1} и силе прижатия образца 200 Н.

Испытания на износостойкость проводились при частоте вращения контртела 8 с^{-1} и силе прижатия образца 100 Н (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Модернизированная установка для испытаний на износ

В качестве предельного износа принималось уменьшение длины контрольной площадки на 40 %.

Контрольно-измерительное оборудование машины трения – это современные измерители-регуляторы ОБЕН TPM-1 и SCADA-системы OWENPROCESSMANAGER, производимые ПО «ОБЕН» (Россия), позволяющие не только более точно оценивать поступающие данные, но и производить их архивирование и обработку на ПЭВМ.

На основании статистической обработки экспериментальных данных получена зависимость приращения коэффициента износостойкости k_L образцов в натуральном выражении, адекватно представляющая эксперимент:

$$\begin{aligned}
 k_L = & b_0 + b_1 \left(\frac{U - 2,0}{0,7} \right) + b_2 \left(\frac{J - 0,25}{0,075} \right) + b_3 \left(\frac{T - 30}{10} \right) + \\
 & + b_{12} \left(\frac{U - 2,0}{0,7} \right) \left(\frac{J - 0,25}{0,075} \right) + b_{13} \left(\frac{U - 2,0}{0,7} \right) \left(\frac{T - 30}{10} \right) + \\
 & + b_{23} \left(\frac{J - 0,25}{0,075} \right) \left(\frac{T - 30}{10} \right) + b_{11} \left(\frac{U - 2,0}{0,7} \right)^2 + b_{22} \left(\frac{J - 0,25}{0,075} \right)^2 + b_{33} \left(\frac{T - 30}{10} \right)^2. \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

4.2 Порядок выполнения работы

1 Измерить твердость образцов до модифицирования.

2 Провести модифицирование образцов в соответствии с данными, полученными у преподавателя.

3 Измерить твердость образцов после модифицирования. Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

Номер образца	Первый эксперимент	...	i -й эксперимент	Твердость до модифицирования	Твердость после модифицирования	Приращение твердости

4 Измерить износостойкость образцов до модифицирования.

5 Провести модифицирование образцов в соответствии с данными, полученными у преподавателя.

6 Измерить износостойкость образцов после модифицирования. Данные занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений

Номер образца	Первый эксперимент	...	<i>i</i> -й эксперимент	Износостойкость до модифицирования	Износостойкость после модифицирования	Приращение износостойкости

4.3 Содержание отчета

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

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цель работы;
- 3) описание конструкции и принципа действия вакуумной установки;
- 4) результаты измерений и расчета;
- 5) выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Понятие вакуума, его свойства.
- 2 Металлы, резина, стекло, полимерные материалы, их свойства при работе в вакууме.
- 3 Чем обусловлен спад тока насыщения при высоком напряжении?
- 4 Что называется эмиссией электронов?

5 Лабораторная работа № 5. Изучение процесса наплавки при восстановлении деталей машин

Цель работы: ознакомление с технологическими особенностями многослойной наплавки ручной дуговой сваркой.

5.1 Оборудование и инструменты

- 1 Инверторный сварочный аппарат.
- 2 Сварочные электроды.
- 3 Молоток.
- 4 Щетка металлическая.

5.2 Общие сведения

Физическая сущность дуги. Сварочная дуга представляет собой мощный электрический разряд в газах, сопровождаемый выделением значительного количества тепла и света. С физической точки зрения это сложный ионный и электронный процесс переноса электрических зарядов через ионизированный

воздушный промежуток. Ионизация газового промежутка при дуговой сварке в основном обусловлена электронной эмиссией с горячего катода. Для разогрева катода между ним и анодом, подключенными к источнику сварочного тока, производят кратковременное короткое замыкание. После отрыва электрода от изделия с разогретого катода, каким при сварке постоянным током может быть и электрод, и изделие (при переменном токе полярность постоянно изменяется), под воздействием электрического поля начинается электронная эмиссия. Электроны, вылетевшие с поверхности катода, направляются к аноду и, сталкиваясь на своем пути с молекулами и атомами воздуха, ионизируют их. Образованные в воздушном промежутке отрицательные ионы и электроны перемещаются к аноду, а положительные ионы – к катоду. На поверхности катода осуществляется нейтрализация заряженных частиц с преобразованием электрической энергии в тепловую.

Сущность способа. Ручную дуговую сварку выполняют штучными электродами, которые сварщик подает к свариваемому изделию и перемещает в нужном направлении. Для сварки по методу Славянова используют металлические электроды, имеющие диаметр 1,6...12 мм и длину 150...450 мм. Для защиты расплавленного металла от взаимодействия с воздухом на электродные стержни наносят толстые, или качественные, покрытия (рисунок 5.1).

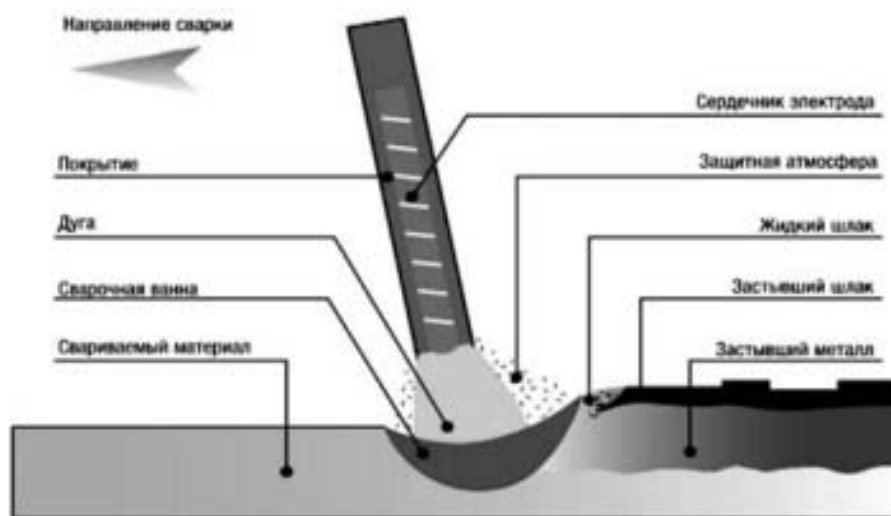


Рисунок 5.1 – Схема ручной дуговой сварки

Их составляющими, кроме стабилизирующих и клеящих (жидкое стекло), являются шлако- и газообразующие вещества и раскислители. Для получения наплавленного металла специального состава и свойств в них вводят также различные легирующие элементы.

Техника выполнения швов ручной дуговой сваркой

Зажигание дуги. Существует два способа зажигания дуги покрытыми электродами – прямым отрывом и отрывом по кривой. Первый способ

называют зажиганием впритык. Второй напоминает движение при зажигании спички, и поэтому его называют чирканьем. Первый используется чаще, второй, как правило, применяют не опытные сварщики, т. к. в этом случае меньше вероятность приваривания электрода к изделию.

Длина дуги. Длина дуги должна быть постоянной. Увеличение длины дуги снижает устойчивое ее горение, глубину проплавления основного металла, повышает потери на угар и разбрызгивание электрода, вызывает образование шва с неровной поверхностью и усиливает вредное воздействие окружающей атмосферы на расплавленный металл. Нормальной считают длину дуги, равную $0,5 \dots 1,1$ диаметра стержня электрода (в зависимости от типа и марки электрода и положения сварки в пространстве).

Положение электрода. Наклон электрода при сварке зависит от положения сварки в пространстве, толщины и состава свариваемого металла, диаметра электрода, вида и толщины покрытия.

Независимо от направления сварки положение электрода должно быть определенным: он должен быть наклонен к оси шва так, чтобы металл свариваемого изделия проплавлялся на наибольшую глубину. Для получения плотного и ровного шва при сварке в нижнем положении на горизонтальной плоскости угол наклона электрода должен быть 15° от вертикали в сторону ведения шва (рисунок 5.2).

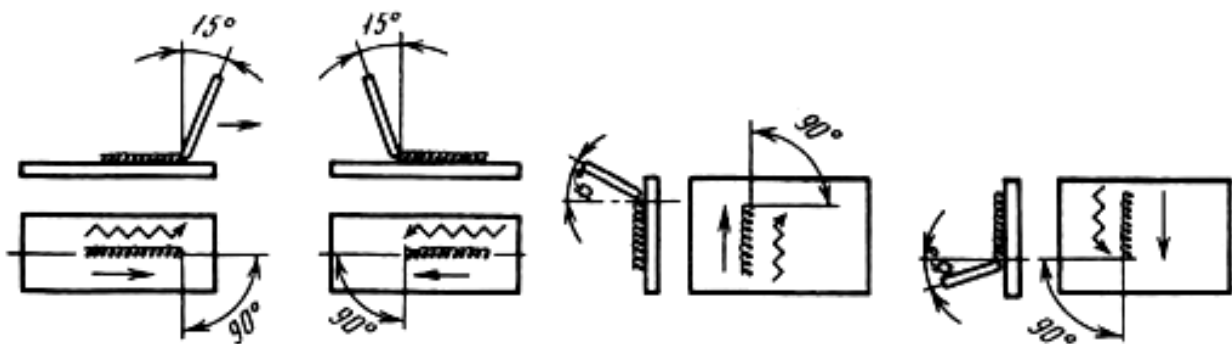
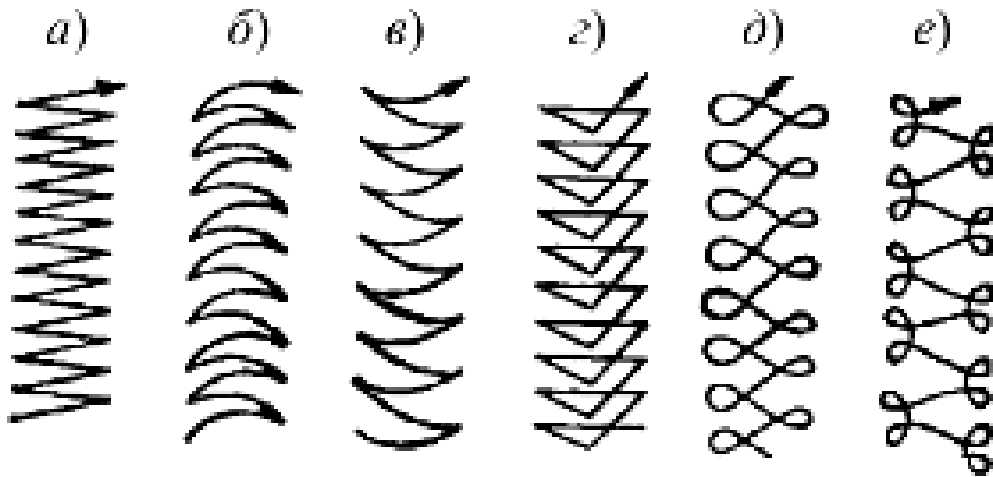


Рисунок 5.2 – Наклон электрода при ручной дуговой сварке

Колебательные движения электрода. Для получения валика нужной ширины производят поперечные колебательные движения электрода. Если перемещать электрод только вдоль оси шва без поперечных колебательных движений, то ширина валика определяется лишь силой сварочного тока и скоростью сварки и составляет от $0,8$ до $1,5$ диаметра электрода. Чаще всего применяют швы шириной от $1,5$ до 4 диаметров электрода, получаемые с помощью поперечных колебательных движений электрода.

Наиболее распространенные виды поперечных колебательных движений электрода при ручной сварке (рисунок 5.3).



a–г – при обычных швах; *д, е* – при швах с усиленным прогревом кромок

Рисунок 5.3 – Основные виды поперечных движений конца электрода

Способы заполнения шва по длине и сечению

Швы по длине выполняют напроход и обратно-ступенчатым способом. Сущность способа сварки напроход заключается в том, что шов выполняется от начала до конца в одном направлении.

Обратноступенчатый способ состоит в том, что длинный шов делят на сравнительно короткие участки.

По способу заполнения швов по сечению различают однослойные швы (рисунок 5.4, *a*), многопроходные многослойные (рисунок 5.4, *б*) и многослойные (рисунок 5.4, *в*).



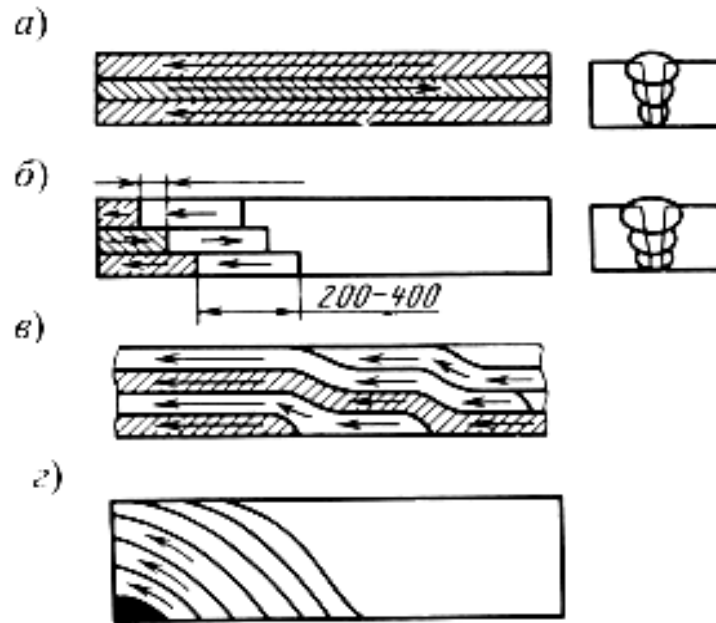
a – однослойный и проходной; *б* – многослойный и многопроходной; *в* – многослойный

Рисунок 5.4 – Сварные швы

Если число слоев равно числу проходов, то такой шов называют многослойным. Если некоторые из слоев выполняются за несколько проходов, то такой шов называют многопроходным.

Многослойные швы чаще применяют в стыковых соединениях, многопроходные – в угловых и тавровых.

Для более равномерного нагрева металла шва по всей его длине швы выполняются способами двойного слоя, секциями, каскадом и горкой, причем в основу всех этих способов положен принцип обратноступенчатой сварки (рисунок 5.5).



a – секция; *б* – каскадом; *в, г* – горкой

Рисунок 5.5 – Схемы заполнения многослойного шва с малым интервалом времени

Сущность способа двойного слоя заключается в том, что наложение второго слоя производится по неостывшему первому после удаления сварочного шлака. Сварка на длине 200...400 мм ведется в противоположных направлениях. Этим предотвращается появление горячих трещин в шве при сварке металла толщиной 15...20 мм, обладающего значительной жесткостью.

При толщине стальных листов 20...25 мм и более для предотвращения трещины применяют сварку каскадом или горкой. Заполнение многослойного шва для сварки секциями и каскадом производится, как видно из рисунка 5.5, по всей свариваемой толщине на определенной длине ступени. Длина ступени подбирается такой, чтобы металл в корне шва имел температуру не менее 200 °С в процессе выполнения шва по всей толщине. В этом случае металл обладает высокой пластичностью, и трещин не образуется. Длина ступени при каскадной сварке равна 200...400 мм, а при сварке секциями – больше. Сварка горкой производится проходами по всей толщине металла. Способ сварки выбирается в зависимости от химического состава и толщины металла, числа слоев и жесткости свариваемого изделия.

Многослойная сварка имеет перед однослойной следующие преимущества.

1 Уменьшается объем сварочной ванны, в результате чего скорость остывания металла возрастает и размер зерен уменьшается.

2 Химический состав металла шва близок к химическому составу наплавленного металла, т. к. малая сила сварочного тока при многослойной сварке способствует расплавлению незначительного количества основного металла.

3 Каждый последующий слой шва термически обрабатывает металл предыдущего слоя, и околошовный металл имеет мелкозернистую структуру с повышенной пластичностью и вязкостью.

Каждый слой шва должен иметь толщину 3...5 мм (при сварке низкоуглеродистой стали) в зависимости от силы сварочного тока.

При сварочном токе 100 А дуга расплавляет металл верхнего слоя на глубину около 1,5 мм, а металл нижнего слоя (глубина – более 1,5 мм) нагревается от 1500 °С до 1100 °С и при быстром охлаждении образует мелкозернистую литую структуру.

При сварочном токе 200 А толщина слоя может быть увеличена до 5 мм, а термическая обработка нижнего слоя произойдет на глубине около 2,5 мм.

Термическая обработка металла корневого шва с получением мелкозернистой структуры осуществляется нанесением подварочного валика, который выполняется электродом диаметром 3 мм при сварочном токе 100 А.

Термическая обработка металла верхнего слоя выполняется нанесением отжигающего (декоративного) слоя. Толщина отжигающего слоя должна быть минимальной (1...2 мм), обеспечивающей высокую скорость остывания и мелкозернистую структуру верхнего слоя.

Окончание шва. В конце шва нельзя сразу обрывать дугу и оставлять на поверхности металла кратер. Кратер может вызвать появление трещины в шве вследствие содержания в нем примесей, прежде всего серы и фосфора. Лучшим способом окончания шва будет заполнение кратера металлом за счет прекращения поступательного движения электрода вниз и медленного удлинения дуги до ее обрыва.

5.3 Порядок выполнения работы

1 Включить сварочный инвертор.

2 В зависимости от диаметра электрода выставить необходимую силу тока. Зажечь сварочную дугу.

3 Параллельно на минимальном расстоянии друг от друга наплавить три валика длиной 50...70 мм.

4 Зачистить наплавленные валики.

5 На полученные валики сверху наплавить валики между первым и вторым (четвертый валик) и между вторым и третьим (пятый валик).

6 Зачистить наплавленные валики.

7 Между четвертым и пятым наплавить шестой валик.

8 Зачистить наплавленный металл от шлака и брызг и оценить качество наплавленного материала в целом.

9 На образцах изучить структуру многослойных швов, полученных ручной дуговой сваркой.

5.4 Содержание отчета

1 Титульный лист.

2 Цель работы.

3 Описание выполнения технологии многослойных швов.

4 Вывод о качестве многослойной наплавки ручной дуговой сваркой.

Контрольные вопросы

- 1 Как влияет длина дуги на стабильность процесса сварки?
- 2 В чем заключается сварка каскадом?
- 3 Для чего выполняют колебательные движения электродом?
- 4 Какие способы зажигания дуги Вы знаете?
- 5 Перечислите преимущества многослойной сварки.

Список литературы

- 1 Качество машин: справочник: в 2 т. / А. Г. Суслов [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 430 с.
- 2 **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 328 с.: ил.
- 3 **Жолобов, А. А.** Технология машиностроения : учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1: Формообразование деталей и сборка узлов машин / А. А. Жолобов, А. М. Федоренко. – Минск : РИВШ, 2020. – 518 с.: ил.
- 4 **Елагина, О. Ю.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие / О. Ю. Елагина. – Москва : Университетская книга ; Логос, 2020. – 488 с.
- 5 Технология, оснащение и организация ремонтно-восстановительного производства : учебник / В. А. Горохов [и др.] ; под ред. В. П. Иванова. – Старый Оскол : ТНТ, 2015. – 552 с.