

Л. Б. Леонтьев

**Методы повышения
износостойкости
и восстановления деталей
узлов трения**

Лабораторный практикум по дисциплине



Дальневосточный федеральный университет
Политехнический институт

Л. Б. Леонтьев

**МЕТОДЫ
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
УЗЛОВ ТРЕНИЯ**
(лабораторный практикум по дисциплине)

Учебное пособие



Владивосток
Издательство Дальневосточного федерального университета
2021

УДК 621.891
ББК 34.41я73

Рецензенты: *И.Б. Друзь*, д.т.н., профессор, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского;
В.Е. Лелюхин, к.т.н., доцент Департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Политехнического института
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Л47 Леонтьев Л.Б. Методы повышения износостойкости и восстановления деталей узлов трения (лабораторный практикум по дисциплине): учебное пособие / Политехнический институт ДВФУ. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. – ISBN 978-5-7444-4954-4 . – 108 с.

Приведены указания по выполнению практических работ, включающие основные положения теории, а также определения, технические характеристики применяемого оборудования, порядок выполнения и контрольные вопросы по теме. Пособие составлено в соответствии с учебным планом для направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение», магистерская программа «Оборудование и технология сварочного производства». Работа также имеет теоретическую и практическую значимость для обучения студентов по магистерским программам «Цифровые технологии машиностроения» и для подготовки бакалавров по профилю «Цифровые технологии машиностроения».
Ключевые слова: ультразвуковая обработка, пластическое деформирование, наплавка, плазменное напыление, ионно-плазменное напыление, нитрид титана, износостойкость, антифрикционные материалы.

УДК 621.891
ББК 34.41я73

ISBN 978-5-7444-4954-4

© ФГАОУ ВО «ДВФУ», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Работа № 1. Ультразвуковая обработка деталей	6
Работа № 2. Определение технологических параметров упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием методом чеканки.....	18
Работа № 3. Определение технологических параметров автоматической дуговой сварки и наплавки в углекислом газе.....	29
Работа № 4. Определение технологических параметров плазменной наплавки чугуна.....	36
Работа № 5. Определение коэффициентов расплавления, наплавки, потерь на угар и разбрызгивание при ручной и автоматической дуговой сварке	50
Работа № 6. Технологический процесс нанесения износостойких покрытий методом КИБ.....	58
Работа № 7. Определение технологических параметров плазменного напыления.....	70
Работа № 8. Оценка эффективности мероприятий по снижению расхода электродов и электроэнергии при ручной дуговой сварке	90
Приложение 1. Результаты наплавки электродом УОНИ-13/45 и проволокой Св-08Г2С в углекислом газе на стальную пластину	99
Приложение 2. Структура поверхности и физико- механические свойства деталей: исходной и с покрытием нитридом титана	100

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современному машиностроению требуются детали, имеющие низкую металлоемкость и высокую долговечность. Долговечность машин и механизмов определяется в основном износостойкостью их трибосопряжений: известно, что около 80–90% всех отказов машин и механизмов обусловлено низкой износостойкостью этих узлов. В процессе эксплуатации машины и механизмы приходится ремонтировать. При этом отдельные детали или узлы машин приходится заменять новыми или восстанавливать. Иногда из-за небольшого узла останавливаются громадные машины и механизмы.

В последние годы повышение надежности трибосопряжений в машинах, механизмах и оборудовании, определяющих ресурс и безопасность работы, представляет актуальную проблему ввиду больших затрат на их восстановление и ремонт. Проблема обеспечения заданной надежности трибосопряжений является комплексной и предполагает применение современных методов проектирования, технологического обеспечения, экономического и организационного управления, контроля, прогнозирования долговечности восстановленных и упрочненных деталей и т.п. Важнейшая часть этой проблемы – задача оптимального формирования поверхностного слоя деталей.

Поверхностный слой детали в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, коррозионному и другим воздействиям. Отказ детали и необходимость в ее замене возникает в большинстве случаев из-за разрушения ее поверхностного слоя вследствие абразивного, усталостного, гидроэрозионного, коррозионного и других видов изнашивания. Поэтому обеспечение заданной надежности детали в основном сводится к нахождению диапазона оптимальных свойств поверхностного слоя.

Не меньшее влияние на долговечность машин и механизмов оказывают потери на трение в подвижных сопряжениях. Снижение этих потерь увеличивает коэффициент полезного действия машин и повышает их износостойкость. По данным английского исследователя Д. Мура, около 1/3 всех энергоза-

трат в мире приходится на преодоление трения и работы, связанные с ремонтом машин.

Для успешного решения задачи увеличения износостойкости трибосопряжений машин и механизмов и снижения в них потерь на трение необходимо углубленное изучение методов упрочнения поверхностных слоев металла и формирования антифрикционных и износостойких покрытий. Как показывает опыт, на долговечность узлов трения существенное влияние оказывают геометрические, структурные, физико-химические и механические свойства поверхностных слоев деталей.

Работа № 1

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ

Цель работы – ознакомление с физическими свойствами ультразвуковых колебаний, принципом действия оборудования и технологическим процессом ультразвуковой упрочняющей обработки деталей.

1. Общие положения

Проектирование современных машин, механизмов и оборудования, узлы трения которых работают в условиях больших скоростей и со значительными нагрузками, требует от конструкторов и технологов решения проблемы повышения срока их службы и, соответственно, срока службы отдельных деталей, входящих в состав трибоузлов машин, механизмов и оборудования.

Качество поверхностного слоя является одним из главнейших факторов, определяющих долговечность деталей машин и механизмов. Поверхности сопрягаемых деталей, обработанные общепризнанными способами, являются носителями остаточных макро- и микронапряжений растяжения, усталостных макро- и микротрещин, шаржированных зерен абразива и прочих дефектов. Для повышения прочности и износостойкости деталей необходимо применять методы обработки, улучшающие физико-механические свойства, структуру и микрогеометрию поверхности.

Известны следующие классические способы повышения качества поверхности, получившие широкое распространение:

- *дробеструйная обработка*: микротвердость поверхности увеличивается незначительно, параметры шероховатости поверхности не уменьшаются, величина усталостной прочности возрастает в 1,5 раза и более;

- *обкатывание шаром или роликом*: микротвердость поверхности увеличивается на 40–60%, параметры шероховатости снижаются с 5 до 10 класса (ориентировочно), обычно требуется несколько проходов инструмента по обрабатываемой детали, обрабатывается наклеп значительной толщины;

- *дорнование*: микротвердость поверхности увеличивается на 25–35%, параметры шероховатости снижаются примерно с 5 до 9–11 класса, незначительный наклеп (толщина до 1 мм);

▪ *чеканка*: микротвердость поверхности увеличивается на 20–70%, толщина упрочненного слоя может достигать 20–25 мм и более, величина усталостной прочности увеличивается на 50–100%, срок службы деталей увеличивается в 2 и более раза.

Ультразвуковая обработка (УЗО) – это прогрессивный процесс обработки и упрочнения материала поверхностного слоя деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Впервые метод ППД с использованием ультразвукового инструмента был предложен в 1964 году И.И. Мухановым. В настоящее время в России оборудование для данного метода обработки производят несколько организаций. Значительных достижений в данном направлении добился Северо-Западный центр ультразвуковых технологий под руководством д.т.н., проф. Ю.В. Холопова. Другое название этого способа металлообработки – безабразивная ультразвуковая финишная обработка – БУФО.

2. Физические свойства и особенности распространения ультразвука

Ультразвуковыми называются упругие колебания материальной среды с частотой, превышающий предел слышимости (15–20 кГц). Ультразвуковые колебания могут распространяться в любых упругих средах: жидких, твёрдых, газообразных. Различают три вида ультразвуковых волн: продольные, поперечные и поверхностные. В твёрдых телах могут распространяться волны всех трёх видов, в жидких и газообразных – только продольные волны разрежения–сжатия.

Важная особенность ультразвуковых волн – возможность концентрации энергии при сравнительно небольших амплитудах колебаний, так как плотность потока энергии пропорциональна квадрату частоты. Ультразвуковые волны большой интенсивности сопровождаются рядом эффектов. Так, распространению ультразвуковых волн в газах и жидкостях сопутствует движение среды, которое называется акустическим течением.

Физическая сущность всех разновидностей УЗО основана на применении ультразвуковых колебаний (УЗК), представляющих собой упругие волны, распространяющиеся в газах, жидкостях и твердых телах. Основными параметрами ультразвуковых

колебаний являются: длина волны λ – расстояние между двумя смежными точками, находящимися в одной фазе; амплитуда колебаний A – наибольшее смещение колеблющейся точки от положения равновесия; частота колебаний f – количество колебаний в единицу времени; период колебаний T – время распространения волнового движения на расстояние, равное длине волны; средняя скорость колебательных движений V ; скорость распространения звуковых волн C .

3. Принцип действия ультразвуковой установки

Ультразвуковые установки, используемые для упрочнения и упрочняюще-чистовой обработки материалов (рис. 1.1), состоят из следующих узлов: преобразователя частоты электрического тока 1, блока управления 2, акустической системы 3 (механической колебательной системы) и излучателя. Преобразователь частоты мощностью 0,25–1,0 кВт преобразует электрический ток 50 Гц в 22 кГц. Важнейший узел, составляющий основу и специфику оборудования и технологии УЗО, – акустическая система служит для преобразования электрической энергии в механическую, передачи этой энергии в нагрузку. Акустическая система предназначена для согласования сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением системы и согласования геометрических размеров зоны ввода энергии с размерами излучателя и концентрирования энергии, а также для получения необходимой величины колебательной скорости излучателя. Система должна работать с максимальным КПД на резонансной частоте независимо от изменения сопротивления нагрузки.

Акустическая система состоит из преобразователей, магнитострикционного (МСП) или пьезоэлектрического (ПЭП), и волноводных звеньев, кратных распространяющимся полуволнам. МСП (или ПЭП) трансформируют электрические колебания в механические за счет магнитострикционных или пьезоэлектрических эффектов. Суть их в том, что некоторые материалы (например, никель, пермендюр, ферриты, пьезокерамика и т.п.) при воздействии электричества меняют свои размеры. Теория этих явлений сложна, разработана недостаточно, расчетные формулы для определения, например геометрических размеров МСП, по-

звонят получать приближенные значения. Тем не менее эффекты преобразования энергии используются с исключительно большой результативностью в различных отраслях науки и техники. Важным обстоятельством является то, что МСП имеют очень большую надежность в работе: практика показывает возможность их использования более 10 лет.

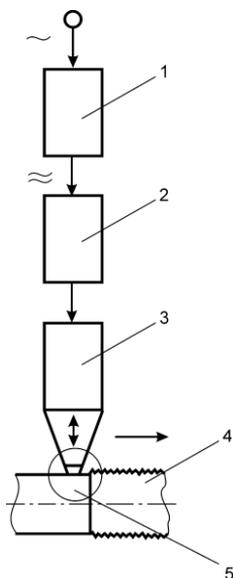


Рис. 1.1. Схема узлов установки для ультразвуковой обработки:
1 – преобразователь частоты электрического тока; 2 – блок управления; 3 – акустическая система с концентратором и рабочей частью инструмента; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – зона обработки поверхности металла

В настоящее время для изготовления МСП используются материалы, которые не содержат дефицитных, дорогостоящих металлов, доступны и обладают хорошими эксплуатационными и технологическими свойствами. Наиболее широкое применение находит пермендюр, реже – никель, который обладает сравнительно небольшой, но достаточно интенсивной магнитострикцией, хорошими антикоррозионными свойствами, пластичностью и прочностью.

Наиболее перспективный материал для изготовления преобразователя – пермендиор (К49Ф2) отличается сильно выраженным магнитострикционным эффектом, т.е. позволяет получать весьма значительные мощности при относительно небольших размерах вибратора. Однако по сравнению с никелем он обладает недостаточной механической прочностью и коррозионной стойкостью.

Волноводные звенья, являясь составной частью механической колебательной системы, позволяют согласовывать сопротивление системы с нагрузкой, менять исходную амплитуду колебаний, концентрировать энергию ультразвуковых волн в технологической зоне и т.п. Основным звеном является концентратор. Концентраторы – трансформаторы упругих колебаний, осуществляющие передачу ультразвуковых колебаний с увеличением значения амплитуды. Принцип их действия заключается в увеличении амплитуды смещения частиц стержня при уменьшении его поперечного сечения или плотности в соответствии с законом сохранения количества движения. Увеличение амплитуды смещения будет тем больше, чем больше разница площадей поперечного сечения или плотности противоположных концов стержня. Практическое применение нашли следующие типы концентраторов для передачи ультразвуковой энергии: ступенчатый, конический и экспоненциальный. Они разнородны по форме и трансформационным свойствам.

4. Физическая сущность ультразвуковой обработки

Сущность процесса УЗО заключается в воздействии на обрабатываемую поверхность твердосплавного индентора, прижатого к ней с постоянной силой и вибрирующего с частотой 22 кГц.

Ультразвуковой инструмент, зажатый в резцедержателе универсального токарного станка, под действием статической силы, создаваемой прижимом, и динамической силы, создаваемой ультразвуковой колебательной системой, пластически деформирует и упрочняет поверхностный слой детали (рис. 1.2), увеличивает микротвердость, снимает остаточные макро- и микронапряжения растяжения и формирует напряжения сжатия, сглаживает неровности поверхности и создает в итоге улучшенный поверхностный слой с регулярным характером микрорельефа.

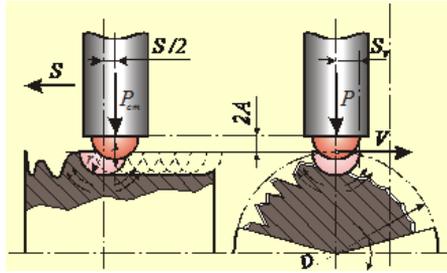


Рис. 1.2. Схема поверхностного пластического деформирования при ультразвуковой упрочняющей обработке

В результате обработки параметры шероховатости поверхности уменьшаются до Rz 0,8–0,4 мкм при исходной Rz 20,0–6,3 мкм (рис. 1.3). Высокая эффективность УЗО достигается за счет импульсной деформации поверхностного слоя детали при повышенном динамическом давлении, создаваемом в поверхностном слое.

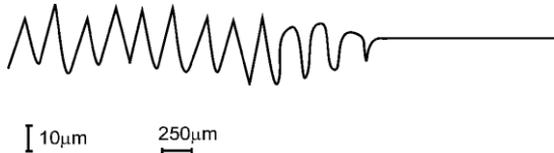


Рис. 1.3. Вид профилограммы поверхности детали без обработки (левая часть) и после УЗО (правая часть)

В результате ультразвукового воздействия на прижатый с постоянным давлением инструмент в зоне контакта могут развиваться высокие локальные напряжения. При обработке УЗО остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое достигают 250 МПа, а глубина упрочненного слоя – 1 мм. В результате применения данного способа микротвердость поверхности возрастает на 30–300%. Такое качество поверхности можно получать не только на термически обработанных и сырых сталях, но и на чугунах, цветных металлах и сплавах. Благодаря обеспечению таких параметров поверхностного слоя этот метод нашел широкое применение в качестве безабразивной финишной обработки деталей (взамен шлифования). По сравнению с другими

чистовыми методами (обработки резанием) долговечность деталей после УЗО увеличивается в 2–5 раз.

В целом процесс ультразвуковой обработки характеризуется следующими факторами:

- формой и радиусом r рабочей части инструмента, мм;
- амплитудой колебаний индентора, 2А;
- величиной силы прижима инструмента к детали $P_{ст}$, Н;
- величиной динамического воздействия P , Н;
- подачей S , мм/оборот;
- числом прохода инструмента i ;
- окружной или линейной скоростью детали V , м/мин;
- применяемой смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ).

5. Технологические особенности ультразвуковой упрочняющей обработки

Применение УЗО целесообразно при формировании свойств поверхности различных деталей и покрытий деталей как в процессе, так и после их нанесения.

Перспективно применение УЗО в качестве совместной технологической операции, например при напылении для послойной обработки частиц напыляемого слоя, находящихся в твердожидком состоянии. Воздействие механических колебаний приводит к излучению ультразвуковых волн, в результате чего изменяются структура, свойства и характеристики материала поверхностного слоя детали.

Характерная особенность УЗО: в отличие от тепловой энергии, которая распространяется достаточно равномерно по всему объему деформируемого металла, акустическая энергия поглощается главным образом границами зерен — дефектами кристаллической решетки, т.е. избирательно. Например, УЗО повышает твердость и усталостную прочность, поэтому с успехом может заменить весьма длительный и энергоемкий процесс азотирования коленчатых валов.

Ультразвуковая установка И 4 состоит из следующих частей:

- ультразвукового генератора И 10, выходная мощность – 630 Вт, ступенчатая регулировка мощности – 100%, 75 и 50% номинальной, рабочая частота – $22 \pm 10\%$ кГц, питание – 220 В, 50 Гц;

- ультразвукового инструмента, зажимаемого в резцедержатель токарного станка, основа инструмента – магнитострикционный ультразвуковой преобразователь со сменным инструментом-индентором;
- соединительного кабеля длиной 4 м.

Ультразвуковая обработка применяется после чистовой токарной обработки. Ультразвуковой инструмент, зажатый в резцедержателе универсального токарного станка, под действием статической силы, создаваемой прижимом, и динамической силы, создаваемой ультразвуковой колебательной системой, пластически деформирует и упрочняет поверхностный слой детали (рис. 1.4), увеличивает микротвердость, снимает остаточные макро- и микронапряжения, сглаживает микронеровности поверхности и создает улучшенный поверхностный слой с регулярным характером микрорельефа.



Рис. 1.4. Ультразвуковая импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей

Ультразвуковой инструмент для обработки наружных поверхностей деталей представлен на рис. 1.5.

Ультразвуковую упрочняюще-чистовую обработку следует рассматривать не как размерную, а как финишную. Величина необходимых припусков определяется экспериментально,

в зависимости от конкретных технологических параметров обработки. В общем случае можно сказать, что размеры деталей практически не изменяются.



Рис. 1.5. Ультразвуковой инструмент для обработки наружных поверхностей деталей

К параметрам режима УЗО относятся: статическая сила, амплитуда колебаний инструмента, радиус его округления, частота колебаний, эффективная масса инструмента, продольная подача, число рабочих ходов, скорость обработки детали.

При ультразвуковом упрочнении рабочая часть инструмента выполняется обычно из твердосплавных материалов ВК8, Т15К6 или закаленных сталей ШХ15 с радиусом закругления 8 мм. Рабочая часть инструмента прижимается к обрабатываемой детали с усилием 300–400 Н и приобретает ультразвуковые колебания, создаваемые ультразвуковым генератором, магнитострикционным преобразователем и коническим концентратором. Частота колебаний инструмента – 18–24 кГц, амплитуда колебаний – 10–20 мкм, скорость обработки поверхности детали – 0,9–1,0 м/с. Продольная подача инструмента $S = 0,125$ мм/об. С целью уменьшения износа инструмента и повышения производительности процесса при упрочнении используют смазочно-охлаждающую жидкость – индустриальное масло.

Применение ультразвукового упрочнения особенно эффективно для инструментов, зубьев колес, деталей, изготовленных из чугуна, цветных металлов и сплавов, в том числе твердосплавных (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Образцы деталей из различных материалов,
обработанные УЗО

Отсутствие внедренных в поверхность деталей зерен абразива увеличивает до двух раз срок службы сопряженных деталей (пар скольжения, уплотнительных сальников, сальниковой набивки и т.д.). К тому же регулярный микрорельеф повышает свойство удержания обработанной поверхностью масел и смазок, что улучшает коррозионную стойкость обработанной поверхности. Технологические процессы упрочнения твердых тел с применением УЗО приводят к снижению коэффициента трения и предела текучести, повышению сопротивляемости при ударном воздействии и предела выносливости.

6. Порядок проведения работы

1. Получить образец, обработанный УЗО.
2. Измерить исходные параметры структуры поверхности на оптическом профилометре Contour GT-I 3D до и после УЗО.
3. Измерить исходный диаметр образца микрометром до и после УЗО.
4. Сравнить результаты измерения параметров структуры поверхности и размеров образца до и после УЗО и объяснить их отличие.
5. Разработать технологию упрочнения детали и определить время операции в соответствии с вариантом задания (табл. 1.1). Оптимальные значения окружной скорости и подачи при УЗО приведены в разделе 5.

Таблица 1.1

Варианты заданий

Номер варианта	Размеры детали, мм		Номер варианта	Размеры детали, мм	
	Диаметр	Длина		Диаметр	Длина
1	20	100	11	120	800
2	30	200	12	130	900
3	40	300	13	150	1000
4	50	400	14	170	1200
5	60	400	15	180	1400
6	70	450	16	190	1500
7	80	500	17	200	1600
8	90	500	18	220	2000
9	100	600	19	250	2200
10	110	700	20	300	2500

Частота вращения шпинделя станка при УЗО зависит от диаметра детали и определяется по формуле

$$n_{ш} = V/\pi D,$$

где D – диаметр обрабатываемой детали, м; V – окружная скорость упрочняемой поверхности.

Частоту вращения шпинделя станка выбрать из ряда: 12,5; 16, 20, 25, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 2000. Уточнить окружную скорость упрочняемой поверхности после выбора частоты вращения шпинделя.

7. Содержание отчета

1. Описание процесса ультразвукового упрочнения детали.
2. Схема узлов установки для ультразвуковой обработки.
3. Результаты измерения исходных параметров структуры поверхности и размеров образца до и после УЗО.
4. Сравнительный анализ качества исходной и упрочненной поверхности и объяснение полученных результатов.
5. Параметры технологического процесса УЗО и расчет времени операции упрочнения.

8. Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется гармоническое волновое движение?
2. В чем состоит сущность процесса ультразвукового упрочнения?
3. Как изменяются параметры структуры поверхности после УЗО?
4. Как изменяются физико-механические свойства в результате УЗО?
5. Какие технологические процессы упрочнения может заменить УЗО?
6. Какова толщина упрочненного слоя после УЗО?
7. Назовите основные параметры режима УЗО.
8. С каким усилием рабочая часть инструмента прижимается к обрабатываемой детали?
9. На сколько увеличивается ресурс деталей после УЗО?
10. Из каких материалов изготавливается рабочая часть инструмента для УЗО?
11. Какие материалы можно упрочнять УЗО?

Литература

1. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Артемьев В.В., Градов О.М., Колomeец Н.П., Приходько В.М., Эльдарханов А.С. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М.: Янус-К, 2006. 687 с.
2. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
3. Осипенкова Г.А., Пегашкин В.Ф. Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2013. 116 с.
4. Ультразвуковое упрочнение деталей машин // Современные технологии производства: сайт. URL: <https://extxe.com/> (дата обращения: 21.01.2021).
5. Хмелевская Б.Б., Леонтьев Л.Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами: в 3 т. Т. 1. Современные методы восстановления и упрочнения деталей. Владивосток: МГУ; Дальнаука, 2003. 283 с.
6. Холопов Ю.В. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов – технология XXI века // Металлообработка. 2001. № 4. С. 16–20.

Работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МЕТОДОМ ЧЕКАНКИ

Цель работы – ознакомление с сущностью процесса, оборудованием и технологическими возможностями поверхностного пластического деформирования (ППД) методом чеканки.

1. Особенности упрочнения ППД

Упрочнение при поверхностном пластическом деформировании (ППД) связано с образованием остаточных напряжений сжатия и структурными изменениями в поверхностном слое металла. Напряжения сжатия тормозят развитие поверхностных трещин, способствуя перемещению очага зарождения усталостной трещины под поверхность, где действуют меньшие нагрузки и отсутствует контакт с внешней средой. В результате возрастает сопротивление усталостному разрушению.

Пластическая деформация способствует повышению плотности и активности взаимодействия дислокаций, снижению локальных микронапряжений в наиболее ответственном за разрушение поверхностном слое, дроблению и вытягиванию кристаллитов в направлении деформирования.

Основные преимущества ППД: малая энергоемкость; не требуется сложное оборудование; не нарушается точность изготовления деталей; обеспечивается идентичность качества поверхностного слоя как у одной детали, так и у всей партии однотипных деталей; с увеличением размеров упрочняемых деталей эффективность ППД сохраняется.

Показатели эффективности ППД деталей: степень (интенсивность) наклепа, глубина упрочнения и глубина промина. Степень упрочнения E показывает величину повышения микротвердости поверхностного слоя $H_{\text{упр}}$ относительно исходного состояния $H_{\text{исх}}$:

$$E = (H_{\text{упр}} - H_{\text{исх}})100 / H_{\text{исх}}.$$

В зависимости от материала и способа ППД E составляет 10–45%. Глубина упрочнения – это толщина поверхностного слоя детали, в котором пластическая деформация вызвала улавливаемое повышение микротвердости. В зависимости от способа и режима ППД глубина упрочненного слоя изменяется от сотых долей миллиметра до 20 мм и более.

Сравнительный анализ технологических возможностей различных способов ППД позволил установить наибольшую эффективность ППД ударным способом (чеканкой), особенно для крупногабаритных деталей, например для втулок цилиндров судовых дизелей, у которых образуются трещины в районе галтели опорного бурта. Этот способ позволяет получить на упрочняемой поверхности значительную глубину наклепанного слоя (свыше 10 мм) без больших статических усилий с использованием относительно простых чеканочных приспособлений. Минимально необходимая глубина наклепанного слоя для большинства деталей, работающих в условиях циклического нагружения, находится в пределах 2–4 мм.

Наибольшее влияние на качество поверхностного слоя оказывает скорость упрочняемой поверхности детали. Причем с ее увеличением качество ухудшается вследствие появления пропусков между отпечатками от бойка. При скорости 1,0–1,5 м/мин отпечатки перекрывают друг друга, что позволяет избежать образования макронеровностей. Величина энергии удара также оказывает влияние: с ее увеличением качество поверхностного слоя улучшается. Количество проходов практически не оказывает влияния на качество поверхностного слоя. Таким образом, для получения упрочненной поверхности без макронеровностей оптимальной следует считать скорость упрочняемой поверхности в пределах $V = 1,0\text{--}1,5$ м/мин при удельной энергии удара $E_y = 1,5\text{--}1,8$ Дж/мм.

Влияние ППД на твердость, глубину упрочнения и промина чугуна и стали. Микротвердость поверхности и глубина упрочнения серых чугунов после упрочнения зависят от большого числа факторов (величина и распределение включений графита, дисперсность перлита, параметры режима и т.п.).

Степень упрочнения E может колебаться от 10,4 до 53,6% в зависимости от режима чеканки.

Глубина упрочнения для чугунов с крупными включениями графита (втулки цилиндров малооборотных дизелей из чугуна марки СЧ20) меньше в среднем на 12,4% по сравнению с глубиной у чугунов с длиной графитных включений до 0,5 мм (втулки цилиндров среднеоборотных дизелей из чугунов марок СЧ25, СЧ30).

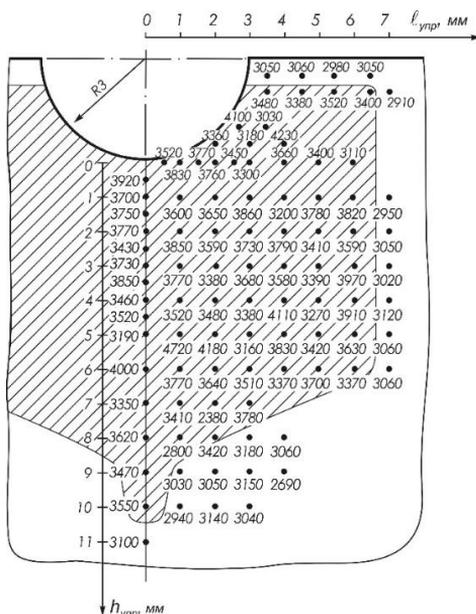


Рис. 2.1. Распределение микротвердости по сечению упрочненного чугуна марки СЧ20 (оптимальный режим)

Оптимальными параметрами режима ППД для получения максимальной глубины упрочнения для всех типов чугунов является режим: энергия удара 1,8 Дж/мм, скорость упрочнения – 1 м/мин, число проходов $n = 1$. Упрочненный слой распространяется в ширину от оси симметрии выточки в среднем на 6,5 мм для чугунов с включениями графита до 0,5 мм и на 5,5 мм для чугунов с более грубыми включениями (рис. 2.1).

Форма и протяженность зоны упрочнения обеспечивают высокую ее долговечность практически для любых случаев распределения напряжений в галтели детали и позволяют устранить влияние галтели как концентратора напряжений. Неупрочненный слой расположен в верхней части галтели, его протяженность 0,5 мм. Зона упрочнения галтели составляет 85% от всей длины полуокружности.

ППД методом чеканки позволяет формировать галтели у деталей из пластичных металлов. Глубина промина – это глубина вытесненного при пластической деформации материала (остающегося отпечатка) (рис. 2.2). При максимальной энергии удара в зависимости от числа проходов глубина промина для малоуглеродистой стали изменяется в пределах 1,1–1,6 мм.



Рис. 2.2. Форма пластических деформаций отпечатков, оставляемых роликом на поверхности детали

Влияние ППД на деформацию и остаточные напряжения серого чугуна. Известно, что остаточные напряжения зависят от степени пластической деформации при ППД и влияют на усталостную прочность материала. Серый чугун с пластинчатым графитом обнаруживает заметные пластические деформации только в условиях «мягкого» нагружения, например, когда его осадка при сжатии достигает 20–40%.

Измерения средних значений деформаций проводили рентгеноструктурным методом. Характерной особенностью полученных профилей деформаций (рис. 2.3) является немонотонность распределения деформаций по глубине.

Для объяснения результатов влияния ППД на механические свойства чугуна представляет интерес знание величины остаточных напряжений, или напряжений второго рода, возникающих в малых объемах (в пределах отдельных зерен) тогда, когда преvзойден предел упругости, т.е. напряжения второго рода являются

остаточными напряжениями и возникают в результате ППД. Деформирование нарушает правильность расположения атомов и сопровождается неоднородным искажением решетки кристалла в субмикроскопических областях. Большая часть энергии, затраченная на деформирование, превращается в тепловую, но часть энергии задерживается в виде энергии остаточных напряжений.

Для всех исследуемых режимов ППД (рис. 2.3) характерно уменьшение деформации в поверхностных слоях на глубине от 0,5 до 1,5 мм в зависимости от режима наклепа, затем наблюдается ее рост, причем максимальная деформация наблюдается на глубине 2,5–3,5 мм. Максимальные деформации и остаточные напряжения на поверхности образца возникают при максимальной энергии удара и одном проходе. Увеличение числа проходов приводит к уменьшению величины деформации на поверхности и к более резкому снижению ее в подповерхностных слоях.

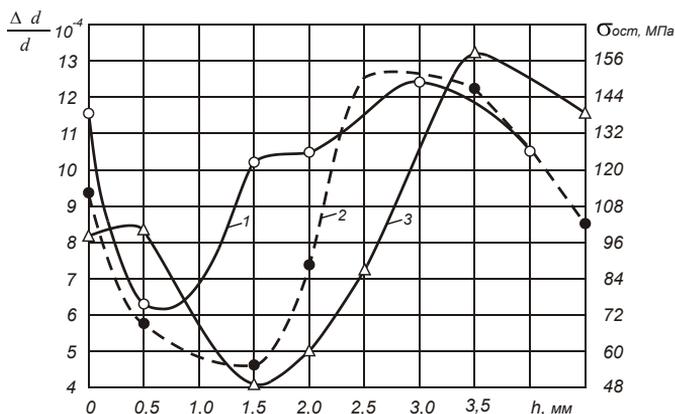


Рис. 2.3. Профили деформаций и остаточных напряжений по глубине чугуна после упрочнения ППД, режимы:

- 1 – $E_y = 1,5$ Дж/мм, $V = 1$ м/мин, $n = 1$;
- 2 – $E_y = 0,9$ Дж/мм, $V = 1$ м/мин, $n = 5$;
- 3 – $E_y = 1,5$ Дж/мм, $V = 1$ м/мин, $n = 5$

Влияние ППД на усталостную прочность. Известно, что ППД позволяет в широких пределах повышать сопротивление усталости металлов благодаря изменениям, происходящим в поверхностных слоях в результате наклепа. Размер графитных

включений не оказывает существенного влияния на величину предела выносливости чугуна после ППД. Наибольший эффект упрочнения достигается на максимальной энергии удара ($E_y = 1,8$ Дж/мм). В результате упрочнения предел выносливости чугуна возрастает на 29%. Увеличение величины относительной деформации повышает предел выносливости чугуна вследствие как искажения кристаллической решетки, так и уменьшения расстояния между атомами (после чеканки в месте упрочнения происходит уменьшение диаметра образца на 0,05–0,10 мм), что приводит, в свою очередь, к возрастанию энергоплотности и механических свойств поверхностных слоев, в которых произошла пластическая деформация.

Для выбора параметров режима ППД конкретной детали при известном необходимом пределе выносливости чугуна можно рассчитать E_y исходя из предела прочности чугуна на растяжение по формуле (остальные параметры режима не оказывают существенного влияния)

$$\sigma_{-1\text{упр}} = 0,5986\sigma_p + 0,0786\sigma_p E_y - 0,016\sigma_p V. \quad (2.1)$$

2. Выбор режима упрочнения

Детали, изготовленные из серого чугуна, как правило, являются базовыми и эксплуатируются очень часто в условиях циклического нагружения, это приводит к образованию трещин в галтельных переходах (например, бурты втулок цилиндров, посадочные места в блоках цилиндров под втулки и т.д.) вследствие того, что при проектировании не учитывается характер нагружения детали или ее узла. Поэтому при ремонте базовых деталей необходимо оценивать как уровень напряжений конкретной детали, так и необходимый предел выносливости материала, который обеспечит требуемую долговечность. Зная марку чугуна, из которого изготовлена деталь, и требуемый предел выносливости материала, можно выбрать параметры режима ППД.

На свойства упрочненного слоя влияют следующие параметры режима чеканки: энергия удара, скорость обрабатываемой поверхности и количество проходов.

Для конструкционных сталей и серого перлитного чугуна для наклепа применяют пневмоинструмент (пневмомолотки) или

перфораторы с энергией удара 12–44 Дж. Диаметр ролика выбирают в пределах 60–70 мм.

Число оборотов шпинделя станка при чеканке зависит от диаметра детали и определяется по формуле

$$n_{ш} = V/\pi D,$$

где D – диаметр обрабатываемой детали, м; V – окружная скорость упрочняемой поверхности (оптимальная скорость – в интервале $V = 1–2$ м/мин, при которой обеспечивается удовлетворительное качество поверхности галтели без макронеровностей и величиной шероховатости не более $Ra = 2,5$ мкм).

Схема упрочнения галтели у цилиндрических деталей чеканкой на токарном станке приведена на рис. 2.4.

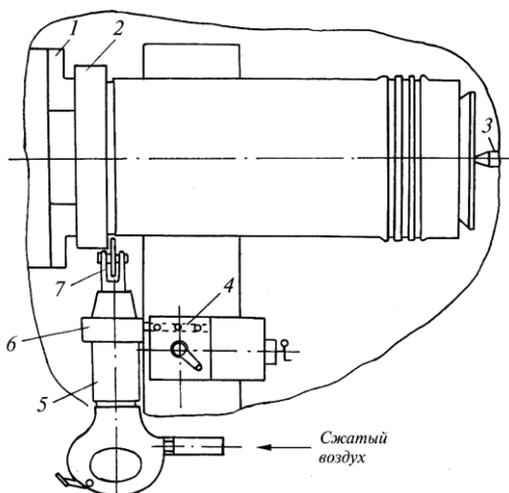


Рис. 2.4. Схема упрочнения цилиндрических деталей чеканкой на токарном станке:

- 1 – патрон станка; 2 – деталь; 3 – центр; 4 – резцедержатель;
- 5 – пневмомолоток; 6 – крепящее устройство;
- 7 – оправка с упрочняющим роликом

Наибольший эффект упрочнения достигается на максимальной энергии удара ($E_y = 1,8$ Дж/мм). Выбор E_y осуществляют в зависимости от требуемого предела выносливости материала детали и прочности упрочняемого чугуна, которые определя-

ются в первом приближении по его марке. Затем в зависимости от радиуса упрочняемой галтели детали выбирают параметры режима упрочнения по графику (рис. 2.5). Приведенная энергия удара E_y определяется по формуле

$$E_y = E_M/2R, \text{ Дж/мм}, \quad (2.2)$$

где E_M – энергия удара молотка, Дж; R – радиус упрочняющего ролика.

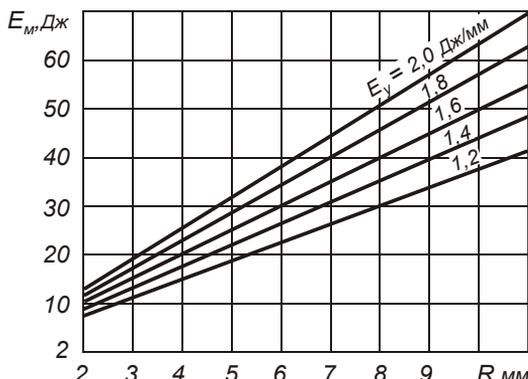


Рис. 2.5. Энергия удара молотка, необходимая для упрочнения галтели радиуса R при заданной удельной энергии E_y

Количество проходов зависит от требуемой глубины промина и может изменяться от 1 до 10 проходов. При упрочнении обычно делают один–два прохода.

3. Порядок выполнения работы

Каждый студент после ознакомления с методическими указаниями определяет параметры ППД методом чеканки и время, необходимое для упрочнения галтели цилиндрической детали (рис. 2.4), в соответствии с собственным вариантом исходных данных, полученных от преподавателя (представлены в табл. 2.1).

1. Ознакомиться с образцом чугуна, упрочненного ППД методом чеканки.

2. В соответствии со своим вариантом определить необходимую энергию молотка по рис. 2.5, обеспечивающую заданную величину энергии удара E_y .

3. По таблице 2.2 выбрать марку молотка и рабочее давление воздуха. Выбор марки пневматического молотка для упрочнения различных деталей методом чеканки осуществляют по требуемой энергии удара, которая зависит как от параметров режима упрочнения, так и от радиуса упрочняемой галтели. При выборе следует исходить из того, что пневматические молотки стабильно работают при давлении воздуха в пределах $(3,0-5,5) \cdot 10^5$ Па (3,0–5,5 ат). Уменьшение давления ниже $3 \cdot 10^5$ приводит к зависанию бойка и нарушению стабильности упрочнения. В заводских пневмосистемах очень часто бывает пониженное давление, поэтому лучше выбирать молоток, который имеет несколько большую энергию удара, чем необходимо по расчетам.

4. По формуле (2.1) рассчитать величину предела прочности чугуна после упрочнения и сравнить с исходной величиной.

5. Рассчитать время, необходимое для выполнения технологической операции по упрочнению галтели детали.

Таблица 2.1

Варианты заданий

Номер варианта	Диаметр детали в районе галтели	Радиус галтели	Марка чугуна, ГОСТ 1412-85	Номер варианта	Диаметр детали в районе галтели	Радиус галтели	Марка чугуна, ГОСТ 1412-85
1	30	6	СЧ15	11	180	4	СЧ24
2	40	3	СЧ18	12	200	5	СЧ25
3	50	4	СЧ20	13	220	6	СЧ30
4	60	5	СЧ24	14	250	7	СЧ35
5	70	6	СЧ25	15	280	8	СЧ15
6	80	7	СЧ30	16	300	9	СЧ18
7	90	8	СЧ35	17	350	3	СЧ20
8	100	9	СЧ15	18	400	4	СЧ24
9	120	4	СЧ18	19	500	5	СЧ25
10	150	3	СЧ20	20	600	6	СЧ30

**Основные технические данные и характеристики
наиболее распространенных пневматических молотков**

Наименование параметра	Марка молотка					
	МО-8у	МО-9у	МО-10у	ИП 4108	ИП 4109	ИП 4110
Масса, кг	8,5	9,1	10,1	4,9	5,3	5,8
Длина, мм	480	520	570	320	350	400
Энергия удара, Дж						
при $3 \cdot 10^5$ Па	19,5	21	–	–	–	–
при $4 \cdot 10^5$ Па	26	28	35	9,6	–	–
при $5 \cdot 10^5$ Па	32	35	44	12	14	16
Частота ударов в минуту						
при $4 \cdot 10^5$ Па	1850	1560	1220	–	–	–
при $5 \cdot 10^5$ Па	2000	1800	1360	2700	2150	1600
Расход воздуха, м ³ /мин	–	–	–	0,9	0,9	0,9

4. Содержание отчета

1. Описание механизма упрочнения детали ППД.
2. Схема процесса упрочнения галтели детали чеканкой.
3. Описание внешнего вида канавки, полученной в результате ППД.
4. График зависимости глубины промина от числа проходов.
5. Параметры технологического процесса упрочнения и время, необходимое для выполнения технологической операции.
6. Выводы и объяснение полученных результатов.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое наклеп?
2. Что такое перенаклеп и его признаки?

3. Назначение и область применения ППД.
4. В результате каких изменений в поверхностном слое металла повышается усталостная прочность детали?
5. Основные параметры режима ППД.
6. От каких параметров режима ППД зависит уровень остаточных напряжений?
7. Какова величина остаточных напряжений на поверхности после ППД?
8. Как влияет количество проходов на деформацию и уровень остаточных напряжений чугуна?
9. Почему увеличивается микротвердость чугуна в зоне упрочнения?
10. Какова глубина, на которой увеличивается микротвердость чугуна?
11. Показатели эффективности ППД.
12. Как изменяется форма зерна металла в результате ППД?
13. Назовите преимущества упрочнения методом чеканки.

Литература

1. ГОСТ 18296-72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. 10 с.
2. Леонтьев Л.Б., Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Леонтьев А.Л. Системное проектирование технологических процессов изготовления и восстановления деталей машин: учебник для вузов [Электронный ресурс]. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. 400 с.
3. Хмелевская Б.Б., Леонтьев Л.Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами: в 3 т. Т. 1. Современные методы восстановления и упрочнения деталей. Владивосток: МГУ; Дальнаука, 2003. 283 с.

Работа № 3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ
СВАРКИ И НАПЛАВКИ
В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Цель работы – ознакомление с оборудованием, технологическими особенностями и возможностями процесса сварки и наплавки в среде углекислого газа.

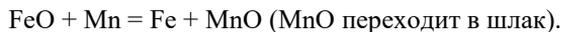
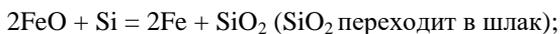
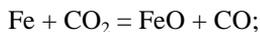
1. Особенности сварки в углекислом газе

Углекислый газ (CO₂) – наиболее распространенный защитный газ при сварке плавящимся электродом. При сварке в углекислом газе дуга горит в среде защитного газа, который отесняет воздух, не допуская его вредного влияния на расплавленный основной и электродный металлы.

Сварка в углекислом газе применима для соединения низкоуглеродистых сталей, а также чугуна.

Преимущества сварки в углекислом газе: высокая производительность, возможность сварки в разных пространственных положениях, большой диапазон толщин свариваемых металлов, низкая стоимость защитного газа, следовательно и сварки.

Сварочная проволока, применяемая для сварки в CO₂, имеет повышенное содержание раскислителей (Si, Mn). Раскислители необходимы для нейтрализации окисляющего действия CO₂; они препятствуют образованию окислов железа.



Особенностью сварки в углекислом газе является сравнительно сильное выгорание элементов, обладающих большим

сродством с кислородом (Al, Ti, Si, Mn и др.)*. Окисление происходит атомарным кислородом, который образуется при диссоциации углекислого газа под действием тепла дуги. Окисление C, Si, Mn в сварочной ванне приводит к значительному обеднению металла шва легирующими элементами, что ухудшает механические свойства соединения. Поэтому для получения качественного соединения необходимо при сварке в углекислом газе иметь в сварочной ванне достаточное количество раскисляющих элементов, которые вводят за счет проволоки (Св-08Г2С, Св-08ГС).

Химический состав металла шва зависит не только от основного и электродного металлов, но и от параметров режима сварки, особенно от напряжения и тока дуги. Повышение величины сварочного тока при одинаковом диаметре сварочной проволоки приводит к уменьшению времени пребывания капли на конце электрода и ее контакта с газами. Вследствие этого уменьшается степень выгорания раскислителей из сварочной проволоки. Повышение напряжения на дуге приводит к значительному обеднению металла шва раскислителями, так как повышается процент выгорания их в столбе дуги за счет увеличения времени контакта капли электродного металла с газом.

Влажность и расход углекислого газа также влияют на качество шва. С повышением влажности CO₂ увеличивается количество растворенного в металле шва водорода, который образуется при диссоциации воды: $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. При недостаточном расходе CO₂ в зону сварки проникает воздух, и в металл шва попадает азот, что приводит к образованию пор, как и при попадании водорода. Расход газа устанавливают по расходомеру.

Сварка в углекислом газе, как правило, осуществляется постоянным током обратной полярности. Переменный ток и постоянный прямой полярности не применяют из-за недостаточной устойчивости процесса и неудовлетворительного качества и формы шва. Это происходит вследствие того, что наличие в дуговом

*Активность по отношению к кислороду повышается в следующем порядке (до температуры 1600 °С): Cu-Ni-Co-Fe-W-Mo-Cr-Mn-V-Si-Ti-Zr-Al. Элементы, стоящие левее железа, при сварке сталей будут практически полностью усваиваться сварочной ванной. Вольфрам и молибден, стоящие справа от железа, достаточно полно усваиваются сварочной ванной. Большую трудность представляет легирование шва титаном и алюминием.

промежутке кислорода нарушает нормальные условия горения дуги, питаемой переменным током.

При сварке в среде углекислого газа используют капельный и мелкокапельный (струйный) перенос металла через дуговой промежуток. При капельном переносе решающее влияние на стабильность процесса и потери на разбрызгивание оказывает выбор диапазона частот коротких замыканий дугового промежутка каплями жидкого металла. Во время контакта возрастает сварочный ток и увеличивается сжимающее действие электромагнитных сил, разрывающих жидкую перемычку между электродом и изделием. Оптимальным является 90–450 коротких замыканий в секунду, что приводит к повышению стабильности процесса горения дуги и уменьшению разбрызгивания металла до 7%. При этом сохраняется возможность ведения сварки во всех пространственных положениях. Переход на мелкокапельный (струйный) перенос возможен лишь при выполнении следующих условий:

- использование сварочной проволоки малого диаметра (0,6–1,2 мм);
- сварка при плотностях тока 100–450 А/мм²;
- применение повышенной индуктивности в цепи дуги.

При этом повышается стабильность процесса горения, повышается производительность с одновременным уменьшением потерь на разбрызгивание до 2%.

На практике приходится рассчитывать режим сварки по шву, указанному на чертеже. Изменение размеров швов сварных конструкций нежелательно, так как их уменьшение снижает прочность конструкции, а увеличение вызывает дополнительный расход сварочных материалов и электроэнергии, повышается основное время на изготовление изделия.

Сварные швы имеют три наиболее важных размера, влияющих на качество соединения: глубину проплавления $H_{\text{П}}$, ширину шва B , высоту валика $H_{\text{В}}$ (рис. 3.1).

Глубина проплавления зависит от величины сварочного тока и диаметра проволоки. С ростом сварочного тока увеличивается глубина проплавления основного металла за счет увеличения эффективной тепловой мощности и давления дуги на поверхность сварочной

ванны. За счет увеличения плотности тока в дуге растет и дополнительное давление на сварочную ванну. При наплавочных работах для уменьшения глубины проплавления необходимо применять проволоку большего диаметра. Опыты показывают, что при сварке в углекислом газе глубина проплавления выше, чем при сварке под флюсом. На параметры шва также влияют напряжение дуги и скорость сварки. Длина (напряжение) дуги оказывает существенное влияние на глубину проплавления, она выбирается исходя из минимального разбрызгивания металла и необходимости получить шов правильной формы. С увеличением сварочного тока напряжение дуги возрастает, причем каждому диаметру проволоки соответствует свое оптимальное значение напряжения дуги.

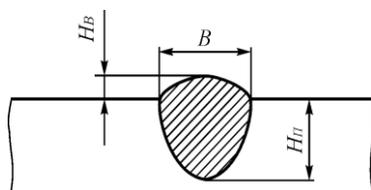


Рис. 3.1. Основные размеры шва

При увеличении сварочного тока растет скорость подачи электродной проволоки, причем тем интенсивнее, чем меньше ее диаметр. Несколько меньшее влияние на скорость подачи, особенно при использовании проволоки малого диаметра и высокой плотности тока, оказывает вылет электрода. С увеличением вылета электрода скорость подачи проволоки возрастает, поскольку количество выделяемого на электроде тепла под действием сварочного тока пропорционально сопротивлению (длине) вылета, квадрату силы тока и времени прохождения тока через сухой вылет электрода. Влияние напряжения дуги и скорости сварки на скорость подачи незначительны и ими можно пренебречь.

2. Выбор параметров режима сварки

Сварка производится постоянным током обратной полярности («плюс» – на электроде, «минус» – на изделии).

Равномерная подача электродной проволоки и скорость сварки обеспечиваются сварочным трактором.

Ориентировочные режимы сварки листов из низкоуглеродистой проволоки приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Ориентировочные режимы сварки листов
из низкоуглеродистой стали**

Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Расстояние от сопла до изделия, мм
0,8	60–140	16–21	5–15
1,0	80–180	19–24	8–18
1,2	110–220	20–25	8–18
1,6	120–320	22–30	15–25

3. Порядок выполнения работы

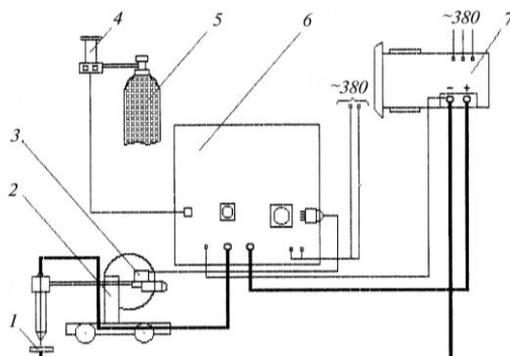


Рис. 3.2. Схема установки для сварки в углекислом газе:
1 – изделие; 2 – сварочный трактор; 3 – кнопочный пост;
4 – подогреватель газа; 5 – баллон с углекислым газом;
6 – шкаф управления; 7 – преобразователь сварочный

1. Работа осуществляется с помощью трактора АДПГ–500. Собрать электрическую схему автоматической установки для сварки на постоянном токе обратной полярности (рис. 3.2).

2. Установить требуемый режим сварки (ток и напряжение дуги, скорости сварки и подачи электродной проволоки) по нижнему пределу (проверяется наплавкой валика на пробной пластине).

3. Произвести наплавку экспериментального валика. В процессе наплавки регистрировать действительные значения сварочного тока и напряжения на дуге.

4. Построить график изменения ширины валика от силы сварочного тока (в пределах в зависимости от диаметра присадочной проволоки (табл. 3.1). Скорость сварки 20–25 м/ч, расход углекислого газа 15–20 л/мин.

5. После наплавки всех валиков зачистить их от шлаковой корки и брызг до металлического блеска. Измерить ширину валика штангенциркулем и результаты замера занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты опытов

№ п/п	Марка электродной проволоки	Диаметр проволоки, мм	Ток сварки, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Ширина валика, мм
1						
2						
3						
4						

4. Содержание отчета

1. Технологические особенности сварки в углекислом газе.
2. Нарисовать схему установки для сварки в углекислом газе.
3. Результаты опытов в виде таблицы и графика.
4. Описание внешнего вида сварных швов. Особое внимание следует обратить на наличие дефектов (поры, трещины и т.п.). Эскиз детали с размерами сварного шва (валика) и указанием мест, где расположены дефекты.
5. Выводы и объяснения полученных результатов.

5. Контрольные вопросы

1. Почему для дуговой сварки в углекислом газе применяют источники постоянного тока с жесткой внешней вольтамперной характеристикой?

2. Диссоциация углекислого газа и ее влияние на условия горения дуги и выбор рода тока.

3. Почему для дуговой сварки в углекислом газе низкоуглеродистой стали применяют сварочные проволоки, легированные марганцем и кремнием?

4. Зачем при сварке в углекислом газе используют подогреватели газа?

5. Каковы причины образования пор в швах?

6. На какой полярности тока выполняется сварка в углекислом газе и почему?

7. Каковы преимущества автоматической и механизированной дуговой сварки в углекислом газе по сравнению с другими способами дуговой сварки?

8. За счет чего повышается стабильность процесса горения при сварке в углекислом газе?

9. Как влияет плотность тока на процесс сварки в углекислом газе?

10. От чего зависит величина напряжения на дуге при сварке в углекислом газе?

Литература

1. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение, 1974. 240 с.

2. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров; под ред. Н.Г. Дюргерова; Национальное агентство контроля сварки. М.: Изд-во Национального агентства контроля сварки, 2011. 367 с. URL: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:672746&theme=FEFU> (дата обращения: 25.02.2021).

3. Щекин В.А. Технологические основы сварки плавлением: учебное пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2009. 345 с. URL: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:381607&theme=FEFU> (дата обращения: 25.02.2021).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ЧУГУНА

Цель работы – ознакомление с оборудованием, технологическими особенностями и возможностями процесса плазменной наплавки серого чугуна.

1. Технологические особенности плазменной наплавки чугуна

Для наплавки медных антифрикционных сплавов на серый чугун необходим способ, обеспечивающий минимальное проплавление основного металла, чтобы получить наплавленный металл без включений железосодержащей фазы и качественное его соединение с чугуном. Наиболее перспективным способом наплавки при использовании в качестве присадочного материала электродной проволоки является двойная плазменная дуга (с токоведущей присадочной проволокой), так как позволяет отдельно регулировать нагрев основного металла и плавление присадочного. Применение маломощной дуги «электрод–изделие» позволяет подогреть основной металл, а более мощной дуги «электрод – присадочная проволока» дает возможность расплавлять значительное количество присадочного металла. Давление сжатой дуги и улучшение смачиваемости за счет подогрева изделия обеспечивают течение жидкого наплавленного металла впереди дуги «электрод–изделие». Наличие на поверхности основного металла под дугой «электрод–изделие» прослойки жидкого металла при правильном выборе режима обеспечивает минимальное (0,3–0,5 мм) проплавление основного металла в случае, когда температуры плавления основного и присадочного металлов близки.

Плазменная наплавка двойной дугой выполняется на постоянном токе прямой и обратной полярности (рис. 4.1). Однако наличие магнитного дутья не позволяет значительно увеличивать ток в цепи «электрод–присадочная проволока» по сравнению с током в цепи «электрод–изделие», что приводит к увеличению глубины проплавления основного металла. Сжатая

двойная дуга переменного тока обладает рядом технологических преимуществ по сравнению со сжатой дугой постоянного тока:

- минимальное магнитное дутье (составляющие электромагнитной силы, действующей на сварочную дугу, находятся в противофазе, и результирующая электромагнитной силы невелика) позволяет перераспределять ток между цепями «электрод–изделие» и «электрод–присадочная проволока» в значительно большем диапазоне, а значит, и регулировать глубину проплавления основного металла;

- импульсное тепловое воздействие дуги переменного тока дает возможность получить процесс с мелкокапельным переносом присадочного металла при меньшей энергии наплавки, что позволяет снизить сварочные напряжения и деформации в наплавляемой детали;

- минимальное растворение газов в сварочной ванне;

- катодная очистка основного металла и сварочной ванны от окислов в момент, когда минус на изделии.

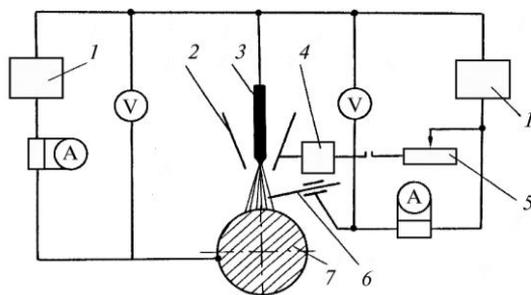


Рис. 4.1. Принципиальная схема установки для плазменной наплавки двойной дугой:

- 1 – сварочный выпрямитель; 2 – сопло плазмотрона; 3 – вольфрамовый электрод; 4 – осциллятор; 5 – балластный реостат;
- 6 – присадочная проволока; 7 – деталь

Основным недостатком дуги переменного тока является ее низкая устойчивость, обусловленная периодическими переходами тока через нуль и вызванное ими погасание дуги. Даже относительно небольшие паузы в горении дуги при переходе тока через нуль приводят к значительному снижению ее устойчивости,

так как межэлектродный промежуток за это время успевает в какой-то степени деионизироваться. Устойчивость горения дуги переменного тока зависит от длительности существования остаточной плазмы в момент перехода напряжения через нуль. Длительность существования остаточной плазмы сжатой дуги зависит от геометрических соотношений плазмотрона, расхода плазмообразующего и защитного газов, а также от физико-химических свойств основного и наплавляемого металлов. Повышение расхода плазмообразующего газа и уменьшение диаметра сопла приводят к снижению устойчивости горения дуги. Самым простым способом обеспечения устойчивости сжатой дуги переменного тока является повышение напряжения холостого хода трансформатора до 120 В и выше.

На основании исследований была разработана схема питания плазменной дуги переменного тока, обеспечивающая устойчивое ее горение и стабильное формирование наплавляемого металла при минимальном проплавлении чугуна (рис. 4.2). Стабильность горения сжатой дуги переменного тока обеспечивается дежурной дугой постоянного тока (20–30 А) и напряжением холостого хода трансформатора (ТP₁) не менее 120 В в цепи «электрод–изделие» (ток дуги 100–130 А). Напряжение в цепи «электрод–присадочная проволока» не влияет на устойчивость горения плазменной дуги.

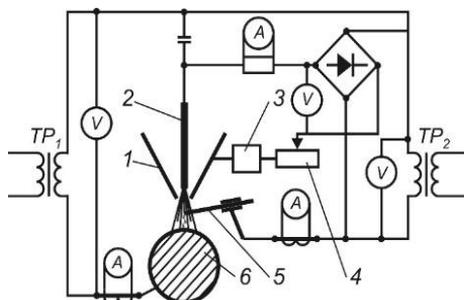


Рис. 4.2. Принципиальная схема питания плазменной дуги переменного тока:

- 1 – сопло плазмотрона; 2 – вольфрамовый электрод; 3 – осциллятор;
 4 – балластный реостат; 5 – присадочная проволока; 6 – изделие;
 TP₁, TP₂ – сварочные трансформаторы

Очистка поверхности детали при наплавке на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе в момент отрицательного полупериода на изделии происходит за счет катодного распыления и позволяет существенно улучшить смачивание чугуна наплавляемым жидким металлом и увеличить скорость его растекания по поверхности.

При наплавке на чугун очень сложно получить высококачественное сварное соединение, так как металл шва и околошовной зоны вследствие больших скоростей охлаждения, тепловых и усадочных напряжений имеет склонность к образованию хрупких структур (ледебурита и мартенсита) и трещин. Низкая прочность и практически полное отсутствие пластичности чугуна являются причинами образования трещин при наплавке как в наплавленном, так и в основном металлах. Поэтому при наплавке без предварительного подогрева необходимо, чтобы процесс соединения присадочного металла с основным происходил при минимальном проплавлении чугуна. В этом случае зоны сплавления и термического влияния (где наблюдаются структурные превращения) имеют минимальные размеры.

Анализ размеров наплавленных валиков и всплесков чугуна (рис. 4.3), получаемых при наплавке медных сплавов на постоянном и переменном токе, позволил установить, что род тока практически не влияет на ширину и высоту валика, глубину и площадь проплавления чугуна.

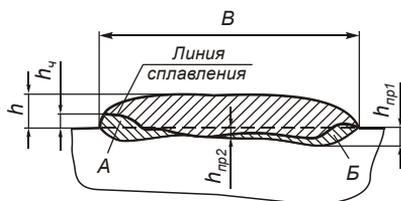


Рис. 4.3. Схема поперечного сечения наплавленного образца:
A и B — места всплесков чугуна в зоне полного расплавления

Управление формированием сварного соединения при плазменной наплавке медных сплавов. Для получения математических моделей свойств наплавленного металла и площади проплавления чугуна были проведены исследования с исполь-

зованием метода планирования эксперимента. На основании анализа и проведения отсеивающего эксперимента по методу насыщенных планов были выбраны четыре технологических параметра, которые наиболее существенно влияют на площадь проплавления чугуна, прочностные свойства сварного соединения и геометрические размеры наплавляемого валика: $I_{и}$ – ток в цепи «электрод–изделие», $I_{пр}$ – ток в цепи «электрод–присадочная проволока», $V_{н}$ – скорость наплавки и $Q_{п}$ – расход плазмообразующего газа. Диапазон изменения параметров режима приведен в табл. 4.1. Напряжение на дуге в зависимости от тока изменялось в пределах 25–30 В.

Таблица 4.1

Режимы плазменной наплавки чугунных деталей

Наименование параметра	Величина параметра
Ток в цепи «электрод–изделие», А	100–130
Ток в цепи «электрод–проволока», А	110–140
Расход плазмообразующего газа, л/мин	2,5–3,5
Скорость наплавки, м/с	$(1,4–1,9) \times 10^{-3}$

Постоянные параметры процесса:

- амплитуда колебаний плазмотрона, мм 18;
- диаметр сопла плазмотрона, мм 5;
- частота колебаний плазмотрона, Гц 0,67;
- скорость подачи присадочной проволоки, м/с 0,033;
- расход защитного газа (аргона), л/мин 10;
- расстояние от торца сопла до изделия, мм 13.

В результате исследования получены зависимости ширины (B , мм) и высоты валика (h , мм):

$$B = 21,02 + 0,0579 I_{и} - 3827 V_{н}; \quad (4.1)$$

$$h = 7,78 - 0,0092 I_{и} - 1038 V_{н} - 0,4 Q_{п}; \quad (4.2)$$

площади проплавления чугуна (мм^2):

$$F_0^{BrA^9M_42} = -42,69 - 0,725 I_{и} + 0,197 I_{пр} + 9,47 Q_{п} - 65622 V_{н} + 570,7 I_{и} V_{н}, \quad (4.3)$$

$$F_0^{БрКЗМц1} = -66,18 + 0,346I_{и} + 0,169I_{пр} + 11,38Q_{п} - 7076V_{н}. \quad (4.4)$$

Площадь ледебуритных участков и тип структуры зоны зависят в первую очередь от площади проплавления чугуна (табл. 4.2): чем больше площадь проплавления, тем больше площадь, занятая ледебуритными участками. В зависимости от площади ледебуритных участков зоны полного расплавления определены основные типы микроструктур и их металлографическая характеристика (табл. 4.2). Микроструктура типа «Б» (без ледебурита) получается при площади проплавления до 5,3 мм². Увеличение площади проплавления до 10–12 мм² обеспечивает получение структур типа «В», которые характеризуются минимальным количеством ледебурита, при котором зона сплавления хорошо обрабатывается режущим инструментом.

Таблица 4.2

**Металлографическая характеристика зоны
полного расплавления чугуна
в зависимости от типа микроструктуры**

Тип структуры			
Б	В	Е	Д
Ледебурита нет $F_0 \leq 5,3 \text{ мм}^2$	Ледебуритные участки в виде отдельных всплесков малой площади (до 5% от площади зоны) $5,3 < F_0 \leq 12,0 \text{ мм}^2$	Ледебуритные участки в виде всплесков средней площади (5–15%) $12,0 < F_0 \leq 21,8 \text{ мм}^2$	Ледебуритные участки в виде всплесков значительной площади (15–50%), расположенные сравнительно плотно $21,8 < F_0 \text{ мм}^2$

При площади проплавления $10 < F_0 < 18 \text{ мм}^2$ в зону расплавления чугуна проникает жидкий цветной металл в виде глобулей, которые концентрируются, как правило, во всплесках чугуна и наблюдаются по всей глубине зоны его расплавления. При увеличении площади проплавления свыше 18 мм^2 в зоне расплавления образуются включения цветного металла не только в виде глобулей, но и розеток или площадок вытянутой формы. При больших значениях погонной энергии и давления дуги

бронзовые включения в чугуна могут иметь, в свою очередь, включения на основе железа (рис. 4.4). Поэтому в качестве основного критерия оценки типов микроструктуры зоны полного расплавления приняты количество и форма ледебуритных участков, которые наиболее важны, так как определяют обрабатываемость сварного соединения и его механические свойства. Расплавленный чугун вследствие большого давления дуги перемешивается с наплавляемой бронзой, а из-за малой растворимости железа в меди формируются сферические включения, имеющие структуру ледебурита (рис. 4.5, а, б).

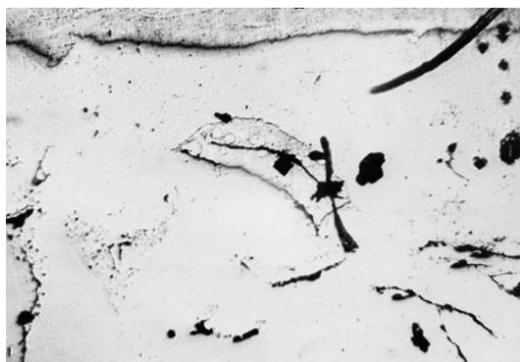
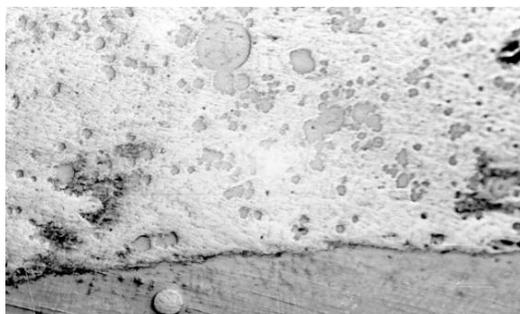


Рис. 4.4. Зона полного расплавления чугуна с включением бронзы БрА9Мц2, содержащей графитную пластину и железистые включения ($F_0 = 27 \text{ мм}^2$) ($\times 160$)

Зона неполного расплавления сравнительно небольшой протяженности не является непрерывной, а располагается отдельными участками, максимальная толщина которых достигает 0,6 мм и характеризуется наличием присущего данному чугуна пластинчатого графита. В процессе наплавки участок находится в твердо-жидком состоянии: наряду с твердой фазой имеется жидкая. Твердая фаза представляет собой аустенит. Однако вследствие быстрого нагрева и охлаждения в твердой фазе могут образовываться и другие структурные составляющие, такие как мартенсит или цементит. Жидкая фаза образуется, как правило, в районе графитных включений: из-за больших скоростей охлаждения после застывания она имеет структуру ледебурита.



a



б

Рис. 4.5. Зона сплавления при наплавке при больших погонных энергиях($\times 160$):
a – БрК3Мц1 ($F_0= 22 \text{ мм}^2$); *б* – БрА9Мц2 ($F_0= 27 \text{ мм}^2$)

Зона термического влияния имеет толщину 1,0–1,5 мм и состоит из аустенита, мартенсита, троостита и графита пластинчатого. Минимальная ширина наблюдается при наплавке на переменном токе проволокой БрК3Мц1. Минимальная ширина зоны термического влияния и величина ее микротвердости получается на режиме, когда скорость наплавки и ток в цепи «электрод–присадочная проволока» максимальны, а расход плазмообразующего газа минимален.

Микроструктура зоны термического влияния плавно переходит в структуру основного металла, которая состоит из графита пластинчатого, перлита, феррита и фосфидной эвтектики. Пластинки графита относительно короткие, слегка искривленные и достаточно равномерно распределены в металлической основе.

Микроструктура металлической основы чугуна – перлит различной степени дисперсности с включениями фосфидной эвтектики – как двойной, так и тройной. Фосфидная эвтектика распределена равномерно и изолированно, без образования сплошной и разорванной сеток. Отдельные зерна феррита, располагающиеся, как правило, у графитных включений, занимают не более 5% общей площади.

2. Оборудование для плазменной наплавки

Установка для плазменной наплавки на постоянном и переменном токе представлена на рис. 4.6.

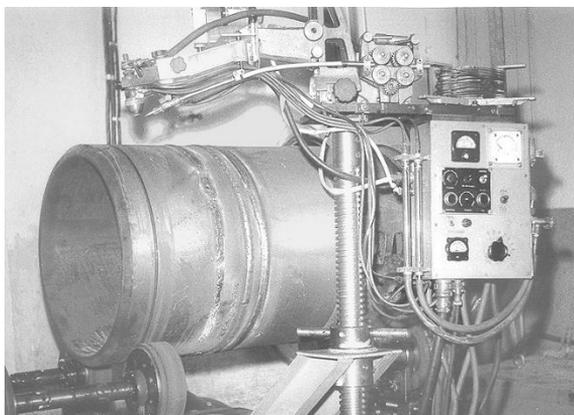


Рис. 4.6. Установка для плазменной наплавки втулок цилиндров

При наплавке на постоянном токе применяли источник питания для дуги «электрод–изделие» с падающей вольтамперной характеристикой ВДУ-504У, а для дуги «электрод–проволока» – с жесткой вольтамперной характеристикой ВДГ-301. Такая схема обеспечивает при оптимальных режимах наплавки явление саморегулирования плавления присадочной проволоки, которая должна происходить около оси плазменной струи.

При наплавке на переменном токе для увеличения напряжения холостого хода до 120 В трансформатора, питающего цепь «электрод–изделие», его вторичные обмотки переключены с параллельного соединения на последовательное. Возбуждение

дуги между электродом и соплом производится с помощью устройства поджига дуги ОБ1948-У4.

Регулирование тока «дежурной» дуги осуществляется балластным реостатом РБ-301. Поскольку вспомогательная дуга необходима только для ионизации дугового промежутка, то она маломощная (20–30 А).

Основной узел установки – плазмотрон. Представленная конструкция плазмотрона (рис. 4.7) обеспечивает устойчивое горение дуги как на переменном, так и на постоянном токе прямой полярности на токах 80–300 А.

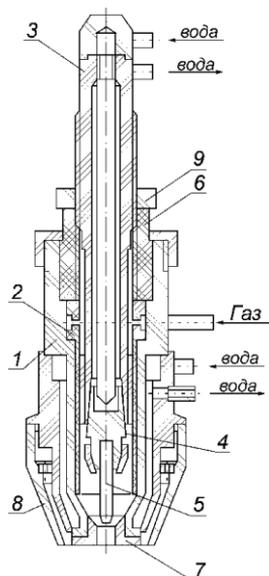


Рис. 4.7. Плазмотрон:

- 1 – корпус; 2 – втулка изоляционная; 3 – катододержатель;
4 – электрододержатель; 5 – неплавящийся электрод; 6 – втулка нажимная; 7 – сопло сменное; 8 – сопло защитное; 9 – гайка

Сопло сделано сменным для получения плазменных дуг с различной степенью обжаривания, а также для повышения долговечности горелки. В качестве неплавящегося электрода применяются лантанированные вольфрамовые прутки диаметром 5 мм. Во избежание расплавления или обгорания сопла горелки и пере-

грева катододержателя необходимо интенсивное водяное охлаждение плазмотрона. Расход охлаждающей воды для обеспечения стабильной и долговечной работы должен быть не менее 6 л/мин. Для получения ламинарного истечения защитного газового потока и хорошей защиты сварочной ванны между водоохлаждаемым корпусом горелки и соплом для дополнительной защиты устанавливаются латунные сетки. Диаметр канала сопла плазмотрона составлял 5 мм, что обеспечивало его стабильную работу на токах до 300 А. Уменьшение диаметра сопла приводит к резкому увеличению тепловой нагрузки на сопло и повышению вероятности двойного дугообразования. Увеличение диаметра сопла приводит к уменьшению концентрации тепловой энергии и к возрастанию потерь тепла в пространство, окружающее дугу и зону нагрева, вследствие чего ухудшается смачивание чугуна наплавляемым металлом и его растекаемость. Поэтому для обеспечения хорошего формирования валика ток в цепи «электрод–изделие» необходимо увеличивать.

Установка укомплектована колебательным механизмом для получения валиков требуемой ширины и уменьшения глубины проплавления. Конструкция колебательного механизма обеспечивает получение колебаний плазмотрона с частотой 0,33–1,00 Гц при амплитуде 0–40 мм. Привод механизма осуществляется от электродвигателя постоянного тока с редуктором.

Для равномерной подачи присадочной проволоки использовался подающий механизм от сварочного полуавтомата А-1197П-5УЗ, позволяющий изменять скорость подачи проволоки в пределах 0,025–0,10 м/с.

3. Технологический процесс плазменной наплавки

1. Перед наплавкой деталь проточить для устранения дефектного слоя.
2. Произвести контроль подготовленной поверхности для выявления трещин магнитной дефектоскопией.
3. Установить деталь на вращатель (если деталь цилиндрической формы).
4. Расположить установку так, чтобы расстояние от сопла до наплавляемой поверхности детали составляло 12–15 мм.
5. Установить требуемую амплитуду колебаний.

6. Включить сварочные источники питания.
7. Включить подачу воды, охлаждающей плазмотрон.
8. Установить требуемую скорость подачи присадочной проволоки.
9. Установить требуемую скорость наплавки.
10. Включить подачу газа и установить расход плазмобразующего и защитного аргона по ротаметрам типа РС-3А и РС-5.
11. Нажать кнопку «Пуск» и после зажигания плазменной дуги – отпустить. Подача проволоки и механизм колебания горелки включатся автоматически.
12. Через 5–10 с после начала подачи проволоки включить вращатель.
13. При наплавке широких поверхностей второй и последующий валики накладываются примерно на 4–5 мм предыдущего валика для обеспечения одинаковой высоты наплавленного металла.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием работы.
2. Получить образцы серого чугуна с наплавленной бронзой. Измерить ширину и высоту валика, глубину проплавления чугуна. Результаты замеров занести в отчет.
3. Рассчитать параметры режима наплавки для своего варианта (табл. 4.3). Не указанные в табл. 4.3 параметры режима плазменной наплавки выбираются на основании расчетов по математическим зависимостям для бронзы БрА9Мц2 (4.3) и для бронзы БрК3Мц1 (4.4) таким образом, чтобы получить заданную площадь проплавления чугуна. Для этого необходимо проанализировать влияние каждого параметра технологического процесса плазменной наплавки на площадь проплавления серого чугуна и выбрать величину одного из неизвестных параметров из области его варьирования (табл. 4.1). Затем рассчитывается второй неизвестный параметр и проводится проверка получаемой площади проплавления чугуна. Отклонение расчетной величины площади проплавления чугуна от заданной не должна превышать 5%.
4. Определить расчетным путем геометрические размеры наплавленного валика по формулам (4.1) и (4.2).

5. Определить величину превышения ширины валика по сравнению с амплитудой колебания плазмотрона.

6. Определить тип структуры зоны полного расплавления чугуна по площади расплавления чугуна (см. табл. 4.2).

Таблица 4.3

Варианты заданий

Вариант	Марка сплава	I_n , А	$I_{пр}$, А	V_n , м/с	Q_n , л/мин	B , мм	h , мм	F_0 , мм ²
1	БрКЗМц1	100	?	$1,4 \times 10^{-3}$?	?	?	5,3
2	БрКЗМц1	130	?	?	2,5	?	?	6,6
3	БрКЗМц1	130	?		3,3	?	?	12,0
4	БрКЗМц1	130	?	$1,4 \times 10^{-3}$?	?	?	13,8
5	БрКЗМц1	?	140	?	2,5	?	?	15,6
6	БрКЗМц1	100	?	?	3,5	?	?	17,3
7	БрКЗМц1	100	?	$1,8 \times 10^{-3}$?	?	?	19,0
8	БрКЗМц1	?	140	?	3,5	?	?	22,1
9	БрКЗМц1	?	110	$1,5 \times 10^{-3}$?	?	?	27,2
10	БрКЗМц1	130	?	?	3,5	?	?	28,2
11	БрА9Мц2	?	110	$1,4 \times 10^{-3}$?	?	?	4,6
12	БрА9Мц2	?	110	?	2,5	?	?	5,2
13	БрА9Мц2	?	110	$1,4 \times 10^{-3}$?	?	?	7,4
14	БрА9Мц2	?	?	$1,4 \times 10^{-3}$	2,7	?	?	9,3
15	БрА9Мц2	105	?	?	3,0	?	?	10,7
16	БрА9Мц2	?	125	$1,4 \times 10^{-3}$?	?	?	12,4
17	БрА9Мц2	110	?	$1,4 \times 10^{-3}$?	?	?	15,1
18	БрА9Мц2	?	120	?	3,0	?	?	19,6
19	БрА9Мц2	?	130	$1,8 \times 10^{-3}$	3,2	?	?	22,3
20	БрА9Мц2	130	?	?	3,5	?	?	27,0

5. Содержание отчета

1. Особенности плазменной наплавки и ее преимущества.
2. Результаты расчетов неизвестных параметров режима плазменной наплавки и геометрических размеров наплавленного валика.
3. Описание структур зоны полного расплавления чугуна при заданной площади проплавления и объяснение причин их образования.

4. Описание внешнего вида валика образца, полученного для исследования. Эскиз наплавленного образца с нанесенными размерами и дефектами.

5. Выводы и объяснения полученных результатов.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое чугун?
2. Что такое ледебурит, мартенсит, троостит и при каких условиях они образуются?
3. Что такое плазма?
4. Почему чугун относят к трудно свариваемым материалам?
5. Какие дефекты образуются при наплавке на чугун?
6. Какие технологические приемы применяют для получения качественного соединения при наплавке на чугун?
7. Какие бронзы относятся к антифрикционным материалам?
8. На каком токе можно наплавлять алюминиевую бронзу и почему?
9. Какова структура железистых включений в бронзе?
10. Какое влияние на антифрикционные свойства бронз оказывают железистые включения?
11. Какой фактор режима наплавки оказывает наибольшее влияние на площадь проплавления чугуна?
12. Какой фактор режима наплавки оказывает наибольшее влияние на ширину и высоту наплавленного валика?

Литература

1. Леонтьев Л.Б., Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Леонтьев А.Л. Системное проектирование технологических процессов изготовления и восстановления деталей машин: учебник для вузов [Электронный ресурс]. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. 400 с.
2. Хмелевская Б.Б., Леонтьев Л.Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами: в 3 т. Т. 1. Современные методы восстановления и упрочнения деталей. Владивосток: МГУ; Дальнаука, 2003. 283 с.

Работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПЛАВЛЕНИЯ, НАПЛАВКИ, ПОТЕРЬ НА УГАР И РАЗБРЫЗГИВАНИЕ ПРИ РУЧНОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Цель работы – опытным путем определить коэффициенты расплавления, наплавки и потерь на разбрызгивание и угар при дуговой сварке покрытыми электродами и автоматической сварке в среде углекислого газа, исследовать влияние величины сварочного тока на эффективность дуговой сварки.

1. Краткие теоретические сведения

При оценке эффективности различных способов дуговой сварки и нормировании электросварочных работ необходимо знать технологические коэффициенты: количество наплавляемого и расплавляемого в единицу времени металла, а также потери на угар и разбрызгивание.

На практике значение сварочного тока при ручной дуговой сварке ориентировочно определяется по формуле

$$I = kd_{эл}, \quad (5.1)$$

где I – сварочный ток, А; k – коэффициент (для низколегированных и углеродистых сталей $k = 30\text{--}50$ А/мм); $d_{эл}$ – диаметр электрода, мм, выбирается в зависимости от толщины свариваемых листов.

Таким образом, значение сварочного тока может выбираться в широких пределах расчетного интервала варьирования (например, при $d_{эл} = 4$ мм $I = 120\text{--}200$ А).

Интенсивность расплавления электродного металла характеризуется коэффициентом расплавления a_p – масса расплавленного металла в единицу времени, отнесенная к единице сварочного тока для данного режима сварки. С увеличением сварочного тока интенсивность теплового потока от горения дуги увеличивается пропорционально квадрату тока $q = I^2R$. Поэтому a_p изменяется по

параболическому закону. Коэффициент расплавления a_p (г/(А×ч)) вычисляется по формуле

$$\alpha_p = \frac{Q_p}{It}, \quad (5.2)$$

где Q_p – масса расплавленного электродного металла, г; I – сварочный ток, А; t – время сварки, ч.

Коэффициент расплавления α_p показывает, насколько эффективно используется электроэнергия при сварке и насколько он зависит от физико-химических свойств электродной проволоки, покрытия и защитного газа, рода тока, его полярности и ряда других факторов.

Производительность процесса сварки характеризуется коэффициентом наплавки a_n – масса наплавленного металла в единицу времени, отнесенная к единице сварочного тока для данного режима сварки. Коэффициент наплавки α_n (г/(А×ч)) определяется по формуле

$$\alpha_n = \frac{Q_n}{It}, \quad (5.3)$$

где Q_n – масса наплавленного металла, г; I – сварочный ток, А; t – время сварки, ч.

Коэффициенты расплавления и наплавки используются для определения расхода электродов и нормирования времени сварки.

Представляет также интерес коэффициент потерь ψ , характеризующий потери металла при сварке на разбрызгивание и угар. Коэффициент потерь ψ (%) определяется по формуле

$$\psi = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_p} 100, \quad (5.4)$$

где $Q_{\text{п}}$ – масса металла, израсходованная на угар и разбрызгивание, г,

или

$$\psi = \frac{a_p - a_n}{a_p} 100.$$

Величина коэффициента потерь ψ зависит от способа сварки, состава электрода и его покрытия при ручной сварке штучными электродами, от параметров режима сварки и вида свар-

ного соединения. Так, коэффициент потерь возрастает при увеличении плотности тока и длины дуги. Обычно значение ψ лежит в интервале от 1 до 3% при сварке под флюсом; от 3 до 6% – при сварке в защитных газах; от 5 до 10% – при сварке толстопокрытыми электродами; от 10 до 20% – при сварке тонкопокрытыми электродами. При значениях коэффициента потерь больше 20% сварку электродами применять нецелесообразно.

Проблема определения оптимального значения сварочного тока, при котором достигаются максимальная производительность и минимальные потери электродного металла, решается экспериментальным путем. Сварка при меньших значениях тока имеет более низкую производительность процесса вследствие снижения интенсивности расплавления электрода и увеличения потерь на разбрызгивание расплава в результате неустойчивого (прерывистого) горения дуги и крупнокапельного переноса электродного металла в сварочной дуге. С увеличением сварочного тока до определенного (оптимального) значения производительность процесса возрастает за счет устойчивого горения дуги, мелкокапельного переноса электродного металла и увеличения скорости плавления электрода. Сварка при значениях тока больше оптимальных приводит к снижению производительности процесса, так как увеличиваются потери на окисление и испарение электродного металла вследствие повышения температуры в зоне горения дуги и перегрева капель электродного металла.

2. Содержание работы

Определение коэффициентов α_n , α_p и ψ при ручной дуговой и автоматической сварке осуществляется в такой последовательности.

1. Масса электродных стержней определяется путем замера их длины (вес 10 мм стержня электрода $\varnothing 4$ мм равен 0,98 г, а $\varnothing 5$ мм – 1,53 г).

Масса электродного стержня Q (г) равна

$$Q = (0,98 \text{ или } 1,53)l,$$

где l – длина стержня в см.

Чтобы определить Q при автоматической сварке, взвешивают отрезок проволоки длиной 800–1200 мм.

2. Определяется масса пластин (Q_n'), на которые будет производиться наплавка различными электродами или на автомате АДПГ–500.

3. Устанавливается ориентировочное значение тока на сварочном источнике (при ручной сварке $I_{св} = 150–160$ А, при автоматической – $I_{св} = 150–300$ А).

4. Производится наплавка. В процессе наплавки фиксируется время сварки по секундомеру и средняя сила тока по показаниям амперметра.

5. Определяется масса оставшейся части электрода (огарка) g_o (г) взвешиванием или по формуле

$$g_o = (0,98 \text{ или } 1,53)l_o,$$

где l_o – длина огарка электрода, см.

6. После сварки пластины тщательно очищаются от шлака и брызг металла и взвешиваются (Q_n'').

7. Определяется масса расплавленного металла $Q_p = Q_3 - g_o$.

8. Определяется масса наплавленного металла $Q_n = Q_n'' - Q_n'$.

9. Время горения дуги, зафиксированное в секундах, пересчитывается в часы.

10. Определяется коэффициент расплавления по формуле (5.2).

11. Определяется коэффициент наплавки по формуле (5.3).

12. Определяется коэффициент потерь по формуле (5.4).

Необходимые приборы и материалы:

1. Весы.
2. Секундомер.
3. Пластины для наплавки из низкоуглеродистой стали размером 200×80×10.
4. Электроды с различным покрытием.
5. Сварочная проволока диаметром 1,2–1,6 мм.
6. Сварочный пост постоянного или переменного тока.
7. Сварочный автомат АДПГ-500.

3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием работы и последовательностью определения коэффициентов α_n , α_p и ψ .

2. Произвести наплавку электродом и проволокой в углекислом газе, результаты опытов свести в таблицу 5.1.

3. Определить коэффициенты α_n , α_p и ψ при сварке электродом и при наплавке в углекислом газе на автомате АДПГ-500.

4. Определить время, необходимое для наплавки 10 кг металла, при ручной и автоматической сварке, результаты расчетов свести в таблицу 5.2.

5. Определить требуемое количество электродов и присадочной проволоки для наплавки 10 кг металла при ручной и автоматической сварке. *Примечание:* учесть потери на огарки при ручной сварке, равные 10%.

6. Построить график зависимостей α_n , α_p и ψ от величины сварочного тока .

Таблица 5.1

Результаты опытов

Марка электрода или проволоки	Диаметр, мм	Ток наплавки, А	Время наплавки, ч	Длина расплавленной части электрода или проволоки, мм	Масса наплавленного металла, г
УОНИ-13/45	4	160			
Св-08Г2С	1,2	160			
Св-08Г2С	1,2	200			
Св-08Г2С	1,2	250			
Св-08Г2С	1,2	280			
Св-08Г2С	1,2	300			
Св-08Г2С	1,2	350			

7. Определить неизвестный параметр задачи согласно варианту (табл. 5.3), назначенному преподавателем (в таблице приведены известные условия задачи).

Таблица 5.2

Результаты расчетов

Вид сварки	Коэффициент наплавки α_n , г/(А·ч)	Коэффициент расплавления α_p , г/(А·ч)	Потери на угар ψ , %	Потери на огарки ΔL , %	Время наплавки 10 кг металла	Количество электродов и проволоки (кг) для наплавки 10 кг металла
Ручная сварка электродом						
Автоматическая сварка на автомате АДПГ-500						

4. Содержание отчета

1. Методика расчета α_n , α_p и ψ .
2. Таблицы результатов опытов и расчетов (примерные результаты приведены в приложении 1).
3. График влияния сварочного тока на значения технологических коэффициентов при дуговой сварке плавящимся электродом.
4. Анализ производительности и расхода электродного металла при ручной и автоматической сварке.
5. Результаты решения задачи своего варианта (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Варианты заданий

Вариант	Коэффициент наплавки α_n , г/(А·ч)	Сварочный ток I , А	Количество наплавленного металла, Q_n , г	Время сварки, час	Производительность наплавки, P_n , г/ч
1	10	160	-	8	?
2	12	300	?	2	?
3	?	120	400	0,3	1440-
4	14	?	-	0,5	2300
5	?	?	600	?	3000
6	8	?	1440	1,5	?
7	6	140	?	5	?
8	18	400	?	0,4	?
9	?	600	13000	1,6	?
10	16	?	-	0,8	5600
11	?	?	10000	?	800
12	9	?	5300	3	?
13	10	?	20700	?	2300
14	8,5	120	?	1,5	?
15	?	180	?	?	950
16	15	?	3600	1,2	?
17	?	?	1400	?	2800
18	13	?	?	0,1	32500
19	12,5	170	?	2,6	?
20	?	?	?	5	4300

5. Контрольные вопросы

1. Чем объясняется разница значений α_n , α_p и ψ при ручной и автоматической сварке?

2. С какой целью при определении коэффициента наплавки поверхность наплавленной пластины очищают от металлических брызг, образовавшихся при расплавлении электрода?

3. Какие критерии для оценки тех же показателей могли бы вы предложить при сравнении различных по характеру способов сварки (например, плазменной и дуговой)?

4. Какие параметры режима и техники сварки влияют на разбрызгивание электродного металла и качество сварных швов?

5. Почему производительность автоматической сварки в защитных газах выше, чем при ручной сварке плавящимся электродом с покрытием?

6. Для чего необходимо знать величины коэффициентов расплавления и наплавки?

7. Как влияет величина сварочного тока на значения технологических коэффициентов при дуговой сварке плавящимся электродом?

Литература

1. Коэффициент наплавки электродов. URL: <https://svarkaipayka.ru/material/elektrodyi/koeffitsient-naplavki-elektrodov.html> (дата обращения: 02.03.2021).

2. Разбрызгивание при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и способы его снижения. URL: <http://weldzone.info/technology/teoriya-svarki/493-pazbryzgivanie-pri-svarke> (дата обращения: 02.03.2021).

3. Щекин В.А. Технологические основы сварки плавлением: учебное пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2009. 345 с. URL: <http://lib.-dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:381607&theme=FEFU> (дата обращения: 02.03.2021).

Работа № 6

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ КИБ

Цель работы – ознакомление с сущностью процесса, оборудованием и технологическими возможностями метода конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ).

1. Общие положения

Установки для ионно-плазменного нанесения однослойных и многослойных покрытий способом конденсации вещества с ионной бомбардировкой предназначены для упрочнения инструмента и деталей широкой номенклатуры диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм. Установки также могут использоваться при напылении коронок зубов и при декоративном напылении на изделия из стекла и металла, фарфора и пластмассы.

Физический принцип метода КИБ основан на испарении и частичной ионизации паров металла с помощью электрической дуги, горящей в вакууме. При необходимости в камеру поступает газ-реагент. На деталь подается отрицательный потенциал, под действием которого осуществляется ускорение ионов напыляемого материала. В результате ионы бомбардируют твердое тело-конденсат или нейтральные атомы, находящиеся на поверхности конденсата. Особенность метода КИБ – использование двух мощных потоков частиц: нейтральных атомов и ионов, причем происходит как осаждение конденсата, так и его ионная обработка.

Продукты эрозии, разлетающиеся с поверхности катода, содержат микрокапельную (размеры частиц от нескольких микрометров и менее), паровую и ионизированную (ионы с различной кратностью заряда) фазы, каждая из которых имеет свои резко отличающиеся величины скоростей (энергий) разлета. Средняя энергия ускоренных на микропятнах ионов изменяется в пределах 10–100 эВ/атом. Нанесение покрытий производится при температуре в камере от 150 до 400 °С и выше.

Для получения на изделия износостойкого покрытия необходимо нанести слой толщиной 4–10 мкм, время напыления должно быть от десяти до нескольких десятков минут.

В качестве износостойких покрытий наиболее часто применяют нитриды титана и молибдена. Нитриды металлов обладают высокой твердостью (например, твердость нитрида титана – 22000–26000 МПа), прочностью и повышенной хрупкостью при температурах ниже 200–400 °С. На нитриды практически не действуют водяные пары, а при комнатной температуре их не растворяют кислоты и щелочи.

Данный метод обладает рядом преимуществ:

- простая технология получения интерметаллидов, а также нитридов и карбидов;
- толщина покрытий может варьироваться от 0,01 до 20 мкм;
- равномерное нанесение покрытий на детали сложной геометрической формы;
- покрытие не нуждается в финишной обработке.

Покрытия, полученные методом ионно-плазменного напыления, могут быть использованы для самых различных целей (табл. 6.1): для снижения различных видов изнашивания, снижения коэффициента трения, повышения противозадирных свойств и исключения схватывания, в том числе при эксплуатации в условиях повышенных температур, и т.д.

Таблица 6.1

Состав и области применения разработанных покрытий

Состав покрытия	Назначение покрытия
Хром, никель, медь	Коррозионностойкие покрытия (применяются для замены покрытий, наносимых гальваническими и химическими методами)
Нитрид (карбид) титана, нитрид хрома, нитрид циркония, нитрид (карбид) титана + нитрид (карбид) хрома, нитрид (карбид) циркония + нитрид (карбид) хрома, нитрид (карбид) титана + нитрид (карбид) циркония	Износостойкие покрытия для обрабатываемого инструмента при обработке сталей, сплавов и полимеров

Состав покрытия	Назначение покрытия
Нитрид титана, нитрид титана + нитрид хрома, хром, нитрид титана + нитрид молибдена, молибден	Износостойкое покрытие для узлов трения деталей машин, в том числе изготовленных из титановых сплавов и работающих без смазок в условиях вакуума
Хром, нитрид титана	Антиадгезионные покрытия, предохраняющие детали от схватывания и задира

2. Особенности формирования покрытий

При поджиге дуги в вакууме на торцевой поверхности катода возникают быстро перемещающиеся катодные пятна, но через 1,0–0,5 мс скорость перемещения замедляется. На катодных пятнах начинается эрозия материала катода, и формируется поток, состоящий из ионной, паровой и микрокапельной фазы. Продукты эрозии разлетаются практически изотропно над поверхностью катода, а из-за перемещения катодного пятна и наличия до 10 катодных пятен одновременно на поверхности эти продукты эрозии образуют плазменную струю, уходящую от поверхности катода. Система магнитных и электрических полей дополнительно перерабатывает продукты эрозии, увеличивая долю ионной фазы и кинетическую энергию ионов, а также коллимирует плазменную струю. На выходе с катода состав плазменной струи оценивается значениями: доля ионной фазы – 30–95%, паровой фазы – 5–65%, микрокапельной фазы – от 20 до 0,5%. Кинетическая энергия ионов достигает сотен электрон-вольт.

Закономерности осаждения на подложку. Плазменная струя с частицами напыляемого материала проходит вакуумную камеру и взаимодействует с поверхностями конденсации, образуя покрытие. На деталь подается отрицательное напряжение, получившее название опорного напряжения в режиме напыления и высокого напряжения – в режиме ионной очистки поверхности. Ионы плазмы под действием напряжения ускоряются в дебаевском слое около поверхности, где нейтрализуются и, ударяясь о поверхность, передают ей свою кинетическую энергию в районе точки соударения. В зависимости от величины кинетической энергии ионов на поверхности протекают различные процессы. Их характеристики при следующих значениях энергии:

- меньше 10 эВ – процессы имеют в основном термическую природу;
- больше 10 эВ – начинают сказываться процессы с нетермической природой;
- выше пороговой энергии распыления – начинаются процессы ионного травления поверхности;
- при превышающих критическую энергию внедрения – ионы начинают внедряться в кристаллическую решетку,
- выше энергии смещения атомов кристаллической решетки – в твердом теле возникают каскады смещения, характерные для ионной имплантации.

При этом активно протекают следующие процессы: образование активных центров роста покрытия, выбивание с поверхности атомов, не попавших в минимумы потенциальной энергии, ускоренная поверхностная диффузия, нетермическая диссоциация адсорбированных соединений, нагрев поверхности и т.д.

Для получения соединений используют реактивные газы. Так, при использовании титанового катода и газа азота можно получать нитрид титана. Причем при увеличении опорного напряжения количество неметалла (азота), вступающего в реакцию нитридообразования, возрастает, и при некотором критическом значении образуется нитрид стехиометрического состава. Образование такого соединения происходит в результате диссоциативной хемосорбции азота. Качество покрытия определяется качеством процесса ионной очистки детали и зависит от технологических параметров: тока дуги, напряжения, давления газа, температуры детали, во многом – от конструкции генератора плазмы, особенностей детали и технологической оснастки, а также от химической чистоты используемых материалов.

3. Краткое описание установки типа ННВ-6.6-И1 для нанесения покрытий методом КИБ

Установка (рис. 6.1, 6.2) состоит из следующих основных узлов: корпус; дверца; электрод токоподводящий (электродуговой испаритель); система водоохлаждения; вакуумная система; механизм вращения; основание; источники питания.



Рис. 6.1. Установка ННВ-6.6-И1
для ионно-плазменного нанесения покрытий

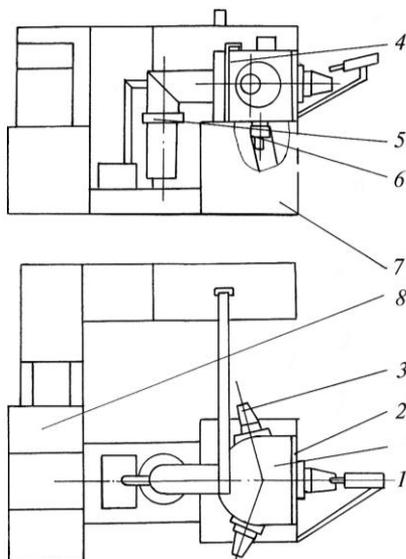


Рис. 6.2. Общий вид установки ННВ-6.6-И1:
1 – корпус; 2 – дверца; 3 – электрод токоподводящий; 4 – система
водоохлаждения; 5 – система вакуумная; 6 – механизм вращения;
7 – основание; 8 – источники питания

Корпус имеет вид горизонтального цилиндрического сосуда с боковым проемом, который закрывает дверца. Выполнен с двойными стенками, образующими полость водоохлаждения

(или подогрева при откачке камеры). На боковых стенках корпуса установлены два токоподводящих электрода. Корпус с дверцей образует вакуумную камеру. Дверца имеет двойные стенки, которые образуют полость водоохлаждения. На дверце установлен третий токоподводящий электрод, который может быть размещен и на верхней плоскости корпуса. Электрод токоподводящий, представляющий собой электродуговой испаритель, состоит из корпуса и держателя, которые электрически изолированы друг от друга, и защитного кожуха.

Система водоохлаждения состоит из водораспределительной панели и трубопроводов. В панели предусмотрена воронка для визуального контроля протока воды, а также датчики сигнализаторов уровня. Расход воды регулируют вентили, установленные на коллекторе.

Вакуумная система обеспечивает создание в рабочей камере необходимого рабочего давления. Регулирование остаточного давления выполняется с помощью автоматического регулятора напуска рабочего газа.

Механизм вращения имеет электромеханический привод, состоящий из электродвигателя постоянного тока и редуктора, соединенных клиноременной передачей. Электродвигатель позволяет изменять число оборотов и направление вращения.

Основание предназначено для монтажа на нем камеры, вакуумной системы, системы водоохлаждения и подогрева. В тумбе основания расположен механизм вращения и блоки поджига дуги. Электродвигатель установлен на плите, которая крепится к тумбе основания.

Вакуумная система, панель водоохлаждения расположены на площадке основания. В площадке под съемным листом размещены провода цепей управления и силовые цепи.

Электрическая часть служит для электроснабжения установки и управления технологическим процессом. Электроснабжение производится от трехфазной сети напряжением 380 В, цепи управления питаются напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

Высоковольтный источник питания, включающий тиристорный преобразователь напряжения, высоковольтный трансформатор и выпрямитель, обеспечивает регулирование напряже-

ния в пределах от 100 до 1500 В. Источник опорного напряжения, включающий в себя тиристорный преобразователь (общий с высоковольтным источником), трансформатор и выпрямитель, обеспечивает регулирование напряжения от 20 до 280 В.

Для получения при нанесении покрытий нитридов металла в установке предусмотрена система напуска рабочего газа (азота). Система состоит из клапана с электромагнитным приводом, клапана напускного регулируемого (автоматического натекателя) и электронного блока управления.

Основные технические характеристики установки.

Потребляемая мощность, кВт	50
Напряжение питающей сети, В	380/220
Скорость осаждения покрытия (нитрида титана), мкм/ч	от 13 до 40
Номинальный ток высоковольтного источника питания подложки, А	20
Диапазон плавного регулирования величины напряжения высоко-вольтного источника питания подложки, В	от 100 до 1500
Диапазон плавного регулирования величины напряжения низко-вольтного источника питания подложки, В	от 20 до 280
Максимальная нагрузка на шпиндель, кг	110
Диапазон плавного регулирования частоты вращения стола (в обе стороны), мин ⁻¹	от 0,5 до 12
Время откачки камеры до рабочего вакуума, не более, мин	12
Длительность цикла упрочнения инструмента, ч	от 2 до 2,5
Размеры рабочей камеры, мм:	
диаметр	600
высота (длина)	600
Количество электродов токоподводящих (испарителей)	3
Остаточное давление в камере, Па (мм рт. ст.)	от $6,65 \cdot 10^{-3}$ до $6,65 \cdot 10^{-1}$ (от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-3}$)
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч, не более	2
Масса установки, т	3,0

Установки данного типа позволяют наносить упрочняющие одно- и многослойные покрытия на детали диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм из металлов конструкционной, инструментальной и легированной сталей.

К недостаткам существующего оборудования можно отнести следующее:

1. Наличие в плазменном потоке микрокапельной фазы.
2. Недостаточная степень ионизации плазменного потока и большая дисперсия распределения ионов по энергиям.
3. Недостаточно высокая производительность процесса напыления.
4. Недостаточные скорость откачки воздуха и величина вакуума.
5. Трудности в получении равномерного по толщине покрытия на деталях сложной формы.
6. Сложность получения многокомпонентных покрытий, так как при напылении из различных катодов возникает микрополосчатость покрытия.
7. Недостаточная степень автоматизации и контроля параметров процесса.

4. Технологический процесс ионно-плазменного напыления

1. Подготовка детали под напыление. Покрываемые детали должны иметь шероховатость поверхности не более $Ra = 1,25$ мкм, а на резьбе не выше $Ra = 2,5$ мкм.

Все подготовительные операции проводятся с целью очистки поверхностей детали от загрязнений органического и неорганического характера. От полноты проведения очистки зависит прочность сцепления покрытия с деталью и качество самого покрытия.

Наиболее эффективную подготовку поверхности от органических загрязнителей обеспечивает обработка в ультразвуковой ванне сначала бензином БР-1 («Галоша»), затем этиловым спиртом. Далее проводится визуальный контроль качества подготовки поверхности с помощью лупы или бинокулярного микроскопа. На поверхностях деталей не должно быть следов и пятен от влаги и других загрязнений, а также ворсинок ткани, так как они инициируют микродуговые разряды в процессе ионной

очистки. Следует отметить, что время нахождения деталей в чистой закрытой стеклянной или металлической таре после мойки не должно быть более четырех часов. При превышении допустимого времени хранения деталей необходимо повторить мойку в спирте.

2. Установить деталь в центре рабочей камеры на вращающемся столике. Вместе с деталями обычно загружается образец-свидетель для замера твердости и толщины покрытия. В качестве образца-свидетеля могут быть использованы бракованные детали.

3. Произвести откачку воздуха из рабочей камеры до давления 3×10^{-5} мм рт. ст.

4. Произвести очистку детали тлеющим разрядом при напряжении на подложке 2,2 кВ.

5. Подать в камеру азот газообразный до давления 5×10^{-3} мм рт. ст.

6. Произвести очистку инструмента и детали тлеющим разрядом в течение 1–5 мин.

7. Произвести откачку газа из камеры до давления 5×10^{-5} мм рт. ст.

8. Установить напряжение 1,1 кВ на подложке и включить испаритель (ток дуги 70–125 А).

9. Произвести нагрев детали до температуры 200 °С ионной обработкой в течение 2–3 мин. Температура нагрева контролируется пирометром.

10. Установить напряжение на подложке 30–150 В и в течение 10 мин произвести осаждение нитрида титана на деталь (ток дуги 90–100 А).

11. Охладить деталь в камере при открытом высоковакуумном затворе в течение 10–15 мин.

12. Разгерметизировать камеру, выгрузить деталь и охладить ее до 30–35 °С.

13. Проверить прочность сцепления покрытия с основой методом царапания остро заточенной пластинкой или сверлом с твердостью 63–65 HRC, после царапания след должен удаляться стирательной резинкой. Если после этого на покрытии остается след, качество считается неудовлетворительным.

Внешний вид иглы распылителя форсунки судового дизеля с покрытием нитрида титана представлен на рис. 6.3.



Рис. 6.3. Внешний вид иглы распылителя форсунки дизеля с покрытием нитрида титана

Металлографические исследования напыленных образцов позволили установить (рис. 6.4), что покрытие имеет практически одинаковую толщину $4,9 \pm 0,1$ мкм, граница соединения четкая и ровная, без взаимного проникновения материалов.

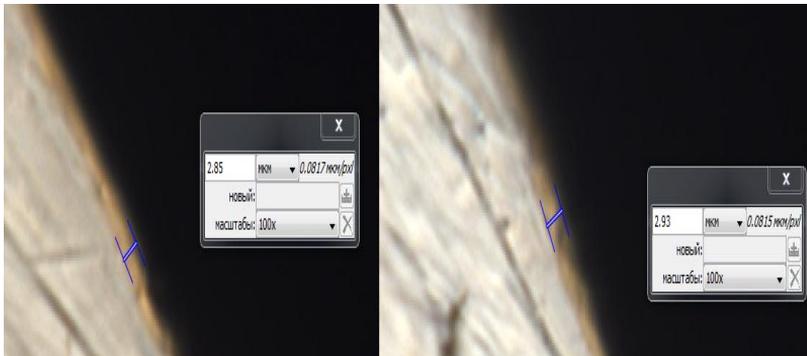


Рис. 6.4. Микршлиф иглы распылителя после напыления

5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием работы.
2. Получить образцы с покрытием нитрида титана и описать их внешний вид.
3. Определить параметры структуры поверхности на оптическом профилометре ContourGT-I 3D.

4. Определить величину микротвердости покрытия на микротвердомере Shimadzu DUN-211.

6. Содержание отчета

1. Технологический процесс нанесения покрытия методом КИБ.

2. Основные технологические параметры режима формирования покрытия.

3. Эскиз детали с описанием внешнего вида покрытия.

4. Результаты измерения параметров структуры поверхности, микротвердости и качества сцепления покрытия с основой.

5. Выводы (перспективная область применения покрытий на основе нитрида титана).

7. Контрольные вопросы

1. Опишите процесс подготовки детали под напыление.

2. Назовите величину напряжения на подложке для очистки детали тлеющим разрядом.

3. Зачем в рабочую камеру подается газообразный азот?

4. Какими физико-механическими свойствами обладает нитрид титана?

5. Почему процесс нанесения покрытия ведется в вакууме?

6. Зачем необходим предварительный подогрев детали перед нанесением покрытия?

7. На каком физическом принципе основан процесс нанесения покрытий?

8. Из каких фаз формируется поток, идущий с катодов?

9. Назовите преимущества метода ионно-плазменного напыления покрытий.

10. Назовите недостатки оборудования для ионно-плазменного напыления методом КИБ.

11. Назовите максимальные размеры детали, на которую можно наносить покрытие на уставках типа ННВ–6.6–И1.

12. Назовите диапазон регулирования величины напряжения низковольтного источника питания подложки.

13. Назовите диапазон регулирования величины напряжения высоковольтного источника питания подложки.

Литература

1. Ионно-плазменное напыление и установки ионно-плазменного напыления. URL: [http:// inlinescom.ru](http://inlinescom.ru) (дата обращения: 20.03.2021).

2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Metallurgia, 1992. 432 с.

3. Особенности ионно-плазменного напыления и характеристика устройства. URL: [URL: http://pens-rf.ru](http://pens-rf.ru) (дата обращения: 29.03.2021).

Работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Цель работы – ознакомление с оборудованием и технологическими особенностями процесса плазменного напыления.

1. Особенности процесса плазменного напыления

Плазменная струя представляет собой высокотемпературный источник нагрева, поэтому в процессе плазменного напыления можно получать покрытия не только из легкоплавких, но и тугоплавких материалов (от алюминиевых сплавов до керамики). В потоке плазменной струи частицы материала химически не разлагаются и не испаряются при высоких температурах.

Источником энергии газотермического плазменного напыления является мощный дуговой разряд, при котором температура дуги колеблется в диапазоне 5230–15700 °С. Электрическая дуга горит между неплавящимся катодом и водоохлаждаемым медным анодом-соплом, через который непрерывно под давлением прокачивается плазмообразующий газ. Этому газу отводится роль рабочей среды.

Мощность плазмотрона при неизменном токе разряда зависит от конструкции его межэлектродного пространства и от рода плазмообразующего газа (носителя газотермически диспергируемых частиц покрытия): аргона, азота, водорода, гелия и смесей этих газов, а также воздуха, смеси воздуха с природным газом и т.д.

Плазменное покрытие отличается от других газотермических покрытий улучшенными *эксплуатационными показателями*, но сама возможность нанесения плазменного покрытия и его эксплуатационная надежность реализуется только в условиях современного производства с высоким уровнем культуры современных технологий, участвующих в технологической цепочке плазменного напыления.

Недостатки метода плазменного напыления:

– токсичные воздействия на органы дыхания окислов азота и озона, образующихся под влиянием ультрафиолетового

излучения из воздуха при выходе плазменной струи из плазмотрона;

- интенсивные звуковые колебания, образующиеся из-за большой скорости истечения плазменной струи;

- загрязнение воздуха аэрозолями материалов, применяемых при напылении;

- ультразвуковые и инфракрасные излучения, генерируемые плазмой.

Исходные технологические материалы плазменного напыления – порошки металлов, сплавов, оксидов, твердых сплавов, композиционных материалов, а также проволоки из различных металлов и сплавов. Однако получение требуемого газотермического покрытия, функциональные (эксплуатационные) характеристики которого отвечают физико-механическим возможностям напыляемых материалов, возможно только в случае соблюдения ряда технических условий, предъявляемых к напыляемым материалам и способу их доставки в зону газотермического диспергирования. А именно: неизменность химического и гранулометрического состава, стабильность массовых соотношений транспортирующего газа и напыляемого порошка, подаваемых в зону напыления.

Качество покрытия характеризуется прежде всего соответствием состава покрытия составу напыляемого материала, адгезионной (между покрытием и подложкой) и когезионной (между частицами покрытия) прочностью, а также плотностью покрытия.

Предварительная обработка напыляемой поверхности необходима для образования у основы (напыляемой поверхности) активированного состояния применительно к тем техническим условиям, которые определяются методом газотермического напыления. Процесс активации основы можно классифицировать на термическую, газодинамическую и специальную предварительную обработку. *Предварительная обработка* напыляемой поверхности предшествует термической и газодинамической активации основы, очищая ее от следов химических загрязнений, которые являются пассивирующим фактором адгезионного сцепления. Кроме того, эта обработка стимулирует активацию материала основы, т.е. увеличивает поверхность контакта (что оце-

нивается величиной шероховатости ее поверхностного слоя) и сохраняет в течение определенного промежутка времени величину поверхностной энергии, которая увеличивает адгезию основы с напыляемой частицей. В общем случае предварительная обработка напыляемой поверхности начинается с ее промывки в моющих растворах или органических растворителях. Затем следует просушка – продувкой горячим обезжиренным и сжатым воздухом, прогревом пламенем газовой горелки до температуры 200 °С, прокаливанием в термической печи и т.п. в зависимости от состояния пористости обезжиренной поверхности и технических условий на выполнение газотермического напыления.

Диагностика обезжиренной поверхности для выявления ее целостности методами визуального обследования, ультразвуковой и магнитной дефектоскопии позволяет выявить в поверхностном слое основы наличие усталостных трещин, пор, раковин и прочих дефектов, которые снижают величину нормативного запаса прочности до критической. Если основа с развитой системой усталостных трещин бракуется обязательно, то другие поверхностные дефекты оцениваются с позиции их влияния на величину допускаемого запаса прочности.

Предварительная механическая обработка поверхности основного материала не только активирует основу, снижая энергию поверхностных связей вещества конструкционного материала, но и создает необходимые технологические предпосылки надежного адгезионного сцепления частиц напыляемого материала с поверхностью основного металла посредством образования методами механической обработки необходимой ей шероховатости, повышающей площадь контакта напыляемых частиц с основой. Кроме того, механическая предварительная обработка позволяет исправить несовершенства геометрической формы поверхности основного материала, удалить поверхностные дефекты, образовавшиеся в процессе эксплуатации детали и препятствующие сцеплению покрытия с основой. В общем случае цель совокупности операций механической предварительной обработки:

- 1) образование необходимой шероховатости поверхности основного материала;
- 2) удаление дефектов поверхности основного материала;

3) удаление с поверхности основного материала следов глубокого диффузионного загрязнения, невосприимчивого к воздействию моющих средств или химической обработки травлением.

Методы механической предварительной обработки поверхности основного материала: струйно-абразивная, нарезание резьбы, ультразвуковая, электроэрозионная и т.д.

Основным видом подготовки поверхности основного материала под газотермическое напыление является струйно-абразивная обработка корундом: благодаря его простоте, универсальности и высокой эффективности. В месте удара абразивных частиц основа разрушается и обнажается так называемая ювенильная поверхность материала, отличающаяся очень высокой активностью. Ювенильные поверхности двух твердых материалов, приведенные в соприкосновение, при сжатии способны прочно соединяться даже при комнатной температуре. Предварительная подготовка поверхности механическими методами влияет не только на активацию, но и резко увеличивает скорость диффузии в контакте между материалом покрытия и основы. Вследствие обработки поверхностный слой насыщается структурными дефектами и приобретает аномальные физико-химические свойства, влияющие на кинетику диффузионных процессов.

При струйно-абразивной обработке поверхности изделия возможно некоторое ее загрязнение внедренными частицами абразивного материала. Острые края частиц абразивного материала, которыми частица ударяется о поверхность, откалываются при обработке и остаются на поверхности изделия. При струйно-абразивной обработке ответственных деталей лучше всего применять электрокорунд, который меньше загрязняет поверхность. Следует учитывать, что зерна корунда и карбида кремния легко разрушаются, поэтому при подготовке ответственных изделий их повторное использование нежелательно.

После обработки поверхности рекомендуется как можно быстрее наносить покрытие. Перерыв между операциями должен быть не более 1 ч.

В последние годы для активизации поверхностного слоя начали применять ультразвуковую обработку, которая производится специальным резцом и может быть совмещена с процес-

сом напыления. Из всех видов предварительной обработки ультразвуковая обработка позволяет получить наиболее высокие параметры прочности сцепления покрытия с основой, так как не только активизирует поверхностный слой металла, но и создает в нем сжимающие остаточные напряжения.

При выборе состава покрытия необходимо наряду с эксплуатационными требованиями учитывать и его совместимость с материалом напыляемой детали.

Под совместимостью понимают принципиальную возможность адгезионного взаимодействия материалов покрытия и напыляемой детали. Кроме того, в совместимых покрытиях физико-химические процессы на границе раздела в процессе эксплуатации не приводят к нарушению стабильности исходного состояния композиции. Например, исключается образование гальванических пар, хрупких фаз и т.д.

Для повышения качества покрытий часто прибегают к напылению подслоев. Необходимость в этом возникает при неудовлетворительной совместимости материала покрытия с напыляемым изделием. Особенно часто несовместимость проявляется в низкой адгезионной прочности; образовании на границе раздела промежуточных фаз, снижающих эксплуатационные свойства напыленных деталей; большом различии в температурных коэффициентах линейного расширения материала покрытия и детали и т.д. Исходя из этого выбирают материал промежуточного слоя.

Важным показателем для материала подслоя является энтальпия напыляемых частиц. С увеличением энтальпии повышается контактная температура и, соответственно, адгезионная прочность. Практика показала хорошие результаты при использовании для промежуточных слоев тугоплавких металлов (в расплавленном состоянии энтальпия молибдена составляет 105 Дж/моль, вольфрама – 130 Дж/моль), а также композиционных терморегулирующих порошков, например плакированных или конгломерированных частиц никеля и алюминия.

Терморегулирующие материалы используют энергию плазменного факела для интенсивного агрегатно-фазового превращения веществ, входящих в частицы композиционных порошковых материалов, и синтеза нового химического

вещества на базе взаимодействия исходных. При нагреве этих порошков протекает химическая реакция между компонентами с выделением теплоты, в результате чего повышается адгезионная прочность подслоя с подложкой и когезионная прочность покрытий. Наиболее значительные тепловые эффекты наблюдаются в металлокерамических композициях, у которых прирост температуры превышает 2000 °С. В системах «металл–тугоплавкое соединение» прирост температуры напыляемых частиц достигает 700 °С и выше. Основные марки терморреагирующих порошков и их химический состав приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Терморреагирующие порошки

Марка	Содержание элементов, %					
	Ni	Al	Cr	Si	Fe	Другие элементы
ПТ-Ю5Н	Осн.	4,5–5,5	–	–	–	–
ПТ-Ю10Н	Осн.	8,5–10	–	–	–	–
ПТ-НА-01 (25000; 50000)	Осн.	4,0–5,5	–	–	–	–
ПТ-19Н-01 (19910)	Осн.	0,8–1,3	9–14	1,2–3,2	2–5	1,7–2,8 В 0,3–0,6 С
ПН74Х19Ю 5-К	71–77	4–6	18–20	–	–	Ост. – связка
ПН62Х16Ю 20-К	59–69	19–21	15–17	–	–	Ост. – связка
ВНпА-15	13–17	1–3	–	–	–	WC ост.
ПНА-75	73–77	Ост.	–	–	–	–
ПНА-80	78–82	Ост.	–	–	–	–
ПТ-19НВК- 01 (19112)	Осн.	5–8	5,8–11,3	0,9–2,6	0,9–2,6	1,2–2,0 В; 0,8–1,3 С; 15,4–19,2 WC

Примечание. В скобках приведены обозначения аналогов – порошков фирмы *Castolin*.

2. Оборудование для плазменного напыления

Для плазменного напыления выпускаются специализированные (для определенного типа материалов или изделий) и универсальные установки.

Установки для напыления состоят из четырех основных элементов – источника питания, плазмотрона, дозирующего устройства для подачи материала и пульта управления. Наиболее широко у нас в стране применяются такие установки, как УПУ-3Д (табл. 7.2), АРП-403, ОБ1255, УН-108 (табл. 7.3) и др. Схема плазменной установки УПУ-3Д приведена на рис. 7.1.

Таблица 7.2

Основные технические характеристики установки УПУ-3Д

Напряжение питающей сети, В	380±10
Мощность плазмотрона, кВт	25
Плазмообразующие газы:	Азот, аргон, гелий, водород и их смеси
Расход плазмообразующих газов, м ³ /ч	2–4
Расход охлаждающей воды, дм ³ /мин	5

Плазменная установка УН-108 разработана для производства газотермических покрытий с использованием в составе плазменного факела распространенных промышленных горючих газов, в том числе пропан-бутана, азота, воздуха и их смесей. Плазмотрон имеет циркониевый электрод.

Таблица 7.3

Основные технические характеристики установки УН-108, УХЛ-4

Напряжение питающей сети, В	380±10
Мощность плазмотрона, кВт	120
Плазмообразующие газы	Воздух, азот, пропан-бутан
Расход плазмообразующих газов, м ³ /ч	3–10
Расход охлаждающей воды, дм ³ /мин	> 10

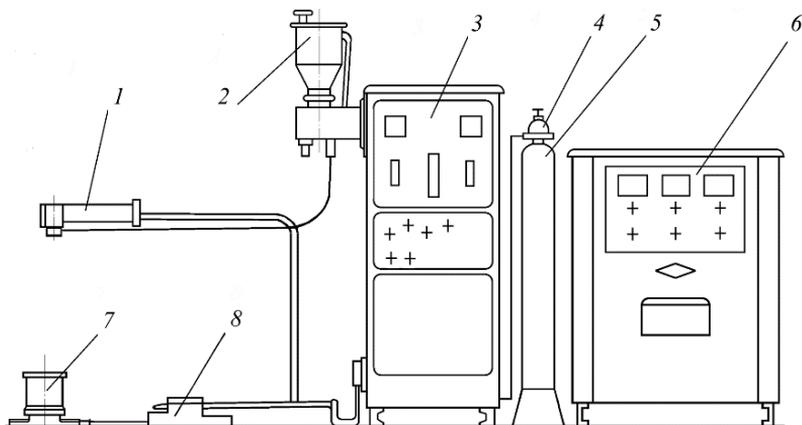


Рис. 7.1. Схема установки для плазменного напыления УПУ-3Д:
 1 – плазмотрон ПП25; 2 – дозатор роторного типа; 3 – шкаф управления; 4 – редуктор кислородный; 5 – баллон с плазмообразующим газом; 6 – источник питания ИПН-160; 7 – насос для подачи охлаждающей воды; 8 – педаль пуска установки

Плазмотроны для напыления предназначены для нагрева и разгона частиц напыляемого материала. От большинства других плазмотронов они отличаются тем, что дуга в них не переносится на напыляемое изделие, а анодом, как правило, служит медное водоохлаждаемое сопло. При этом тепловые потоки в анод составляют 20–30 % подводимой мощности, что требует наличия в установке блока охлаждения.

Свойства покрытий, формирующихся в процессе плазменного напыления, в значительной степени зависят от конструкции и характеристик плазмотрона как рабочего инструмента напыления, который при длительной непрерывной работе и высокой энергетической эффективности должен обеспечить стабильность параметров плазменного потока, иметь надежную конструкцию и быть простым в эксплуатации.

Наибольшее распространение получили плазмотроны с тангенциальной подачей плазмообразующего газа: принципиальная схема плазменной горелки представлена на рис. 7.2. Плазмотрон выполнен по схеме электродугового плазменного устройства с секционированной межэлектродной вставкой. На

входе плазмотрона установлен катод с гафниевой вставкой, а на выходе – цилиндрический анод. Между ними установлены секции межэлектродной вставки. Сжатый воздух подается со стороны катода тангенциально. Плазмотроны работают на постоянном токе и имеют самоустанавливающуюся или частично фиксированную (уступ в сопле) длину дуги, что обеспечивает простоту их конструкции и высокую надежность.

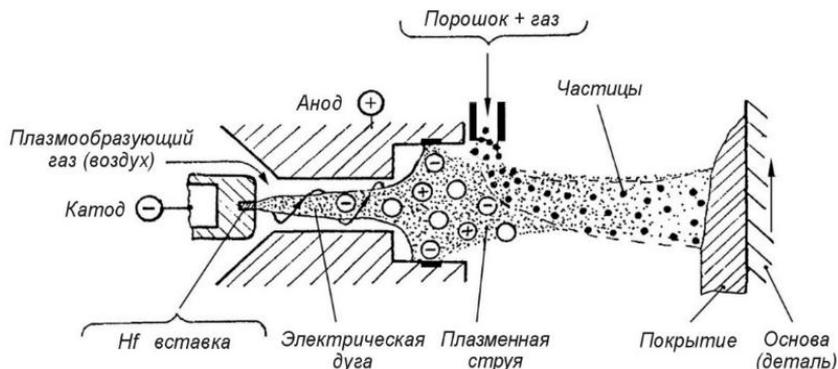


Рис. 7.2. Схема плазмотрона ПН-В1

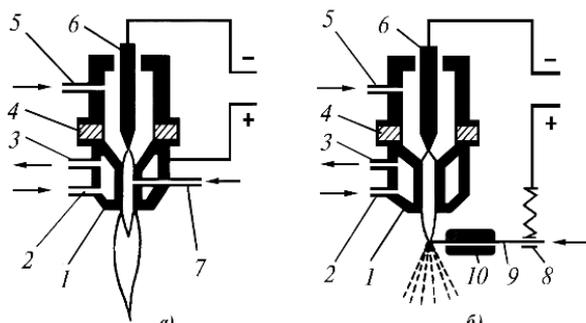


Рис. 7.3. Схема процесса плазменного напыления:

- а – для работы на порошках; б – для работы на проволоке; 1 – сопло плазменной горелки (анод); 2, 3 – подвод и отвод охлаждающей воды;
- 4 – изолирующее кольцо; 5 – подвод плазмообразующего газа;
- 6 – неплавящийся электрод (катод); 7 – подача присадочного порошка;
- 8 – контактное устройство для проволоки; 9 – напыляемая проволока; 10 – направляющая трубка для проволоки

В плазменных горелках плазменную струю получают путем вдувания в электрическую дугу, возбужденную между электродами, плазмообразующего газа и его газодинамического обжата в канале водоохлаждаемого сопла. Принципиальная схема электропитания плазменной горелки представлена на рис. 7.3. По специальному каналу в плазменную струю вдувается напыляемый порошок, частицы которого, нагреваясь, одновременно приобретают высокую скорость. При подаче напыляемого материала в виде проволоки или стержня легче осуществить ввод материала в центр струи и гарантировать его расплавление.

Наиболее простые и надежные плазмотроны типа ПП25 (его конструкция представлена на рис. 7.4) применяются на установках УПУ-3Д.

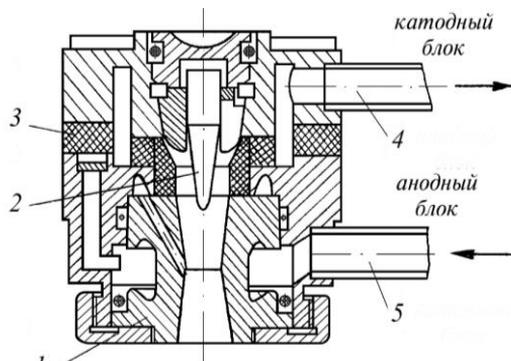


Рис. 7.4. Конструкция плазменного распылителя:
 1 – сопло (анод медный); 2 – вольфрамовый катод; 3 – изолятор;
 4 – охлаждающая вода; 5 – подвод постоянного тока
 и охлаждающей воды

Ресурс непрерывной работы плазмотронов определяется стойкостью электродного узла и сопла – анода. Ресурс работы электродов зависит от рода плазмообразующего газа и подводимой мощности и при мощности 30 кВт составляет 20–25 ч. Известно, что привязка анодного пятна к постоянному месту канала сопла анода ухудшает качество и стабильность свойств покрытий. Особенно часто такая привязка имеет место в результате даже небольшого эрозийного износа анода плазмотрона.

Разработка новых типов и моделей плазмотронов ведется в направлении увеличения их мощности, надежности и производительности, а также повышения качества покрытий. В этом смысле представляет интерес плазмотрон С2В3 (рис. 7.5), работающий на воздухе с ламинарным истечением плазменной струи.

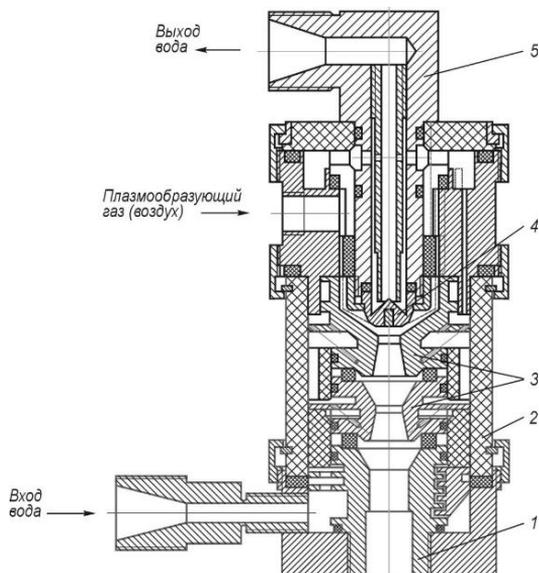


Рис. 7.5. Конструкция плазмотрона С2В3:
 1 – анод-сопло; 2 – корпус; 3 – секция межэлектродной вставки;
 4 – катод с гафниевой вставкой; 5 – катододержатель

3. Указания по выбору технологии

В целом энергетические параметры плазменной струи определяют нагрев и ускорение напыляемых частиц.

Параметры потока частиц при плазменном напылении характеризуются следующими величинами: температура и скорость напыляемых частиц; распределение температуры и скорости частиц в конусе напыления; взаимодействие напыляемых частиц с газовой фазой; испарение, сублимация и диссоциация; плотность потока частиц по пятну напыления.

Эффективность прогрева частиц напыляемого материала и распределение скорости распыляемых частиц в объеме газо-

термического потока определяются параметрами технологического режима и соответствием ему конструкции плазмотрона.

Напыление следует осуществлять на специализированном участке, который должен быть оснащен следующим оборудованием.

1. При напылении воздухом в качестве плазмообразующего газа:

– источником постоянного тока, обеспечивающим напряжение холостого хода 320 В (типа АПР 404.УХЛ4);

– плазмотроном типа С2В3, АПП УХЛ-4 или ПЦВ20;

– дросселем для сглаживания пульсации дуги.

2. При напылении плазмообразующим газом аргоном или смесью газов аргона и азота ($Ar + N_2$):

– источником постоянного тока, обеспечивающим напряжение холостого хода 160 В (типа ИПН 160);

– плазмотроном типа ПП25 (установка УПУ-3Д).

3. Пультom управления, обеспечивающим регулирование и контроль следующих параметров процесса: напряжение на дуге, величина тока, расход плазмообразующего (ротаметр типа Р-50) и транспортирующих газов (ротаметр типа Р-25).

4. Питателем порошка, обеспечивающим плавную регулировку подачи порошка в интервале 20–40 г/мин (например, шнековый питатель установки УПУ-3Д).

5. Сварочным вращателем или токарным станком с высотой центров не менее 200 мм (типа 1К62).

6. Установкой для пескоструйной обработки с пистолетом, работающим при давлении 0,5 МПа (5 ат) и имеющим диаметр сопла 5 мм, или установкой типа «Каскад».

7. Виброситом для раздела порошка по фракциям (типа ВИЛ-23).

8. Компрессором для получения сжатого воздуха.

4. Технологический процесс плазменного напыления вкладышей подшипников

1. Подготовка детали (образца) под напыление.

1.1. Мойку и обезжиривание детали (образца) производить в моющих растворах или органических растворителях.

1.2. Проточить наружную поверхность детали (образца) до «чистого» металла.

1.3. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой произвести струйно-абразивную обработку проточенной поверхности детали (образца). Режим обработки: давление воздуха 0,4–0,5 МПа (4–5 ат), диаметр сопла 5–7 мм, расстояние от среза сопла до поверхности детали 100–150 мм, угол наклона сопла к обрабатываемой поверхности детали 60–90°, время обработки 30–40 с.

Для струйной обработки применяют электрокорунд по ОСТ 2МТ 793–80 и ОСТ 2МТ 715–78 зернистостью 0,80–0,15 мм, металлическую дробь ДЧК, ДСК номера 01, 02, 03, 05 по ГОСТ 11964–66.

После струйно-абразивной обработки вкладыш обдувают сухим сжатым воздухом для удаления частиц абразива с поверхности. Запрещается касаться руками поверхности, подготовленной под напыление.

Перерыв между струйно-абразивной обработкой и нанесением покрытий не должен превышать 1 ч.

2. Просеивание порошка.

2.1. При нанесении покрытий из порошковых материалов большое значение имеет размер частиц наносимого порошка. От гранулометрического состава исходного порошка зависят стабильность и производительность процесса, свойства получаемого покрытия. Поэтому порошковые материалы должны обязательно проходить операцию рассеивания (классификации). Классификацию порошка производить по группам:

- 1) 40–100 мкм;
- 2) 101–160 мкм;
- 3) 161–200 мкм;
- 4) > 200 мкм.

Для напыления используются первые две группы.

Для напыления антифрикционного слоя применяется сплав АО20 следующего химического состава (%): *Al* – основа, *Cu* 0,6–0,8, *Sn* 16–20 и АО6 следующего химического состава (%): *Al* – основа, *Cu* 0,6–0,8, *Sn* 5–7.

Для напыления подслоя применяется термореагирующий никель-алюминиевый сплав ПТЮ5Н ТУ 14–1–3926–85.

2.2. Подготовленные порошковые материалы хранить в герметичной таре.

3. Напыление детали (образца).

3.1. Установить деталь (образец) в патроне токарного станка.

3.2. Установить частоту вращения патрона станка согласно таблице режимов и включить его.

3.3. Открыть вентиль и отрегулировать давление по манометру и расход плазмообразующего газа по ротаметру в режиме «настройка» в соответствии с требуемыми параметрами (табл. 7.4).

3.4. Включить дозатор и отрегулировать расход порошка 30 г/мин, выключить дозатор.

3.5. Зажечь дугу и установить требуемый ток (см. табл. 7.4).

Таблица 7.4

Параметры режима напыления

Напыляемый материал	Плазмообразующий газ	Параметры режима					
		Напряжение на дуге, В	Сила тока, А	Расход газа, л/мин	Давление газа, МПа	Расстояние сопло–деталь, мм	скорость вращения, мин ⁻¹
АО20, АО6	Воздух	200	140	50	0.4	80–120	25–100
АО20, АО6	Аргон	30	280–320	50	0.2	80–120	25–50
ПТЮ5Н	Воздух	220	100	50	0.4	80–120	100–150
ПТЮ5Н	Аргон	30	300–400	50	0.2	80–120	25–120

Примечание. Для транспортирования порошка используется газ того же состава, что и плазмообразующий. Расход транспортирующего газа устанавливается в пределах 2–3 л/мин при давлении 0,15–0,20 МПа.

3.6. Включить дозатор и откорректировать подачу порошка по центру плазменной струи.

Подвести плазматрон к кромке поверхности детали (образца), выдерживая расстояние от сопла до напыляемой поверхности

(см. табл. 7.4). Угол наклона плазмотрона к напыляемой поверхности детали (образца) должен находиться в пределах 60–90 °С. Включить устройство для перемещения плазмотрона.

3.7. Режимы напыления приведены в табл. 7.4. Напыление материалов производится в последовательности:

– ПТЮ5Н напыляется за 1–2 прохода, толщина слоя 0,06–0,10 мм;

– АО20 напыляется с припуском на механическую обработку 0,2–0,3 мм (в среднем напыляется 10–15 слоев, за один проход напыляется 0,05–0,10 мм).

При напылении различными порошками временных перерывов не делать.

Структура напыленного слоя АО20 приведена на рис. 7.6.

3.8. Контроль качества покрытия: провести контроль качества покрытия визуально с помощью лупы; наличие трещин, капель металла, различий в цвете, указывающие на частичный местный перегрев, не допускается.

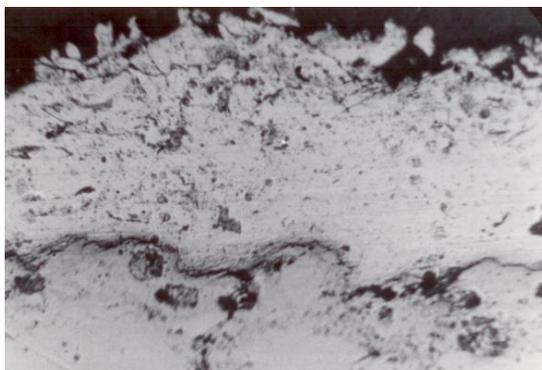


Рис. 7.6. Структура напыленного слоя АО20

5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием работы.
2. Получить образцы с напыленным покрытием и описать их внешний вид.
3. Рассчитать угол наклона плазмотрона и механические свойства напыленного покрытия для своего варианта (табл. 7.5).

Выбрать марку плазмотрона, обеспечивающую максимальную прочность покрытия.

Таблица 7.5

Варианты задания

Номер варианта	Внутренний диаметр вкладыша, мм	Ширина вкладыша, мм	Дистанция напыления, мм	Марка материала
1	120	60	80	АО20
2	115	65	80	АО6
3	125	70	80	АО20
4	135	80	80	АО6
5	140	60	85	АО20
6	145	75	85	АО6
7	150	80	90	АО20
8	155	120	90	АО20
9	160	110	90	АО6
10	180	100	100	АО6
11	195	85	100	АО20
12	200	110	100	АО20
13	215	100	110	АО6
14	230	80	110	АО6
15	250	150	110	АО20
16	280	140	120	АО20
17	290	160	120	АО6
18	320	130	120	АО6
19	330	140	120	АО20
20	350	150	120	АО20

Процесс плазменного напыления на внутреннюю поверхность вкладыша подшипника скольжения осуществляется при установке плазмотрона на специальное приспособление на токарном станке. Плазмотрон должен быть установлен относительно напыляемой поверхности таким образом, чтобы его сопло было удалено на расстояние 80–120 мм.

Наибольшее значение величины когезионной прочности обеспечивается при угле между осью плазмотрона и напыляемой

поверхностью 90° (рис. 7.7, а). Такое положение плазмотрона возможно только тогда, когда выполняется следующее условие:

$$D \geq (L + S_1 + S_2),$$

где D – внутренний диаметр подшипника; L – длина плазмотрона (ПП-25 $L = 50$ мм, С2В3 $L = 90$ мм); S_1 – расстояние от напыляемой поверхности до сопла плазмотрона (80–120 мм); S_2 – расстояние от верхней части плазмотрона до внутренней поверхности подшипника (≈ 10 мм).

В случае когда $D < (L + S_1 + S_2)$, необходимо определять значение угла наклона плазмотрона β при напылении наиболее удаленной внутренней части вкладыша (рис. 7.7, б), так как по мере уменьшения угла наклона уменьшаются величины когезионной и адгезионной прочности покрытия и, соответственно, ресурс вкладыша. При такой схеме расположения плазмотрона в процессе напыления необходимо учитывать расстояние S_1 , диаметр плазмотрона $d_{пн}$, ширину подшипника B и внутренний диаметр подшипника D .

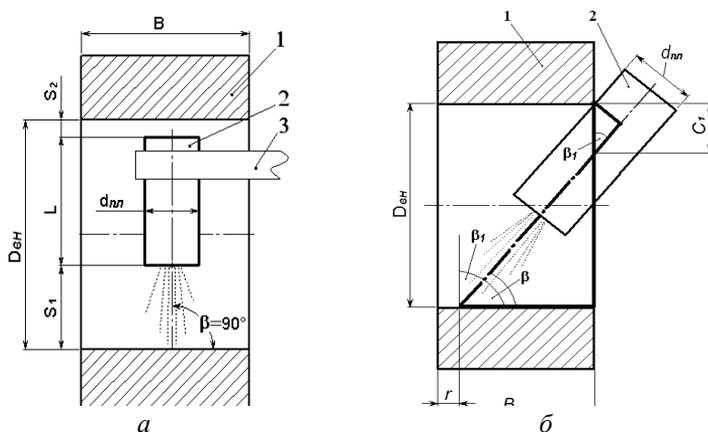


Рис. 7.7. Схема напыления вкладыша подшипника скольжения при угле наклона плазмотрона:

а – 90° ; б – менее 90° . 1 – подшипник скольжения; 2 – плазмотрон; 3 – приспособление

Для напыления вкладышей целесообразно использовать две марки плазмотронов: малогабаритный плазмотрон ПП-25

для напыления вкладышей диаметром менее 185 мм, когда обеспечивается угол наклона близкий к 90° , и С2В3 для вкладышей диаметром свыше 185 мм.

Технологический угол наклона плазмотрона к напыляемой поверхности подшипника скольжения β можно найти из следующего выражения:

$$\beta = 90^\circ - \beta_1,$$

$$\text{где } \beta_1 = 2 \cdot \left(\arctg \frac{4D - \sqrt{16D^2 - 4(d_{пл} - 2(B-r)) \cdot (2(B-r) + d_{пл})}}{2(d_{пл} - 2(B-r))} \right);$$

D – внутренний диаметр вкладыша подшипника; B – ширина вкладыша; r – радиус пятна напыления (4–5 мм); $d_{пл}$ – диаметр плазмотрона (50 мм).

4. Рассчитать механические свойства напыленного покрытия для своего варианта (табл. 7.5).

В случае если угол наклона β будет меньше 45° для обоих плазмотронов, когезионная прочность σ_k будет меньше требуемой, а напыленное покрытие – недолговечным. Если же угол наклона β обоих плазмотронов или одного из них будет больше 45° , то производится расчет когезионной прочности в зависимости от материала по формулам:

Для плазмотрона ПП-25:

$$\sigma_{кАО6} = -115,64 + 0,81U + 0,62 \beta_{ПП\ 25}$$

$$\sigma_{кАО20} = -125,76 + 0,81U + 0,69 \beta_{ПП\ 25}$$

Для плазмотрона С2В3:

$$\sigma_{кАО6} = -115,64 + 0,81U + 0,62 \beta_{С2В3}$$

$$\sigma_{кАО20} = -125,76 + 0,81U + 0,69 \beta_{С2В3}$$

Значения когезионной прочности для одного из материалов, но для разных марок плазмотронов сравниваются между собой:

$$\sigma_{кС2В3} \geq \sigma_{кПП-25}$$

5. Выбрать марку плазмотрона, обеспечивающую максимальную прочность покрытия. Наибольшему значению когезионной прочности будет соответствовать марка плазмотрона. Установленное наибольшее значение должно превышать 80 МПа,

так как это минимальная величина когезионной прочности, при которой обеспечивается необходимый предел выносливости и долговечность напыленного покрытия. Эти условия учитываются при выборе марки плазмотронов:

$$\sigma_{\text{КС2В3}} \geq 80 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\text{кПП-25}} \geq 80 \text{ МПа},$$

Далее, если эти условия выполняются, то производится окончательный выбор марки плазмотрона.

6. Выбрать оборудование для напыления заданного материала (АО6 или АО20) с учетом выбранного плазмотрона.

7. Определить долговечность покрытия по выражению (количество циклов до разрушения)

$$N_{\text{ц}} = (-1,15 + 0,11\sigma_{\text{к}}) \times 10^6.$$

6. Содержание отчета

1. Принципиальная схема электропитания плазменной горелки.

2. Схема плазмотрона ПН-В1.

3. Технологическая схема напыления деталей.

4. Результаты расчетов угла наклона плазмотрона, механических характеристик напыленного покрытия.

5. Описание оборудования для своего варианта и параметров режима напыления.

6. План технологических операций.

7. Описание внешнего вида напыленного слоя (наличие, величина и места расположения дефектов, если таковые имеются).

8. Выводы и объяснения полученных результатов.

7. Контрольные вопросы

1. Что понимают под совместимостью состава покрытия с материалом напыляемой детали?

2. Назначение и виды предварительной обработка напыляемой поверхности.

3. Какие газы применяются в качестве плазмообразующих?

4. Какие дефекты образуются при напылении?

5. Какие технологические приемы применяют для получения качественного соединения напыленного слоя с подложкой?

6. Из каких основных узлов состоит плазмотрон?
7. При каких условиях образуется плазменная струя?
8. Какие материалы называются терморезирующими?
9. Как влияет угол наклона плазмотрона на адгезионную и когезионную прочность покрытия?
10. Какова величина расхода плазмообразующего газа?
11. Чем отличаются плазмотроны для напыления на воздухе и в среде инертных газов?

Литература

1. Леонтьев Л.Б. Методы повышения износостойкости узлов трения (конспект лекций): учебное пособие. Владивосток: Дальневост. федерал. унт, 2017. 170 с. URL: <http://elib.dvfu.ru/vit-al/access/manager/Repository/vtls:000874667>(дата обращения: 13.04.2021).
2. Леонтьев Л.Б., Макаров В.Н., Токликишвили А.Г. Перспективы использования плазменного напыления для восстановления и изготовления вкладышей подшипников коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2013. № 2(15). С. 67–74. URL: <https://www.dvfu.ru/vest-nikis/archive-editions/2-15/10/> (дата обращения: 03.04.2021).
3. Хмелевская Б.Б., Леонтьев Л.Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами: в 3 т. Т. 1. Современные методы восстановления и упрочнения деталей. Владивосток: МГУ; Дальнаука, 2003. 283 с.

Работа № 8

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ РАСХОДА ЭЛЕКТРОДОВ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Цель работы – Научить студентов оценивать эффективность выбранного технологического оборудования и марки электродов при ручной дуговой сварке и наплавке.

1. Общие положения

При оптимизации технологического процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами особое внимание следует обратить на технологические и организационные факторы. К технологическим факторам относятся выбор сварочного оборудования и сварочных материалов. При выборе сварочного оборудования следует применять источники питания с максимальным коэффициентом полезного действия (табл. 8.1), обеспечивающие сварку с минимальными разбрызгиванием и также дымо- и газовыделением. Соблюдение последних двух критериев позволяет минимизировать потери электродного материала и, соответственно, капитальные вложения на системы цеховой вентиляции.

Таблица 8.1

**Коэффициент полезного действия источников питания
для ручной дуговой сварки**

Марка источника питания	КПД,%
ВД-306	60
ТДМ-411, ТДМ-180, ТДМ-250, ТДМ-403, ТДМ-505, ТДМ-181, ТДМ-259, ТДМ-300	70
ВД-306М, ВД-306С	73
ВД-309, ВД-313	75
ВДУ-506С, ВДУ-506, ВДУ-601	79
ВД-306Д, ВД-506Д, ВД-306ДК, ВД-506ДК	80
ВДУ-1202, ВДМ-1202С, ВДМ-6303С (при работе с балластными реостатами)	40

Марка источника питания	КПД, %
ВДУ-1602, ВДУ-1250	85
PRO ARC 200	85
Сварог PRO TIG 200 P	87

Несмотря на традиционно пренебрежительное отношение к такой величине, как КПД источника питания, она, как показывают расчеты, оказывает существенное влияние на расход электроэнергии при ручной дуговой сварке и существенно влияет на стоимость метра сварного шва.

Норматив расхода электроэнергии на выполнение одного метра сварного соединения или 1 кг наплавленного металла описывается зависимостью

$$\mathcal{E}_{\text{эл}} = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_{\text{ХХ}},$$

где \mathcal{E}_0 – расход электроэнергии в основное время сварки, кВт·ч/м (кВт·ч/кг); $\mathcal{E}_{\text{ХХ}}$ – удельные потери электроэнергии в период холостого хода, кВт·ч/м (кВт·ч/кг).

Первое слагаемое определяется по зависимости

$$\mathcal{E}_0 = \frac{I \times U \times T \times 10^{-3}}{\eta},$$

где I – сила тока, А; U – напряжение на дуге, В; T – основное время сварки одного метра (наплавки 1 кг металла) сварного соединения, ч/м (ч/кг); η – КПД источника питания, %.

Основное время сварки T одного метра шва (наплавки 1 кг металла) определяется по зависимости

$$T = \frac{M}{I \alpha_n},$$

где M – масса наплавленного металла, кг; α_n – коэффициент наплавки, г/А·ч (табл. 8.2).

Второе слагаемое $\mathcal{E}_{\text{ХХ}}$ в приведенной выше формуле, определяется по следующей зависимости:

$$\mathcal{E}_{\text{ХХ}} = P_{\text{ХХ}} \times T \times K_{\text{ХХ}},$$

где $P_{\text{ХХ}}$ – потребление электроэнергии источника питания в режиме холостого хода, кВт; $K_{\text{ХХ}}$ – коэффициент, учитывающий

время холостого хода источника питания по отношению к основному времени сварки.

Таблица 8.2

**Характеристика электродов
для сварки конструкционных сталей**

Тип	Марка	Род и полярность тока	Коэффициент наплавки, г/А·ч
Э42	АНО-1	Переменный и постоянный, любая полярность	15,0
Э42	АНО-5		11,0
Э42	ВСЦ-4	Постоянный, любая полярность	10,5
Э42А	СМ-11	Постоянный, обратная полярность	9,5
Э46	АНО-3	Переменный и постоянный, любая полярность	8,5
Э46	УОНИ-13/45	Постоянный, обратная полярность	8,5
Э46	МР-3	Переменный и постоянный, любая полярность	8,0
Э46	ОЗС-4		8,5
Э46	ОЗС-6		8,5
Э46	ОЗС-12		8,0
Э46А	УОНИ-13/55	Постоянный, обратная полярность	9,0
Э50	ВСЦ-4А	Постоянный, любая полярность	11,0
Э50	ЛЭЗ ЛБ-52	Постоянный, обратная полярность	9,5
Э50А	ДСК-50	Постоянный, на электроде + и переменный	10,0
Э50А	УП-1/55		10,0
Э60А	УОНИИ-13/65	Постоянный, на электроде +	9,0
Э60А	ВСФ-65У		9,5
Э70	НИАТ-3М	Постоянный, обратная полярность	9,5

Коэффициент K_{XX} рассчитывают по формуле

$$K_{XX} = (1 - K_{ОСН})/K_{ОСН},$$

где $K_{ОСН}$ – коэффициент, учитывающий время горения дуги в общем времени на сварку или наплавку.

Средние значения P_{XX} , кВт:

для однопостового преобразователя

(типа ПСО)

1,2–1,6;

для сварочного трансформатора

0,2–0,3;

для полупроводникового выпрямителя

0,25–0,35;

для тиристорного выпрямителя

0,15–0,2.

Средние значения K_{XX} зависят от организации труда на производстве и определяются методом замеров времени работы сварщика. Например, на ОАО «Адмиралтейские верфи» суммарное время горения дуги при работе сварщика ручной дуговой сварки составляет 30% от рабочего времени.

В зависимости от организации труда на предприятиях приняты следующие значения этого коэффициента:

для крупносерийного производства 0,3–0,7;

для мелкосерийного производства 0,7–0,9.

Пример расчета электроэнергии

Исходные данные: сварное соединение типа $T1$, катет шва – 5 мм, $M = 0,140$ кг (1 метр шва), электроды марки АНО-4, коэффициент наплавки $\alpha_n = 8,3$ г/А·ч. Режимы сварки: $I = 200$ А, $U = 24$ В, $\eta = 80\%$, $P_{XX} = 0,2$ кВт, $K_{ОСН} = 0,4$ (источник питания ВД-306Д).

Определяем:

– время сварки одного метра шва (без учета времени смены электрода)

$$T = 140/(200 \times 8,3) = 0,084 \text{ ч};$$

– расход электроэнергии на 1 м сварного шва

$$\mathcal{E}_0 = 200 \times 24 \times 0,084 \times 0,001/0,8 = 0,504 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

– коэффициент, учитывающий время холостого хода источника питания по отношению к основному времени сварки

$$K_{XX} = (1 - 0,4)/0,4 = 1,5;$$

– удельные потери электроэнергии в период холостого хода

$$\mathcal{E}_{XX} = 0,2 \times 0,084 \times 1,5 = 0,025 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

– расход электроэнергии на 1 м сварного шва

$$\mathcal{E}_{\text{эл}} = 0,504 + 0,025 = 0,53 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м};$$

– расход электроэнергии на 1 кг наплавленного металла

$$\mathcal{E}_{\text{эл}}/M = 0,53/0,140 = 3,79 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}.$$

При замене источника питания и сохранении неизменными режимов сварки, кроме параметров $\eta = 60\%$, $P_{\text{ХХ}} = 0,35$ кВт (например, ВД-306), расчетные данные составят:

$$T = 140 / (200 \times 8,3) = 0,084 \text{ ч};$$

$$\mathcal{E}_0 = 200 \times 24 \times 0,084 \times 0,001 / 0,6 = 0,672 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$K_{\text{ХХ}} = (1 - 0,4) / 0,4 = 1,5;$$

$$\mathcal{E}_{\text{ХХ}} = 0,35 \times 0,084 \times 1,5 = 0,044 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$\mathcal{E}_{\text{эл}} = 0,672 + 0,044 = 0,716 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м};$$

$$\mathcal{E}_{\text{эл}}/M = 0,716 / 0,140 = 5,12 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}.$$

При применении многопостовых источников питания с балластными реостатами и сохранении режимов сварки, кроме параметров $\eta = 40\%$, $P_{\text{ХХ}} = 0,35$ кВт, получаем следующие данные:

$$T = 140 / (200 \times 8,3) = 0,084 \text{ ч};$$

$$\mathcal{E}_0 = 200 \times 24 \times 0,084 \times 0,001 / 0,4 = 1,01 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$K_{\text{ХХ}} = (1 - 0,4) / 0,4 = 1,5;$$

$$\mathcal{E}_{\text{ХХ}} = 0,35 \times 0,084 \times 1,5 = 0,044 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$\mathcal{E}_{\text{эл}} = 1,01 + 0,044 = 1,054 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м};$$

$$\mathcal{E}_{\text{эл}}/M = 0,716 / 0,140 = 7,53 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}.$$

Таким образом, из приведенных расчетов следует, что применение современных сварочных выпрямителей для ручной дуговой сварки позволяет практически в 2 раза сократить расход электроэнергии при производстве сварочных работ. К числу выпрямителей с высоким КПД относятся ВД-306Д, ВД-506Д, ВДУ-506С, ВД-309, ВД-313, Сварог PRO TIG 200 P и другие (табл. 8.1).

При покупке сварочных материалов предпочтение следует отдавать высокоэффективным электродам с высоким коэффициентом наплавки. При выполнении сварочных работ с использованием ручной дуговой сварки основная доля затрат приходится на стоимость сварочных материалов (до 60% стоимости сварочных работ). Поэтому снижение расхода покрытых электродов

тродов при сварке позволяет существенно снизить затраты на изготовление металлоконструкций. Норматив расхода электродов в общем виде определяют по зависимости $H = M \times K_p$, где K_p – коэффициент расхода электродов данной марки, учитывающий потери на угар, разбрызгивание и огарки (длина одного огарка не более 50 мм) на 1 кг наплавленного металла. Значения K_p для наиболее распространенных электродов длиной 350 и 450 мм приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Коэффициент расхода K_p наиболее распространенных электродов

K_p	Группа марок электродов	Марки электродов для сварки	
		углеродистых и низколегированных сталей	легированных сталей
1,4	I	ЛЭЗ ЛБ-52А, ВСФ-65У	ОЗЛ-25Б, ОЗШ-1, ВСФ-75У, ВСФ-85,
1,5	II	АНО-1, АНГ-1К, ОЗС-17Н, АНО-19М, ДСК-50, АНП-6П, НИАТ-3М, ВСЦ-4А	ТМЛ-1У, ТМЛ-3У, ОЗЛ-25, ЦТ-28, АНВ-17, АНЖР-1,
1,6	III	ОЗС-23, ВН-48, УП-1/55, АНО-5, АНО-13, АНО-19, АНО-20, ОЗС-6, АНО-10, АНО-11, АНО-30, АНО-ТМ, ВСО-50СК, ОЗС-18, ОЗС-25, УОНИ-13/55У, АНО-ТМ60, ВСФ-65, АНО-ТМ70, АНП-2, УОНИ-13/65, УОНИ-13/85	ЦЛ-20, КТИ-7А, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, АНВ-13, АНВ-34, НИАТ-4, НИАТ-5, НИИ-48Г
1,7	IV	АНО-3, АНО-4, АНО-6, АНО-6У, АНО-21, АНО-29М, АНО-32, МР-3, ОЗС-4, ОЗС-12, ОЗС-21, СМ-11, УОНИ-13/45, УОНИ-13/45СМ, УОНИ-13/55, УОНИ-13/55СМ, ВСЦ-4, ОЗС-24	ЦУ-5, ТМУ-21У, ЦЛ-51, УОНИ-13/НЖ, ОЗЛ-9А, ЦТ-15, ОЗЛ-17У, ЦЛ-11

Снижение массы наплавленного металла на 1 м сварного соединения достигается в результате следующих организационно-технологических мероприятий:

- применение прогрессивных видов проката (низколегированного высокопрочного или термически упрочненного), что позволяет уменьшить толщину свариваемых деталей и катеты сварных швов;

- использование экономичных видов разделок кромок под сварку;

- подготовка кромок толстолистового металла под сварку с X-образной разделкой;

- внедрение кондукторов для сварки конструкций в нижнем положении;

- выбор электродов оптимальной марки и диаметра с минимальным K_p для данного технологического процесса;

- по возможности не применять многостовую сварку с использованием балластных реостатов, а там, где она необходима, применять многостовые источники типов ВД 2×313;

- использовать современные выпрямители для ручной дуговой сварки (ВД-306Д, ВД-506Д, ВД-313, ВД-309);

- использование специальных электрододержателей для уменьшения длины огарка (например, держателей фирмы *A. Binzel*);

- не допускать выполнение сварки на форсированных режимах при повышенном разбрызгивании электродного металла, использовать приборы контроля сварочных параметров на рабочих местах (например, блок БИ-01);

- обеспечивать транспортировку и хранение электродов согласно требованиям нормативной документации;

- использовать термопалаты для прокатки и хранения электродов при выполнении сварочных работ;

- совершенствовать организацию рабочего места сварщика для уменьшения величины K_{xx} и увеличения $K_{осн}$: здесь скрыты резервы повышения производительности сварочных работ до 3 раз.

2. Порядок выполнения работы и содержание отчета

Каждый студент после ознакомления с методическими указаниями производит расчет расхода электроэнергии на выполнение 1 м сварного соединения и 1 кг наплавленного металла, а

также норматив расхода электродов на 1 кг наплавленного металла в соответствии с собственным вариантом исходных данных, полученных от преподавателя (представлены в табл. 8.4). Остальные исходные данные: сварное соединение типа Т1, катет шва – 5 мм, М = 0,140 кг (1 метр шва), $K_{осн} = 0,4$. По результатам расчета делаются выводы. В качестве образца при оформлении расчетов можно использовать пример, приведенный выше.

Таблица 8.4

Варианты задания

№ варианта	Марка источника питания		Марка электрода		Режим сварки	
					Сила тока, А	Напряжение на дуге, В
1	ВД-306	ТДМ-411	АНО-1	СМ-11	120	24
2	ВД-306М	ВД-306Д	ВСЦ-4	УОНИ13/45	120	24
3	ВД-306С	ВД-506Д	СМ-11	МР-3	120	24
4	ВДУ-1202	ВД-313	ОЗС-6	УОНИ13/45	120	24
5	ТДМ-403	ВДУ-601	ДСК-50	МР-3	120	24
6	ВД-313	ВДУ-506	УОНИ13/55	НИАТ-3М	120	24
7	ВД-306	ТДМ-411	АНО-1	ОЗС-4	160	25
8	ВД-306М	ВД-306Д	ВСЦ-4	УОНИ13/45	160	25
9	ВД-306С	ВД-506Д	СМ-11	МР-3	160	25
10	ВДУ-1202	ВД-313	ОЗС-6	УОНИ13/45	160	25
11	ТДМ-403	ВДУ-601	ДСК-50	МР-3	160	25
12	ВД-313	ВДУ-506	УОНИ13/55	НИАТ-3М	160	25
13	ВДУ-1250	ВД-306	УП-1/55	УОНИ13/55	200	26
14	ВД-306	ТДМ-411	УОНИ13/65	МР-3	200	26
15	ВД-306С	ВД-506Д	СМ-11	МР-3	200	26
16	ВДУ-1202	ВД-313	ОЗС-6	УОНИ13/45	200	26
17	ТДМ-403	ВДУ-601	ДСК-50	МР-3	200	26
18	ВД-313	ВДУ-506	УОНИ13/55	НИАТ-3М	200	26
19	ВД-306М	PRO ARC 200	ЛЭЗ ЛБ-52А	ВСЦ-4А	200	26
20	ВДУ-601	Сварог PRO TIG 200 P	ОЗС-4	АНО-1	200	26

КПД источника питания выбирают по табл. 8.1, коэффициент наплавки – по табл. 8.2, коэффициент расхода – по табл. 8.3.

3. Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит время сварки 1 м шва?
2. Какими параметрами определяется расход электроэнергии на 1 м сварного шва?
3. Какими параметрами определяются удельные потери электроэнергии в период холостого хода?
4. Назовите основные организационно-технологические мероприятия, которые позволяют снизить массу наплавленного металла на 1 м сварного соединения.
5. От чего зависит норматив расхода электродов?
6. Какие типы источников питания имеют наибольший КПД?
7. В чем достоинства и недостатки предложенной методики?

Литература

1. Леонтьев Л.Б. Методы повышения износостойкости узлов трения (конспект лекций): учебное пособие. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2017. 170 с. URL: <http://elib.dvfu.ru/vital/access/-manager/Repository/vtls:000874667>(дата обращения: 09.04.2021).
2. Техничко-экономический обзор. Анализ наиболее эффективного использования различных видов сварочного оборудования и сварочных материалов в производстве металлоконструкций. СПб.: Инженерный и технологический сервис, 2000. 40 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Результаты наплавки электродом УОНИ-13/45
и проволокой Св-08Г2С
в углекислом газе на стальную пластину**

Таблица П.1

Марка электрода или проволоки	Диаметр, мм	Ток наплавки, А	Время наплавки, с	Длина расплавленной части электрода или проволоки, мм	Масса наплавленного металла, г
УОНИ-13/45	4	160	60	277	24,0
Св-08Г2С	1,2	160	44	3000	22,5
Св-08Г2С	1,2	200	34	3000	22,8
Св-08Г2С	1,2	250	25	3000	22,9
Св-08Г2С	1,2	280	22	3000	22,9
Св-08Г2С	1,2	300	20	3000	23,0
Св-08Г2С	1,2	350	16	3000	23,3

Примечание. Наплавка на постоянном токе обратной полярности.

**Структура поверхности
и физико-механические свойства деталей:
исходной и с покрытием нитридом титана**

Структура поверхности новой детали однородна по всей площади (рис. П.1, П.2), перепады высот незначительны, большая часть микронеровностей поверхности находится около нулевой отметки.

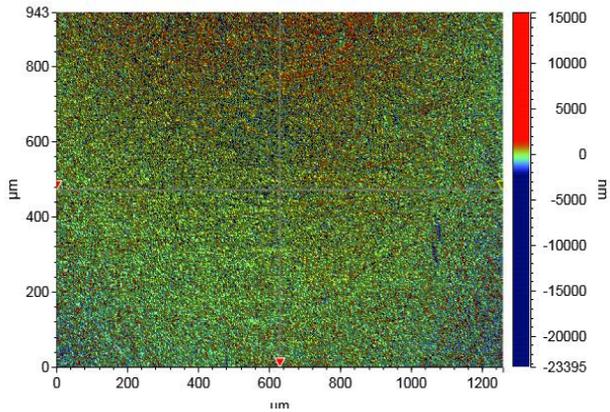


Рис. П.1. Структура поверхности новой детали

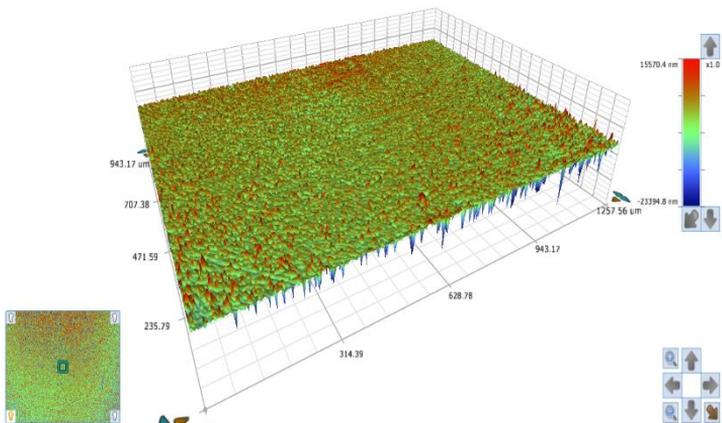


Рис. П.2. Структура поверхности новой детали

Параметры шероховатости R_a по осям X и Y отличаются незначительно: по оси X величина $R_a = 0,552$ мкм, по оси Y $R_a = 0,683$ мкм (рис. П.3).

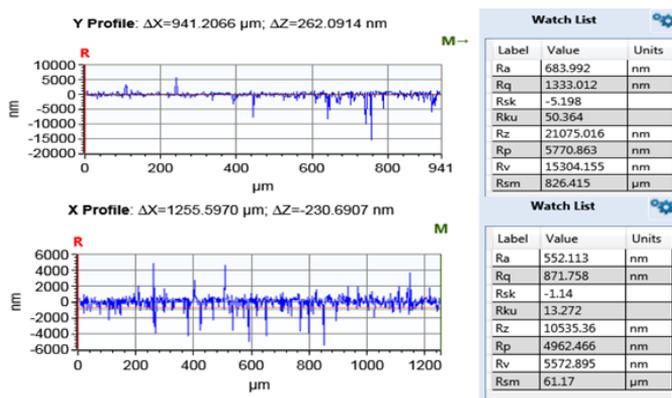


Рис. П.3. Параметры профиля поверхности новой детали по осям X и Y

В результате формирования покрытия нитрида титана на детали структура поверхности характеризуется небольшими (до 14 мкм) перепадами высот. Покрытие имеет небольшие поры и впадины (тёмные пятна на поверхности, рис. П.4, П.5). Поры и впадины оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства покрытия: в них находится смазка, которая обеспечивает удовлетворительные условия работы сопряжения в условиях трения при граничной смазке.

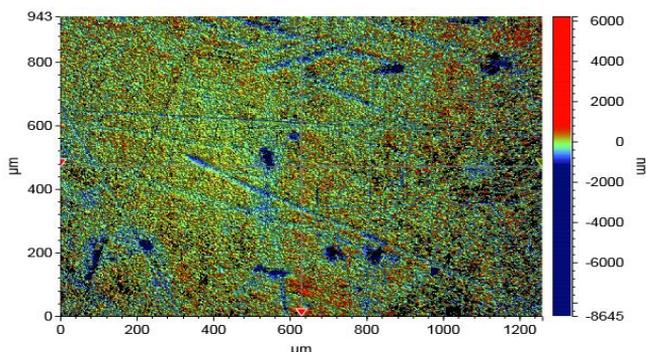


Рис. П.4. Структура поверхности детали с покрытием нитридом титана

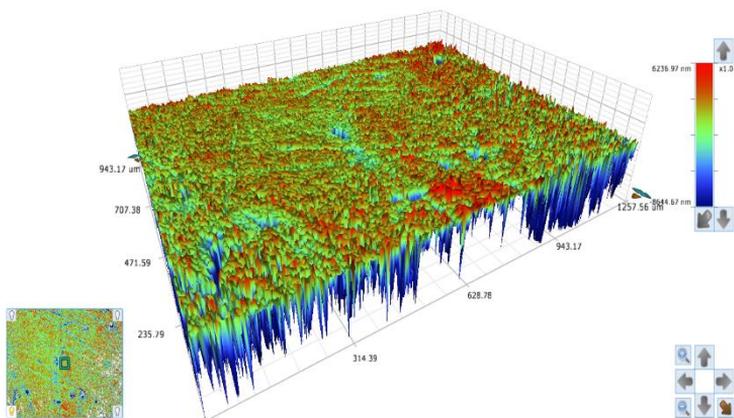


Рис. П.5. Структура поверхности детали с покрытием нитридом титана

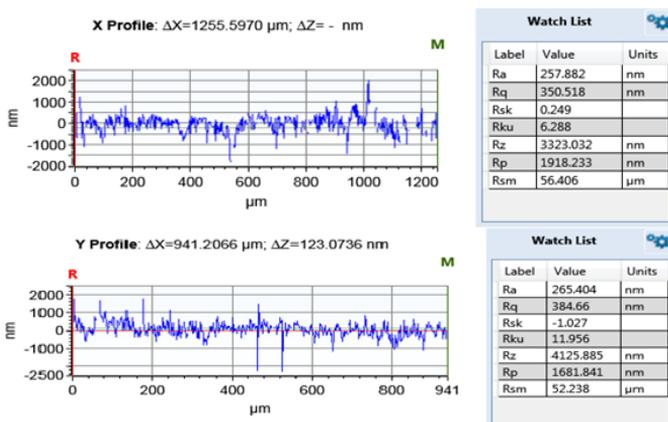


Рис. П.6. Параметры профиля поверхности детали по осям X и Y после нанесения нитрида титана

Анализируя параметры структуры поверхностей (табл. П.1), можно сделать вывод: большинство параметров структуры указывает на улучшение свойств поверхностного слоя после формирования покрытия (снижение высотных параметров, равномерность профиля и т.д.). По некоторым параметрам поверхностный слой детали с покрытием превосходит поверхностный слой новой детали.

Таблица П.1

Параметры структуры поверхностей

Параметры	Детали		
	Новая	Изношенная	Восстановленная
Sa, нм	638,24	2294,141	309,916
Sq, нм	1073,778	3533,821	431
Ssk	-2,766	-3,032	-0,867
Sku	36,412	21,248	13,775
Sp, нм	15570,448	16187,699	6236,969
Sv, нм	-23394,812	-64069,848	-8644,667
Sz, нм	38965,26	80257,552	14881,635
Sbi	0,927	0,936	0,686
$S_c, \frac{\text{МКМ}^3}{\text{МКМ}^2}$	0,782	2,517	0,435
Sci	0,951	0,88	1,339
$V_m, \frac{\text{МКМ}^3}{\text{МКМ}^2}$	0,052591	0,07891	0,022302
$V_v, \frac{\text{МКМ}^3}{\text{МКМ}^2}$	0,163	0,669	0,057325
Svi	0,152	0,189	0,133
Sdq, град	45,61	70,862	17,729
Sdr, %	42,173	282,14	4,81
$Sds, \frac{1}{\text{МКМ}^2}$	0,002	0,003	0,004
$Ssc, \frac{1}{\text{МКМ}}$	0,591	1,026	0,202
Sal, МКМ	3,93	5,895	9,825
Str	0,894	0,25	0,687

Анализ физико-механических характеристик нового плунжера показал, что величина модуля упругости изменяется в небольшом диапазоне (табл. П.2), а величина твердости изменяется в диапазоне $\pm 10\%$.

В результате формирования покрытия нитрида титана модуль упругости поверхностного слоя возрастает в 1,8 раза, а твердость более чем в 2,8 раза, что обеспечивает существенное увеличение износостойкости как детали, так и сопряжения в целом.

Диаграммы «нагрузка–глубина отпечатка» для новой детали (рис. П.7) и детали с покрытием нитридом титана (рис. П.8) существенно отличаются вследствие значительной разницы физико-механических свойств стали и нитрида титана.

Таблица П.2

**Физико-механические характеристики
поверхностного слоя исходной детали
(плунжер топливного насоса высокого давления дизеля)
и после нанесения нитрида титана**

Порядковый номер измерения	Приложенная нагрузка, мН	Глубина заглабления индетора, мкм	Модуль упругости, Н/мм ²	Твердость, HV
Новая деталь				
1	1227,51	3,3934	1.134e+005*	786
2	1334,53	3,319	1.266e+005*	778
3	1402,04	3,2939	1.279e+005*	797
4	1468,3	3,2753	1.296e+005*	814
5	1495,6	3,2717	1.326e+005*	832
Среднее значение	1396,84	3,3046	1.268e+005*	801,4
После нанесения покрытия				
1	1493,03	1,812	2.313e+005*	2146
2	1534,33	1,7789	2.341e+005*	2452
3	1476,33	1,8629	2.316e+005*	2198
4	1479,56	1,8538	2.224e+005*	2112
5	1462,33	1,9127	2.402e+005*	2527
Среднее значение	1489,12	1,8441	2.323e+005*	2287

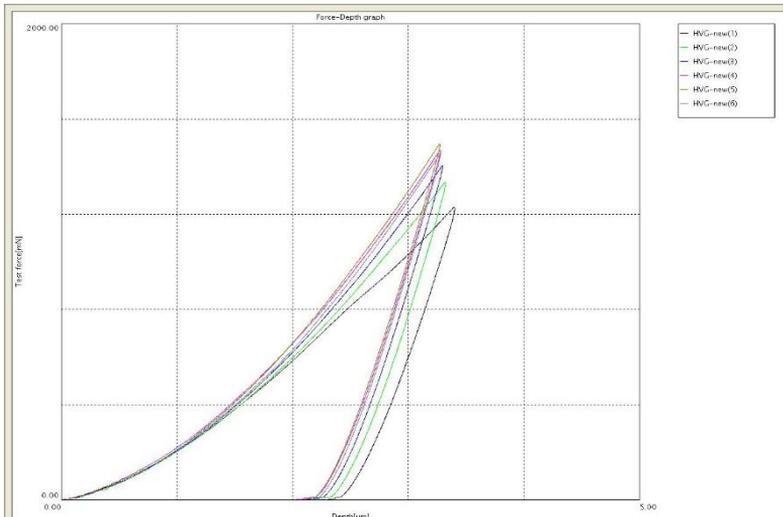


Рис. П.7. Диаграмма «нагрузка–глубина отпечатка» новой детали

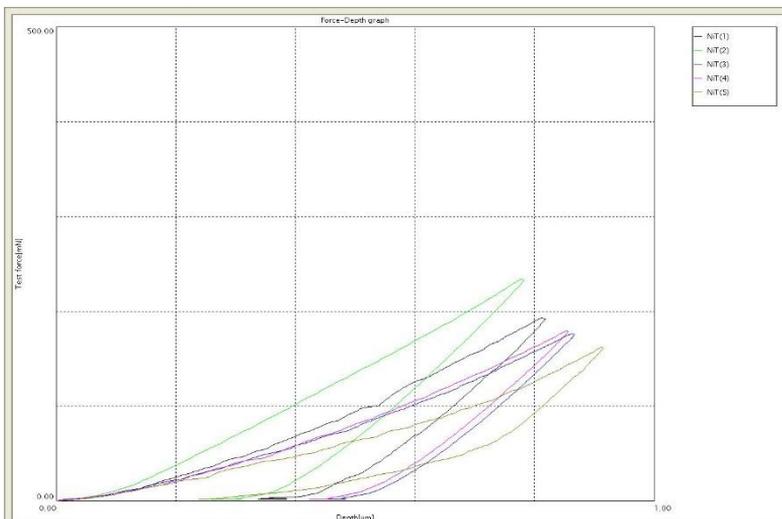


Рис. П.8. Диаграмма «нагрузка–глубина отпечатка» детали с покрытием нитридом титана

Учебное издание

Автор

Леонтьев Лев Борисович – д.т.н., профессор
Департамент промышленной безопасности
Политехнического института

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Методы повышения износостойкости и восстановления
деталей узлов трения
(лабораторный практикум по дисциплине)

Учебное пособие

Редактор Г.Б. Арбатская

Корректор Н.С. Мун

Компьютерная верстка Г.П. Писаревой

Подписано в печать 09.08.2021

Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 6,3

Тираж 40 экз.

Заказ

URL: [на сайте Политехнического института ДВФУ]:
<https://www.dvfu.ru/schools/engineering/science/scientific-and-educational-publications/manuals/>

Издание подготовлено редакционно-издательским отделом
Политехнического института ДВФУ
[Кампус ДВФУ, корп. С, каб. С714]

Дальневосточный федеральный университет
690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Отпечатано в Дальневосточном федеральном университете
(типография Издательства ДВФУ
690091, Владивосток, ул. Пушкинская, 10)

ДЛЯ ЗАМЕТОК