

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра автомобилей и автомобильного хозяйства

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локинова
«ЮЗГУ» 2018 г.



ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДАМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Методические указания к практическим занятиям

Курск 2018

УДК 656.13.071.8

Составители: Е.В. Агеев, Е.П. Новиков

Рецензент

Кандидат технических наук, дцент С.В. Пикалов

Практикум по электрофизическим методам нанесения покрытий : методические указания к практическим занятиям / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Е.В. Агеев, Е.П. Новиков. – Курск, 2018. – 56 с.: ил. 11, табл. 2. – Библиогр.: с. 59.

Методические указания содержат рекомендации и требования по проведению практических работ по дисциплине «Электрофизические методы нанесения покрытий».

Пособие предназначено для аспирантов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 22.06.01 «Технологии материалов».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 13.11.18. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 3,6 . Уч.-изд. л. 3,1 . Тираж 100 экз. Заказ 2184 Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	4
	Общие указания к практическим занятиям	5
Тема 1	Практические рекомендации по изготовлению и применению установок для электроискрового легирования	6
Тема 2	Определение прочности сцепления с подложкой упрочняющих покрытий методом микротвердости	9
Тема 3	Определение физико-механических характеристик деталей, упрочненных электроискровым легированием	13
Тема 4	Выбор режима термической обработки холодом	16
Тема 5	Перечень технологических операций восстановления деталей и последовательность их выполнения	19
Тема 6	Контроль дислокационной структуры покрытий методом микротвердости	23
Тема 7	Определение толщины покрытий методом вихревых токов	26
Тема 8	Определение толщины гальванических и лакокрасочных покрытий на металлических деталях электромагнитным методом	29
Тема 9	Контроль качества ремонта коленчатых валов	34
Тема 10	Контроль восстановленных поверхностей и покрытий датчиком поглощенной энергии	37
Тема 11	Расчет гибких накладных вихретоковых преобразователей для неразрушающего контроля деталей	41
Тема 12	Методика исследования эффективности нагрева материалов в плазме	45
Тема 13	Температура частиц, движущихся в потоке плазмы	49
Тема 14	Тепловые характеристики плазмотронов	53
Тема 15	Выбор основных параметров электроплазменного процесса	56
	Библиографический список	59

ВВЕДЕНИЕ

При изучении курса «Электрофизическим методам нанесения покрытий» выполнение практических работ в значительной степени способствует развитию инженерного мышления у студентов, и приобретению ими необходимых навыков в ремонте применяемых машин. Наибольшие трудности у студентов возникают при выполнении самостоятельных работ. Практика выполнения практических работ указывает на необходимость издания дополнительных рекомендаций, имеющих целью облегчить студентам выполнение практических работ.

В настоящей методической разработке подробно рассмотрены основные разделы практических работ, а также изложены устройства и принципы работы основного оборудования, предусмотренного программой курса «Электрофизические методы нанесения покрытий» для аспирантов очного и заочного обучения по направлениям подготовки 22.06.01 «Технологии материалов».

Курс «Электрофизические методы нанесения покрытий» предполагает изучение таких вопросов как закономерности формирования ремонтных материалов, установки электроискрового легирования, способы наплавки, способы износа деталей, машины для ремонта, дефекты деталей и способы их устранения.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

В процессе изучения дисциплины «Электрофизическим методам нанесения покрытий» каждый студент должен выполнить практические занятия.

Каждый студент выполняет практические занятия самостоятельно в соответствии с индивидуальным заданием, используя данные методические указания, учебники, учебные пособия, справочники, ГОСТы и др.

Отчет по практическим занятиям должен быть представлен в сброшюрованном виде на листах формата А4 (210x297). Все листы, кроме титульного, нумеруются. Титульный лист оформляется по форме, образец которой представлен на кафедре или выдается преподавателем.

Отчет по практическим заданиям может быть выполнен с использованием персонального компьютера.

Изложение практического занятия должно быть кратким, логичным, четким, призванным дать обоснование принятым решениям. Сокращение слов в тексте не допускается. Значение символов и числовых коэффициентов, входящих в формулы, должны быть приведены непосредственно под формулой. Графические изображения могут быть выполнены на миллиметровой бумаге.

Практические занятия, выполненные не по вариантам и не по установленной форме, к защите не принимаются.

Тема 1. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРИМЕНЕНИЮ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Задачи работы: изучить устройство и работу установок для электроискрового легирования.

Приборы и принадлежности: трансформатор, выпрямитель, деталь, электроды.

В ремонтных мастерских можно изготовить установки для электроискрового легирования. Они очень просты по конструкции, надежны и удобны в эксплуатации. Установка позволяет осуществлять легирование поверхности на трех режимах:

-минимальном- при работе на этом режиме величина тока колеблется от 1 до 5А.,

-среднем- значение тока от 5 до 8А.,

-максимальном- значение тока от 8 до 16А.

Величина тока зависит от материала детали и электрода, формы и размера электрода.

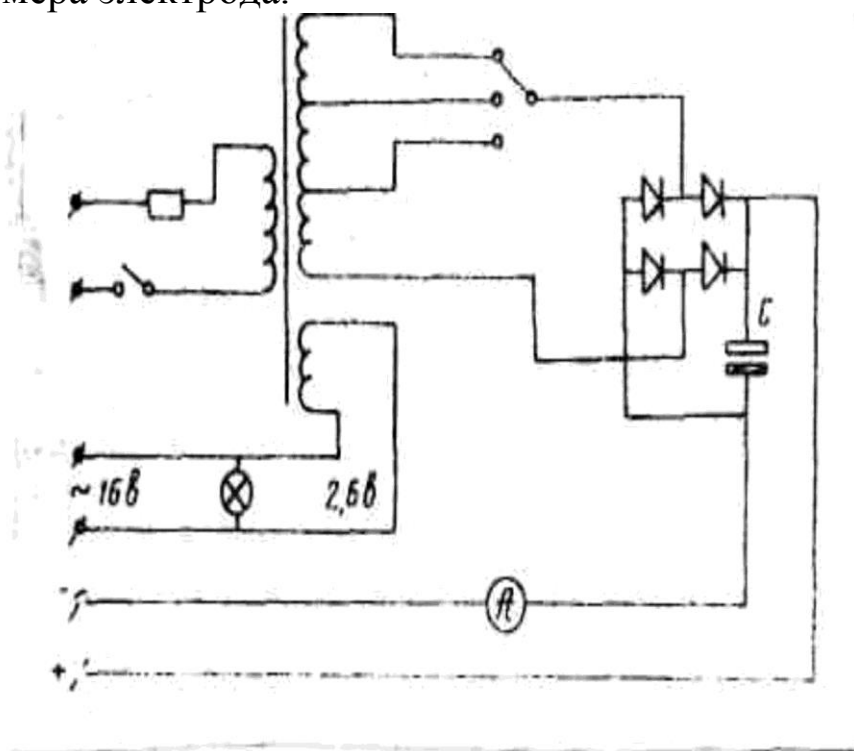


Рис.1. Электрическая схема установки для электроискрового легирования.

На рис.1. приведена принципиальная электрическая схема установки. Она состоит из трансформатора, имеющего три обмотки, и выпрямителя. Малая обмотка предназначена для питания переменным током напряжением 16В вибратора. Силовая обмотка состоит из трех выводов, которые соответствуют трем режимам обработки.

Выпрямитель служит для выпрямления тока, подаваемого на деталь и электрод. Конденсатор емкостью 1000 мкФ применяется для накопления энергии и подачи ее в момент разрядки в зону обработки. Отрицательная клемма установки всегда соединяется с деталью.

Питание установки для электроискрового легирования осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В.

Установка для чистовой электроискровой обработки (рис.2) состоит из трех блоков: блока выпрямителя постоянного тока с плавным регулированием выходного напряжения 0-12В, 0-10А., блока импульсного генератора с током в импульсе до 1000А, длительностью импульса 0,2-50 мкс., блока импульсного амперметра, имеющего свой стабилизированный выпрямитель на транзисторах, входной делитель напряжения.

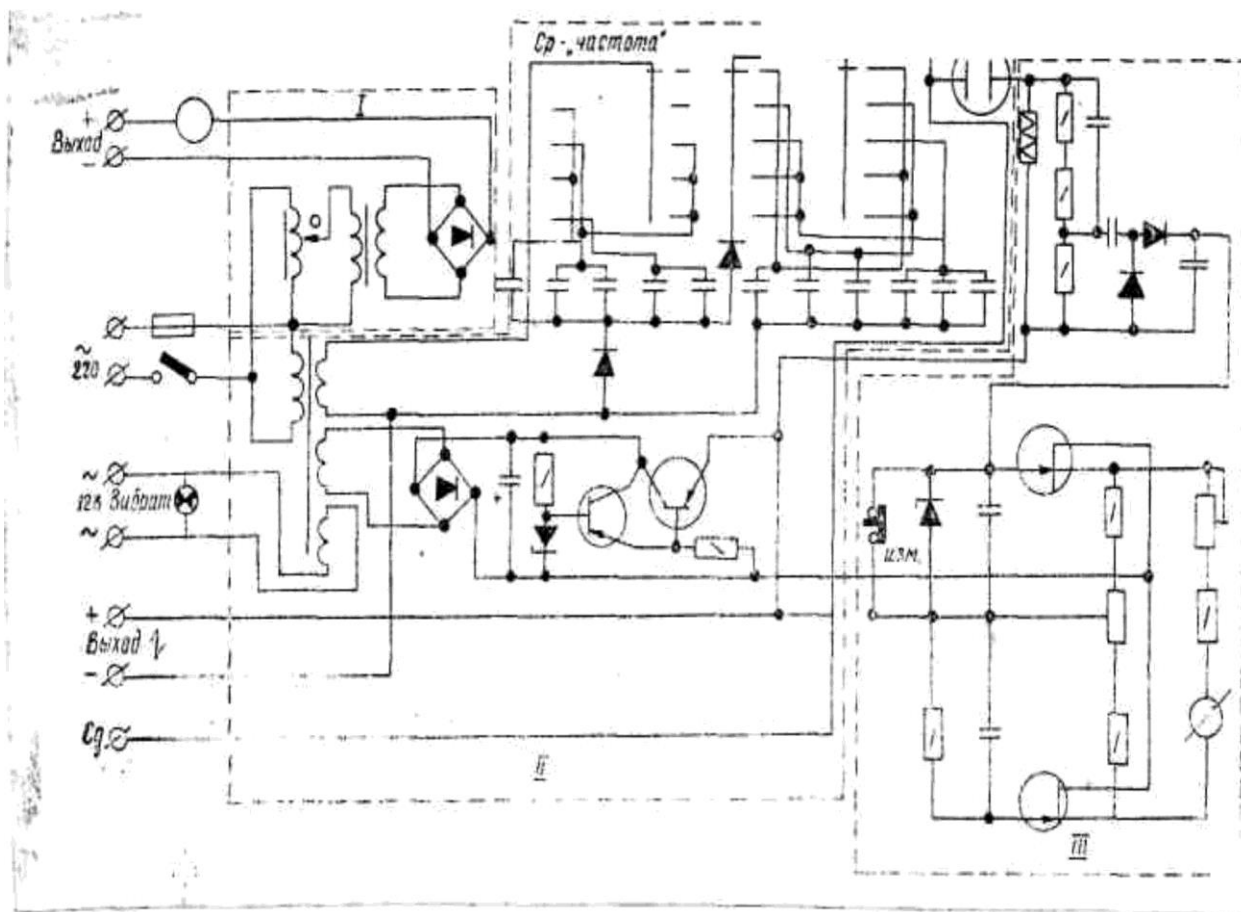


Рис.2.Электрическая схема установки для чистового электроискрового легирования.

Порядок проведения работы:

1. Собрать электрическую схему для электроискрового легирования.
2. Произвести электроискровое легирование.
3. Собрать электрическую схему установки для чистового электроискрового легирования.
4. Произвести чистовое электроискровое легирование.

Контрольные вопросы:

- 1.Что такое электроискровое легирование?
2. Сколько режимов можно использовать для электроискрового легирования?
3. Из каких частей состоит установка для чистового электроискрового легирования?

Тема 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОДЛОЖКОЙ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОТВЕРДОСТИ

Задачи работы: научиться определять прочность сцепления с подложкой упрочняющих покрытий методом микротвердости.

Приборы и принадлежности: микротвердомер ПМТ-3, пресс для горизонтальной установки образцов при измерениях, набор образцов.

Электрические измерения неэлектрических величин чрезвычайно широко применяются в сельскохозяйственном производстве. Измерение и контроль влажности, температуры, освещенности, насыщенности вредными и агрессивными газами и других неэлектрических характеристик с помощью датчиков (преобразователей), преобразующих неэлектрические величины в электрические сигналы, позволяет осуществлять своевременный и дистанционный контроль за технологическими процессами сельскохозяйственного производства, их автоматическое регулирование.

Достижения современной науки позволяют изготавливать датчики, идентичные по своим размерам, электрофизическим и эксплуатационным характеристикам, взаимозаменяемые без какой-либо подстройки контролирующей аппаратуры, что чрезвычайно важно в условиях сельскохозяйственного производства. В настоящее время уже изготавливаются тонкопленочные и фольговые датчики температуры, датчики неразрушающего контроля и др.

Одной из важнейших характеристик упрочненных деталей является сцепление нанесенного материала с деталью, так как отслаивание материала от детали немедленно делает ее непригодной к работе.

Метод микротвердости может использоваться для определения прочности нанесенного электроискровым методом сцепления материала с деталью.

На диаграмме «нагрузка- глубина внедрения индентора» (алмазная пирамида на микротвердомере ПМТ-3) четко выявляется точка перелома кривой нагружения, соответствующая критической нагрузке $R_{кр}$, при которой из-за влияния переходного слоя от покрытия к детали резко возрастает интенсивность пластического де-

формирования материала. Перелом кривой нагружения наблюдается при глубине отпечатка в 8-10 раз меньшем, чем толщина самой пленки или фольги (рис.3).

Установлена связь критической нагрузки $R_{кр}$ с температурой термостатирования наносимого материала к детали, прочностью сцепления материала с деталью и другими характеристиками, определяющими прочность сцепления.

При вдавливании индентора в границу раздела материалов детали и слоя возможно несколько вариантов поведения покрытия и детали (рис.3).

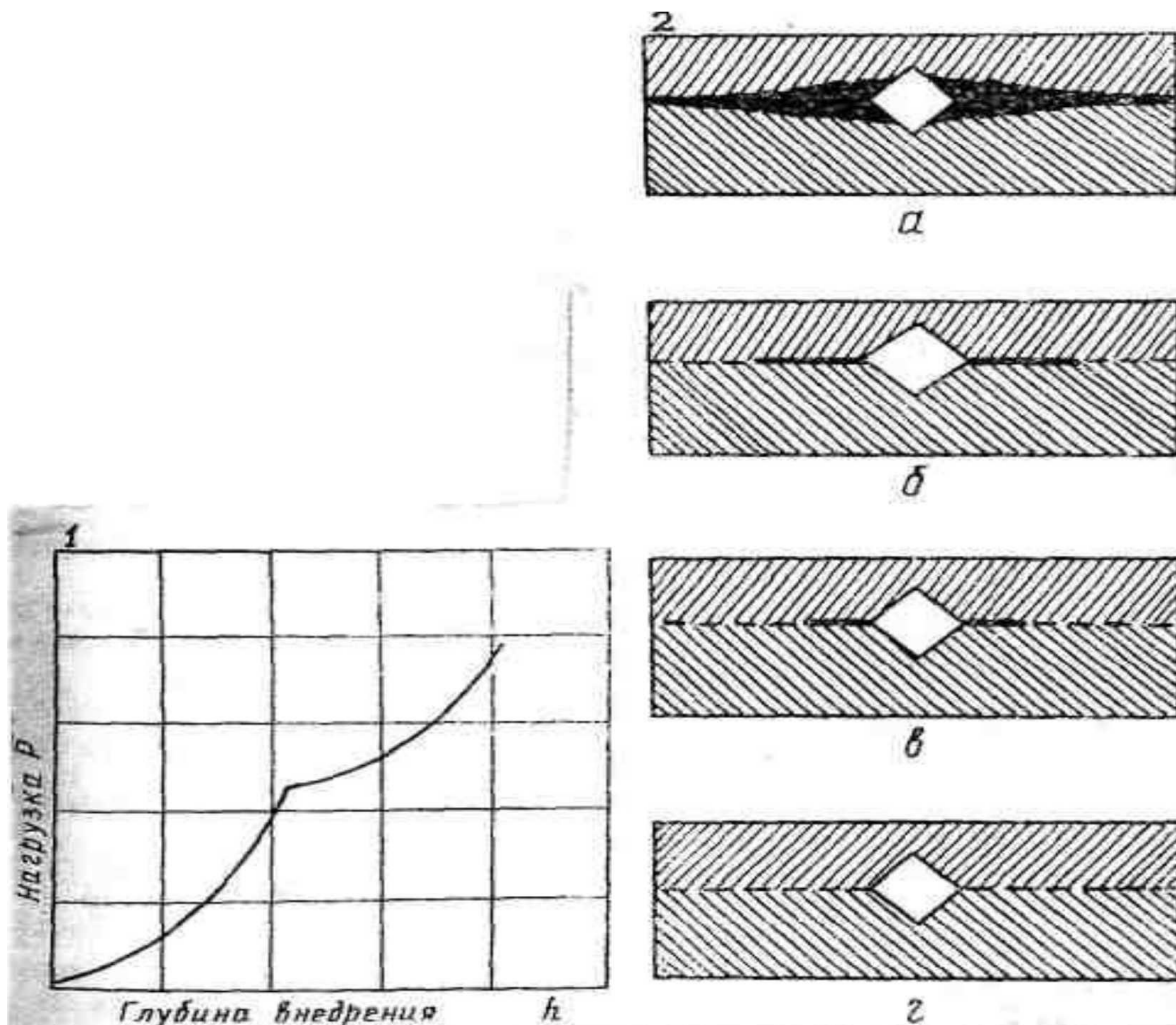


Рис.3. График зависимости глубины внедрения от нагрузки.

В углах отпечатка алмазной пирамиды возникают растягивающие напряжения G , которые пропорциональны микротвердости

Н:

$$G=CT \quad (1)$$

где C – некоторая постоянная для данного индентора, зависящая от угла вдавливания.

Эти напряжения уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния от центра отпечатка.

Поэтому, когда прочность сцепления покрытия и подложки невелика, покрытие при вдавливании индентора отслаивается, на границе раздела возникает трещина, размеры которой значительно больше самого отпечатка (3 а).

С увеличением адгезии покрытия и подложки размеры трещины уменьшаются (рис. 3б и 3в). В том случае, когда прочность сцепления покрытия и подложки больше прочности покрытия, трещина не образуется вообще (рис.3г).

Расклинивающее напряжение на конце трещины

$$G=H(d/l)^2=2P/l^2, \text{ кгс/мм}^2$$

где P -нагрузка на индентор;

d -длина диагонали отпечатка;

l -длина трещины около отпечатка по линии сцепления покрытия. Таким образом, если при вдавливании индентора возникают по линии сцепления покрытия и подложки трещины, то по формуле можно оценить разрушающее растягивающее напряжение на конце трещины длиной l , т.е. напряжение отрыва покрытия от подложки, и тем самым определить величину адгезии. Если же при вдавливании индентора в границу раздела покрытия и подложки трещина не образуется, то прочность сцепления будет не менее чем $2P_{кр}/d^2$.

Порядок измерений:

1. Изучают конструкцию и методику измерения микротвердости по инструкции к микротвердомеру ПМТ-3.
2. Устанавливают образец с помощью пресса на подставку горизонтально.
3. Устанавливают образец на поворотный столик микротвердомера и находят в микроскопе линию раздела покрытия и детали.
4. Подбирают методом проб такую нагрузку на индентор,

при которой в месте внедрения индентора по линии раздела покрытия и детали возникают трещины.

5. Проводят серию измерений длины трещины на каждом из образцов в различных точках линии раздела (не менее 10 точек).

6. Находят среднее значение сцепления покрытия и детали по формуле.

7. Проводят измерения адгезии на серии образцов, полученных при различных режимах термообработки при различных режимах нанесения легирующего слоя на деталь.

8. Проводят анализ полученных данных и делают вывод об оптимальном режиме технологии нанесения материала на деталь.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается метод микротвердости?
2. По какой формуле определяются растягивающие напряжения?
3. В чем заключается метод проб?
4. По какой формуле определяют среднее значение сцепления покрытия и детали?

Тема 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ, УПРОЧНЕННЫХ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Задачи работы: научиться определять физико-механические характеристики деталей, упрочненных электроискровым легированием.

Приборы и принадлежности: установка для электроискрового легирования, металломикроскоп МИМ-8М, микротвердомер ПМТ-3, набор образцов и электродов, прибор УТ-1.

Повышение надежности и долговечности деталей машин и механизмов связано с улучшением физико-механических характеристик их рабочих поверхностей, в частности с повышением твердости и износостойкости.

Известны многочисленные сплавы, стойкие против действия высоких температур, абразивных и агрессивных сред. Однако изготовление деталей из этих материалов часто не практикуется по технологическим или экономическим соображениям. Поэтому целесообразно и эффективно нанесение покрытий из этих материалов на рабочие поверхности деталей и инструмента, изготовленных из более технологичных и дешевых материалов.

В установках для электроискрового легирования применяются вибрирующие электроды.

При сближении электрода с легируемой поверхностью напряженность электрического поля растет и наступает момент, когда между электродом и поверхностью возникает искровой электрический разряд.

В дальнейшем происходит контакт электродов, сопровождающийся значительным выделением тепла Джоуля-Ленца, расплавлением и даже испарением контактирующих материалов. Электрический импульс между двумя электродами в жидком слое вызывает направленный взрыв металлической поверхности анода. В результате на аноде образуется лунка, а выброшенный металл оседает в жидкой капле материала катода (легируемой поверхности). При удалении электрода от поверхности происходит разрыв электрической цепи.

Легирование твердосплавными электродами позволяет дости-

гать твердости поверхности 2500-2800 кгс/мм².

Область применения установок электроискрового легирования достаточно велика. Установки эффективно применяются для упрочнения режущих кромок штампов, ножей, режущего инструмента из углеродистых инструментальных сталей.

Применение электроискрового легирования показало, что при упрочнении фрез, сверл, резцов, метчиков и других металлорежущих инструментов повышается их стойкость в 2-5 раз, стойкость вырубных штампов, дисковых пил и режущих звеньев сельскохозяйственных машин - в 3-5 раз.

Электроискровое упрочнение не только повышает износостойкость штампов и режущих инструментов, но и сокращает время на их установку, переточку, снижает затраты на их изготовление.

Установки для электроискрового легирования используются в ремонтно-восстановительных работах. Этот метод применяется для восстановления деталей автомобилей, тракторов, экскаваторов, сельхозмашин, при упрочнении и восстановлении крупногабаритных деталей машин и агрегатов, работающих в условиях абразивного трения в присутствии агрессивных сред, для восстановления размеров изношенных деталей.

Эффективность метода во многом зависит от правильного выбора материала легирующего электрода, режимов и условий обработки.

Порядок измерений:

1. Изучить схему установки для электроискрового легирования и прибора УТ-1.
2. Привести установку в рабочее состояние.
3. Нанести легированный слой на образцы по режимам.
4. Изготовить микрошлифы образцов для исследования микроструктуры, толщины и микротвердости легированного слоя.
5. Исследовать на металломикроскопе МИМ-8М микроструктуру упрочненного слоя.
6. Измерить на микротвердомере ПМТ-3 микротвердость упрочненного слоя на различных расстояниях от поверхности образца.
7. Построить график зависимости микротвердости от глу-

бины упрочненного слоя.

8. Определить по измерениям микротвердости толщину белого и упрочненного слоя.

9. Измерить на приборе УТ-1 толщину легированного слоя.

Контрольные вопросы:

1 Принцип работы прибора УТ-1?

2. Для чего применяется металломикроскоп МИМ-8М?

3. Как определяется по измерениям микротвердости толщина белого и упрочненного слоя?

Тема 4. ВЫБОР РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ХОЛОДОМ

Задачи работы: научиться выбирать режим термической обработки холодом.

Приборы и принадлежности: установка для обработки холодом, детали.

При выборе режимов термической обработки холодом для деталей, не прошедших никакой предварительной термообработки, разрабатывают последовательность операций термообработки, включая обработку холодом., исходя из химического состава материала деталей, марки материала, времени между последней термообработкой и обработкой холодом, устанавливают минимальную температуру и время охлаждения глубоким холодом (M_k), определяют температуру и время последующего низкотемпературного отпуска, определяют экономические показатели процесса.

Если детали или инструмент хранились длительное время до обработки глубоким холодом, температура закалочной среды (хладоагента) должна быть на 40-50 К ниже точки аустенитномартенситного превращения M_k .

Остающийся после закалки глубоким холодом остаточный аустенит обычно незначительно влияет на величину максимально возможной твердости изделий и на стабильность их размеров. При изготовлении деталей высокой точности необходимо обеспечить максимальную стабильность их размеров и формы изделий. В этом случае следует после обработки холодом провести низкотемпературный отпуск и затем повторить обработку холодом с последующим старением.

Опыт работы ряда машиностроительных предприятий и литературные данные позволяют рекомендовать технологические режимы обработки глубоким холодом деталей и инструмента (таблица 1).

Таблица 1

Рекомендуемые режимы термообработки.

Тип материала	Температура нагрева перед закалкой, °С	Температура при закалке, °С	Температура обработки холодом, К	Температура отпуска, °С
1	2	3	4	5
Стали У8-У12	1050-1100	350-400	180-200	400-450
Быстрорежущие стали типа Р9-Р18	1500-1550	350-400	180-200	750-800
Хромоникелевые стали типа 12ХН3А, 18Х2Н4ВА	1200-1250	250-300	150-180	400-450
Стали типа Х12М	1300-1350	280-300	150-180	400-450
Стали типа ХВГ, ХГ	1100-1150	280-300	150-180	350-400

Практика показала, что все легированные стали могут быть обработаны холодом путем погружения в жидкий азот. Температура – 196°С достаточна для осуществления фазового перехода аустенита в мартенсит для всех легированных сталей. Для многих сталей достаточна и обработка холодом в среде «сухого льда».

Обработке холодом следует подвергать мерительный инструмент из стали типов У8-У12. Твердость возрастает при этом на 3-4 единицы НРС, ресурс работы инструмента увеличивается в 2 раза.

Обработка холодом инструмента из быстрорежущей стали типа Р18 позволяет получить твердость 63-65 единиц НРС. При этом сокращается время термической обработки на 2-2,5 ч, повышается износостойкость в 3-8 раз.

Обработка холодом штампов и холодновысадочного инструмента из стали Х12М, ХВГ, ХГ увеличивает их твердость до 60-62 единиц НРС, повышает стойкость в несколько раз, позволяет сократить время термообработки в 2-3 раза.

Значительно (в 2-3 раза) повышается износостойкость деталей машин, изготовляемых из легированных сталей после обработки холодом. Глубокое охлаждение приводит к стабилизации их размеров, повышению твердости. Такой обработке должны подвергаться калибры, мерительные инструменты, штампы, пресс-формы, шари-

ки, ролики и кольца подшипников, ответственные детали сельскохозяйственных машин, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях.

Обычный способ стабилизации размеров и форм деталей из закаленной стали- отпуск и старение- приводит к снижению их твердости и износостойкости, требует больших затрат времени. Обработка холодом значительно эффективнее, на нее уходит в десятки раз меньше времени, чем на старение, так как при этом происходит практически полное превращение аустенита в мартенсит.

Практика показывает, что при обработке деталей холодом их размеры стабилизируются и в тех случаях, когда в материале не происходят фазовые превращения. Это подтверждается низкотемпературной обработкой деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, чугунных отливок.

Эффективность стабилизации размеров деталей возрастает при чередовании отпуска и обработки холодом.

Контрольные вопросы:

1. Что такое обработка холодом?
2. Что входит в режим термической обработки холодом?

Тема 5. ПЕРЕЧЕНЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Задачи работы: научиться правильно составлять перечень технологических операций восстановления деталей.

Принадлежности и инструменты: органические растворители, измерительные инструменты, инструменты для механической обработки, муфельная печь.

Технологический процесс восстановления деталей гальваническими покрытиями включает операции в следующей последовательности: моечную, контрольную, удаления покрытия, моечную, контрольную, механическую обработку, термическую обработку, контрольную, упрочняющую, контрольную, гальваническую или химическую (нанесение покрытия), контрольную, термическую, механическую обработку, термическую, отделочно-упрочняющую, контрольную.

I. Моечная операция. Обезжиривают деталь органическими растворителями, химическими и электрохимическими методами для удаления смазок, загрязнений, продуктов коррозии, промывают в теплой воде (60°C), сушат теплым воздухом.

II. Контрольная операция. Измеряют размеры деталей, оценивают качество поверхности (визуально) и проводят дефектацию. Детали, не удовлетворяющие требованиям ТУ, бракуют. По величине износа определяют дальнейший маршрут восстановления детали.

При повышенном износе поверхность детали восстанавливают нанесением гальванического покрытия, предварительно удалив с поверхности изношенное покрытие.

III. Удаление покрытия. Осуществляют химическим или электрохимическим методом.

IV. Моечная операция. Промывают детали в теплой (60°C) проточной воде до полного удаления растворов, применяемых на операции III, промывают в содовом растворе для нейтрализации следов кислоты, промывают в холодной проточной воде до полного удаления остатков содового раствора, сушат в струе теплого воздуха досуха.

V. Контрольная операция. Предусматривает контроль размеров и визуальную оценку состояния поверхности. При наличии на поверхности следов коррозии или окалины деталь подвергают механической обработке.

VI. Механическая обработка. Перед нанесением гальванического покрытия проводят для удаления дефектов поверхностного слоя и обеспечения размерной точности поверхности, а также очистки деталей от окалины, ржавчины.

VII. Термическая обработка. Устраняют неоднородность напряженного состояния поверхностного слоя, возникающего при эксплуатации и механической обработке детали. Режимы приведены в табл.2.

Если рабочий технологический процесс предусматривает выполнение упрочняющей обработки, то термическую обработку не проводят.

VIII. Контрольная операция для выявления усталостных или шлифовочных трещин.

Таблица 2

Режимы термической обработки деталей

Покрытие	Цель обработки	Среда	Температура, °С	Продолжи тельность
1	2	3	4	5
Твердое износостойкое хромовое, железное	До нанесения покрытия	Воздух	180-200	2-3
	Снижение остаточных растяги- вающих напряжений в поверхностном слое деталей из чугуна	Воздух	200-250	2-3
	Снижение остаточ- ных растягивающих напряжений в по- верхностном слое де- талей из			
	конструкционных сталей и сплавов с	Масло	200-230	2-3
	пределом прочности 0,9-1,3 ГПа	Воздух	200-250	2-3
Более 1,2 ГПа				
После нанесения покрытия	Обезводороживание деталей из	Масло	200-230	2-3
	конструкционных сталей и сплавов с			
	пределом прочности 0,9-1,2 ГПа			
	Более 1,2 ГПа			

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Никелевое, никельфосфорное	Повышение твердости покрытия и сцепления с основной деталей: из конструкционных сталей и сплавов с пределом прочности 0,9ГПа Более 0,9ГПа Медных сплавов Алюминиевых сплавов	Воздух	350-400	1
		«	200-230	12
		«	280-300	1
		«	140-220	2-3
Кадмиевое	Обезводороживание деталей из конструкционных сталей и сплавов с пределом прочности 0,9ГПа	Воздух	200-220	12

IX. Упрочняющая обработка. Применяют для повышения выносливости деталей и герметичности хромовых покрытий. Упрочняющей обработке подлежат все детали из высокопрочных материалов, подвергаемые хромированию, железнению и кадмированию.

Порядок выполнения работы:

1. Мойка детали.
2. Измерить деталь и проверить качество поверхности.
3. Удалить покрытие.
4. Промыть детали в теплой воде.
5. Проверить размеры детали.
6. Очистить деталь от окалины и ржавчины.
7. Провести термообработку детали.
8. Выявить усталостные и шлифовочные трещины.
9. Провести упрочняющую обработку.

Контрольные вопросы:

1. Из скольки этапов состоит технологический процесс восстановления деталей?
2. Какая цель обработки кадмиевых покрытий?

Тема 6. КОНТРОЛЬ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОТВЕРДОСТИ

Задачи работы: научиться производить контроль дислокационной структуры покрытий методом микротвердости.

Приборы и принадлежности: микротвердомер ПМТ-3, набор монокристаллических электротехнических сплавов с разной плотностью дислокаций, набор фольговых электротехнических материалов в различных состояниях, наборы осажденных электротехнических материалов, полученные в разных технологических условиях

Теоретические сведения: Кристаллическая структура металлов и сплавов, в значительной степени определяющая многие физические и механические свойства, даже в термодинамически равновесном состоянии всегда содержит значительное количество точечных и линейных дефектов: вакансий, междоузельных атомов, дислокаций. В сплавах положение усложняется еще и концентрационными неоднородностями, взаимодействующими со структурными дефектами.

В настоящее время еще не существует достаточно экспрессных методов, позволяющих с полной определенностью судить о характере дислокационной структуры, плотности дислокаций и их движении в поликристаллических материалах. Рентгеновские, электронномикроскопические, ультразвуковые и другие методы позволяют определить, в лучшем случае, лишь порядок величины плотности дислокаций. Метод ямок травления дает приемлемые результаты только при исследовании монокристаллов с малой плотностью дислокаций. Кроме того, эти методы сложны, трудоемки и вряд ли могут быть использованы для исследования быстропротекающих процессов.

Микротвердость материала связана с его кристаллической структурой и физико-механическими свойствами.

В ряде металлов установлена корреляционная связь между микротвердостью и пределом текучести. Связь между твердостью и микротвердостью и пределом прочности выражается соотношением:

$$G_B = C H_B + B_n$$

где G_b -напряжение разрыва;

C и B -константы;

H_v -твердость по Бринеллю.

Величина C для отожженных металлов имеет значение 0,4-0,5, а для деформированных 0,2-0,3.

Величина B может быть в пределах 0,1-0,3 кг/мм². Во многих случаях ею можно пренебречь по сравнению с величиной H_v .

В работе указано на возможность равенства предела прочности G_b напряжению взаимодействия дислокаций при больших деформациях. Можно допустить, что вообще напряжение взаимодействия дислокаций G пропорционально пределу прочности:

$$G_b = AG$$

В первом приближении $A=1$. Следовательно, можно приравнять предел прочности G_b напряжению, возникающему около дислокаций на расстоянии, равном среднему расстоянию между дислокациями, т.е. $G_b=G$

Связь между напряжениями взаимодействия дислокаций и параметрами, характеризующими кристаллическую решетку металла, может быть выражена формулой:

$$G = G_b / 2\pi(1 - \nu)r(1 - \nu \cos^2 \alpha)$$

где G -модуль сдвига материала;

b -вектор Бюргерса;

ν -коэффициент Пуассона;

α -угол, образованный дислокацией с вектором Бюргерса;

r -расстояние между дислокациями.

Порядок измерений:

1. Изучают конструкцию и настройку микротвердомера ПМТ-3 по инструкции.
2. Приводят микротвердомер в рабочее состояние.
3. Полируют и очищают от загрязнений серию образцов для исследования плотности дислокаций: набор монолитных пластинок

с электролитическими осадками из электротехнических материалов (например, меди, стали, хрома).

4. Проводят измерения и вычисления микротвердости образцов.

5. Определяют по формулам плотность дислокаций во всей серии образцов.

6. Строят график зависимости плотности дислокаций от факторов, оказывающих влияние на состояние образцов.

Контрольные вопросы:

1. Из каких частей состоит микротвердомер ПМТ-3?
2. Как производится измерение микротвердости образцов?
3. По какой формуле определяется плотность дислокаций?

Тема 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Задачи работы: научиться определять толщину покрытий методом вихревых токов.

Приборы и принадлежности: куметр ИДН-1, токовихревой накладной датчик, набор образцов.

Общие сведения: Неразрушающий контроль методом вихревых токов применяется для различных измерений и обнаружения дефектов. Вихревые токи возникают в металлическом образце (детали) при помещении его в магнитное поле, создаваемое переменным током индукционной катушки (датчика). Переменное магнитное поле

порождает вихревые токи в проводниках, которые создают свое поле. Это вторичное поле действует в соответствии с правилом Ленца навстречу полю возбуждения. Чем лучше проводник пропускает токи, тем ближе по величине к первоначальному встречное магнитное поле. Возникающие на поверхности проводника вихревые токи создают своеобразный экран полю возбуждения.

В основе измерений прибором ИДН-1 лежит принцип куметра, т.е. свойство последовательного контура, настроенного в резонанс, увеличивать напряжение на емкости контура в Q раз по сравнению с ЭДС, вводимой в контур. На рис.4 приведена схема последовательного колебательного контура с подключенным датчиком.



Рис.4. Схема подключения вихретокового датчика

На рисунке L - активное сопротивление и индуктивность катушки индуктивности., C - переменный конденсатор, служащий для настройки контура в резонанс., u - напряжение, вводимое в контур., V - напряжение на конденсаторе., D -образец.

Для подготовки прибора к работе и работы с ним необходимо проделать следующее.

1. Переключатель «Шкалы Q » установить на шкалу «300».
2. Ручку «Установка входного напряжения» вывести в крайнее левое положение.
3. Ручками «Множитель частоты» и «кГц» установить по шкале генератора частоту 1кГц.
4. Включить прибор в сеть 220В.
5. Дать прибору прогреться 20-30мин.

По окончании работы с прибором необходимо:

- а) вращением влево до упора ручки «Установка входного напряжения» снять входной сигнал;
- б) ручку «Шкалы Q » установить на шкалу «300»;
- в) ручки декад магазина вывести в нулевое положение;
- г) поставить тумблер «220» в положение «Выключено». При этом сигнальная лампа гаснет;
- д) выключить прибор из сети.

Порядок измерений:

1. Определить добротность датчика (если она неизвестна) на различных частотах (20, 40, 60, 80 Гц).

2. Построить график зависимости Q от толщины гальванического покрытия на подложке (для этого берется набор образцов с последовательно возрастающей толщиной покрытия) на частоте с максимальной добротностью (например 40 Гц). Чтобы ускорить процесс измерения и повысить чувствительность, необходимо произвести подстройку установки. Подстройка заключается в следующем: после того как определена добротность датчика ручку переключателя «Шкалы Q » переключить на меньший предел (например, с 300 на 100) и переключателем рукоятки третьей декады магазина емкостей вывести стрелку прибора « Q » в правое крайнее положение. Накладывая датчик на образцы, занести в таблицу показания « Q » в зависимости от толщины покрытия.

В дальнейшем измерения толщин покрытий проводят наложением датчика на деталь и по значению Q определяют толщину гальвани-

ческого покрытия.

Контрольные вопросы:

1. Как определяется добротность датчика?
2. Где применяется неразрушающий контроль методом вихревых токов

Тема 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ И ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Задачи работы: научиться определять толщину гальванических и лакокрасочных покрытий на металлических деталях электромагнитным методом.

Приборы и принадлежности: универсальный толщиномер УТ-2, набор деталей с различными гальваническими покрытиями.

Общие сведения: Широкое внедрение в практику сельскохозяйственного машиностроения антикоррозийных, износостойких, декоративных покрытий потребовало разработки приборов, контролирующих качество и толщину покрытий.

В магнитных приборах для измерения толщины покрытий используют постоянные магниты, сила отрыва от детали которых служит индикатором измеряемой величины, или электромагниты, сила отрыва которых от детали измеряется по изменению тока намагничивания.

Магнитный метод прост и удобен в производственных условиях, когда покрытие является немагнитным или слабомагнитным и нанесено на ферромагнитную деталь, например, при измерениях никелевых, цинковых, медных, хромовых, лакокрасочных и ряда других покрытий. Промышленность выпускает приборы такого класса типа МТ-2, В-22, В-166, ИПТ-1 и многие другие. Общим их недостатком является значительное влияние на определение толщины покрытий таких технологических параметров и конструктивных факторов, как состояние материала основы, кривизна и неплоскостность контролируемой поверхности, шероховатость ее и т.д. Практически при работе с этими приборами погрешность измерения достигает величины $\pm 10\%$ от верхнего предела шкалы, при этом шероховатость поверхности должна быть в пределах 5-го класса.

Для ремонтных предприятий удобны в эксплуатации универсальные толщиномеры (УТ-1 и УТ-2), позволяющие измерять глубину упрочненного слоя, нанесенного различными методами восстановления и упрочнения деталей. Кроме того, прибором можно определять толщину различных гальванических и лакокрасочных

покрытий на деталях из ферромагнитных материалов. Измерения можно производить как в отдельной точке, так и на большой поверхности, для чего датчик прибора имеет сменные сердечники.

Принцип работы толщиномера основан на измерении силы отрыва сердечника электромагнита в зависимости от толщины покрытия, отличающегося по своим магнитным свойствам от материала детали (рис.5, а).

Измерение толщины покрытия производится выносным датчиком - электромагнитом Д (рис.5,б). Датчик состоит из конусной электромагнитной катушки с сопротивлением 18 Ом, подвижного сердечника из армо-железа и хвостовика. Электромагнитная катушка закреплена неподвижно в дюралевом корпусе, а сердечник может двигаться свободно в направляющей втулке из фторопласта. В верхнюю часть корпуса датчика вмонтировано фотосопротивление ФСК-1 и лампочка подсветки на 13,6 В, поток света от которой перекрывается при подъеме сердечника.

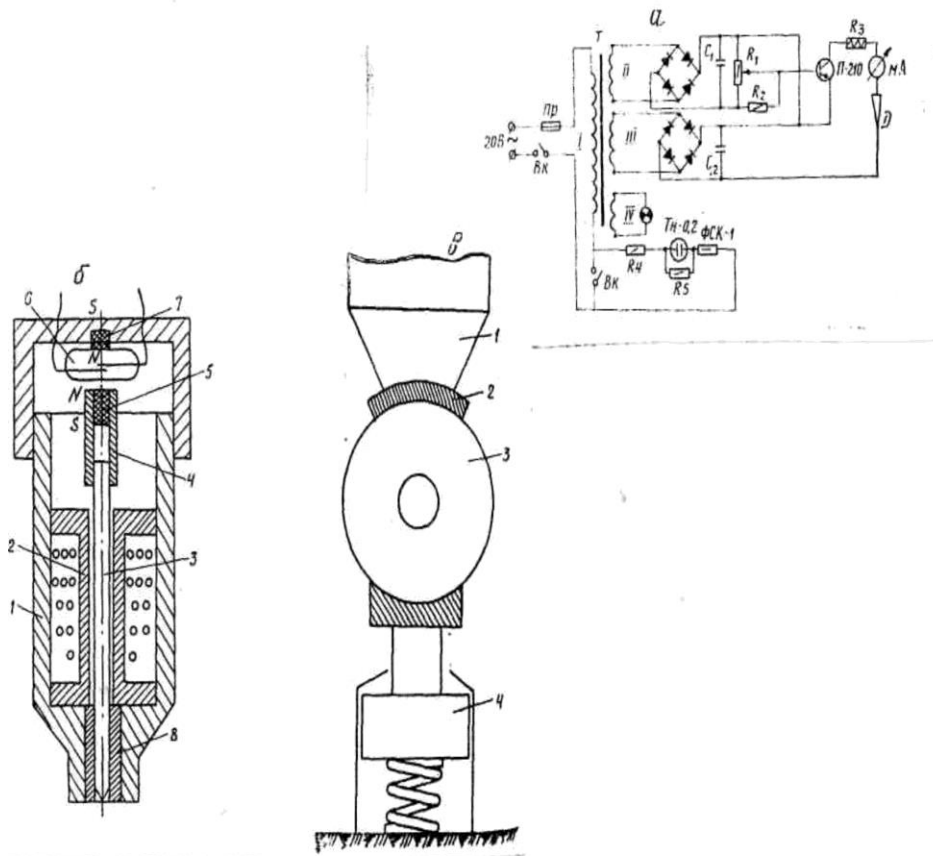


Рис.5. Схема универсального толщиномера УТ-1 (а), датчика (б) и измерительного столика (в): 1-датчик; 2-насадка; 3-деталь; 4-пружинящий столик.

При установке датчика на измеряемую деталь сердечник под действием собственного веса опускается до соприкосновения с деталью. Свет от лампы подсветки попадает на ФСК-1, его сопротивление уменьшается, в цепи идет ток, а неоновая лампа горит. При пропускании тока через электромагнитную катушку сердечник втягивается в нее и хвостовиком перекрывает поток света от лампы подсветки. Сопротивление ФСК-1 резко возрастает, цепь размыкается и неоновая лампа гаснет.

Отрыв сердечника от детали происходит при определенной силе тока, проходящего через электромагнитную катушку. Величина этого тока измеряется миллиамперметром М-94.

Сила тока, необходимая для отрыва сердечника от детали, зависит от магнитных свойств и толщины покрытий. Следовательно, миллиамперметр М-94 при соответствующей градуировке измеряет толщину покрытия.

Элементы электрической схемы прибора имеют следующие параметры. Первичная обмотка трансформатора I питается от сети переменного тока с напряжением 220 В. Вторичная обмотка понижающего трансформатора II на 6В питает выпрямительный мост на четырех диодах КД-204А, а вторичная обмотка понижающего трансформатора III на 40В питает выпрямительный мост на четырех диодах Д-243Б. Лампочка на передней панели прибора на 6,3В питается от трансформатора IV и сигнализирует о включении прибора в сеть. Конденсаторы и сопротивления: С1-100 мкФ., и- 6В., С2-100 мкФ., и-50В., R1- 1кОм. R2-1,6 кОм. R3-20 Ом. R4-560кОм. R5-1мОм.

В качестве регулятора тока использован триод П-210, в коллекторную цепь которого включен датчик Д в качестве нагрузки.

Толщиномер УТ-2 отличается от УТ-1 конструкцией датчика. Вместо фотосопротивления ФСК-1 и лампочки подсветки в датчике

использован магнитоуправляемый контакт типа КЭМ-1-6, а на конце сердечника электромагнитной катушки помещен небольшой постоянный магнит.

Применение магнитоуправляемых контактов позволило упростить схему датчика и уменьшить его размеры.

В зависимости от целей применения прибора можно менять сердечник датчика. Например, для измерения толщины покрытия в точке используют сердечник в виде иглы, для измерения на определенной площади- с плоским основанием.

По эталонам различных покрытий производят градуировку прибора и в дальнейшем используют его для неразрушающего контроля деталей.

Для того чтобы датчик всегда соприкасался с контролируемой деталью и располагался вертикально, применяют специальные приспособления (измерительные столики), позволяющие плавно и в нужном направлении перемещать корпус датчика. Для зажима контролируемой детали с одинаковым усилием без нанесения дефектов на гальванопокрытие используют пружинящий столик (рис.5,в). При контроле криволинейных поверхностей деталей применяют соответствующие насадки к датчику, повторяющие кривизну контролируемой поверхности. Это обеспечивает стабильность измерений.

Градуировку прибора можно провести капельным методом. Например, для контроля кадмиевых покрытий применяют 10%-ный раствор йода и специальной капельницей, имеющей диаметр капилляра 1,5-2мм, каплю подают на обезжиренную поверхность детали. Отсчитывают секундомером 30с, затем салфеткой убирают остатки йода и вновь подают каплю до полного травления покрытия. Толщину покрытия определяют по формуле

$$h=(n-0,5)hk$$

где n-число капель,

hk -толщина кадмиевого слоя, снимаемого одной каплей за 30с.

Порядок измерений:

1. Прибор и датчик установить на горизонтальном рабочем столе.

2. Перед включением прибора проверить положение ручек управления, которые должны находиться:

а) регулятор «Вкл-выкл»- в положении «Выкл» (левое крайнее положение);

б) датчик установить в строго вертикальном положении;

3. Включить прибор в сеть ($U=220V$). При этом должна загореться неоновая лампочка.

4. Надеть на торец датчика наконечник, соответствующий геометрии детали, и установить на измерительный столик деталь.

5. Привести в соприкосновение деталь и сердечник датчика. Регулятором «Вкл.-Выкл.» поворачивая его по часовой стрелке, добиться выключения неоновой лампочки. Прибор к работе готов.

6. Изготовить эталоны различных электролитических или лакокрасочных покрытий, наиболее часто используемых на данном предприятии.

7. Проградуировать прибор по эталонам, построить кривую зависимости «толщина покрытия-показания прибора».

8. Наложением датчика на деталь определить величину тока отрыва и по градуировочным кривым или шкале УТ измерить толщину гальванических или лакокрасочных покрытий на деталях.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность магнитного метода?
2. Какие толщиномеры применяют на ремонтных предприятиях?
3. Принцип работы толщиномера?

Тема 9. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РЕМОНТА КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Задачи работы: научиться производить контроль качества ремонта коленчатых валов.

Принадлежности и инструменты: ультразвуковая установка для контроля коленчатых валов, коленчатые валы.

Ультразвуковая установка дает возможность выявить и классифицировать трещины, поры и другие дефекты коленчатых валов, регистрировать их графически перед наплавкой, а также позволяет определять характеристики восстановленного вала (количество заплавленных трещин и пор в поверхностном слое, наличие шлаковых включений).

Установка состоит из следующих узлов: генератора высокочастотных импульсов Г, приемного трактора Пр, генератора развертки Гр, электронно-лучевой трубки, входящей в ультразвуковой дефектоскоп УДМ-1М, а также самопишущего милливольтметра Н-390-СП, анализатора дефектов АД, приборов звуковой ЗС, световой сигнализации и набора искателей для коленчатых валов разных марок (рис.6,а).

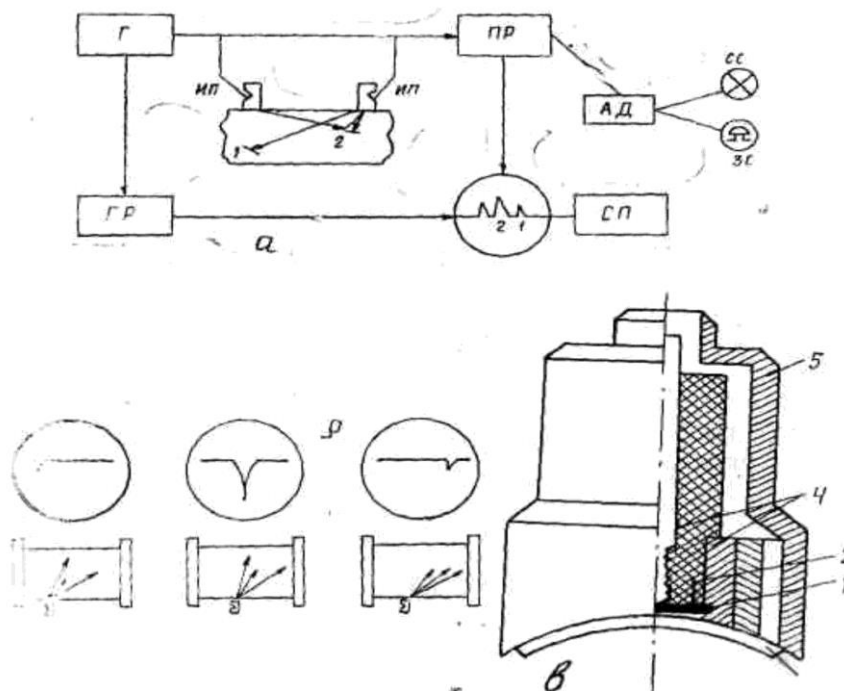


Рис.6. Ультразвуковая установка для контроля коленвалов

Методы ультразвуковой дефектоскопии основаны на измерении процесса распространения упругих колебаний с частотой 0,5-0,25 мГц в контролируемых изделиях.

Если размеры дефекта значительно меньше длины волны, то волны огибают его без существенного отражения. Для получения заметного отражения необходимо, чтобы размеры дефекта в направлении, перпендикулярном ультразвуковому лучу, были соизмеримы с длиной волны.

При малой толщине дефекта доля отраженной от него энергии определяется также величиной раскрытия в направлении прозвучивания.

При падении ультразвуковой волны на границу раздела сред под некоторым углом В волна из первой среды проходит без искажения во вторую только при условии, если вторая среда аналогична первой по акустическим параметрам.

Интенсивность отраженной волны зависит прежде всего от размеров и формы дефекта, направления, в котором происходит отражение, расстояния от дефекта. Амплитуда эхосигнала зависит и от взаимного положения совмещенного искателя и дефекта (рис.6,б).

Установка работает следующим образом: шейки контролируемого вала для создания акустического контакта смазываются маслом АС-8 или другим, близким по консистенции.

Рабочая поверхность искателя, состоящего из пьезопластины 1, демфера 2, протектора 3, соединяющих проводников 4 и корпуса 5, также смазывается маслом (рис.6,в). Ультразвуковой дефектоскоп для выхода на рабочие параметры предварительно прогревается в течение 15-20с. К специальному выходу дефектоскопа подключается самопишущий милливольтметр Н-390.

При наложении искателя на контролируемую шейку коленчатого вала сигнал с дефектоскопа поступает для регистрации на самопишущий милливольтметр Н-390 и одновременно на анализатор дефектов. Поскольку по технологии восстановления валов допускаются трещины глубиной до 1мм, установка настроена для регистрации трещин и пор больше допустимых.

Анализатор дефектов представляет собой блок сравнения и работает на принципе сравнения эталонного и входного сигналов.

При ультразвуковой дефектоскопии выявляются также окисные пленки, сетка мелких пор и трещин. Время контроля одного вала не более 2-3мин. Вероятность выявления дефектов близка к единице.

Установка позволяет осуществлять контроль качества не только коленчатых валов, но и цапф, полуосей, пальцев рулевых тяг, крестовин дифференциалов, карданных валов и других деталей.

Порядок выполнения работы:

1. Смазать шейки контролируемого вала;
2. Собрать установку;
3. Прогреть ультразвуковой дефектоскоп в течении 15-20с;
4. Произвести контроль ремонта коленчатого вала;

Контрольные вопросы:

1. Что определяют ультразвуковой установкой?
2. Принцип работы ультразвуковой установки?

Тема 10. КОНТРОЛЬ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПОКРЫТИЙ ДАТЧИКОМ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ

Задачи работы: научить производить контроль восстановленных поверхностей и покрытий датчиком поглощенной энергии.

Приборы и принадлежности: датчик поглощенной энергии, милливольтметр В2-11, набор отожженных и деформированных материалов-образцов, микрометр.

В настоящее время не существует приборов, способных определить величину поглощенной энергии. В то же время известно, что энергетическую сторону процесса деформации металлов наиболее полно характеризует поглощенная энергия.

Можно определять поглощенную энергию деформации по величине ЭДС элемента, составленного из пластически деформированного и отожженного образца в качестве электродов.

Известно, что уменьшение свободной энергии системы вследствие происходящих в ней химических реакций служит мерой работы, которую можно получить. Измеряя количество электроэнергии, отданной в ходе реакции в гальваническом элементе, можно определить работу химического превращения.

Если в элементе прореагирует кг-эквивалент вещества, то количество электричества, протекающего по цепи, будет равно числу Фарадея F . Полученная при этом электрическая энергия, равная FE , представит собой изменение свободной энергии на кг-эквивалент вещества. Так как F -константа, то очевидно, что ЭДС является непосредственной мерой измерения свободной энергии, возникшей в результате перенесения определенного количества вещества в элементе с одного электрода на другой.

Величина скрытой энергии пластической деформации, приходящаяся на единицу прореагировавшего вещества, определяется отношением величины ЭДС элемента к электрохимическому эквиваленту металла, из которого сделаны электроды.

Из $W=FE$ следует, что $w/m=RE/m$. Так как $m/F=K$, то $w/m=E/K$ и $W=Em/K$

Здесь W -скрытая энергия пластической деформации., m - масса прореагировавшего вещества., E - ЭДС., K -электрохимический эквивалент металла.

Из теории дислокаций следует, что скрытая энергия деформации, идущая в основном на создание и движение дислокаций, может быть определена по формуле:

$$W = Gb^2NV$$

где N -плотность дислокаций;

V -деформируемый объем.

На рис.7 представлена схема датчика поглощенной энергии деформированных металлов.

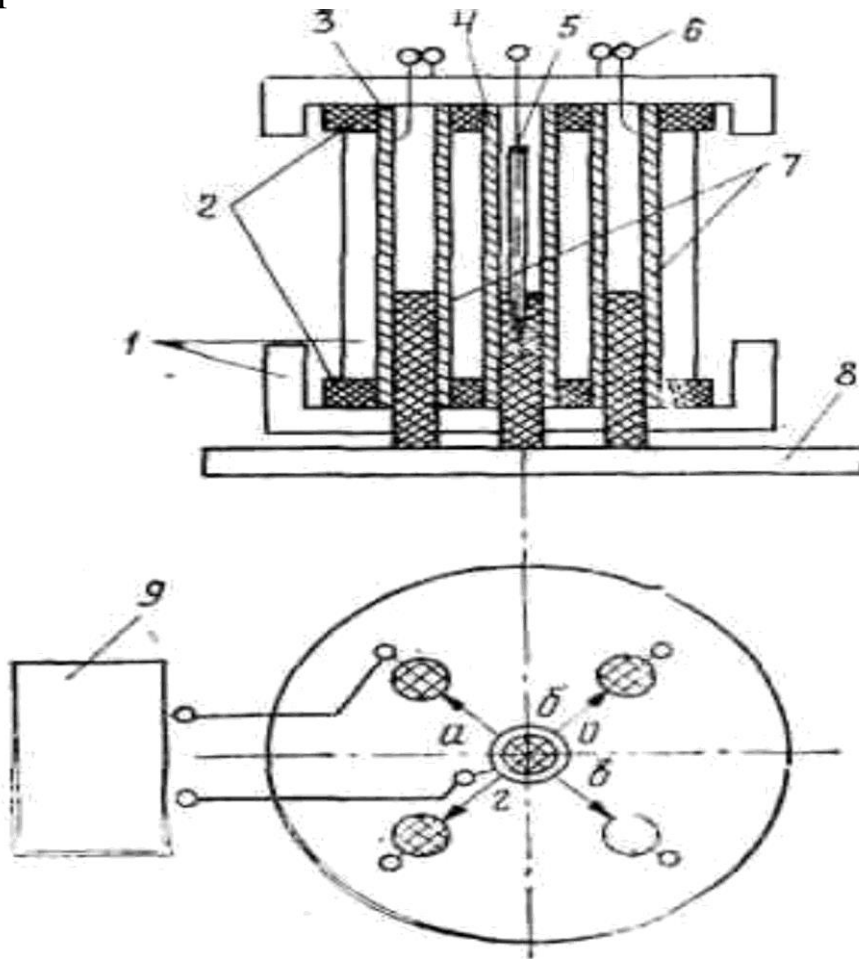


Рис.7. Схема датчика поглощенной энергии

Датчик содержит диэлектрический корпус 1, в котором размещены две диэлектрические шайбы-электродержатели 2, четыре

боковых электрода 3 и один центральный электрод 4 с эталонным образцом 5. Все электроды содержат пористые вставки 7, заполненные электролитом. Коммутацию между электродами, контролируемой деталью 8 и измерительным прибором 9, осуществляют с помощью тоководов 6.

Датчик работает следующим образом.

Пористые вставки 7 наполняются электролитом, в котором контролируемый материал способен электролитически растворяться. В центральный электрод вставляют эталонный образец 5. Датчик ставят пористыми вставками на контролируемую деталь и подключают датчик к измерительному прибору 9. Эталонный образец 5 изготавливается из того же материала, что и контролируемая деталь, но предварительно отжигается.

При подключении центрального электрода «о» к одной клемме, а всех остальных электродов «а», «б», «в» и «г» параллельно к другой клемме прибора замыкается цепь гальванической пары эталонный образец- электролит- контролируемый образец. Величина ЭДС характеризует среднюю поглощенную энергию по площади, охватываемой датчиком. При подключении центрального электрода и электрода «а» определяется поглощенная энергия деформации в направлении «о-а», если деформация привела к образованию текстуры. Соответственно подключения электродов «о-б», «о-в», «о-г» дают значения поглощенной энергии в указанных направлениях.

Таким образом, датчик поглощенной энергии деформированных металлов позволяет определить как среднюю по площади поглощенную энергию, так и определить анизотропность деформации и направления

максимальной и минимальной деформации.

Порядок измерений:

1. Собрать измерительную схему.
2. Заполнить датчик электролитом.
3. Измерить на установке с помощью датчика величину ЭДС деформированных металлов.
4. Рассчитать поглощенную энергию в деформированных образцах.
5. Рассчитать плотность дислокаций в деформированных образцах.

6. Построить графики зависимости поглощенной энергии и плотности дислокаций от степени деформации в контролируемых образцах, которые могут служить ориентиром в расчетах возможной и допустимой деформации деталей.

Контрольные вопросы:

1. Как определяют поглощенную энергию деформации?
2. По какой формуле определяется скрытая энергия деформации?
3. Из каких частей состоит датчик поглощенной энергии?

Тема 11. РАСЧЕТ ГИБКИХ НАКЛАДНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ

Задачи работы: научиться рассчитывать гибкие накладные вихретоковые преобразователи для неразрушающего контроля деталей.

Принадлежности и инструменты: компланарный датчик, модули.

Разработка универсальных компланарных измерительных преобразователей на гибкой подложке с заданной локализацией поля вихревых токов перспективна для дефектоскопии металлов, особенно изделий со сложной кривизной поверхности.

Разработанные УКИП, содержащие измерительную обмотку, выполненную по печатной технологии в виде многослойной печатной спиральной катушки индуктивности, характеризуются высокой абсолютной чувствительностью, которая достигнута увеличением индуктивности обмотки за счет последовательного соединения n плоских печатных спиралей, что повышает индуктивность обмотки приблизительно в n раз.

При последовательном соединении большого количества плоских спиралей и расположении их в виде многослойной матрицы электромагнитное поле практически равномерно распределяется под площадью катушек индуктивности, не обладает селективностью.

Для повышения чувствительности УКИП поле вихревых токов должно быть локализовано и иметь заданную топологию. Это достигается тем, что электромагнитное поле преобразователей, содержащих катушки индуктивности, формируют по заданным параметрам поля набором печатных катушек индуктивностей- модулей с топологией электромагнитного поля, рассчитанной по формулам:

$$\begin{aligned} H_z &= I n^2 p / 4 (r^2 + z^2)^{3/2} [2 - 3r^2 / (r^2 + z^2)] \\ H_r &= 3 I n^2 p r z / 4 (r^2 + z^2)^{5/2} \end{aligned}$$

где H_z и H_r - нормальная и тангенциальная составляющие электромагнитного пол;

I - амплитудное значение величины переменного тока;

n -число витков катушки;

a -радиус катушки;

r и z - координаты точки, в которой определяется поле (в цилиндрической системе координат).

Модули изготавливают на одной гибкой подложке, например, полиимидной, которую сгибают таким образом, чтобы модули образовали многослойную матрицу, а поля модулей суммировались.

Для согласования и усиления полей модулей, последние формируются на гибкой подложке так, что каждый последующий после линии сгиба модуль имеет противоположное направление витков.

На рис.8,а показаны расположение модулей в преобразователе и сформированное ими поле с заданной топологией, а на рис.8,б- линии сгиба и расположение модулей на гибкой подложке.

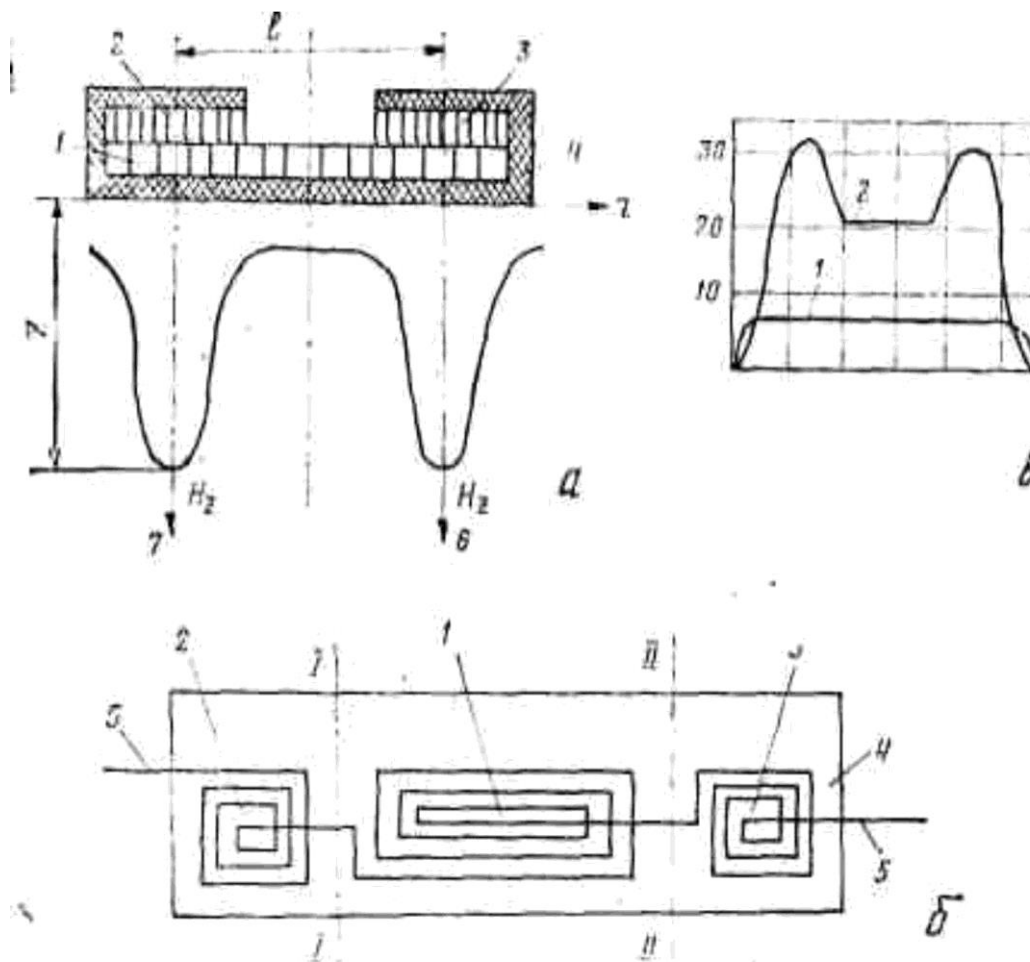


Рис.8. К расчету универсального компланарного датчика

В качестве примера рассмотрим метод расчета такого вихревого преобразователя с заданными параметрами поля для неразрушающего контроля наличия и точного месторасположения микротрещин. Зададим поле преобразователя с двумя максимумами нормальной составляющей напряженности поля, расположенных друг от друга на расстоянии 6мм. Величина максимумов напряженности на расстоянии 6мм от преобразователя 450 А/м.

Найдем величину I и n для базового (б) и дополнительных (д) модулей. Для этого по формуле определим величину I^*n для каждого из модулей $(I^*n)_д$ и $(I^*n)_б$.

$$I^*n = [4Hz(r^2+z^2)^{3/2}] / ад[(2-3r^2)/(r^2+z^2)^{3/2}]$$

Исходя из знаний I^*n , установим величину тока I и число витков n . Ток во всех модулях, соединенных последовательно, будет один и тот же. Положим $I=0,5А$. Тогда $n_д=40$ витков и $n_б=40$ витков.

Печатная технология позволяет формировать токоведущие линии шириной 30мкм с расстоянием между ними 20мкм. Из геометрических размеров дополнительных модулей следует, что на такой ширине уместится 50 витков. Размер базового модуля- 5,5 мм, на нем можно сформировать 220 витков.

Таким образом, выбранные размеры модулей позволяют сформировать на них в соответствии с расчетом 40 витков, при размерах контактной площадки не менее 1*1мм.

Расчет потерь в преобразователе дает величину 1Вт, что значительно меньше допускаемых по критерию перегрева и температурного коэффициента индуктивности.

Разработанный способ изготовления токовихревых преобразователей для селективного контроля и преобразователя, спроектированные на основе приведенных расчетов, позволили значительно повысить чувствительность неразрушающего контроля. Приведенные сравнительные испытания двух датчиков с одинаковым числом витков (по 80), один из которых изготовлен по традиционной технологии, т.е. мотанный из проволоки, а другой описан в примере, при контроле микротрещин в гофрированных трубах показали, что сигнал УКИП в 5 раз больше, чем у проволочного. Кроме того, сиг-

нал у проволочного датчика размытый, что не позволяет точно зафиксировать местоположение дефекта. Сигнал от УКИП имеет два резких пика от микротрещин (рис.8,в), т.е. строго фиксирует местоположение дефекта.

Предложенный метод расчета преобразователей позволяет еще на стадии проектирования и изготовления заложить в конструкцию преобразователя необходимые характеристики и параметры без дальнейшей переработки, что резко удешевляет стоимость их изготовления.

Порядок выполнения работы:

1. Изготовить модули;
2. Найти величину I и n для базового и дополнительных модулей;
3. Провести сравнительные испытания двух датчиков;

Контрольные вопросы:

1. Что такое модули?
2. Принцип изготовления модулей?
3. Принцип расчета модулей?

Тема 12. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРЕВА МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ

Задачи работы: провести методику исследования эффективности нагрева материалов в плазме.

Принадлежности и инструменты: плазмотрон, экран, вращающийся диск, мотор, порошок.

Среди большого числа параметров, определяющих эффективность нагрева материалов, можно выделить основные: скорость и температуру потока плазмы, а также скорость движения частиц материала и их температуру.

Скорость движения частиц материала может быть измерена различными методами, однако не все из них обеспечивают достаточную точность и простоту измерений.

Метод вращающегося диска данным методом можно достаточно просто измерять скорости движения частиц, хотя его по ряду причин применяют весьма редко.

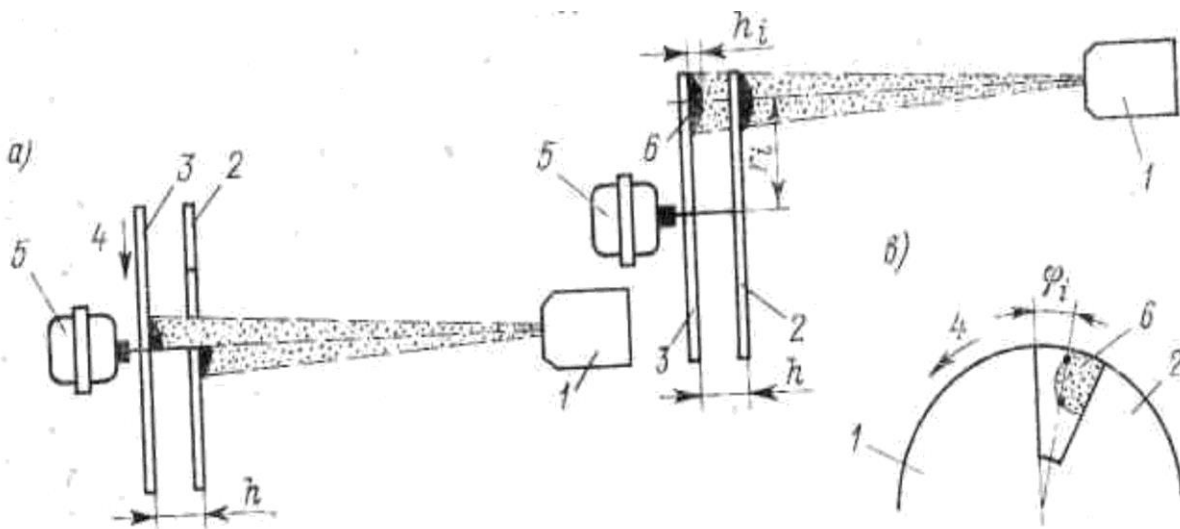


Рис.9. Схема измерения скорости движения частиц методом вращающегося диска: 1-плазмотрон; 2-экран; 3-вращающийся диск; 4-направление вращения диска; 5-мотор; 6-осажденный порошок.

Обычно измерительное устройство (рис.9) состоит из диска 3 и вращающегося вместе с ним экрана 4, причем они смещены между собой на определенное расстояние h . В процессе измерения при

вращении диска 3 на нем осаждается покрытие 6, смещенное на некоторый угол ϕ_i относительно щели экрана 4. По величине этого смещения и расстоянию h_i от оси диска до точки измерения можно определить скорость движения частиц

$$V_{ч} = (h - h_i) 2\pi\omega / \phi_i$$

где ω -частота вращения диска, h_i -толщина покрытия.

Метод радиоактивных изотопов- обычно вместе с исходным дисперсным материалом через поток газа подаются частицы радиоактивных изотопов. Счетчики радиоактивных излучений, установленные по пути следования частиц, определяют время прохождения какой-нибудь из частиц расстояния, равного расстоянию между счетчиками. Скорость движения частиц определяется соотношением $v_{ч} = s/t$, где s - расстояние между счетчиками, t - время. Данным методом можно измерять скорость движения частиц порошка в агрессивных средах через непрозрачные стенки камеры. Однако он имеет низкое пространственное разрешение и им нельзя измерять локальные значения скорости частиц. Кроме того, движение частиц радиоактивных изотопов может существенно отличаться от движения основного материала.

Метод стробоскопического освещения- этот метод основан на фоторегистрации движущихся частиц при их прерывистом освещении с помощью стробоскопического диска. Обычно при фотографировании на неподвижную фотопленку получается трековая картина, позволяющая проследить за движением частиц. Причем на пленке регистрируются все частицы, в том числе и неизлучающие. Данному методу свойственна значительная трудность пространственного разрешения, из-за чего им нельзя определить локальные значения скорости частиц. Для получения пространственного разрешения необходимо использовать стереокамеру. В некоторых случаях при появлении сильно нагретых излучающих частиц регистрируемая трековая картина «смазывается», и погрешность измерения скорости движения частиц оказывается весьма высокой.

Метод покадровой фотокиносъемки- применяется в основном для регистрации светящихся частиц, причем светимость создается за счет их разогрева или при их непрерывном освещении от допол-

нительного источника излучения. Прерывистость освещения фотопленки обеспечивается при их регистрации фотокинокамерой. Длина трека определяется по фотографии с учетом масштаба фотосъемки, а время - по экспозиции. При стереоскопическом фотографировании или при фотографировании через зеркало в двух взаимно перпендикулярных направлениях этим методом можно определить локальные значения скорости движения частиц. Метод имеет ограничения по размеру и скорости движения частиц. Так, частицы размером менее 10 мкм и со скоростью движения частиц более 200 м/с трудно регистрировать из-за недостаточной их светимости.

Метод непрерывной фотосъемки - он основан на регистрации изображений светящейся частицы на движущейся пленке, например, с помощью камеры с вращающейся пленкой. В этом случае направление движения пленки перпендикулярно направлению движения частиц и скорость их определяется по углу наклона трека на пленке в соответствии со следующим выражением

$$V_{\text{ч}} = v_{\text{пл}} f / \text{tg} \varphi$$

где $v_{\text{пл}}$ - скорость движения пленки, φ - угол наклона трека, f - фото увеличение.

В отличие от вышерассмотренных методов измерения описываемый метод позволяет осуществить более точное измерение $v_{\text{ч}}$ по длине струи. Однако, ввиду значительного изменения скорости движения частиц по радиусу плазменной струи, возникают определенные трудности в расшифровке треков на фотопленке.

Метод вращающегося зеркала - данный метод имеет два варианта. При первом варианте ось вращения зеркала располагается перпендикулярно оси плазменной струи, а направление вращения зеркала - встречное, причем частоту вращения зеркала выбирают такой, чтобы траектория движения частицы воспроизводилась в виде точки. Применимость данного метода становится проблематичной при большом разбросе скоростей движения частиц. Значительно лучшие результаты получаются при применении второго варианта метода, когда ось вращения зеркала параллельна оси плазменной струи. В этом случае на проекцию скорости движения частицы накладывается перпендикулярная к ней компонента, про-

порциональная частоте вращения зеркала, и трек частицы на пленке изображается в виде наклонных линий, угол наклона которых пропорционален искомой скорости. Данный метод во многом аналогичен вышеописанному методу. Данный метод измерения скорости движения частиц, как и вышеописанные, не обеспечивает хорошего пространственного разрешения при использовании его для потоков плазмы с большим разбросом скорости движения частиц.

Метод фотоэлектрической регистрации- этот метод во многом аналогичен методу с радиоактивными изотопами. С помощью двух фотоумножителей, последовательно расположенных на пути следования частиц, регистрируют время прохождения одной и той же частицей расстояния между ними. Вероятность того, что будет зарегистрирована случайная частица, не прошедшая первый фотоумножитель, пропорциональна плотности частиц в потоке. Поэтому необходимо выбирать малое количество частиц. Для плазмы данный метод пригоден, очевидно, только в ограниченных случаях, так как плазма является сильным источником излучения и регистрировать на этом фоне излучение частиц или отраженный от них свет с помощью фотоумножителя довольно трудно, при этом погрешности измерений могут быть высокими ввиду попадания в фотоумножитель флуктуаций излучения плазмы.

Порядок проведения работы:

1. Провести метод вращающегося диска;
2. Провести метод радиоактивных изотопов;
3. Провести метод стробоскопического освещения;
4. Провести метод покадровой фотокиносъемки;
5. Провести метод вращающегося зеркала;
6. Провести метод фотоэлектрической регистрации;

Тема 13. ТЕМПЕРАТУРА ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ

Задачи работы: научиться определять температуру частиц движущихся в потоке плазмы.

Принадлежности и инструменты: плазмотрон, порошок, шихтопровод.

Для измерения температуры частиц существует значительно меньшее число методов, чем для измерения скорости их движения. Это обусловлено собственным интенсивным излучением потока плазмы в широком интервале частот и малым количеством возможных методов регистрации. В последнее время наибольшее распространение получили методы измерения температуры движущихся частиц, основанные на регистрации интенсивности излучения при их нагреве.

Определение температуры частиц по абсолютной интенсивности излучения их поверхности. В основе этого метода лежит сравнение интенсивностей излучения частицы и эталонного источника. Для регистрации интенсивностей излучения движущейся частицы может быть применен любой из методов фотокиносъемки. Наиболее подходящим является метод модулированной фотосъемки, позволяющий одновременно определить локальные значения скоростей движения частиц. В качестве эталонного источника излучения удобно использовать анодное пятно угольной дуги в «предшипящем» режиме.

Основная трудность данного метода измерения температуры частиц заключается в сравнении интенсивностей излучения движущегося объекта и неподвижного эталонного источника. При регистрации движущейся частицы на фотопленку экспозиция определяется размерами частицы и скоростью ее движения, а при регистрации эталонного источника- фотокамерой. Так, для движущейся частицы выдержка может быть определена с помощью упрощенного выражения $t = bd^4/v^4$, где d и $уч$ - диаметр и скорость движения частиц, b - коэффициент, учитывающий лучеиспускательную способность сферического тела. При фотометрировании только центральной части трека b можно считать близким к единице. Скорость частицы $уч$, как уже указывалось, определяется по этому же

треку, а диаметр частицы d_4 обычно принимают равным исходному размеру частиц порошка. Однако в процессе движения диаметр частиц может меняться в сторону уменьшения за счет их испарения или в сторону увеличения за счет их коагуляции, поэтому целесообразно его в процессе измерения контролировать. По ширине трека это очень трудно сделать из-за малых размеров частиц, что способствует появлению большой погрешности измерения.

Определение диаметра частиц порошка в потоке плазмы можно производить методом проб. Непосредственно перед фоторегистрацией осуществляют улавливание частиц порошка с помощью специального приспособления (матрицы), устанавливаемого на определенном расстоянии от среза сопла плазмотрона (рис.10). Матрица представляет собой пластину с отверстиями, равномерно расположенными по ее поверхности. Перед измерением матрицу центрируют с осью сопла плазмотрона, а ее отверстия заполняют вязким веществом, например вакуумным маслом, для того чтобы частицы, попадающие в отверстия, не деформировались и не соударялись со стенками отверстия. Время взятия пробы составляет несколько секунд. Каждую пробу частиц, находящихся в отверстии, анализируют под микроскопом, и определяют размеры частиц. Так, при подаче в плазменную струю порошка вольфрама с дисперсностью 32 мкм на выходе методом проб был установлен диаметр частицы 32 мкм. Аналогичные результаты были получены для других порошков, т.е. существенного испарения частиц и их коагуляции не наблюдалось.

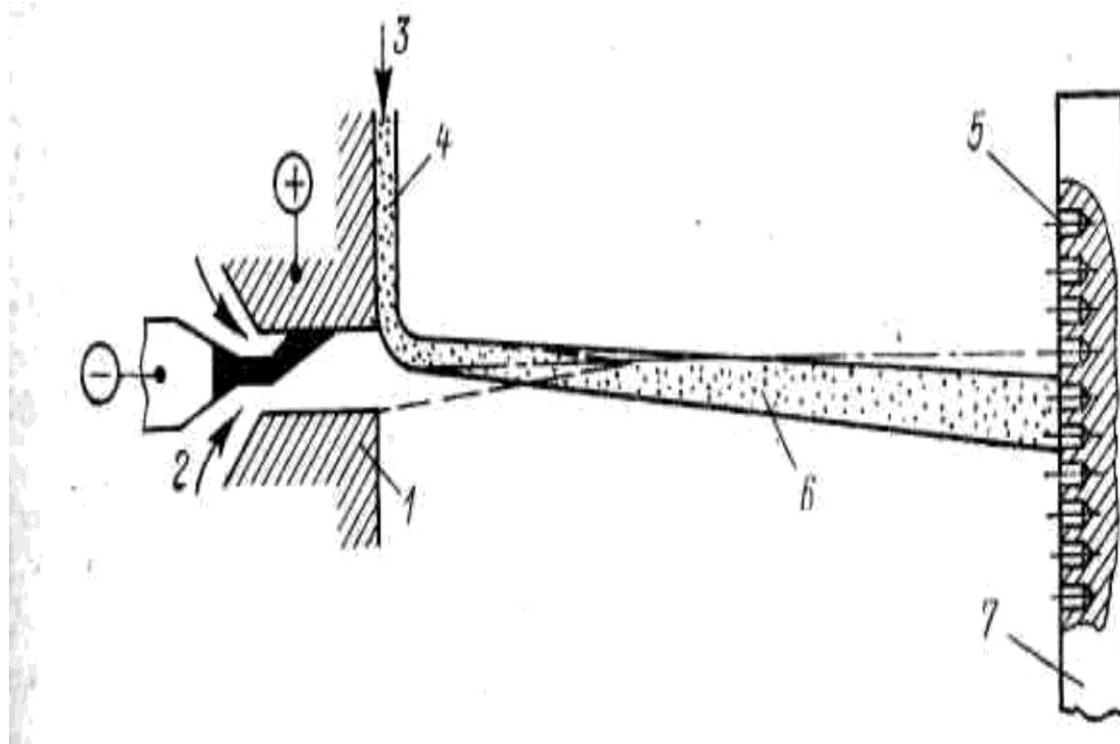


Рис.10.Схема улавливания частиц порошка:
 1-плазмотрон; 2-ввод аргона; 3-исходный порошок; 4-шихтопровод;5-отверстия заполненные маслом; 6-частицы порошка; 7-матрица.

Другим источником погрешности измерений является недостаточная точность выбора степени черноты материала сферической частицы. Для уменьшения ее целесообразно модулированную фотосъемку вести в узком диапазоне длин волн, что легко осуществить определенным выбором цветных или интерференционных фильтров. Так, используя цветной фильтр ЖС-12 и панхроматическую фотопленку, можно производить фотосъемку нагретых частиц в области длин волн 43006800 А. В данном диапазоне длин волн обеспечивается четкая фоторегистрация движущихся частиц и незначительный разброс значений степени черноты материала частиц.

Учитывая влияние всех факторов на погрешность определения температуры частиц, можно считать, что она составляет в среднем не более 10%.

Порядок проведения работы:

1. Собрать схему улавливания частиц порошка.

2. Определить температуру частиц по абсолютной интенсивности излучения их поверхности.

3. Определить диаметр частиц порошка в потоке плазмы методом проб.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность метода определения температуры частиц по абсолютной интенсивности излучения их поверхности?

2. В чем сущность метода определения диаметра частиц порошка в потоке плазмы методом проб?

Тема 14. ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОТРОНОВ

Задачи работы: научиться определять тепловые характеристики плазмотронов.

Принадлежности и инструменты: плазмотроны различных конструкций.

В большинстве случаев при теоретических и экспериментальных исследованиях дуги в канале плазмотрона используется идеализированная модель дугового разряда. Так, в плазмотронах с продольной дугой предполагается, что дуга горит по оси дугового канала и колебания параметров плазменной струи обусловлены, в основном, процессами шунтирования приэлектродных участков дуги или процессами взаимодействия турбулентного потока газа со столбом дуги, приводящими к ее колебаниям и в некоторых случаях к «дроблению» токопроводящей области.

При отсутствии различных неустойчивостей, присущих электрической дуге, ее можно условно разбить на несколько участков (рис.11).

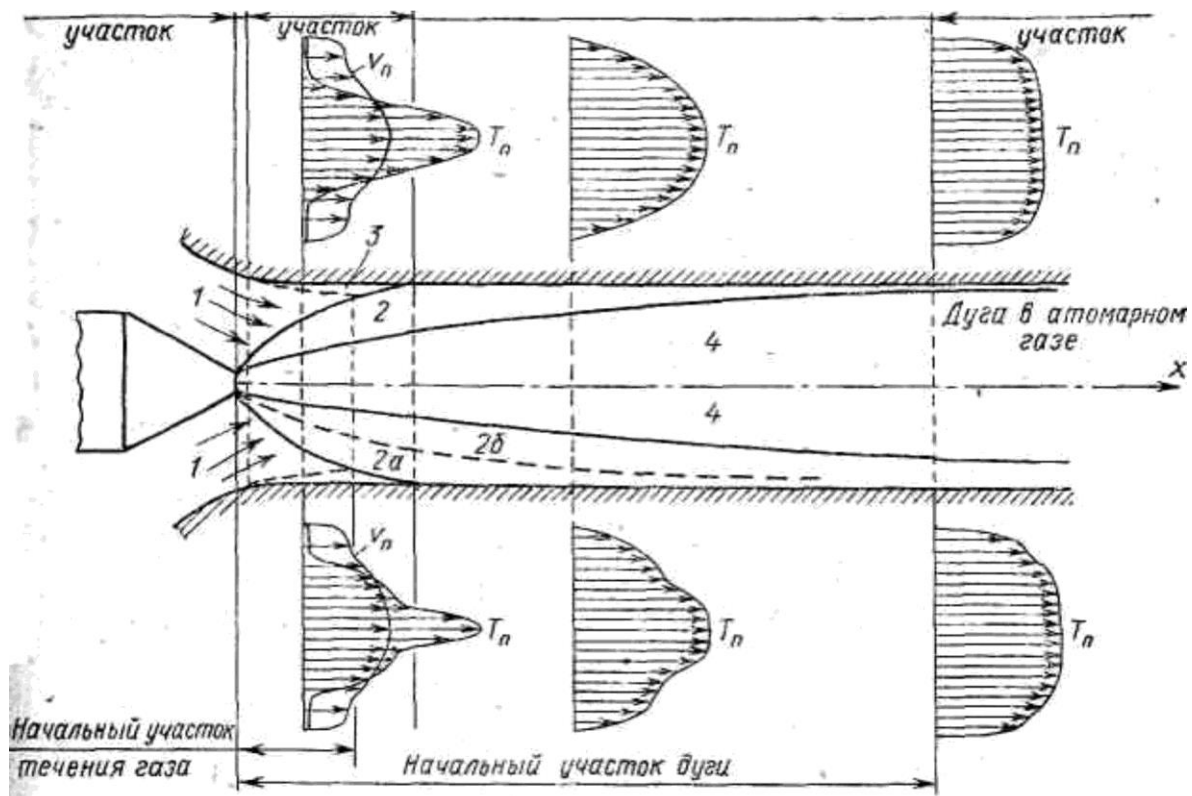


Рис.11. Схема дугового разряда в ламинарном потоке газа: 1-зона

холодного газа; 2-зона нагретого газа; 2а-нагретый газ; 2б-зона диссоциации; 3-пограничный слой; 4-токопроводящая область дуги.

Начиная от входного электрода идет приэлектродный участок дуги, включающий область объемного заряда у электрода и заканчивающийся в области максимума осевой температуры дуги. Он имеет небольшую протяженность и существенно зависит от характеристик материала электрода, его формы и состояния поверхности. Несмотря на свои небольшие размеры, он может существенно влиять на положение дуги в разрядном канале и на параметры потока плазмы. Далее идет входной участок дуги, где происходит интенсивный разогрев газа и вход его в дугу. На этом участке энергия выделяющаяся в токопроводящей области дуги, за исключением лучистых потерь, идет на нагрев поступающего газа 1. Размеры дуги существенно увеличиваются, при этом температура на оси дуги значительно снижается, а ее профиль расширяется. Потери тепла мало меняются по длине канала и определяются в основном излучением дуги, так как между дугой и стенкой канала течет холодный газ. Следует отметить, что совместно с дугой в канале формируется поток плазмообразующего газа 1, который до момента встречи с тепловым слоем дуги сохраняет заданную скорость и температуру (рис.11, первые профили v_p и T_p). Это соответствует начальному участку течения газа в канале плазмотрона, заканчивающемуся при соединении теплового слоя дуги 2 с пограничным слоем 3.

При достижении тепловым слоем дуги стенки разрядного канала входной участок дуги сменяется переходным, где потери тепла определяются уже не только излучением дуги, но и кондуктивным теплопереносом. Для данного участка дуги характерно также формирование температурного профиля дуги, который по мере движения газа становится более наполненным.

Начальный участок дуги имеет три зоны. В первой зоне течет ненагретый газ 1, скорость которого определяется его расходом. Вторая зона соответствует нагретому неионизированному газу 2, это тепловой слой дуги., третья зона- токопроводящая область дуги 4. По мере увеличения размеров дуги (вдоль по потоку) область неионизированного газа уменьшается и на теплообмен ионизированного газа со стенкой разрядного канала начинают влиять процессы

рекомбинации и диффузия электрон-ионных пар. В молекулярном газе начальный участок дуги тоже имеет три зоны. Две из них- первая и последняя- такие же, как и в атомарном газе, а между ними во второй зоне появляется область 2б диссоциированного газа (рис.11), где на потери тепла существенное влияние оказывает ассоциация атомов. Таким образом, в молекулярном газе тепловой слой дуги состоит из нагретого и диссоциированного газа.

После начального участка дуги идет установившийся участок развитого горения дуги, или, как его иногда называют, цилиндрически- симметричный участок, асимптотический участок и т.п. Здесь параметры дуги по ее длине не меняются, а энергия, выделяющаяся в дуге, полностью отводится к стенкам разрядного канала, поэтому при выборе режимов работы плазмотрона желательно избегать существования данного участка дуги, так как здесь эффективность нагрева газа равна нулю. Протяженность развитого участка дуги определяется расположением выходного электрода относительно входного, током дуги, расходом газа и диаметром дугового канала.

Порядок выполнения работы:

1. Произвести исследование дуги в канале плазмотрона;
2. Построить схему дугового разряда в ламинарном потоке газа;
3. Изучить и описать движения дугового разряда в ламинарном потоке газа;

Контрольные вопросы:

1. В чем различие горения дуги в плазмотронах различной конструкции?
2. Из скольких зон состоит схема дугового разряда в ламинарном потоке газа?
3. Дайте характеристику каждой зоны схемы дугового разряда в ламинарном потоке газа?

Тема 15. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОГО ПРОЦЕССА

Задачи работы: научиться выбирать основные параметры электроплазменного процесса.

Принадлежности и инструментов: установки УПУ-3М и УПМ-5-68.

Выбор основных параметров процесса, как входных, так и выходных, является весьма сложной задачей и в то же время определяет успех разработки нового технологического процесса. Например, при плазменном напылении с помощью серийно выпускаемых плазмотронов от установки УПУ-3М и УПМ-5-68 в ряде случаев не удается достичь хорошего качества покрытий. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев не учитывается наличие пульсаций плазменной струи, связанных с перемещением анодного пятна электрической дуги. Особенно существенны такие пульсации на азоте. Кроме того, из-за малой длины дуги напряжение на плазмотроне невелико, и для обеспечения необходимой мощности плазменной струи приходится значительно увеличивать ток дуги, а это вызывает сильную эрозию сопла и изменение во времени режима работы плазмотрона, что, в свою очередь, ухудшает качество покрытий. Поэтому выбор в качестве основных параметров только тока дуги, расхода плазмообразующего газа, расхода транспортируемого газа и количества подаваемого материала оказывается недостаточным, так как при проведении оптимизации отсутствует воспроизводимость результатов.

Аналогичная ситуация возникает при разработке и использовании плазмотронов для резки, сварки, строжки и т.п. Так, при плазменной резке помимо тока дуги, расхода газа и диаметра сопла существенно влияет на качество резки конфигурация сопла и газо-вихревая стабилизация дуги. При одном и том же токе дуги за счет хорошо организованной стабилизации дуги можно обеспечить большую скорость и лучшее качество резки.

В плазмохимических процессах основные параметры обычно определяются термодинамикой и кинетикой химических реакций, хотя немаловажную роль играют и параметры плазмотрона, процесса и установки в целом. Например, в плазмотроне с вихревой

стабилизацией дуги и мощностью 1МВт и более, несмотря на высокие показатели плазмотрона (к.п.д. 75-80%), не были получены хорошие результаты по электрокрекингу природного газа, так как каналы электродов забивались сажей и ресурс работы плазмотрона составлял всего несколько часов (вместо сотен часов). Такая же картина наблюдалась и при получении ацетилена из природного газа.

При оптимизации любого электроплазменного процесса после тщательного анализа всех параметров процесса, плазмотрона и установки в целом должно быть проведено ранжирование параметров по степени их влияния на качество получаемого материала и на эффективность технологического процесса. В случае невозможности количественной оценки некоторых параметров может использоваться качественная оценка с пятибалльной или иной шкалой.

Выбор выходных параметров электроплазменных процессов в качестве основных также является сложной задачей. Например, при плазменной резке желательно иметь максимальную скорость резки, как можно более узкий рез, отсутствие грата, высокую эффективность процесса, низкие энергетические затраты, небольшие расходы газа и т.п. При плазменном напылении необходимо иметь высокую плотность покрытия, хорошую адгезию, минимальную шероховатость покрытия, высокие коэффициенты использования материала и к.п.д. процесса, малые расходы газа, низкий уровень шума и т.п. Все эти требования трудно удовлетворить при оптимизации технологического процесса. Например, оптимизация процесса плазменного напыления износостойкого покрытия из смеси алюминия и молибдена проводилась одновременно по трем выходным параметрам-коэффициенту трения, износу и твердости покрытия, а в качестве входных параметров были выбраны содержание молибдена, давление газа в плазмотроне, сила тока и дистанция напыления. В результате оптимизации не были достигнуты оптимальные режимы по всем выходным параметрам.

Оптимизация процесса по нескольким выходным параметрам проводится так, основной выходной параметр выбирается в качестве параметра оптимизации, а другие выходные параметры играют роль ограничений. В некоторых случаях вводится обобщенный параметр оптимизации, учитывающий влияние каждого из выходных

параметров.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить характеристики плазмотронов.
2. Сравнить основные параметры плазмотронов.
3. Выбрать наиболее оптимальный вариант.

Контрольные вопросы:

1. Что входит в основные параметры электроплазменного процесса?
2. Как определяют основные параметры электроплазменного процесса?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бушмин А. П. Прогрессивные способы восстановления и ремонта деталей сельхозмашин / Краснодар, 1985г.- Бушмин А. П.
2. Самсонов Г. В. Тугоплавкие покрытия / М. : Металлургия , 1983г. - Самсонов Г. В.
3. Донской А. В. Электроплазменные процессы и установки / Л: Машиностроение, 1989 г.- Донской А. В.
4. Самсонов Г. В. Электроискровое легирование металлических поверхностей / К.: Наукова думка, 1976 г. - Самсонов Г. В.
5. Бушмин А. П. Долговечность деталей и контроль качества ремонта / К. : Книжное издательство, 1981г.- Бушмин А. П.
6. Воловик Е. А. Справочник по восстановлению деталей / М: Колос , 1981 г.- Воловик Е. А.
7. Плешаков В. В. Повышение надежности деталей, восстанавливаемых гальваническими покрытиями / М. : Россельхозиздат, 1983г. - Плешаков В. В.
8. Нудьга В. Н. Ультразвук в сельском хозяйстве / К. : Книжное издательство, 1975г. - Нудьга В. Н.
9. Потапов Ю. С. Ремонт деталей автомобилей и сельхозмашин / К. : Картя молдовеняскэ, 1978г. - Потапов Ю. С.
10. Бушмин А. П. Электрофизические методы упрочнения и неразрушающего контроля деталей машин / К. : КСХИ, 1983г. - Бушмин
11. П.
12. Фридман В. И. Ультразвуковые генераторы / М.: Энергия, 1976г. - Фридман В. И.
13. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / М. : Наука, 1969г. - Абрамович Г. Н.
14. Быховский Д. Г. Плазменная резка / М. : Машиностроение, 1972г. - Быховский Д. Г.
15. Жуков М Ф. Электродуговые нагреватели газа / М. : Наука, 1973г. - Жуков М. Ф.
16. Кудинов В. В. Плазменные покрытия / М. : Наука, 1977г. - Кудинов.