

УДК 621.923: 536.24

## СОВМЕЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

*д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ*  
(ГНПО «ЦЕНТР» НАН Беларуси, Минск);

*Н.Л. ГРЕЦКИЙ*

(Полоцкий государственный университет);

*С.В. СЕМЕНОВ, А.В. НОВИКОВ*

(ОАО «Полоцкий завод «Проммаширемонт»)

Рассмотрена технология восстановления геометрических характеристик предельно изношенных поверхностей деталей и повышения износостойкости поверхностного слоя при упрочнении. Технология состоит из послойного нанесения легированных ферромагнитных порошков и низколегированных углеродистых проволок. Нанесение порошков может происходить одновременно с поверхностным пластическим деформированием наносимого слоя, а нанесение проволоки сопровождается упрочняющим ротационным резанием. Показано существующее оборудование по нанесению ферромагнитных порошков, предложена универсальная конструкция для их нанесения. Даны рекомендации по оборудованию и режимам для последующей наплавки проволоки, совмещенной с ротационным резанием.

**Введение.** Повышение надежности и долговечности машин и их составных частей в процессе ремонта – главная цель предприятий, занимающихся разработкой технологий и организацией ремонтного производства. Обеспечить высокое качество отремонтированных машин в процессе освоения технологий и организации ремонта можно за счет внедрения новых методов восстановления, упрочнения и обработки деталей машин [1]. Новые и традиционные методы восстановления, упрочнения и обработки деталей машин имеют свои рациональные области применения и не всегда решают комплексные задачи повышения долговечности изделий в конкретных условиях эксплуатации [2]. Так, например, при высоких параметрах качества упрочнения не обеспечивается экономное восстановление до заданного размера предельно изношенной поверхности детали. Поэтому рациональным представляется сочетание в технологическом процессе восстановления различных методов упрочнения и обработки, а в рамках самих методов – комбинации разнообразных технологических воздействий [3, 4].

**Цель работы** – создание технологии и оборудования для восстановления и упрочнения поверхностей деталей нанесением ферромагнитных порошков (ФМП) в сочетании с поверхностным пластическим деформированием (ППД) и наплавкой низколегированных углеродистых проволок в сочетании с ротационным резанием (рис. 1).



Рис. 1. Схема технологии восстановления предельно изношенных поверхностей деталей машин

### Оборудование и режимы наплавки низколегированной углеродистой проволоки и применяемый для обработки наплавленного слоя ротационный инструмент

Совмещение наплавки в среде углекислого газа с термомеханической обработкой в момент кристаллизации наплавленного слоя (рис. 2) благоприятно сказывается на уменьшении пор и трещин и на увеличении усталостной прочности деталей. Использование ротационного самовращающегося реза в качестве деформирующего инструмента позволяет не только улучшить физико-механические характеристики наплавленного слоя, но и обеспечить путем завальцовывания впадин между сварочными швами, залечивания пор и трещин геометрические параметры качества, резко сокращающие последующую механическую обработку [1, 4, 5].

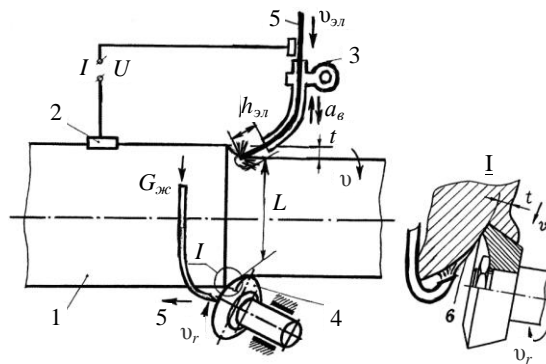


Рис. 2. Наплавка проволоки с упрочняющим ротационным резанием:

- 1 – обрабатываемая деталь; 2 – скользящий контакт; 3 – мундштук наплавочной головки;  
 4 – ротационный резец; 5 – наплавочная проволока; 6 – охлаждающая жидкость;  
 $v$  – скорость главного движения;  $v_r$  – скорость дополнительного движения реза;  $S$  – скорость подачи;  
 $v_{эл}$  – скорость подачи электродной проволоки;  $h_{эл}$  – вылет электрода;  $G_{жс}$  – расход жидкости;  $I$  – сила тока;  
 $U$  – напряжение дуги;  $t$  – глубина резания;  $L$  – расстояние от электрода до реза

**Методика и аппаратура исследования.** Оптимизация качества поверхностного слоя покрытия, получаемого в процессе упрочняюще-размерной обработки ротационным резцом, совмещенной с электродуговой наплавкой проволокой Нп-30ХГСА в среде углекислого газа, осуществлялась в производственных условиях. В качестве параметров оптимизации были приняты показатели макро- и микрогеометрии поверхности:  $S_{mw}$ ,  $Ra$ . Так как после наплавки проволокой Нп-30ХГСА (20...25 HRCэ) в среде  $CO_2$  согласно технологическому процессу следует закалка, то параметры твердости HRCэ и упрочнения поверхностного слоя  $\mu$  не рассматривались.

Кинематический коэффициент задавали в широком диапазоне с помощью привода принудительного вращения реза ( $K = 0 \dots 10$ ). При высоких скоростях вращения режущей пластины на поверхности формировался рельеф, характерный для операций фрезерования, с большой высотой неровности вследствие вибрации инструмента на высоких скоростях резания. Поэтому использование принудительного вращения ротационного инструмента для упрочняюще-размерной обработки было принято нецелесообразным. При работе заторможенным ротационным резцом ( $K = 0$ ) снимались выступы наплавленного металла, впадины между шагами наплавки сохранялись, срезаемая стружка скатывалась в валик, что приводило к сколу режущего лезвия. Поверхность, не требующую дополнительной лезвийной обработки, удавалось получить в диапазоне скоростей самовращения ротационного реза, когда режущая пластина частично завальцовывала впадины и залечивала поры, при этом образующаяся стружка сходила с перемещающегося лезвия в форме шпаги [6].

Независимой переменной при упрочняюще-размерной обработке самовращающимся ротационным резцом принимали расстояние от наплавочной проволоки до режущей кромки реза  $L$ , так как интенсивность нагрева  $I$ , подача  $S$  и скорость главного движения  $v$  определялись режимами наплавки проволоки Нп-30ХГСА в среде  $CO_2$ , а глубину резания назначали в соответствии с потребностью обеспечить определенную толщину износостойкого покрытия, наносимого на восстанавливаемую деталь. Глубину резания, которая изменялась в пределах  $t = 0,5 \dots 2,0$  мм, устанавливали с помощью щупов толщиной, равной толщине покрытия  $t_n = 2 \dots 3$  мм. Постоянными факторами при упрочняюще-размерной обработке были приняты: скорость наплавки  $v = 0,01$  м/с и подача  $S = 4$  мм/об.

В экспериментах использовали наплавочный автомат А-580, электродную проволоку которого устанавливали таким образом, чтобы металл из сварочной ванны не растекался по поверхности детали. За проволокой на различных расстояниях  $L$  закрепляли ротационный резец из твердого сплава ВК6.

Режимы наплавки следующие: напряжение дуги  $U = 20$  В; сварочный ток  $I = 120 \dots 150$  А; вылет проволоки  $h_{np} = 15 \dots 20$  мм; скорость подачи электродной проволоки  $v_{np} = 0,035$  м/с; расход углекислого газа

$G = 0,5 \dots 0,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Расстояние от наплавочной проволоки до режущей кромки ротационного резца изменяли от 30...35 до 10...15 мм.

**Результаты и обсуждение.** Необрабатываемая поверхность после наплавки имеет большое количество характерных для сварочного шва макронеровностей волнистой формы с пиками и провалами между сварочными швами (рис. 3, а). При установке резца на расстояние  $L = 30 \dots 35$  мм от электродной проволоки срезаются пики, обнажаются впадины, выступают подповерхностные поры (рис. 3, б). Глубина обработки получается меньше установленной вследствие отжима консольной конструкции резцедержателя с ротационным резцом. При установке резца на расстояние  $L = 25 \dots 30$  мм подповерхностные поры в основном залечиваются (рис. 4, в). Отжим резца уменьшается, но образуются трещины на недостаточно пластичном материале наплавки вследствие растягивающих нагрузок от резца с большим по величине отрицательным передним кинематическим углом. При установке резца на расстояние  $L = 20 \dots 25$  мм трещины не образуются, но остаются впадины между сварочными швами (рис. 3, г). При установке резца на расстояние  $L = 15 \dots 20$  мм отжим резца снижается, начинается завальцовывание впадин между швами (рис. 3, д). При расстоянии 10...15 мм резец практически не отжимается разогретым металлом наплавки, впадины между сварочными швами завальцовываются, поры залечиваются, образуется поверхность с показателями макро- и микрогеометрии, не требующая дополнительной лезвийной обработки (рис. 3, е).

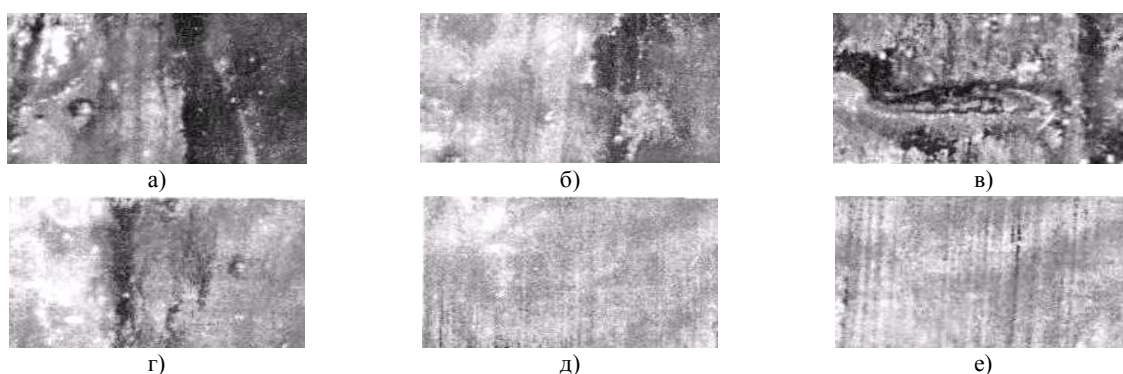


Рис. 3. Поверхности наплавки Нп-30ХГСА ( $\times 30$ ) до обработки (а), после упрочняюще-размерной обработки при расстоянии между резцом и электродом  $L = 30 \dots 35$  мм (б),  $L = 25 \dots 30$  мм (в),  $L = 20 \dots 25$  мм (г),  $L = 15 \dots 20$  мм (д),  $L = 10 \dots 15$  мм (е)

Полученные результаты позволяют рекомендовать при упрочняюще-размерной обработке самовращающимся ротационным резцом, совмещенной с электродуговой наплавкой проволокой Нп-30ХГСА в среде  $\text{CO}_2$ , устанавливать ротационный резец на расстояние  $L = 10 \dots 15$  мм от наплавочного электрода. При этом геометрические параметры качества поверхностного слоя наплавки проволокой Нп-30ХГСА будут оптимальны и составят:  $S_{mw} \approx 2 \dots 4$  мм,  $Ra \approx 6 \dots 10$  мкм.

#### Универсальное оборудование и режимы нанесения ферромагнитных порошков при совмещении с поверхностным пластическим деформированием

Существуют различные устройства для реализации процесса электромагнитной наплавки. Наиболее просты двухполюсные и однополюсные установки для упрочнения деталей в электромагнитном поле [2]. При упрочнении на двухполюсной установке деталь располагается между двумя торцами сердечников электромагнита, имеющими разноименную магнитную полярность, а при упрочнении на однополюсной установке – вблизи одного торца сердечника электромагнита. Процесс упрочнения в большинстве случаев имеет низкую стабильность, обусловленную тем, что в рабочих зазорах часто происходит спекание массы ферропорошка и источник технологического тока переходит в режим короткого замыкания [7].

**Методика и аппаратура исследования.** Для повышения качества формирования покрытий в электромагнитном поле разработаны установки, позволяющие реализовать импульсное механическое воздействие полюсного наконечника на формируемый участок покрытия, а также установки, обеспечивающие, кроме возвратно-поступательного движения полюсного наконечника, его вращение [8]. Дополнительное вращение полюсного наконечника способствует лучшей очистке рабочего зазора от частиц ферропорошка, не участвовавшего в предыдущих разрядах, и от продуктов эрозии в твердой фазе, что повышает стабильность образования токопроводящих цепочек, увеличение переноса капель расплава порошка на поверхность детали, повышение стойкости полюсного наконечника. Перемещение рабочей поверхности полюсного наконечника может быть как результатом его самовращения – при импульсном трибомеханическом взаимодействии с формируемым участком покрытия, так и принудительным – при использовании привода от электродвигателя. Принудительное вращение при проскальзывании поверхности заготовки относительно поверхности полюсного наконечника в момент импульсного механического воздействия на формируемый участок покрытия обеспечивает сглаживание его неровностей. Пазы на поверхности вращающегося наконечника способствуют концентрации магнитного потока, повышают количество порошка, удерживаемого в рабочем зазоре, увели-

чивают концентрацию энергии разрядного тока, способствуют повышению производительности, стабильности процесса расплавления порошка и последующего переноса капель расплава на поверхность детали.

Для повышения стойкости полюсного наконечника и качества формирования покрытий в электромагнитном поле необходимо учитывать направление электрического тока и магнитной индукции, а также фазовые сдвиги напряжений, питающих электромагнитную катушку и сварочный трансформатор. Максимальные перенос порошка, производительность и стабильность процесса [2, 7] обеспечиваются при подключении установки по схеме, когда электрический ток и магнитная индукция имеют направление от полюсного наконечника к детали. Для изучения влияния фазового угла смещения между напряжением  $U_k$ , питающим электромагнитную катушку для создания вибрации полюсного наконечника и переменного магнитного потока, и напряжением  $U_t$ , питающим сварочный трансформатор, предложена принципиальная электрическая схема [8], позволяющая реализовать шесть возможных вариантов смещения (рис. 4):

- 1) без фазового смещения (а);
- 2) со смещением  $180^\circ$  (б);
- 3) с опережением  $U_t$  относительно  $U_k$  на  $120^\circ$  (в);
- 4) с отставанием  $U_t$  относительно  $U_k$  на  $120^\circ$  (г);
- 5) с опережением  $U_t$  относительно  $U_k$  на  $60^\circ$  (д);
- 6) с отставанием  $U_t$  относительно  $U_k$  на  $60^\circ$  (е).

Ряд вариантов (рис. 4, б, в, д) из-за нестабильности процесса упрочнения, низкой производительности и больших тепловложений в деталь не могут быть рекомендованы к практическому применению. В отдельных случаях (рис. 4, а, г, е) процесс упрочнения протекает стабильно.

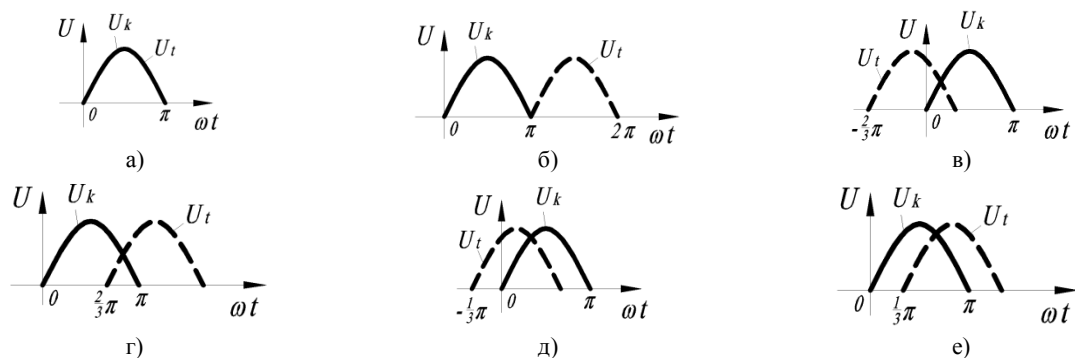


Рис. 4. Схемы вариантов фазового смещения напряжения цепи технологического тока  $U_t$  относительно напряжения цепи электромагнитной катушки  $U_k$ :  
 $\omega$  – угловая частота переменного тока;  $t$  – время

**Результаты и обсуждение.** Максимальный привес образца наблюдается при упрочнении по варианту (рис. 4, а), когда нет фазового смещения. При этом происходит незначительный нагрев детали и полюсного наконечника. Перенос расплава зерен порошка осуществляется крупными плотными каплями. При упрочнении по варианту (рис. 4, г), когда перенос расплава порошка осуществляется более мелкими каплями, повышается сплошность покрытия. При этом привес образцов несколько снижается, а полюсных наконечников увеличивается. Упрочнение по варианту (рис. 4, е), обеспечивающему перенос расплава мелкими каплями, значительно увеличивает сплошность и уменьшает шероховатость покрытия, при этом снижается привес образцов и полюсных наконечников. Низкая эрозия рабочей поверхности полюсного наконечника способствует незначительному изменению величины рабочего зазора, что значительно повышает стабильность процесса упрочнения. При данном варианте стойкость полюсного наконечника максимальна.

В результате проведенных исследований установлено:

- оборудование для нанесения покрытия должно обеспечивать совмещение процесса упрочнения деталей ферропорошками в электромагнитном поле с ППД;
- полюсный наконечник должен иметь выступы и пазы на рабочей поверхности, способствующие концентрации магнитного потока и энергии разрядного тока;
- установка должна реализовывать процесс, в котором векторы индукции магнитного поля, электрического тока и перемещения ферромагнитного порошка, подаваемого в рабочий зазор, сонаправлены;
- оборудование должно обеспечить технологический процесс нанесения ФМП в электромагнитном поле по различным вариантам (см. рис. 4, а, г, е). Первый из них целесообразно применять при комбинированном восстановлении и упрочнении поверхностей деталей с значительным износом (до 1,8 мм), используя последующую наплавку проволокой, совмещенную с ротационным резанием; второй вариант рекомендуется для восстановления и упрочнения поверхностей деталей, изношенных на 0,3...0,5 мм, в сочетании с ППД; третий – для упрочнения поверхностей с последующей обработкой до первоначального размера, сохраняя после неё только диффузионный слой или слой толщиной 0,1...1,15 мм.

### Универсальная установка для нанесения ферромагнитных порошков

Структурная схема оборудования для нанесения ФМП представлена на рисунке 5, принципиальная схема и внешний вид установки – на рисунке 6, а, б. Наличие обратной связи в рассматриваемых схемах позволяет поддерживать заданные режимы упрочнения и автоматически их корректировать для повышения стабильности процесса нанесения ферропорошковых покрытий.

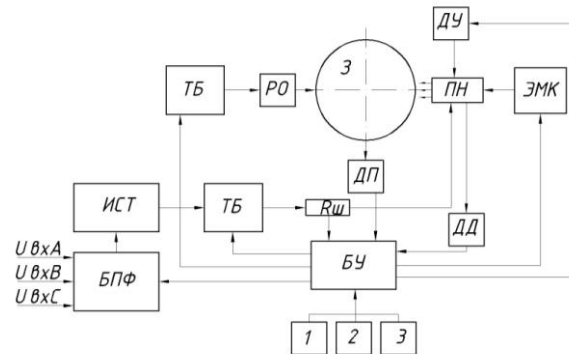


Рис. 5. Структурная схема универсальной установки для нанесения ферромагнитных порошков с обратной связью:

1, 2, 3 – режимы нанесения порошков по вариантам, представленным на рисунках 4, а, г, е;  
 $U_{вхА}$ ,  $U_{вхВ}$ ,  $U_{вхС}$  – фазы входного напряжения; 3 – заготовка; РО – рабочий орган ППД; УП – устройство перемещения рабочего органа ППД; ДП – датчик перемещения; ИСТ – источник сварочного тока; БПФ – блок переключения фаз;  
 ТБ – тиристорный блок; БУ – блок управления; ПН – полюсный наконечник; ДУ – дозирующее устройство;  
 ЭМК – электромагнитная катушка;  $R_{ш}$  – шунтирующее сопротивление; ДД – датчик давления

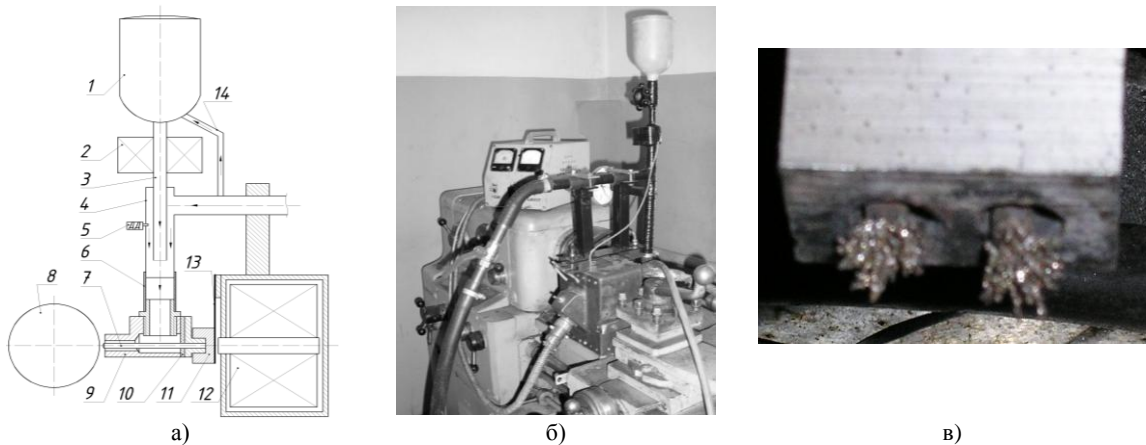


Рис. 6. Установка для нанесения ферропорошковых покрытий:

а – принципиальная схема, где 1 – бункер; 2 и 12 – электромагнитные катушки; 3 – медная трубка; 4 – каркас установки; 5 – датчик давления; 6 – резиновая трубка; 7 – электрод; 8 – заготовка; 9 – полюсный наконечник; 10 – текстолитовая пластина; 11 – державка; 13 – гибкая металлическая пластина; 14 – трубка;

б – внешний вид установки на базе токарно-винторезного станка;

в – внешний вид полюсного наконечника с образовавшимися цепочками порошка под действием электромагнитного поля

Электромагнитная катушка 2 питается от переменного напряжения для предотвращения намагничивания ферропорошка и служит для его дозирования. Трубка 3 выполнена из меди для предотвращения концентрации магнитного потока по ее длине и оперативного реагирования системы на увеличение или уменьшение количества ферропорошка, подаваемого в рабочий зазор. Электромагнитная катушка 12, гибкая металлическая пластина 13 и резиновая трубка 6 позволяют полюсному наконечнику 9 осуществлять осциллирующие движения. Текстолитовая пластина 10 и полюсный наконечник 9, выполненный из алюминия, способствуют концентрации магнитного потока на металлическом электроде 7. Трубка 14 подводит струю воздуха от компрессора в нижнюю часть бункера 1 для предотвращения образования в нем арочных структур ферропорошка на переходе в медную трубку 3.

Дозирование порошка осуществляется следующим образом: поток воздуха от компрессора, проходя по каркасу 4, увлекает за собой частицы порошка, находящегося в медной трубке 3 и удерживаемого магнитным полем электромагнитной катушки 2. При чрезмерно большой подаче ферропорошка в полость полюсного наконечника резко увеличивается давление воздушного потока в каркасе 4, что фиксируется датчиком давления 5. Сигнал от датчика поступает в блок управления (см. рис. 5), который увеличивает напряжение элек-

тромагнитной катушки 2. В результате растёт электромагнитная сила, удерживающая порошок в трубке 3, и уменьшается его подача в полость полюсного наконечника 9. При недостаточной подаче порошка давление воздушного потока в каркасе установки уменьшается. Это вызывает уменьшение (при помощи БУ) электромагнитной силы и увеличение количества порошка, поступающего в полость наконечника. Таким образом, система автоматически поддерживает заданное количество порошка в рабочем зазоре.

Процесс формирования покрытия осуществляется следующим образом: в полости полюсного наконечника ферропорошок равномерно распределяется по поверхности электрода в результате его осциллирующего движения. Под действием воздушного потока и вибрации полюсного наконечника ферропорошок равномерно перемещается по поверхности электрода и на выходе его из полюсного наконечника, образуя токопроводящие цепочки (см. рис. 6, в). В период, когда подается напряжение на заготовку и электрод, происходит расплавление цепочек ферропорошка и его последующий перенос на поверхность заготовки электромагнитными силами и воздушным потоком. При увеличении количества образовавшихся токопроводящих цепочек наблюдается падение напряжения на шунтирующем сопротивлении, что фиксируется блоком управления, который формирует сигнал управления теристорным блоком. В результате увеличиваются напряжение и сила тока, проходящего через этот блок, что способствует более полному расплавлению образовавшихся цепочек ферропорошка. При уменьшении образования токопроводящих цепочек напряжение и сила тока снижаются, предотвращая перегрев расплава порошка и большой выброс его из рабочего зазора. Воздушный поток и алюминиевый корпус полюсного наконечника снижают нагрев электрода, увеличивая ресурс его работы. Поток воздуха и вибрация полюсного наконечника способствуют более полной очистке рабочего зазора от продуктов эрозии в перерыве между электрическими импульсами.

**Заключение.** Сочетание в одном технологическом процессе операций комбинированного упрочнения, восстановления и обработки поверхностей деталей дает возможность не только обеспечить нужные геометрические характеристики поверхности при восстановлении, но и повысить физико-механические свойства материала поверхностного слоя при упрочнении.

Результаты испытаний двигателя внутреннего сгорания показали, что комбинированная технология, состоящая из нанесения легированных ферромагнитных порошков и последующей наплавки углеродистой проволоки с обработкой ротационным инструментом, позволяет увеличить ресурс работы и снизить себестоимость восстановления изношенных деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воловик, Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик. – М.: Колос, 1981. – 351 с.
2. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
3. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
4. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
5. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ. – 276 с.
6. Обработка износостойких покрытий / под ред. Ж.А. Мрочека. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
7. Оптимизация технологических параметров формирования износостойких покрытий электромагнитным способом / Ж.А. Мрочек [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1991. – № 2. – С. 22 – 25.
8. Формирование покрытий ферропорошками в электромагнитном поле / М.Л. Хейфец [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2007. – № 2. – С. 2 – 10.

Поступила 04.02.2011

#### COMBINATION OF ELECTROPHYSICAL AND THERMOMECHANICAL PROCESSES FOR RESTORATION AND HARDENING OF SURFACES OF DETAILS

*M. KHEIFETZ, N. GRETSKIJ, S. SEMENOV, A. NOVIKOV*

*The technology of restoration of geometrical characteristics of extremely worn out surfaces of details and increase of wear resistance of a blanket is considered at hardening. The technology consists of level-by-level drawing of the alloyed ferromagnetic powders and low alloyed carbonaceous wires. Drawing of powders can simultaneously occur to superficially plastic deformation of a put layer, and wire drawing is accompanied by strengthening rotational cutting. The existing equipment on drawing of ferromagnetic powders is shown, the universal design for their drawing is offered. Recommendations about the equipment and modes for the subsequent surfacing wire with the combined rotational cutting are given.*