

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА

**Л.М. Акулович,**

*профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

**А.В. Миранович,**

*декан факультета технического сервиса в АПК БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**В.Г. Мисько,**

*ст. преподаватель каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ*

*Приведены результаты экспериментальных многофакторных исследований производительности осаждения покрытий из материала композиционного порошка ФБХ-6-2 при магнитно-электрическом упрочнении цилиндрических поверхностей деталей из стали 30ХГС в зависимости от технологических режимов.*

*Ключевые слова: магнитно-электрическое упрочнение, ферромагнитный порошок, покрытие, электрические разряды, математико-статистическая модель.*

*The results of experimental multifactorial studies of the capacity of coating deposition made of composite powder material FBH-6-2 at the magnetic-electric hardening of cylindrical surfaces of 30HGS steel parts depending on the technological modes are presented.*

*Keywords: magnetic-electric hardening, ferromagnetic powder, coating, electric discharges, mathematical-statistical model.*

### Введение

Большинство деталей сельскохозяйственной техники работает в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка (скорость перемещения, давление, нагрев, воздействие окружающей среды и т.п.) воспринимается главным образом их поверхностным слоем. Поэтому износостойкость рабочих поверхностей, зарождение и развитие усталостных трещин являются очагами коррозии, зависят от сопротивления поверхностного слоя разрушению. Основной причиной выхода из строя деталей сельскохозяйственной техники (около 50 %) является износ их рабочих поверхностей. К ним относятся [1] валы коробок перемены передач тракторов и грузовых автомобилей, которые выходят из строя при износе сопряжений «вал – подшипник качения», «вал – распорная втулка», «вал – муфта фрикциона» и т.п. Допустимый износ таких сопряжений не превышает 0,10-0,25 мм.

Разнообразие условий работы машин и видов изнашивания деталей обусловило появление большого количества методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытий и (или) изменении состояния (модификации) поверхности. При нанесении покрытий упрочнение поверхностей деталей достигается путем осаждения на них материалов, которые по своим свойствам отличаются от свойств основного металла, но наиболее полно отвечают условиям эксплуатации (механическое, коррозионное, химическое, эрозионное воздействие и т.п.). При из-

менении состояния (модификации) поверхностного слоя происходит физико-химическое изнашивание в металле, повышающее его сопротивление разрушению. Модифицирование поверхностного слоя может осуществляться поверхностным пластическим деформированием (ППД), поверхностной термообработкой, диффузионным насыщением легирующими элементами. Из-за многообразия условий работы машин и видов изнашивания ни один из известных методов упрочнения поверхностей деталей не может претендовать на универсальность. Один и тот же метод в одних условиях эксплуатации может дать положительный эффект, а в других – отрицательный. Поэтому в ряде случаев целесообразно применять комбинированную или совмещенную упрочняющую обработку, основанную на использовании двух или трех методов упрочнения, каждый из которых позволяет усилить тот или иной показатель качества поверхности.

Перспективным является упрочнение поверхностей комплексными или комбинированными методами, основанными на сочетании различных видов высокоэнергетических и механических воздействий. Например, при пластическом деформировании целесообразно использовать технологическое тепло, выделяемое при энергетическом воздействии от другого метода упрочнения. Для модифицирования уже сформированного упрочненного слоя используют лазерную обработку. В мировой практике известны технологии модифицирования газотермических и плазменных покрытий. В любом случае, выбор того

или иного метода поверхностного упрочнения определяется экономическими соображениями. Наиболее востребованными в настоящее время являются способы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии и характеризующиеся минимальным тепловложением, что практически исключает коробление деталей, вызванное температурными деформациями. Для упрочнения и восстановления деталей, поверхности которых изношены до 0,3 мм, эффективными способами являются электрофизические, в том числе магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) [2] и лазерное оплавление покрытий [3].

### Основная часть

Магнитно-электрическое упрочнение, помимо осаждения на поверхностях деталей материалов, отличающихся от свойств основного металла, обеспечивает модификацию поверхностного слоя. Установлено [4, 5], что эффект упрочнения при воздействии магнитного поля на поверхностный слой металла состоит в изменении его эксплуатационных свойств. Сталь, как любое твердое тело, обладает внутренней энергией, обусловленной дислокационной структурой материала. Взаимодействие энергии магнитного поля с внутренней энергией материала приводит к появлению местных перенапряжений. В этих местах резко возрастает вероятность разрыва межатомных связей. В тех местах, где эти локальные перенапряжения превышают пределы упругости материала, формируются очаги пластической деформации, что свидетельствует об упрочнении металлической поверхности. Именно здесь интенсивно протекают процессы размножения и перемещения дислокаций. С увеличением плотности дислокации, сталь претерпевает своеобразный наклеп, что выражается в изменении параметра решетки мартенсита и снижении температуры мартенситного превращения.

Сущность магнитно-электрического упрочнения состоит в том, что упрочняемую поверхность 1 детали (рис. 1) и полюсный наконечник 3 магнита распо-

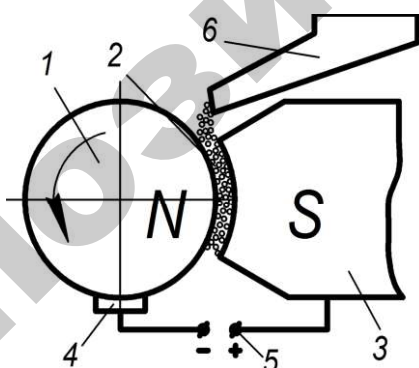


Рис. 1. Схема магнитно-электрического упрочнения

лагают относительно друг друга с определенным зазором и их подключают к источнику импульсного технологического тока 5 с помощью скользящего контакта 4.

В образованный зазор из бункера-дозатора 6 подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы которого выстраиваются в токопроводящие «цепочки» 2. Частицы ФМП, контактирующие с поверхностью детали, расплавляются под действием электрических разрядов, и расплав осаждается на упрочняемой поверхности. Качество образовавшегося покрытия зависит от свойств ФМП. Формирование покрытия происходит путем расположения на поверхности детали множества точечных вкраплений округлой формы, по мере заполнения которыми поверхности детали, сплошность покрытия увеличивается, а толщина его практически не изменяется, хотя перенос материала порошка на поверхность детали продолжается. В результате происходит сглаживание формируемой поверхности, и ее шероховатость находится в пределах  $Ra$  12,5-40 мкм. Поверхности с такой шероховатостью покрытий хорошо зарекомендовали себя при работе в среде свободного абразива. Для условий работы в парах трения требуется дополнительная обработка поверхности. Наибольший эффект получен при совмещении МЭУ с поверхностным пластическим деформированием. В этом случае происходит электрорезистивное термомеханическое упрочнение, при котором для разогрева поверхностного слоя используется технологическое тепло, образовавшееся от прохождения энергии электрических разрядов через пятно контакта частиц порошка. В результате такого комбинированного упрочнения осуществляется нагрев неровностей поверхности, их деформирование и сглаживание.

Так как МЭУ может использоваться как в качестве самостоятельной технологии нанесения покрытий при восстановлении и упрочнении поверхностей деталей, так и являться первым этапом комбинированной или совмещенной упрочняющей обработки, то целью настоящего исследования является определение рациональных значений технологических режимов, обеспечивающих максимальную производительность процесса осаждения материала ФМП на упрочняемую поверхность. Масса осажденного материала упрочняющего порошка характеризует толщину упрочненного слоя.

Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71), из которой изготавливают многие детали сельскохозяйственной техники (валы, шкворни, диски сеялок зерновых и т.п.). Образцы представляли собой кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм. Масса исходных образцов – 125 г. Образцы подвергались нормализации и обрабатывались до параметра шероховатости поверхности  $Ra = 12,5$  мкм. Нанесение покрытий из ферромагнитного композиционного порошка ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75) на упрочняемую поверхность образцов проводилось на установке модели УНП 1, смонтированной на токарно-винторезном станке модели 1Е61М.

На основе анализа существующих вариантов и методов математического моделирования технологических процессов [6-8] установлено, что процесс

МЭУ достаточно полно можно описать математико-статистическими моделями второго порядка, полученными по матрице центрального композиционного ротatableльного равномер-планирования экспериментов (ЦКРУП).

Производительность  $q$  мг/мин оценивалась по массе покрытия, наносимого на упрочняемую поверхность в единицу времени. Измерения массы образцов производились до и после упрочнения на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,001 г. Значение показателей, полученных для каждого из условий МЭУ, определялось как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах.

Постоянными приняты факторы: размер частиц композиционного порошка  $\Delta = 240-320$  мкм; величина рабочего зазора  $\delta = 1,0$  мм; расход рабочей жидкости (СОЖ – 5 %-й раствор эмульсола Э2 в воде) равен  $0,4 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с·мм<sup>2</sup>). Исходя из априорной информации, в качестве независимых переменных приняты технологические режимы, которые оказывают наибольшее влияние на производительность МЭУ. Их перечень с указанием средств измерения и точности фиксирования приведен в таблице 1.

Величину тока в катушках электромагнитов  $I_k$ , обеспечивающего заданное значение магнитной индукции  $B$ , определяли экспериментально.

Структура матрицы ЦКРУП была следующей:

- полуреплика факторного эксперимента с определяющим контрастом  $1 = -X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5$ ;
- 10 «звездных» точек с длиной плеча  $k = 2$ ;
- 6 точек в центре плана;
- число опытов ядра плана – 16.

Общее количество опытов в плане – 32.

Уровень технологических параметров и условия проведения опытов приведены в таблице 2.

Униформность плана обеспечивается соблюдением равенства числа опытов в центре плана

$$n_0 = \lambda(N_1 + 4\sqrt{N_1} + 4) - N_1 - 2k,$$

где  $N_1$  – число опытов ядра плана;

$\lambda$  – коэффициент униформности при числе факторов  $k = 5$  равен 0,8918.

При этом дисперсия предсказания сравнительно мало изменяется в радиусе от центра плана до  $X_i = \pm 1$ .

Чтобы ротatableльный план был ортогональным, число опытов в центре плана должно соответствовать равенству согласно формуле

$$n_0 = 4\sqrt{N_1} - 2k + 4.$$

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, с использованием стандартного пакета Excel Microsoft Office, позволила получить математико-статистическую модель, определяющую зависимость производительности  $Y$  процесса МЭУ  $Q$  мг/мин от технологических режимов (1)

$$Y = 224,64 + 2,62X_1 + 1,68X_2 + 1,07X_3 + 0,48X_4 + 1,58X_5 + 1,65X_1X_2 - 1,2X_1X_3 + 1,62X_1X_4 - 1,94X_1X_5 - 2,26X_2X_3 - 0,11X_2X_4 - 2,36X_2X_5 - 0,04X_3X_4 + 2,26X_3X_5 + 0,16X_4X_5 - 1,38X_1^2 - 0,60X_2^2 - 0,94X_3^2 - 0,30X_4^2 - 0,47X_5^2 \quad (1)$$

Выявлено, что не все коэффициенты уравнения регрессии (1) значимы с 95 %-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (\* – коэффициент не значим). Установлено, что математико-статистические модели адекватны при 5 %-м уровне значимости по критерию Фишера.

Полученные математико-статистические модели процесса МЭУ позволяют установить характер и степень влияния технологических факторов на производительность МЭУ при нанесении упрочняющих покрытий и диапазоны рациональных режимов упрочнения. Степень влияния технологических режимов на

**Таблица 1. Перечень исследуемых технологических параметров и средств их измерения**

Технологические параметры		Методы регулирования	Средства измерения	Точность фиксирования
наименование	обозначения и единицы измерения			
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре	$B$ , Тл	Величиной тока в катушках электромагнитов	Измеритель магнитной индукции ИМИ-1	$\pm 1,5$ %
Плотность разрядного тока	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	Изменение параметров электрических импульсов инверторного сварочного источника	Источник технологического тока Invertec V270 T	$\pm 2$ %
Удельная длительность упрочнения	$t$ , с/см <sup>2</sup>	Продольной подачей полюсного наконечника электромагнита относительно упрочняемой поверхности	Секундомер	$\pm 0,05$ с/см <sup>2</sup>
Окружная скорость заготовки детали	$V$ , м/с	Настройкой токарно-винторезного станка мод. 1Е61М	Механический тахометр MVR RY-850	$\pm 0,02$ %
Подача ферромагнитного порошка	$q$ , г/с	Изменением величины напряжения электродвигателя вибратора	Весы аналитические ВЛА-200-2М	$\pm 1$ мг/с

**Таблица 2. Условия проведения опытов**

Уровень параметров	Технологические параметры				
	<i>B</i> , Тл	<i>i</i> , А/мм <sup>2</sup>	<i>τ</i> , с/см <sup>2</sup>	<i>V</i> , м/с	<i>q</i> , г/с
	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub>	<i>X</i> <sub>5</sub>
Основной (0)	0,60	1,80	2,50	0,06	0,17
Верхний (+1)	0,75	2,20	3,00	0,08	0,20
Нижний (-1)	0,45	1,40	2,00	0,04	0,14
Звездная точка (+α)	0,90	2,60	3,50	0,10	0,23
Звездная точка (-α)	0,30	1,00	1,50	0,02	0,11
Интервалы варьирования:					
основной	0,15	0,40	0,50	0,02	0,03
по α	0,30	0,80	1,00	0,04	0,06

производительность МЭУ представлена в таблице 3. Анализ математико-статистической модели (1) и данных таблицы 3 показывает, что в порядке убывания значимости влияния на исследуемый параметр технологические режимы можно расположить в следующий ряд:  $Q: B \rightarrow i \rightarrow \tau \rightarrow q \rightarrow V$ ;

**Таблица 3. Влияние технологических режимов на производительность МЭУ**

Технологические режимы	Степень влияния технологических режимов на производительность, Q %
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре, <i>B</i> Тл	41,55
Плотность разрядного тока, <i>i</i> А/мм <sup>2</sup>	18,74
Удельная длительность упрочнения, <i>τ</i> с/см <sup>2</sup>	17,91
Окружная скорость заготовки, <i>V</i> м/с	5,23
Подача ферромагнитного порошка, <i>q</i> г/с	16,57

На производительность процесса МЭУ наибольшее влияние оказывают величины магнитной индукции *B*, затем в порядке убывания следуют плотность разрядного тока *i*, удельная длительность упрочнения *τ*, подача ферромагнитного порошка *q* и окружная скорость заготовки *V*.

Для анализа влияния величины магнитной индукции *B* на производительность процесса *Q* стабилизируем в уравнении (1) факторы *X*<sub>2</sub>, *X*<sub>3</sub>, *X*<sub>4</sub>, *X*<sub>5</sub> на нулевом уровне. В результате получим зависимость

$$Y = 224,64 + 2,62X_1 - 1,38 X_1^2 \quad (2)$$

Графическая интерпретация зависимости (2) представлена на рис. 2.

С увеличением магнитной индукции в рабочем зазоре масса наносимого материала ФМП увеличивается до определенного значения. Такой характер зависимости (2) можно объяснить тем, что величина магнитной индукции влияет не только на интенсивность образования цепочек из зерен упрочняющего ферромагнитного порошка, но и на электрическую проводимость образовавшихся из зерен токопроводящих цепочек.

При прохождении электрического тока по образовавшимся цепочкам последние можно рассматривать как проводники с током, находящиеся во внешнем магнитном поле. На элемент цепочки длиной  $\Delta l$  в рабочем зазоре действует сила

$$\Delta F = I \cdot B \cdot \Delta l,$$

где *I* – величина тока в цепочке, А;

*B* – величина магнитной индукции в рабочем зазоре, Тл.

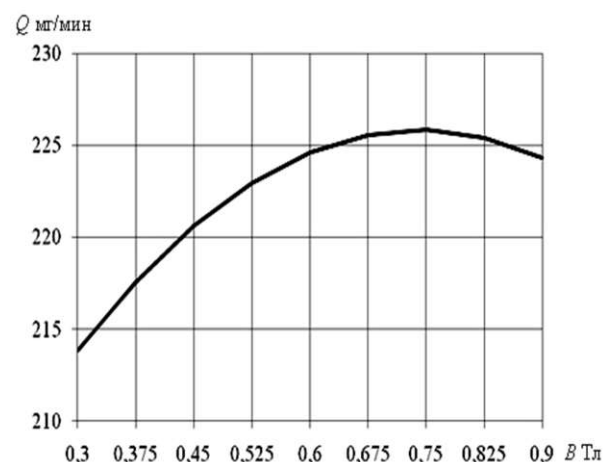
Если цепочка располагается строго вдоль магнитных силовых линий, то сила  $\Delta F$  равна нулю. Однако в реальном процессе в рабочем зазоре одновременно формируется множество токопроводящих цепочек с различной электрической проводимостью, и некоторые из них могут иметь направление, не параллельное магнитным силовым линиям. В таком случае на зерна ФМП действуют силы  $\Delta F$  и силы взаимодействия токов в цепочках, которые с увеличением магнитной индукции способны разорвать цепочку до момента расплавления зерен. Этим можно объяснить наличие экстремума в зависимостях (3) и (4). Область рационального значения величин магнитной индукции в рабочем зазоре находится в пределах:  $0,6 < B < 0,8$  Тл.

Для анализа влияния плотности разрядного тока *i* на производительность процесса *Q* стабилизируем в уравнении (1) факторы *X*<sub>1</sub>, *X*<sub>3</sub>, *X*<sub>4</sub>, *X*<sub>5</sub> на нулевом уровне. В результате получим зависимость

$$Y = 224,64 + 1,68X_2 - 0,60 X_2^2, \quad (3)$$

графическое представление которой показано на рис. 3.

Существенное влияние на производительность *Q* процесса оказывает плотность разрядного тока *i*. При увеличении плотности разрядного тока до 2,4 А/мм<sup>2</sup>



**Рис. 2. Зависимость производительности *Q* (мг/мин) МЭУ от величины магнитной индукции *B* (Тл)**

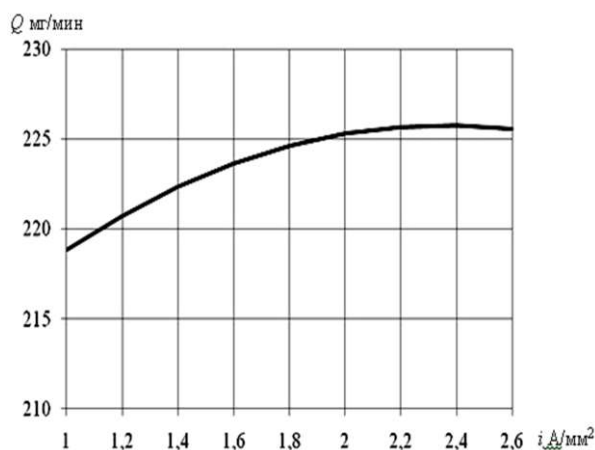


Рис. 3. Зависимость производительности  $Q$  (мг/мин) МЭУ от плотности разрядного тока  $i$  (А/мм<sup>2</sup>)

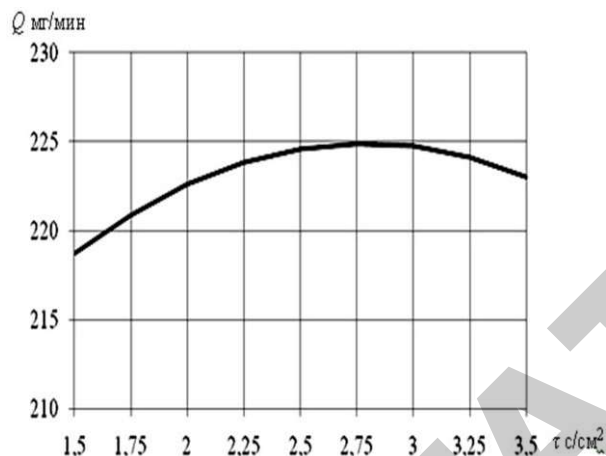


Рис. 4. Зависимость производительности  $Q$  (мг/мин) МЭУ от удельной длительности упрочнения  $\tau$  (с/см<sup>2</sup>)

происходит преобразование электрической энергии в тепловую и обеспечивается интенсивный нагрев и осаждение на упрочняемой поверхности материала зерен ферромагнитного порошка, расположенных в цепочках-микроэлектродах. В результате возрастает производительность процесса. Вместе с тем, при превышении максимального значения плотности тока (более 2,4 А/мм<sup>2</sup>), производительность снижается, так как согласно источнику [9], возрастает вероятность возникновения электрического разряда у поверхности полюсного наконечника по причине увеличения коэффициента передачи энергии. Область рационального значения плотности разрядного тока  $i$  (рис. 3) находится в пределах  $2,1 < i < 2,5$  А/мм<sup>2</sup>.

Стабилизируя в уравнении (1) факторы  $X_1, X_2, X_4, X_5$  на нулевом уровне, получим зависимость (4) производительности  $Q$  процесса от удельной длительности упрочнения  $\tau$ , графическая интерпретация которой представлена на рис. 4.

$$Y = 224,64 + 1,07X_3 - 0,94X_3^2 \quad (4)$$

С увеличением времени упрочнения производительность МЭУ повышается, достигает максимального значения, затем уменьшается (рис. 4). Это уменьшение вызвано тем, что процесс МЭУ одновременно сопровождается двумя явлениями: нанесением покрытия и его эрозией. Масса наносимого покрытия в каждый момент времени зависит от того, какое явление превалирует. Из рис. 4 видно, что на восходящей линии зависимости превалирует нанесение покрытия, а на нисходящей – явление эрозии превалирует над нанесением покрытия. Из полученных данных можно сделать вывод, что МЭУ следует вести с удельной длительностью упрочнения  $\tau$ , не превышающей 2,8 с/см<sup>2</sup>.

Если в (1) факторы  $X_1, X_2, X_3$  и  $X_5$  стабилизировать на нулевом уровне, то получим зависимость производительности  $Q$  от окружной скорости заготовки  $V$

$$Y = 224,64 + 0,48X_4 - 0,30X_4^2 \quad (5)$$

Из анализа зависимости (5) следует (рис. 5), что окружная скорость заготовки не оказывает существенного влияния на производительность МЭУ. Функциональное назначение этого фактора состоит в подводе к рабочей зоне новых участков упрочняемой поверхности. Однако стохастическое расположение вкраплений материала порошка на упрочняемой поверхности обуславливает необходимость повторного подвода одних и тех же участков. Однако при этом с увеличением скорости вращения заготовки часть зерен ФМП уносится из рабочего зазора до возникновения электрического разряда. Это обусловлено увеличением силы трения зерен ФМП при их контакте с образовавшимися на поверхности неровностями в виде выступающих вкраплений металла порошка. Область рационального значения величины окружной скорости заготовки  $V$  (рис. 5) находится в пределах  $0,06 < V < 0,09$  м/с.

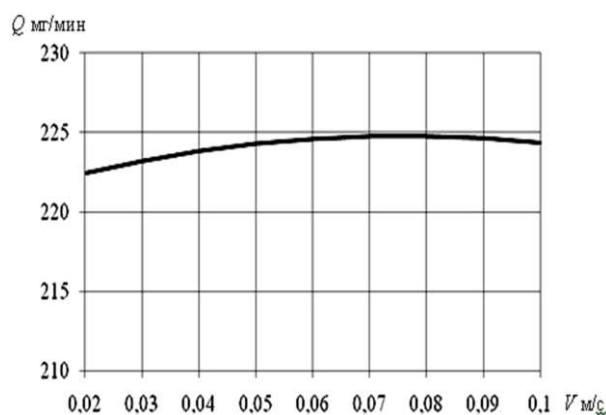


Рис. 5. Зависимость производительности  $Q$  (мг/мин) МЭУ от величины окружной скорости заготовки  $V$  (м/с)

Стабилизируя в уравнении (1) факторы  $X_1, X_2, X_3$  и  $X_4$  на нулевом уровне, получим зависимости производительности  $Q$  от подачи ферромагнитного порошка в рабочий зазор  $q$ :

$$Y = 224,64 + 1,58X_5 - 0,47 X_5^2 \quad (6)$$

Графическое представление зависимости (6) показано на рис. 6.

Анализируя зависимость (рис. 6), можно сделать вывод, что увеличение подачи ферромагнитного порошка приводит к большему количеству образовавшихся в рабочем зазоре токопроводящих цепочек. Это повышает производительность МЭУ. Однако экспериментально установлено, что при увеличении подачи порошка свыше 0,21 г/с количество токопроводящих цепочек сильно возрастает. Однако при этом электрическая проводимость рабочего зазора возрастает, и появляется опасность возникновения короткого замыкания межэлектродного промежутка и прерывания процесса МЭУ. Поэтому величина подачи порошка не должна превышать 0,21 г/с.

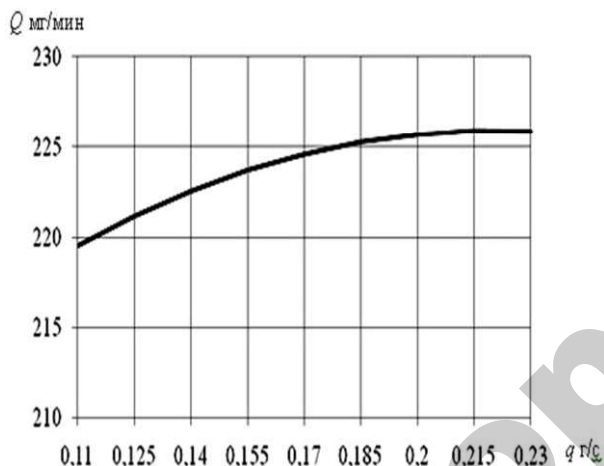


Рис. 6. Зависимость производительности  $Q$  (мг/мин) МЭУ от подачи ферромагнитного порошка в рабочий зазор  $q$  (г/с)

### Заключение

Статистический анализ результатов проведенных многофакторных экспериментальных исследований, полученных при магнитно-электрическом упрочнении цилиндрических поверхностей деталей из стали 30ХГС с использованием композиционного ферромагнитного порошка ФБХ-6-2, показывает, что из исследованных технологических режимов наибольшее влияние на производительность магнитно-электрического упрочнения оказывает величина магнитной индукции ( $B$ , Тл) в рабочем зазоре (около 42 %). Затем следуют величины плотности ( $i$ , А/мм<sup>2</sup>) разрядного тока (около 19 %) и подачи ( $q$ , г/с) ферромагнитного порошка (около 16 %). Наименьшее влияние (около 5 %) на производительность магнитно-

электрического упрочнения оказывает окружная скорость заготовки ( $V$ , г/с).

Проведенные исследования позволили определить следующие рациональные диапазоны величин технологических режимов: магнитной индукции  $0,6 < B < 0,8$  Тл; плотности разрядного тока  $2,1 < i < 2,5$  А/мм<sup>2</sup>; удельной длительности упрочнения  $2,3 < \tau < 2,8$  с/см<sup>2</sup>; окружной скорости заготовки  $0,06 < V < 0,09$  м/с; подачи ферромагнитного порошка  $0,18 < q < 0,21$  г/с.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миклуш, В.П. Организация технического сервиса в агропромышленном комплексе / В.П. Миклуш, А.С. Сайганов. – Минск: ИВЦ Минфина, 2014. – 607 с.
2. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л. М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск: БГАТУ, 2016. – 236 с.
3. Морунов, И.В. Применение лазерной наплавки для упрочнения и восстановления деталей машиностроения / И.В. Морунов, С.Е. Крылова // Материалы Всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург: ОГУ, 2017. – С. 159-162.
4. Алифанов, А.В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А.В. Алифанов // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, инструмента и технологической оснастки: материалы IX Международ. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург, 10-13 апр. – 2007. – Ч. 2. – С. 9-15.
5. Малыгин, Б.В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б.В. Малыгин. – М.: Машиностроение, 1998. – 130 с.
6. Лавров, В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / В.В. Лавров, Н.А. Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
7. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пос./ В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. – Брянск: БГТУ, 2004. – 271 с.
8. Хейфец, М.Л. Математическое моделирование технологических процессов / М.Л. Хейфец. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 104 с.
9. Ракомсин, А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А.П. Ракомсин; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Парадокс, 2000. – 201 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 11.12.2019