

УДК 621.7:621.8:621.9

СОВМЕЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКОЙ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, канд. техн. наук, доц. В.Б. ЧЕМИСОВ,
канд. техн. наук, доц. В.И. АБРАМОВ, Н.Л. ГРЕЦКИЙ, С.К. ТОЛСТИКОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Для обеспечения геометрических характеристик изношенных поверхностей деталей при восстановлении и повышении физико-механических характеристик поверхностного слоя при упрочнении предложено в технологическом процессе ремонтного производства сочетать операции электромагнитного упрочнения легированными ферропорошками и наплавки проволокой в защитной среде. Процессы упрочнения и наплавки рекомендовано интенсифицировать комбинированием термомеханических воздействий при использовании ротационных шариковых и роликовых деформирующих и режущих инструментов.

Повышение надежности и долговечности машин и их узлов 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 поверхностей 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 восстановление до заданного размера сильно изношенной поверхности детали.

Поэтому рациональным представляется сочетание в технологическом процессе ремонтного производства различных методов упрочнения, восстановления и обработки, а в рамках самих методов комбинации разнообразных технологических воздействий [3].

В результате для улучшения комплекса параметров качества восстановления изношенных поверхностей деталей с минимальными затратами предложено упрочнение производить в процессе электромагнитной наплавки легированных ферропорошков, совмещенном с поверхностным пластическим деформированием [4], а восстановление и обработку – в процессе наплавки проволокой, совмещенном с упрочняюще-размерным ротационным резанием [5].

Электромагнитное упрочнение. Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием обеспечивает не только упрочнение поверхностного слоя, но и повышение его физико-химических характеристик.

В процессе электромагнитной наплавки в зазор между вращающейся деталью и полюсным наконечником электромагнита из дозирующего устройства непрерывно подается ферропорошок (рис. 1).

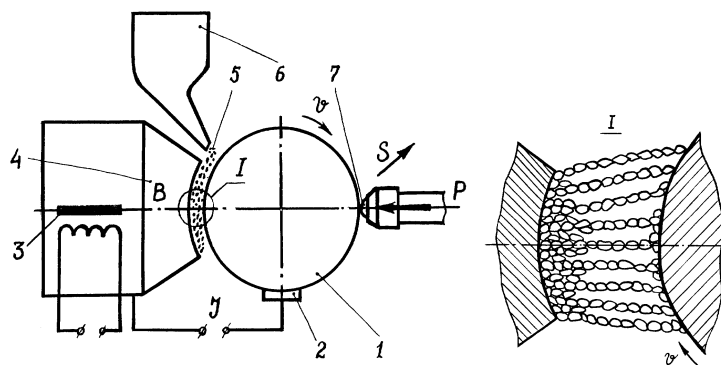


Рис. 1. Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием:
1 – обрабатываемая деталь; 2 – скользящий контакт; 3 – электромагнит; 4 – полюсный наконечник;
5 – ферромагнитный порошок; 6 – дозирующее устройство; 7 – шариковый обкатник;
V – скорость главного движения; S – скорость подачи; P – усилие деформирования;
B – магнитная индукция; I – сила тока электродугowych разрядов

Ориентируясь в зазоре вдоль силовых линий магнитного поля, частицы ферропорошка образуют множество токопроводящих цепочек, замыкающих электрическую цепь между полюсным наконечником и деталью. Частицы у поверхности детали, в зоне максимального электросопротивления под воздействием электрического тока расплавляются. Капли расплава распределяются по поверхности детали и подвергаются пластическому деформированию шариковым накатником [4].

В существующих установках для реализации метода в качестве источников технологического тока применяют узкоспециальные машинные генераторы импульсов, что является одним из сдерживающих факторов широкого внедрения процесса. Применение других источников тока пока малоэффективно, так как процесс обычно нестабилен, вследствие того, что в рабочих зазорах часто происходит спекание массы ферропорошка и источник технологического тока переходит в режим короткого замыкания. В результате перенос материала ферропорошка на упрочняемую поверхность уменьшается и может полностью прекратиться.

Наибольшую известность получили двухполюсные и однополюсные установки для упрочнения валов в постоянном магнитном поле. При упрочнении на двухполюсной установке деталь располагается между двумя сердечниками электромагнита, имеющими разноименную магнитную полярность. При упрочнении на однополюсной установке поверхность детали находится вблизи торца сердечника электромагнита.

Процесс упрочнения на двухполюсной установке при прочих равных условиях имеет более высокую стабильность, чем упрочнение на однополюсной установке. Для повышения стабильности процесса его ведут в потоке охлаждающей жидкости, однако при этом происходит снижение переноса материала ферропорошка на поверхность детали и ухудшение физико-механических свойств упрочняемого слоя. При реализации электромагнитного упрочнения деталей ферропорошками в среде азота установлено, что замена воздушной среды фактически не изменяет характеристик упрочненного слоя.

Упрочнение внутренних поверхностей вращения деталей класса втулок может осуществляться с помощью устройства, в котором полюсный наконечник электромагнита напоминает расточной резец, но имеет развитый рабочий торец. Для упрочнения поверхностей отверстий во втулках, дисках и в корпусных деталях применяют устройства, в которых полюсный наконечник имеет форму диска с радиальными прорезями. При этом полюсный наконечник в отверстиях упрочняемой детали совершает или вращательное, или планетарное движение. Радиальные прорези улучшают кинематику движения зерен ферропорошка и обеспечивают концентрацию магнитного потока в рабочих зазорах.

Для упрочнения плоских и сложнопрофильных линейчатых поверхностей разработаны устройства для электромагнитной наплавки деталей ферропорошками, в которых при наплавке циклически изменяется не только геометрия и размеры рабочего зазора, но и величина, а в ряде случаев и направление магнитного потока. Такие установки обеспечивают более высокую стабильность процесса, но менее производительны, чем одно- и двухполюсные установки для упрочнения валов.

Для стабилизации процесса электромагнитную наплавку ведут в пульсирующем магнитном поле. В такой установке в качестве источника технологического тока используют специально разработанный тиристорный генератор импульсов. Конструкция электромагнитной системы установки обеспечивает совпадение моментов времени существования максимального магнитного потока в рабочих зазорах и предельного сближения полюсных наконечников с упрочняемой поверхностью. Благодаря наличию вибрации сердечников процесс стабилизируется в широком диапазоне варьирования технологических факторов.

Опыт эксплуатации установки показал, что производительность электромагнитной наплавки достигает $50 \text{ см}^2/\text{мин}$, при удельном привесе детали $12...16 \text{ мг}/\text{см}^2$ и переносе материала ферропорошка в объеме 13% , а упрочненный поверхностный слой имеет более высокую сплошность вследствие влияния импульсных механических воздействий полюсных наконечников на поверхностный слой в процессе его формирования.

Наплавка проволокой. Для восстановления сильно изношенных поверхностей деталей наибольшее распространение получила наплавка проволокой в защитной среде (рис. 2). При такой наплавке хорошо формируется шов большой толщины, а наплавленный металл получается плотным [1].

Для наплавки обычно применяют наплавочный автомат А-580М, который устанавливают на токарный станок 1624М, а в качестве источника тока используют выпрямитель ВС-300. Автоматическую наплавку деталей с высокой твердостью рабочих поверхностей ведут проволокой Нп-30 диаметром $1,6...1,8 \text{ мм}$ с последующей закалкой с нагрева токами высокой частоты.

Режимы наплавки: напряжение дуги $U = 20 \text{ В}$; сварочный ток $I = 150 \text{ А}$; скорость наплавки $V = 0,01 \text{ м}/\text{с}$; подача, или шаг наплавки, $S = 4 \text{ мм}/\text{об}$; вылет электрода $h_{эл} = 15 \text{ мм}$; скорость подачи электродной проволоки $V_{эл} = 0,035 \text{ м}/\text{с}$; расход углекислого газа $G_2 = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Совмещение наплавки в среде углекислого газа с термомеханической обработкой в момент кристаллизации наплавленного слоя (см. рис. 2) благоприятно сказывается на уменьшении пор и трещин и на увеличении усталостной прочности деталей. Использование ротационного самовращающегося резца 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 [5].

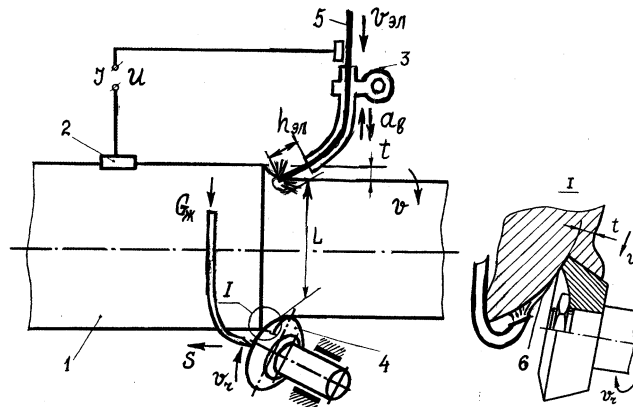


Рис. 2. Наплавка проволокой с упрочняющим ротационным резанием:
 1 – обрабатываемая деталь; 2 – скользящий контакт; 3 – мундштук наплавочной головки;
 4 – ротационный резец; 5 – наплавочная проволока; 6 – охлаждающая жидкость;
 V – скорость главного движения; V_r – скорость дополнительного движения резца; S – скорость подачи;
 $V_{эл}$ – скорость подачи электродной проволоки; $h_{эл}$ – вылет электрода; $G_{ж}$ – расход жидкости; I – сила тока;
 U – напряжение дуги; t – глубина резания; L – расстояние от электрода до резца

Ввиду того, что режимы наплавки определяются заранее и для ротационного упрочняющего резания выбираются резцы известных конструкций, а глубина резания назначается в соответствии с необходимостью обеспечить заданную толщину наносимого покрытия, то для совмещенного процесса в качестве регулируемого фактора принимается расстояние от наплавочной проволоки до режущей кромки инструмента [5].

Таким образом, 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.

Совмещение процессов упрочнения и наплавки. Нанесение на заготовку ферромагнитных порошков в переменном по величине магнитном поле осуществляется магнитной системой путем подачи порошков в рабочий зазор между полюсным наконечником и заготовкой с последующим их расплавлением импульсами электрического тока. Причем за время прохождения одного импульса значение магнитной индукции в рабочем зазоре уменьшают от максимального до минимального. После нанесения ферромагнитного порошка на заготовку осуществляют наплавку углеродистой проволокой с последующим снятием слоя покрытия величиной, определяемой максимальной поверхностной твердостью наносимого покрытия, достигаемой за счет обратной диффузии.

Благодаря совмещению процессов упрочнения и наплавки происходит заполнение пор в слое нанесенного порошка расплавом проволоки, что значительно уменьшает количество пор и неравномерность наносимого покрытия, а также увеличивает толщину наносимого покрытия.

Предлагаемый способ реализовывали следующим образом. На заготовку – вал с номинальным диаметром 50 мм при длине 100 мм, изготовленный из Стали 20, наносили ферромагнитный порошок ферробора марки ФБ-1 с размерами зерен 0,2...0,4 мм. Вращающийся вал устанавливали в центрах токарного станка 16К20, а устройство для реализации способа нанесения ферромагнитного порошка – в резцедержателе. Вибрацию полюсного наконечника с амплитудой 1 мм, отдаленного от сердечника электромагнита воздушным зазором, и переменное по величине магнитное поле в рабочем зазоре создавали электромагнитной катушкой, питаемой выпрямленным током по однополупериодной схеме. При этом автоматически самим устройством обеспечивалась синхронизация изменения магнитного потока в рабочем зазоре с вибрацией полюсного наконечника таким образом, что величина магнитной индукции в рабочем зазоре уменьшалась при движении полюсного наконечника к поверхности заготовки и падала до минимального значения, определяемого величиной остаточной намагниченности полюсного наконечника и заготовки в момент импульсного механического воздействия полюсного наконечника на поверхность заготовки.

Полусный наконечник и заготовку подключали к разноименным полюсам сварочного трансформатора ТД-500 через вентиль В200, обеспечивающий однополупериодное выпрямление напряжения. Соотношение фазового угла между напряжением, питающим электромагнитную катушку для создания вибрации и переменного магнитного потока, и напряжением, питающим сварочный трансформатор, выбирали таким, что моменту импульсного механического воздействия полусного наконечника на поверхность заготовки соответствовало падение напряжения до нуля во вторичной цепи сварочного трансформатора. Сварочный трансформатор работал в режиме малых токов при минимальном значении величины накопленной энергии, соответствующей току короткого замыкания в 150 А. Ширина полусного наконечника вдоль образующей шейки вала составляла 30 мм. Первоначальный рабочий зазор между полусным наконечником и деталью при обесточенной электромагнитной катушке составлял 0,4 мм. При вращении вала в рабочий зазор непрерывно подавался ферромагнитный порошок с расходом 17 г/мин.

После нанесения ферромагнитного порошка на шейки вала наплавляли углеродистую проволоку Нп-30 диаметром 1,6 мм. Наплавку вели короткой дугой на постоянном токе обратной полярности с использованием источника питания с жесткой внешней характеристикой. Режимы наплавки: напряжение дуги $U = 20$ В; сварочный ток $I = 150$ А; скорость наплавки составляла $V = 0,01$ м/с; подача, или шаг наплавки, 4 мм/об; вылет наплавочной проволоки 15 мм; скорость подачи наплавочной проволоки 0,035 м/с; расход углекислого газа 0,6 м³/ч.

Затем снимали слой полученного покрытия твердосплавным инструментом Т15К10 глубиной 0,5 мм, определяемой экспериментально, соответствующей максимальной поверхностной твердости наносимого покрытия, достигаемой за счет обратной диффузии.

По предлагаемому способу были изготовлены и исследованы несколько образцов. Количество пор в покрытии определяли металлографическим способом на микроскопе ПМТ-3, для чего изготавливали шлифы из образцов. Неравномерность нанесения покрытия определяли визуально и на микроскопе МИМ-7. Поверхностную твердость образцов измеряли на твердоме Роквелла. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов при совмещении процессов

№ образцов	Условия нанесения и материалы покрытий		Толщина покрытия, мм	Твердость поверхности покрытия, HRC	Количество пор на поверхности покрытия после механической обработки, %
	упрочнение порошком ферробора марки ФБ-1	наплавка углеродистой проволокой Нп-30 в среде углекислого газа			
1	+	-	0,29	50	21
2			0,25	52	26
3			0,31	50	18
4			0,28	51	22
5	+	+	0,54	51	2
6			0,53	50	4
7			0,52	51	3
8			0,56	52	2

Результаты испытаний показали, что применение совмещения процессов нанесения металлических покрытий обеспечивает следующие преимущества:

- увеличение толщины наносимого покрытия до 0,5...0,6 мм;
- снижение пористости покрытия при сохранении поверхностной твердости покрытия (более 50 HRC).

Интенсификация процесса пластическим деформированием. Нанесение на заготовку ферромагнитных порошков в переменном по величине магнитном поле путем их подачи в рабочий зазор между полусным наконечником и заготовкой с последующим расплавлением импульсами электрического тока интенсифицируется поверхностным пластическим деформированием накатным инструментом. После нанесения ферромагнитного порошка с поверхностно-пластическим деформированием на заготовку осуществляют наплавку углеродистой проволоки и снятие слоя величиной, определяемой максимальной поверхностной твердостью наносимого покрытия, достигаемой за счет обратной диффузии.

При вращении вала в рабочий зазор непрерывно подавали ферромагнитный порошок, который, расплавляясь, распределялся по поверхности детали и подвергался поверхностному пластическому де-

формированию накатным инструментом. Диаметр шарикового накатника составлял 5 мм; усилие деформирования $P = 1240$ Н, подача $S = 0,22$ мм/об.

После нанесения ферромагнитного порошка с последующим поверхностным пластическим деформированием на шейки валов наплавляли углеродистую проволоку Нп-30 диаметром 1,6 мм. Наплавку вели короткой дугой на постоянном токе обратной полярности с использованием источника питания с жесткой внешней характеристикой. Затем снимали слой полученного покрытия твердосплавным инструментом Т15К10 на глубину 0,5 мм, определяемую экспериментально, которая соответствовала максимальной поверхностной твердости наносимого покрытия, достигаемой за счет обратной диффузии.

По предлагаемому способу были изготовлены и исследованы несколько образцов. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов при интенсификации процесса
поверхностным пластическим деформированием

№ образцов	Условия нанесения и материалы покрытий			Толщина покрытия, мм	Твердость поверхности покрытия, HRC	Количество пор на поверхности покрытия после механической обработки, %
	упрочнение порошком ферробора марки ФБ-1	поверхностное пластическое деформирование	наплавка углеродистой проволокой Нп-30 в среде углекислого газа			
1	+	+	-	0,59	50	11
2				0,57	52	10
3				0,53	50	14
4				0,58	51	12
5	+	+	+	0,88	51	2
6				0,74	52	3
7				0,85	51	3
8				0,83	52	2

Результаты испытаний показали, что интенсификация нанесения металлических покрытий с использованием деформирующего инструмента обеспечивает следующие преимущества:

- увеличение толщины наносимого покрытия до 0,7...0,9 мм;
- снижение пористости и неравномерности поверхности покрытия при сохранении и увеличении поверхностной твердости покрытия (более 50 HRC).

Совмещение наплавки с упрочняюще-размерной обработкой. Нанесение на заготовку функционального слоя с одновременной обработкой ротационным резцом, установленным под углами, обеспечивающими его самовращение относительно обрабатываемой поверхности, позволяет дополнительно упрочнить поверхностный слой и улучшить его геометрические характеристики. При этом функциональный слой получают последовательным сочетанием электромагнитной наплавки ферромагнитных порошков с электродуговой наплавкой углеродистой проволоки, а глубину срезаемого слоя самовращающимся ротационным резцом определяют по максимальной поверхностной твердости наносимого покрытия, достигаемой за счет обратной диффузии легирующих элементов ферромагнитных порошков.

После нанесения ферромагнитного порошка ФБ-1 на вал наплавляли углеродистую проволоку Нп-30 диаметром 1,6 мм в среде углекислого газа совместно с упрочняющей обработкой самовращающимся ротационным резцом из твердого сплава ВК6. Для чего за проволокой на расстоянии $L = 10$ мм при углах поворота оси реза $\beta_y = 20^\circ$ и наклона режущей кромки $\varphi = 15^\circ$ закрепляли инструмент из твердого сплава ВК6 с углами заточки $\gamma_3 = 27^\circ$, $\alpha_3 = 12^\circ$. Наплавку вели на наплавочном автомате А-580, электродную проволоку которого устанавливали таким образом, чтобы металл из сварочной ванны не растекался по поверхности детали. Снятие слоя наплавленной поверхности ротационным резцом производили на глубину 0,5 мм, определяемой экспериментально, которая соответствовала максимальной поверхностной твердости получаемого покрытия, достигаемой за счет обратной диффузии легирующих элементов ферропорошка.

По предлагаемому способу были изготовлены и исследованы несколько образцов. Поверхностную твердость образцов измеряли на твердомере Роквелла. Результаты испытаний (табл. 3) показали,

что совмещение нанесения металлических покрытий с упрочняюще-размерной обработкой обеспечивает увеличение твердости получаемого покрытия до 52...54 HRC.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов при совмещении наплавки с упрочняюще-размерной обработкой

№ образцов	Условия нанесения и материалы покрытий			Твердость поверхности покрытия после наплавки проволоки, HRC	Твердость поверхности покрытия после закалки с нагревом ТВЧ, HRC
	Упрочнение порошком ферробора марки ФБ-1	Наплавка углеродистой проволокой Нп-30 в среде углекислого газа	Упрочняюще-размерная обработка ротационным резцом		
1	-	+	+	21	50
2				22	51
3				23	51
4				21	50
5	+	+	+	24	54
6				23	52
7				24	53
8				25	54

Заключение

Для обеспечения геометрических характеристик изношенных поверхностей деталей при восстановлении и повышении физико-механических характеристик поверхностного слоя при упрочнении в технологическом процессе ремонтного производства рационально сочетать операции электромагнитного упрочнения легированными ферропорошками и наплавки проволокой в защитной среде.

Процессы упрочнения и наплавки рекомендовано интенсифицировать комбинированием термомеханических воздействий при использовании ротационных шариковых и роликовых, деформирующих и режущих инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. – М.: Колос, 1981. – 351 с.
2. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
3. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАН Беларуси. – 276 с.
4. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 232 с.
5. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж.А. Мрочека. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.