

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

М.М. БЕЗЗУБЦЕВА, В.С. ВОЛКОВ, А.В. КОТОВ

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В АГРОИНЖЕНЕРНОМ СЕРВИСЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Рекомендовано УМО РАЕ по классическому  
университетскому и техническому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению подготовки: 110800.68-  
«Агроинженерия» (Профиль «Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве»)*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2012

УДК 621.311(07)  
ББК 40.76

Составители: М.М. Беззубцева, В.С. Волков, А.В. Котов

Рецензенты: д.т.н., проф. С.А. Ракутько; д.т.н., проф. В.В. Орлов

А 24: Энергоэффективные электротехнологии в агроинженерном сервисе и природопользовании . – СПб: СПбГАУ, 2012. -240 с.

В учебное пособие включены электрофизические, электрохимические, оптические, ультразвуковые и электробиологические способы интенсификации традиционных процессов агроинженерного сервиса, процессов очистки и обеззараживания технологических, воздушных и водных сред, а также процессов утилизации отходов неразрывно связанных с эколого-милеоративными системами сельскохозяйственного производства.

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочими программами дисциплины «Энергоэффективные электротехнологии агроинженерного сервиса и природопользования» и предназначено для подготовки магистров по направлению 110800.68 «Агроинженерия». Учебное пособие также может быть использовано студентами, аспирантами и научными работниками, работающими в различных областях АПК.

УДК 621.311(07)  
ББК 40.76

ISBN 978-5-85-983-148-7

© М.М. Беззубцева  
В.С. Волков  
А.В. Котов

## ПРЕДИСЛОВИЕ

*"Проблемы, которыми занимаются исследователи, все чаще не укладываются в рамки отдельной определенной сложившейся науки, мы специализируемся не по наукам, а по проблемам".  
В.И. Вернадский*

Это высказывание полностью применимо к проблемам экосистем аграрного сектора экономики, отличительной чертой которого является междисциплинарность. Обеспечение устойчивого развития сельских территорий предусматривает подготовку специалистов, воспитанных на мировоззрении внедрения в практику сельскохозяйственных производств системных знаний естественных, общественных и технических наук.

Теоретическим фундаментом рационального природопользования и охраны природы в рамках специальности «Агроинженерия» и профиля «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве» является разработка экосовместимых энерго- и ресурсосберегающих электротехнологий и электротехнологических установок, основанных на последних достижениях науки и техники.

Целью учебного пособия «Электротехнологии агроинженерного сервиса» является формирование у студентов системы компетентных знаний и практических навыков для решения задач эффективного использования инновационных электротехнологий в агроинженерном сервисе и природопользовании с формированием мировоззрения применения экологически чистых, ресурсо- и энергосберегающих технологий и принятия нестандартных научно-обоснованных решений при внедрении в практику природопользования электротехнологий, обеспечивающих реализацию

Государственных программ, международных стандартов ИСО и Законов РФ по энергосбережению, экологии и повышению энергоэффективности предприятий АПК.

В учебное пособие включены электрофизические, электрохимические, оптические, ультразвуковые и электробиологические способы интенсификации традиционных процессов агроинженерного сервиса, процессов очистки и обеззараживания технологических, воздушных и водных сред, а также процессов утилизации отходов неразрывно связанных с экологомилеоративными системами сельскохозяйственного производства.

Одноименная дисциплина «Электротехнологии агроинженерного сервиса и природопользования» является неотъемлемой составляющей модуля ООП «Инновационные электротехнологии и энергетические технологические процессы АПК», основанного на общей внутренней логике дисциплин, методически связанных между собой по признаку целей освоения, групп родственных компетенций и практических навыков, получаемых студентами при их изучении. Дисциплина «Электротехнологии агроинженерного сервиса и природопользования» является завершающей в тематике модуля и основана на фундаментальных знаниях электротехнологий, изложенных в предыдущих разделах. Этим обусловлена структура изложения материала в учебном пособии. Классификация электротехнологий построена не на традиционном признаке, а на признаке их целевого практического назначения в экосистемах сельскохозяйственных производств. Такая структура изложения материала позволяет на завершающей стадии обучения концентрировать внимание студентов на проблемных и перспективных вопросах, последовательно осваивать учебный материал и выбирать приоритетные отраслевые направления исследований в области экосовместимости электротехнологий для самостоятельной работы.

Учебное пособие состоит из предисловия, 6 глав, заключения и обширного библиографического списка, включающего 160 наименований отечественной и зарубежной литературы.

В первой главе достаточно компактно представлена обзорно-аналитическая информация об электротехнологиях гальванопластики и гальваностегии, электрохимического травления, анодного шлифования и полирования, ионно-плазменных технологиях нанесения износостойких покрытий, а также электромагнитных технологиях абразивного шлифования и полирования деталей сельскохозяйственной техники. Представлены и обоснованы приоритетные направления научных исследований. Вторая глава является логическим продолжением и посвящена вопросам совершенствования процессов электромагнитной очистки смазочноохлаждающих жидкостей и интенсификации методов контроля ферропримесей в жидких и сыпучих технологических средах агропромышленного сервиса путем внедрения экомсовместимых электротехнологических контрольно-измерительных приборов. В качестве инновационной электротехнологии в главе представлены запатентованные разработки авторов учебного пособия.

В последующих главах представлены экосистемы очистки и обеззараживания водных ресурсов и воздушной среды, утилизации отходов сельскохозяйственных предприятий и антисептирования продукции, основанные на электрофизических, электрохимических, оптических, ультразвуковых и электробиологических способах и методах интенсификации традиционных технологий. Представлены инновационные запатентованные технологии объемного облучения для дезинсекции и обеззараживания технологических сред сельскохозяйственного производства, разработанные коллективом кафедры «Энергообеспечение производств в АПК и электротехнологий» под руководством основателя научной школы профессора В.Н.Карпова.

Учебное пособие рекомендовано для магистров. Может быть использовано в заочном и дистанционном обучении. Представляет интерес для бакалавров, инженеров, специалистов и научных работников, занимающихся проблемами экологической безопасности сельских территорий.

## **Глава 1. ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ АГРОИНЖЕНЕРНОГО СЕРВИСА**

Внедрение в агроинженерный сервис технологий, обеспечивающих, с одной стороны, получение новых материалов и изделий, а с другой - снижение энерго- и ресурсозатрат при одновременном повышении экологических показателей является одной из актуальных задач аграрного сектора экономики. Значительное место в ряду технологий агроинженерного сервиса занимают электротехнологии, основанные на преобразовании энергии электрического тока в тепловую, химическую или механическую энергии.

Традиционно выделяют пять групп электротехнологий агроинженерного сервиса: электротермия, электросварка, электрохимические, электрофизические, электромеханические и ультразвуковые методы.

В электротермических процессах используется превращение электрической энергии в тепловую для нагрева материала изделий с целью изменения их агрегатного состояния, формы или свойств.

В электросварочных процессах получаемая из электрической энергии тепловая энергия используется для создания неразъемного соединения деталей.

В электрохимических процессах с помощью электрической энергии осуществляется разложение химических соединений и их разделение в жидкой среде под действием электрического поля (электролиз, гальванотехника, анодная электрохимическая обработка).

Электрофизические методы используют специальные физические эффекты для превращения электрической энергии как в тепловую, так и в механическую (электроэрозионные, ультразвуковые, магнитоимпульсные, электровзрывные, плазменные, электронно-лучевые, лазерные технологии).

В аэрозольных технологиях (электронно-ионных) энергия электрического поля используется для сообщения электрического заряда взвешенным в газовом потоке частицам и для перемещения их в заданном направлении.

Наряду с перечисленными методами нашли применение технологические процессы и установки, в которых основные и вспомогательные операции реализуются за счет непосредственного механического (силового) воздействия электрического и магнитного полей на обрабатываемые изделия и материалы. Такие методы и установки можно классифицировать по виду полей, воздействующих на объекты технологической обработки: стационарные, пульсирующие, вращающиеся, бегущие.

Наиболее известны и широко применяемые электротехнологические установки (ЭТУ) используют силовое действие стационарных электрического и магнитного полей. Например, стационарные электрические поля применяются в аэрозольных технологиях (пылегазоочистка, электроокраска, нанесение порошковых покрытий), в электрических сепараторах, в устройствах водоочистки.

Стационарные магнитные поля используются в магнитных сепараторах для извлечения ферромагнитных предметов и частиц из сырья и отходов, для разделения смесей, при водоочистке, а также для захвата или фиксации стальных заготовок и удаления металлоотходов из рабочей зоны при металлообработке.

С использованием пульсирующих магнитных полей работает ряд электродинамических устройств и некоторые виды магнитных или электродинамических сепараторов.

Воздействие импульсных электромагнитных полей применяется в устройствах для магнитоимпульсной обработки материалов давлением и при электродинамической сепарации.

Вращающиеся и бегущие магнитные поля используются в МГД-технологиях, обработке жидких металлов (перемешивание, транспортировка и т.д.), при электродинамической сепарации и водоочистке.

Перечисленные процессы и установки, использующие механическое действие электрического и магнитных полей, нашли достойное применение в агроинженерном сервисе и природоохраных технологиях.

Отличительной особенностью всех указанных электромеханических технологических устройств является то, что их рабочим телом непосредственно служат обрабатываемые изделия и материалы, т.е. отсутствуют промежуточные электромеханические преобразования энергии.

Наличие такого четкого обобщающего признака позволяет классифицировать электромеханические технологические процессы и установки как отдельную группу в ряду других электротехнологических методов и установок агроинженерного сервиса.

### **1.1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ И ГАЛЬВАНОСТЕГИИ**

На ремонтных предприятиях сельского хозяйства электрохимические процессы представлены, в основном, гальванопластикой и гальваностегией, использующих катодные процессы при прохождении тока через электролит (выделение вещества на катоде). Анодные процессы (растворение анода) являются основой электрохимического травления, шлифования, полирования.

*Гальванопластика* - электрохимическое осаждение металлов на поверхности металлических и неметаллических изделий. Основная область применения - получение точных копий изделий - гальваноконтий. Для этой цели с изделия снимают оттиск - обратное изображение, получившее название матрицы. Если матрица не токопроводящая, ее поверхность обрабатывают тонким слоем металлического порошка или графита и помещают в гальваническую ванну. После электролиза получают точную пустотелую копию изделия.

*Гальваностегия* - процесс электрохимического осаждения металла на металлические изделия для придания им повышенной механической прочности или улучшения внешнего вида (никелирование, хромирование, кадмирование, омеднение, цинкование, золочение и т.д.).

Осажденный на катоде слой металла должен иметь мелкокристаллическую структуру, быть равномерно распределенным по поверхности и прочно



связанным с основным металлом, что обеспечивается рациональным выбором и поддержанием необходимой плотности тока через электролит.

Ванны для гальваностегии питают постоянным током при напряжении на электродах 6 - 24В и плотности тока от 100 до 1000 А/м<sup>2</sup>. При увеличении плотности тока процесс электролиза ускоряется, а качество покрытия - снижается.

Количество металла (в граммах), удаляемое с поверхности анода, определяют по первому закону Фарадея

$$Q_m = K_e It, \quad (1.1)$$

где  $K_e$  - массовый электрохимический эквивалент, г/(Ач);  $I$  - ток, А;

$t$  - время обработки, ч.

Учитывая, что часть энергии расходуется на электролиз воды и выделение на аноде кислорода и озона, фактическая масса удаленного с анода металла  $m_\phi$  оказывается меньше расчетной массы  $m_p$ .

Выход по току

$$\eta = \frac{m_\phi}{m_p} \quad (1.2)$$

Общее количество анодно- растворенного металла с учетом выхода по току определяют по формуле

$$Q_{общ} = 60 \frac{It}{S} \frac{A}{n\rho} \eta = Q_{уд} h, \quad (1.3)$$

где  $S$  - площадь заготовки, см ;  $\rho$  - плотность металла, г/см<sup>3</sup>;  $Q_{уд}$  - удельный объемный съем металла, см<sup>3</sup> /ч;  $A$  - атомная масса металла анода;  $n$  - валентность металла.

Процесс электрохимической обработки одинаков для всех методов и осуществляется по единой схеме. Однако, изменяя материал электродов и состав электролита, размеры реакционного пространства, а также условия

протекания процесса (температура электролита, плотность тока, скорость удаления продуктов реакции и т.д.) можно получить большое число вариантов электрохимической обработки. Важное место среди них занимает группа методов по выполнению отделочных операций с изменением свойств или состояния поверхности деталей или изделий.

*Электрохимическое (анодное) травление* применяют для удаления поверхностных загрязнений, оксидов, окалина, ржавчины, снятия заусенцев, округления кромок, а также маркирования изделий. Ведется при относительно высоких скоростях растворения металла (50 - 500 мм /мин), определяемых регулируемой плотностью тока или температурой электролита.

*Электрохимическое (анодное) шлифование и полирование* производится при малых плотностях тока, что приводит к растворению всех выступов, образующих макро- и микрорельеф поверхности металла. Приводит к результату, соответствующему механическому шлифованию или полированию.

Процесс состоит в том, что в углублениях обрабатываемой поверхности (аноде) при электролизе накапливаются продукты растворения с большим электрическим сопротивлением и плотность тока в этих зонах уменьшается. На выступах происходит концентрация электрического поля и плотность тока растет. Поэтому процесс растворения выступов многократно ускоряется и происходит постепенное выравнивание поверхности металла.

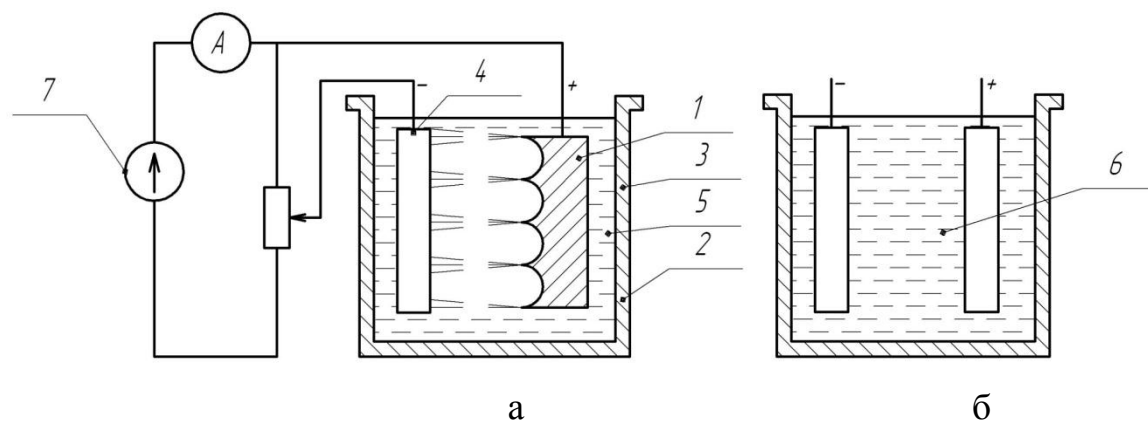


Рис. 1.1. Схема электрохимического шлифования – полирования в стационарном электролите: а) – микрогеометрия поверхности детали и линии тока в начале обработки; б) - то же, в конце обработки; 1 - обрабатываемая деталь; 2 - электролит; 3 - ванна; 4 - катод; 5, 6 - линии тока вначале и конце обработки; 7 – источник питания размерной обработки.

Шлифование и полирование осуществляют в одной и той же ванне изменением плотности тока без изменения состава электролита. Удельный съем металла составляет 50 - 100 мкм/мин при шлифовании и 0,5 – 5,0 мкм/мин при полировании.

Ванны должны иметь заземление и бортовую вентиляцию. Между ваннами настилаются деревянные полы, покрыты резиновыми ковриками. Электрохимическая размерная обработка металлических изделий заключается в копировании формы инструмента – катода в заготовке – аноде, которая растворяется избирательно, в соответствии с местной плотностью тока. Эффект достигается уменьшением расстояния между электродами до долей миллиметра и большой скоростью прокачки электролита, уносящего продукты реакции. Достигается высокая плотность тока (до нескольких тысяч  $\text{А/м}^2$ ) и высокая производительность при отсутствии износа рабочего инструмента (катода), высокой точности копирования и чистоты поверхности заготовки.

Электрохимическая размерная обработка применяется для:

- изготовления и доводки пресс-форм высокой точности, штампов из материалов, труднообрабатываемых механически (рис. 1.2,а);
- вырезки, калибровки и доводки сложных полостей и отверстий в заготовках, профилирования поверхностей сложной формы (рис. 1.2,б);
- маркировки (клеймения) и нанесения знаков на изделия (рис.1.2,в);
- затачивания режущего инструмента из твердых сплавов;
- прошивания большого числа отверстий круглых, прямоугольных, фасонных и др.);
- разрезания заготовок и деталей из труднообрабатываемых металлов с получением чистого среза (рис.1.2,г).

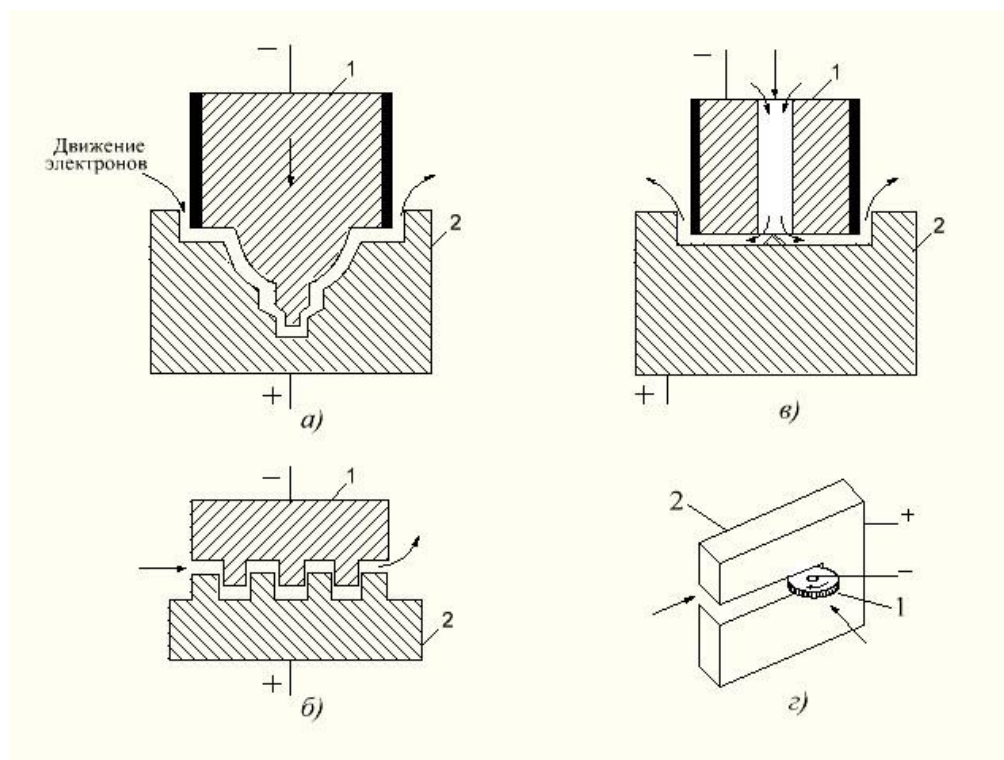


Рис. 1.2. Электрохимическая размерная обработка

Кроме перечисленных существует большое число комбинированных методов размерной обработки. Такие из них, как анодномеханическая, электроабразивная, электроалмазная, могут выполняться на обычных, лишь слегка измененных, металлорежущих станках. К недостаткам электрохимической обработки следует отнести высокую энергоемкость процессов.

Основными направлениями совершенствования электрохимических процессов агроинженерного сервиса является снижение энергоемкости при одновременном улучшении качества готовых изделий путем совершенствования конструктивной формы электродов, оптимизации химического состава электролита и о режимов работы установок на основании научных исследований.

Одним из наиболее неблагоприятных факторов гальванического производства является загрязнение наружного воздуха на территории предприятия и внутренних помещениях соединениями металлов и ядовитыми парами с выбросами кислоты.

Гальванический шлам является побочным продуктом гальваностегии и

гальванопластики. В состав гальваношламов кроме железа и кальция входят представляющие опасность для природной среды и здоровья человека соединения тяжёлых металлов (марганец, свинец, медь, никель и др.). Добыча металла из гальваношлама приносит экономическую выгоду только при его высокой концентрации. При этом требуется применение специальных химических технологий. Утилизация гальванических отходов представляет крупную научно-техническую проблему.

## 1.2. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ СВАРКА, НАПЕКАНИЕ, НАПЛАВКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

В электросварочных процессах получаемая из электрической энергии тепловая энергия используется для создания неразъемного соединения деталей. В процессах электроконтактной сварки металлические детали приводятся в соприкосновение и сжимаются под давлением 5...20 МПа. Через детали пропускают электрический ток. Переходное сопротивление в месте соприкосновения деталей значительно превышает сопротивление самих деталей, в силу чего нагрев деталей непосредственно от тока незначителен, тогда как в стыках выделяется большое количество энергии.

Количество теплоты, выделяемое в местах стыка, пропорционально квадрату тока и сопротивлению контакта стыка. Переходное сопротивление контакта:

$$R_{\Pi} = k_1 k_T / (0,1F)^m, \quad (1.4)$$

где  $k_1$  – коэффициент зависящий от материала свариваемых деталей (табл. 1.1.);

$F$  – усилие сжатия, Н;  $m$  – показатель степени, зависящий от формы поверхностей контактирующих деталей (табл. 1.1.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий температуру контакта :

$$k_T = 1 + 0,67\alpha_T (T_K - 293), \quad (1.5)$$

где  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления контактов, К;

$T$  – температура контакта, К.

После достижения в зоне стыка необходимой для сваривания температуры под влиянием сжимающего усилия осуществляется пластическая сварка контактирующих деталей. Плотность тока при электроконтактной сварке достигает  $(1...1,5)10^8$  А/м<sup>2</sup>. Сварка принципиально может осуществляться как на постоянном, так и на переменном токе. Но на практике применяют только переменный ток, так как сила тока при сварке достигает десятков тысяч ампер при напряжении всего несколько вольт, и источники постоянного тока для этих целей были бы слишком дорогими и сложными. Различают стыковую, роликовую и точечную электроконтактную сварку (рис. 1.3.).

Таблица 1.13 Значения коэффициента и показателя степени

Материал контактов	$k_1$	Форма поверхностей контактирующих деталей	m
Алюминий–алюминий	0,006	Плоскость–плоскость	1,0
Алюминий–сталь	0,0044	Сфера–сфера	0,75
Латунь–сталь	0,003	Линейный контакт	0,5
Сталь–сталь	0,0076		

Основные технические данные некоторых установок для электроконтактной сварки приведены в табл. 1.2.

Сущность электроконтактного напекания порошков заключается в том, что в месте контакта двух токопроводящих поверхностей металлический порошок спекается за счет теплоты, выделившейся при протекании электрического тока. Плотность тока –  $(2...4)10^5$  А/м<sup>2</sup>, переменное напряжение – (2...4) В, давление между напекаемой деталью и вспомогательным медным роликом –  $(12...18)10^6$  Па. Способ применим для восстановления деталей диаметром более 10 мм.

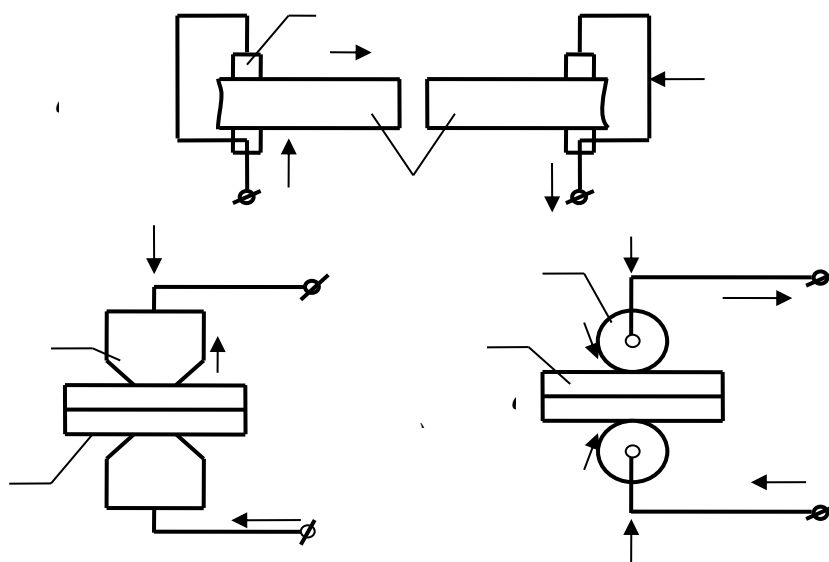


Рис. 1.3 – Разновидности контактной сварки:

а – стыковая; б – точечная; в – роликовая; 1 – деталь; 2 – зажимной подводящий контакт

Таблица 1.2. Основные технические данные некоторых установок для электроконтактной сварки

Тип	Номинальная мощность, кВА	Первичное напряжение, В	Вторичное напряжение, В	Максимальный диаметр детали, мм	Назначение
АСП-10	10	220	1,2.....3,2	8	Стыковая сварка
М	55	220	2,5.....5,0	34	
С-1202	750	380	5,5..14,5	66	
МСО-750					
МТ-809	20	220	1,42..2,8	3	Точечная сварка
МТ-1209	50	220	2,2.....4,4	4	
МТП-400	400	380	6.....12	8	
МШ-1001	27	220/380	1,75..3,5	1,2	Роликовая сварка
МШ-1601	75	220/380	3,8	1,5	
МШ-200	200	220/380	4,3.....8.	2,5	
			6		

Электроконтактная наплавка отличается от напекания тем, что в зону контакта вместо порошка подают присадочную проволоку. Прочность наплавляемого слоя обеспечивается за счет частичного плавления тонких слоев

металла в месте контакта и за счет диффузии. Толщина наплавляемого слоя – (0,2...1,5) мм, сила тока (4...12) кА, потребляемая мощность – (5...40) кВА. Для восстановления деталей использует установки типа УКН-8.

Схема установки для электрошлаковой наплавки показана на рис. 1.4. Электрический ток проходит от электрода к детали через шлак, который разогревается выше температуры плавления электрода. Электрод расплавляется. Расплавленный металл оседает вниз, где приобретает форму, задаваемую охлаждаемым водой кристаллизатором. Напряжение 34 В, сила тока 800...900 А. Для осуществления этого способа разработана установка ОКС-7755, наиболее рациональной областью применения которой является восстановление деталей ходовой части гусеничных тракторов.

В основе электромеханической обработки лежит совместное действие термического и силового воздействия на поверхность восстанавливаемой поверхности (рис. 1.5.). Ток, проходя через контакт детали с инструментом сила тока 300...1300 А, напряжение 1...6 В), очень быстро нагревает металл в месте контакта до 1100...1200 К. Нагретый металл выдавливается, образуя выступы, аналогичные резьбе. Далее выраженную поверхность доводят до требуемого диаметра. Этим способом восстанавливают поверхности валов неподвижных соединений (посадочные места под подшипники, шкивы, шестерни и т.п.



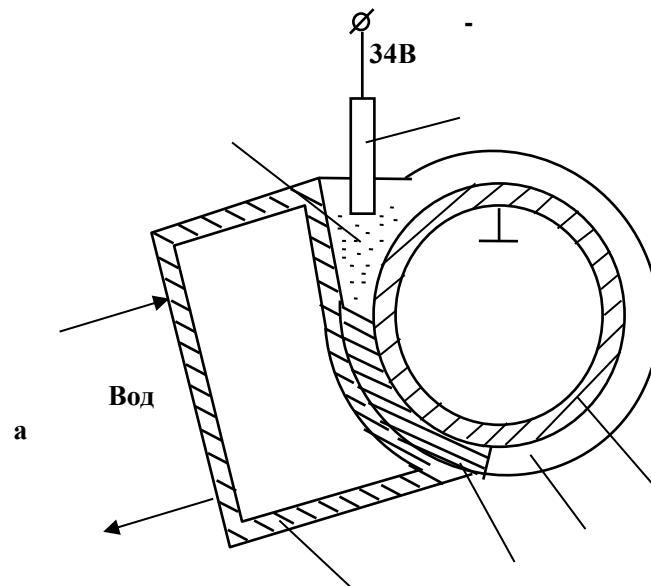


Рис. 1.4. – Схема электрошлаковой наплавки:  
1–охлаждаемый кристаллизатор; 2– наплавленные слои; 3 – габаритные диски;  
4–восстанавливаемая деталь; 5 – шлак; 6 – стальной электрод

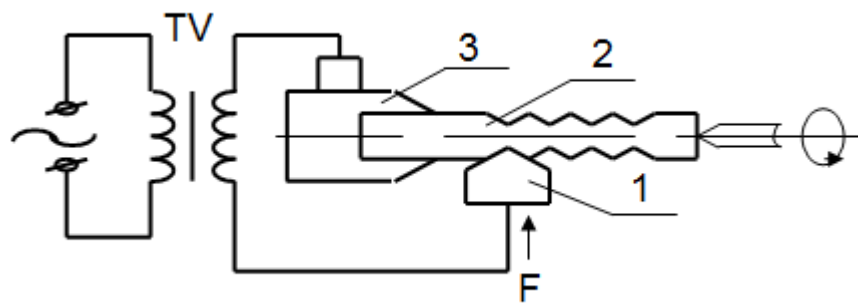


Рис. 1.5. – Схема электромеханической обработки:  
1 – высаживающий инструмент; 2 – деталь; 3 – патрон станка, TV – понижающий трансформатор

### 1.3. МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Шлифовка и полировка деталей считается трудной и дорогостоящей работой. На финишную обработку поверхности приходится примерно 60 % стоимости продукции. На смену традиционным барабанам и виброустановкам приходят более производительные методики.

Современный этап развития технологии финишной обработки характеризуется поиском путей совершенствования параметров технологического оснащения с целью повышения к.п.д. процесса обработки, снижения энергоемкости, универсализации и специализации.

Одним из перспективных методов финишной обработки деталей является метод магнитно-абразивного полирования (МАП). Сущность метода заключается в том, что обрабатываемой детали или наполнителю с магнитными и абразивными свойствами, помещенными в магнитное поле, сообщают принудительное движение относительно друг друга. Магнитно-абразивный наполнитель создает режущий инструмент, плотность которого можно варьировать, изменяя напряженность магнитного поля. Силами магнитного поля зерна наполнителя прижимаются к поверхности детали, оказывая давление на деталь в каждой точке ее поверхности, что приводит к съему металла и сглаживанию микронеровностей. Обработка производится при наличии жидкого наполнителя (СОТС), который в данном процессе выступает как носитель поверхностно-активных веществ, а не как средство охлаждения детали.

В качестве режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке невозможно использование традиционных абразивных материалов, так как они должны обладать не только абразивными, но и высокими магнитными свойствами.

Основным свойством магнитно-абразивных порошков является прочность соединения ферромагнитной и абразивной составляющих. Последнее существенно влияет на стойкость зерен порошка при воздействии термических

и механических нагрузок. Важное значение имеет также микротвердость, форма частиц, технологичность в изготовлении и стоимость магнитноабразивного порошка. Таким образом, в качестве режущих элементов при МАО используются порошки ферросплавов, железа, керметов и других веществ, которые подбираются в зависимости от материала обрабатываемых изделий, состояния его поверхности и исходной шероховатости.

Магнитно-абразивным полированием можно обрабатывать детали любой геометрической формы и габаритных размеров из магнитных и немагнитных материалов.

Устройство для магнитно-абразивного полирования представлено на рис. 1.6. Устройство состоит из неподвижной рабочей камеры (изготовлена из немагнитного материала) и диска вращающегося на оси двигателя с закрепленными на нем постоянными магнитами.

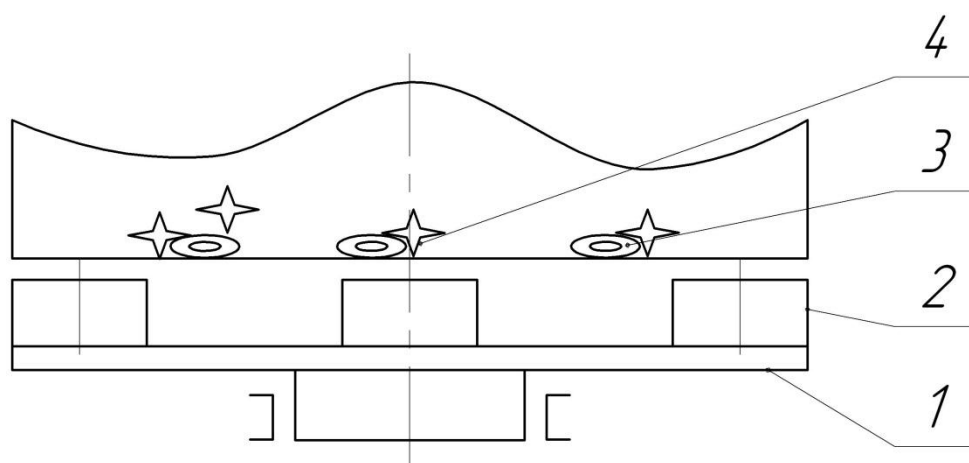


Рис. 1.6. Схема магнитно-абразивной обработки деталей сложной формы из немагнитных материалов:

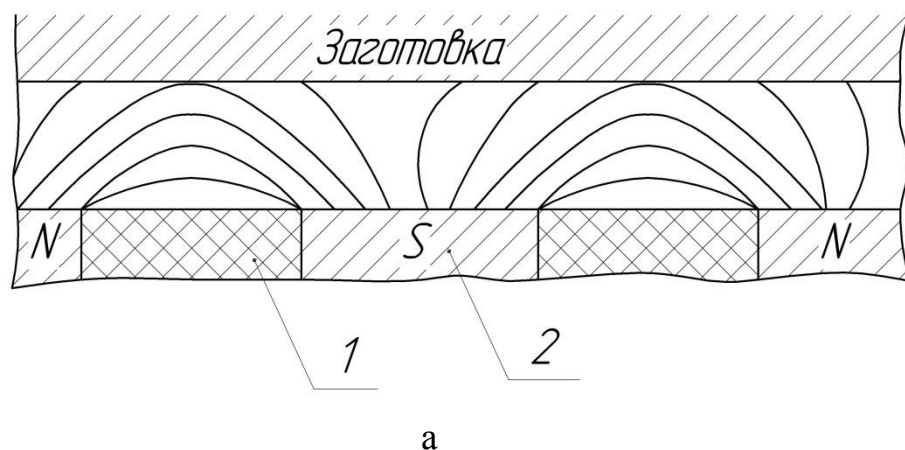
1 – вращающийся диск; 2 – индуктор на постоянных магнитах; 3 – обрабатываемые детали;  
4 – наполнитель

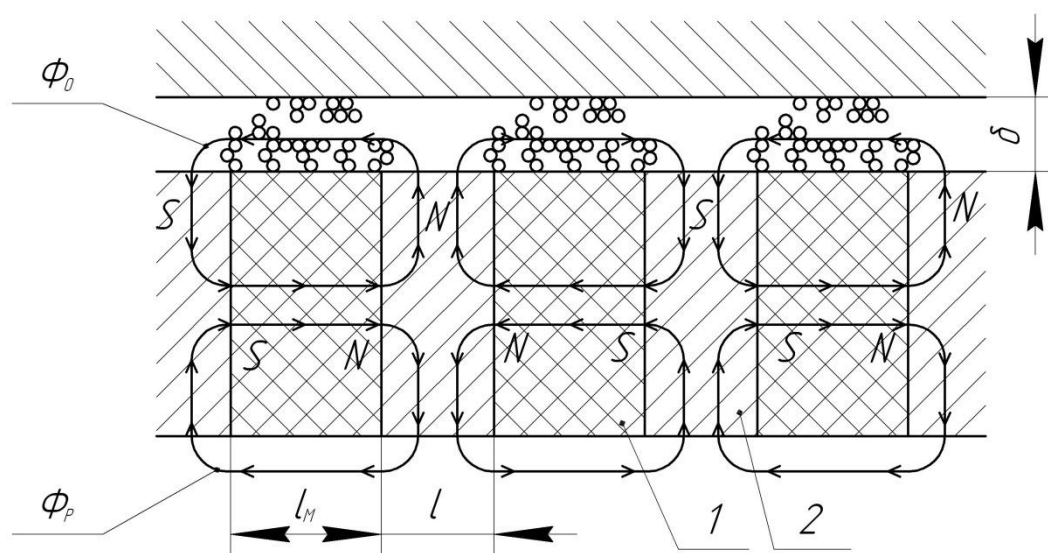
Индуктор выполнен из стали марки КС37 (ГОСТ 21559). При одинаковых размерах  $l_m \times h_m \times b_m = 5 \times 20 \times 20$  мм магниты SmCo5 обеспечивают при полировании заготовок в 2 раза более высокое давление порошка на обрабатываемую поверхность, чем ферриты бария, и в 5 раз более высокое давление – при полировании немагнитных заготовок. Магнитная система индуктора состоит из магнитных ячеек, каждая из которых включает магнит и

два стальных магнитопровода, размещенные у полюсных боковых поверхностей магнита.

Магнитная система индуктора с постоянными магнитами представляет собой блок, составленный из магнитных ячеек. Каждый блок состоит из поочередно расположенных магнитов 1 и стальных магнитопроводов 2, причем магниты установлены так, что их одинаковые полюсы в каждом двух соседних ячейках обращены друг к другу (рис 1.7). Каждый стальной магнитопровод при этом пропускает через себя поток, созданный двумя соседними магнитами. Верхние плоскости магнитопроводов с чередующейся полярностью являются магнитными полюсами на рабочей поверхности индуктора, обращенной к заготовке.

При полировании немагнитной заготовки картина силовых линий поля в рабочем зазоре  $\delta$  имеет вид, изображенный на рис. 1.7. а. Прохождение основного магнитного потока  $\Phi_o$  и потоков рассеивания  $\Phi_p$  показаны на рис. 1.6. б. Основной магнитный поток проходит от одного полюса индуктора к другому преимущественно вдоль рабочего зазора над магнитом, концентрируясь у боковых кромок стальных магнитопроводов. Из-за этого расположение магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре оказывается иным, чем при полировании ферромагнитных заготовок: порошок концентрируется над магнитами а не над полюсами индуктора. При использовании магнитов из SmCo5 в рабочем зазоре  $\delta = 0,8 \div 1,0$  мм удастся создать индукцию  $B = 0,8 \div 1,0$  Тл.





б

Рис. 1.7. Картины поля (а) и прохождение магнитных потоков (б) при полировании немагнитных заготовок индуктором на постоянных магнитах [1,5]:

1 – магниты; 2 – стальные магнитопроводы

Вращение магнитных индукторов позволяет реализовывать обработку в «бегущем» магнитном поле комбинируя ее с центробежным уплотнением абразивной среды. Объем загрузки рабочей среды и деталей (образцов) составляет 80% объема рабочей камеры.

Достоинством применяемого для полирования оборудования является простота конструкции и удобство эксплуатации.

Представленный способ является перспективным для более широкого внедрения в производство агроинженерного сервиса. Развитие этого направления позволит повысить энергоэффективность и улучшить качество готовых изделий.

#### 1.4. ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Для нанесения износостойких покрытий на поверхность обрабатываемого деталей и узлов используются потоки ионов и плазмы, генерируемые в условиях вакуума или при атмосферном давлении. Наиболее

интенсивному воздействию подвергаются поверхностные слои деталей, контактирующие между собой (пары трения, подшипники). Широкими возможностями для нанесения покрытий обладают вакуумные установки, содержащие дуговые испарители и распылительные магнетронные источники. Скорость нанесения защитных покрытий дуговым методом выше, чем магнетронным. Однако микрокапельный режим дугового испарения металла на катоде приводит к образованию микрокапель размером в единицы - десятки микрометров на поверхности обрабатываемых изделий. При этом шероховатость поверхности возрастает. Магнетронный метод нанесения покрытий обычно применяется для получения пленок толщиной до 10 мкм. Дуговые и магнетронные источники имеют различные конструкции магнитных систем для управления дуговым и магнетронным разрядами. Общим является форма катода. Обычно применяются плоские дисковые и прямоугольные катоды. Для магнетронных и дуговых установок промышленного применения используется также длинные вращающиеся цилиндрические катоды для увеличения степени использования материала катода. В источниках с цилиндрическими катодами она составляет 70-80%, в магнетронных источниках с дисковыми и прямоугольными катодами используется только 25-30% материала катода.

Технологии нанесения трибологических покрытий на внутренние поверхности деталей и узлов начинают внедряться в промышленности. Зарубежная компания Mahle применяет ионно-плазменное нанесение покрытий на рабочие поверхности подшипников, маркируя их "Sputter" (катодное распыление). Такие подшипники с плазменной обработкой поверхности используют в производстве двигателей легковых и грузовых автомобилей Audi, Mercedes-Benz, MAN.

#### **1.4.1. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ**

Традиционная конструкция вакуумной установки для нанесения покрытий (рис. 1.8.) включает в себя один или несколько плазменных

источников магнетронного или дугового типов, расположенных на боковой поверхности цилиндрической вакуумной камеры. Внутри вакуумной камеры находится карусельно-планетарный механизм вращения обрабатываемых образцов для получения однородного покрытия. Вакуумная камера оснащается ионным источником и нагревательным элементом для предварительной очистки и подготовки обрабатываемой поверхности.

Плазменные источники с плоскими катодами не совсем подходят для обработки внутренних рабочих поверхностей подшипников, втулок, труб, вентилях и других изделий, так как боковая поверхность находится в поперечном направлении к аксиальному направлению распространения плазменного потока. Ионы будут падать на внутреннюю поверхность деталей под скользящими углами, поэтому скорость осаждения покрытия, однородность, плотность и адгезия пленки будут низкими. С другой стороны, будет затруднена предварительная ионно-плазменная очистка поверхности от загрязнений перед процессом нанесения покрытий.

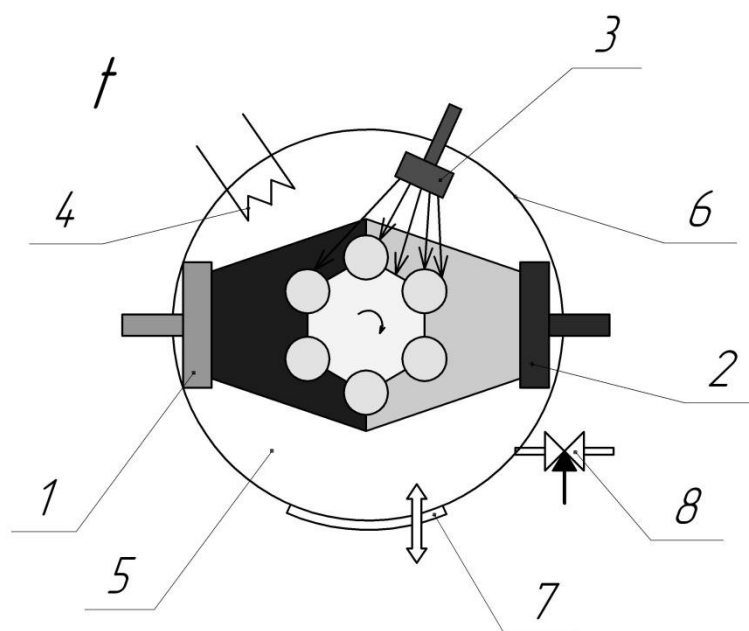


Рис. 1.8. Схема технологической установки для нанесения покрытий:

1, 2 - магнетроны с катодами из различных материалов, 3 - ионный источник для предварительной очистки образцов, 4 - резистивный нагреватель, 5 - карусельный механизм вращения образцов, 6 - вакуумная камера, 7 - дверца для загрузки образцов, 8 - регулятор потока рабочего газа.

Для обработки внутренних поверхностей деталей и узлов больше всего подходят плазменные источники коаксиального типа, у которых радиальный поток плазмы распространяется от внутреннего цилиндрического катода к внутренней обрабатываемой поверхности цилиндрической формы, которая будет являться анодом плазменного источника.

Для получения защитных пленок и дальнейшего исследования их трибологических свойств разработана вакуумная установка (рис.1.9.), состоящая из плазменных источников и вакуумной камеры диаметром 420 мм и длиной 480 мм, которая откачивается диффузионным насосом со скоростью откачки 200 л/с. Вакуумная камера, оснащена двумя магнетронными источниками. Один из них - это традиционный магнетронный источник со сменным дисковым катодом диаметром 40 мм и толщиной 6 мм, предназначенный для получения многослойных покрытий различного состава с целью лабораторного исследования характеристик покрытий. Другой магнетрон коаксиального типа специально изготовлен для разработки технологии нанесения покрытий на внутренние поверхности подшипников. Диаметр цилиндрического катода составляет 20 мм, длина рабочей части 200 мм. Внутри катода расположена магнитная система. Магнетрон с плоским катодом является универсальным источником, позволяющим быстро изменять материал катода, подбирать состав покрытий, количество слоев, толщину, расстояние до обрабатываемой детали, проводить измерения параметров плазмы. Коаксиальный магнетрон - это базовый плазменный источник, на основе которого будет создаваться промышленная установка для обработки внутренних поверхностей деталей. Питание магнетронов осуществляется инверторным источником питания с максимальной мощностью 3 кВт.