

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НАМАГНИЧЕННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**Марилов Н. Г., Шеремет А. И.**

Предложена схема электрической и магнитной цепей для измерения магнитного потока и исследования прочностных характеристик порошковых ферромагнитных материалов в намагниченном состоянии. Представлена методика и основные соотношения для градуировки установки по магнитному потоку. Выполнен экспоненциальный и степенной регрессионный анализ полученных экспериментальных зависимостей механической прочности намагниченного порошка от магнитной индукции, установлено какой из 2-х видов анализа более точно описывает полученные зависимости.

Запропонована схема електричного та магнітного ланцюгів для вимірювання магнітного потоку та дослідження характеристик міцності порошкових ферромагнітних матеріалів у намагніченому стані. Представлена методика та головні співвідношення для градуїровки схем по магнітному потоку. Виконано експоненціальний та ступеневий регресійний аналіз експериментальних залежностей механічної міцності порошку у намагніченому стані від магнітної індукції, встановлено який з 2-х видів аналізу найбільш точно описує залежності, які отриманні експериментальним шляхом.

The scheme of electric and magnetic circuits for measuring the magnetic stream and the research of the characteristics of durability of powder ferromagnetic materials in a magnetised condition is offered. The technique and the basic dependences for the installation of the graduation on a magnetic stream is presented. The exponential and polynomial regression the analyze of the received experimental dependences of mechanical strength of magnetised powder from magnetic induction are made, it is revealed which of 2 the types of the analysis describes the received dependences more precisely.

Марилов Н. Г.

доцент кафедры ЭСА ДГМА

Шеремет А. И.

канд. техн. наук, доц. кафедры ЭСА ДГМА
alexsheremet1@gmail.com

УДК 621.313-837:621.9

Марилов Н. Г., Шеремет А. И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НАМАГНИЧЕННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изготовление астрономической оптики связано с обеспечением больших точностей и малых допусков. В производстве астрономических зеркал приходится выдерживать допуски в десятые и даже сотые доли микрона. Объясняется это тем, что допустимые искажения поверхности зеркала связаны с волновой природой света [1]. Для того чтобы оптический прибор давал изображение безупречного качества, необходимо чтобы деформация фронта световой волны (волновые aberrации) не превышали четверти длины световой волны.

Поэтому в процессе чистовой обработки изделия не допускается какой-либо его деформации. При неравномерном основании стола заготовка под действием собственного веса может получить незначительные деформации, находящиеся в пределах упругости материала (стекла). После окончательной обработки при снятии заготовки со стола, она вернется в своё первоначальное состояние и исказит обработанную поверхность. Поэтому перед шлифованием и, особенно, при полировании обрабатываемые изделия закрепляют на столе так, чтобы они не имели внутренних напряжений [2]. Один из методов закрепления изделия заключается в том, что перед установкой заготовки в план-шайбу наливается только что разведённая эпоксидная смола, в которую и опускается изделие. По окончании процесса полимеризации смолы получается ровная постель для заготовки и надёжное её закрепление. Контроль качества обрабатываемой поверхности можно проводить только на остывшей и полностью свободной от закрепления заготовке. Поэтому в процессе доводки линзы приходится несколько раз скалывать и вновь заливать эпоксидную смолу [3].

Целью настоящей работы является изучение возможности замены эпоксидной смолы магнитопроводящими порошками или суспензиями, которые под действием магнитного поля мгновенно переходят в твёрдое состояние и фиксируют заготовку в разгрузочном состоянии.

Для исследования прочностных характеристик материала, используемых для подложки, обрабатываемых заготовок из оптического стекла, были проведены испытания следующих магнитных порошков и паст:

- порошок из ферромагнитного железа ПЖ4М2;
- порошок из чистого никеля;
- порошок из реактивно восстановленного железа;
- магнитная паста, представляющая собой смесь порошка реактивно восстановленного железа с глицерином.

Испытания проводились на установке (рис. 1), состоящей из магнитопровода 1, выполненного из электротехнической стал, рабочей катушки 2, создающей намагничивающую силу, ёмкости с ферромагнитным порошком 3, двух измерительных катушек 4 и 5 для измерения магнитного потока. Для получения отпечатка на испытываемом материале и определения его прочностных характеристик использовались инденторы 6 и 7, изготовленные из неферромагнитного материала. Конденсатор 8 известной ёмкости использовался для градуировки всей установки по количеству электричества. Электронный интегратор 9 с вольтметром 10 – для измерения выходного сигнала, проградуированного в единицах магнитного потока. Для питания установки использовался источник постоянного тока 11 с регулятором напряжения.

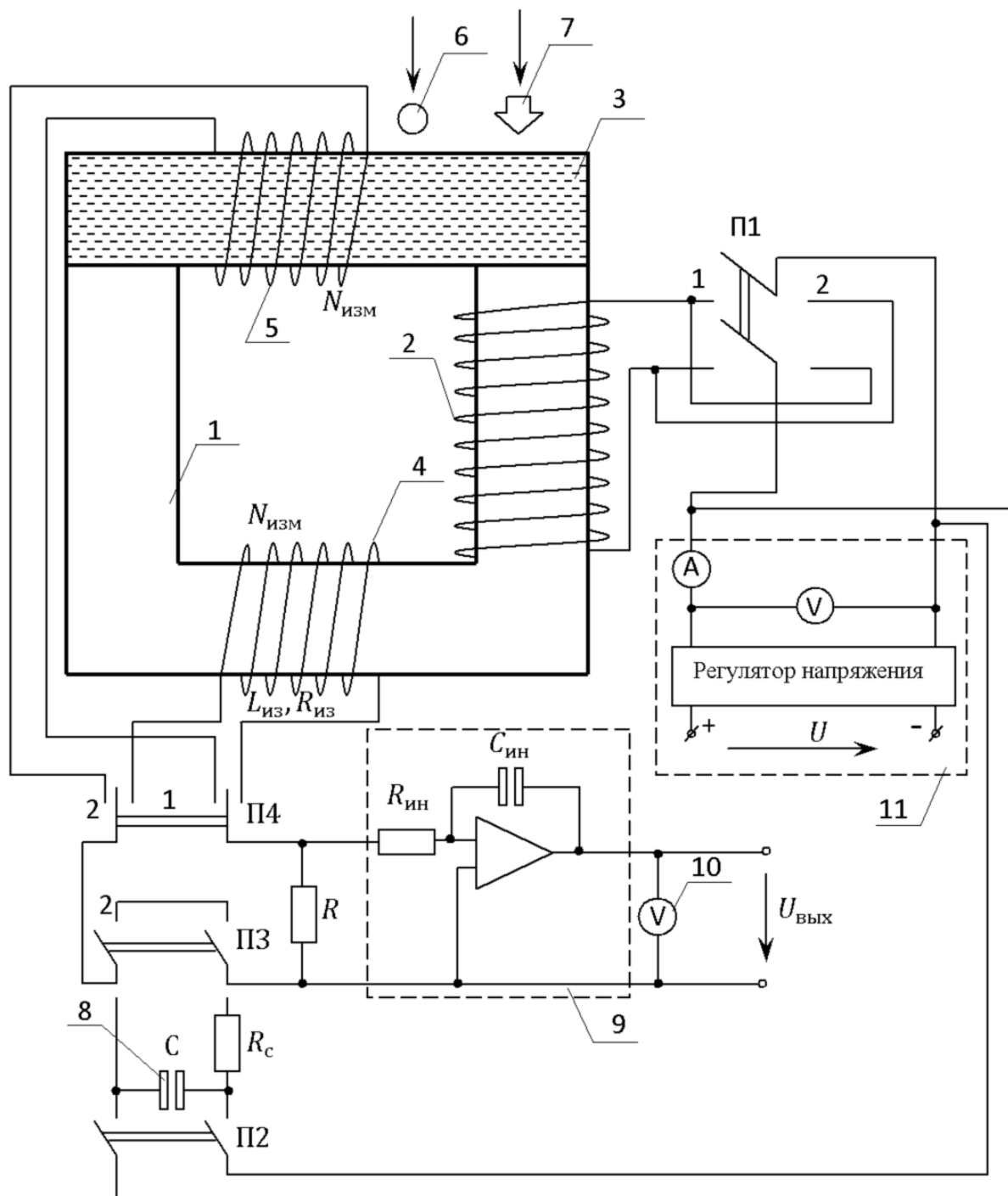


Рис. 1. Установка для испытания прочностных свойств ферромагнитных порошковых материалов

Последовательность градуировки следующая. Магнитный поток в сердечнике отсутствует, переключатели устанавливаются: П1 – в нейтральное, П2 – во включенное, П3 – в положение 1. При этом конденсатор заряжается до напряжения источника 11. Разрывая цепь заряда переключателем П2, переводят переключатель П3 в положение 2. Конденсатор разряжается и в катушке с измерительной обмоткой 4 и сопротивлением R , появляется ток. При этом количество электричества через сопротивление R определится напряжением заряда конденсатора и его ёмкостью $Q = CU$. Учитывая связь между количеством электричества и выходным напряжением интегратора, получим:

$$Q = K_{QC} U_{\text{вых.С}} \quad (1)$$

Далее определяем постоянную установки по количеству электричества:

$$K_{QC} = \frac{Q}{U_{\text{вых.С}}} \quad (2)$$

Для определения постоянной по магнитному потоку определяем связь между магнитным потоком в сердечнике и количеством электричества в контуре с измерительной обмоткой. Положение переключателей: ПЗ – в состоянии 2, П4 – в состоянии 1.

При подключении рабочей обмотки 2 на напряжение источника в измерительной обмотке 4 наводится ЭДС, которую можно выразить следующим образом:

$$e = -N_{\text{изм}} \frac{d\Phi}{dt}$$

При этом для контура с измерительной обмоткой и сопротивлением R в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать:

$$e = iR_{\Sigma} + L_{\text{изм}} \frac{di}{dt},$$

или, опуская символ «1», перед выражением для ЭДС:

$$N_{\text{изм}} \frac{d\Phi}{dt} = iR_{\Sigma} + L_{\text{изм}} \frac{di}{dt},$$

где $N_{\text{изм}}$ – количество витков измерительной обмотки; $L_{\text{изм}}$ – индуктивность измерительной обмотки, R_{Σ} – суммарное сопротивление контура, вычисляется следующим образом:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{изм}} + R.$$

Умножая обе части уравнения на dt , получим:

$$N_{\text{изм}} d\Phi = R_{\Sigma} i dt + L_{\text{изм}} di.$$

Интегрируя это выражение в пределах времени изменения магнитного потока, получим:

$$N_{\text{изм}} \int_0^{\Phi_{\text{уст}}} d\Phi = R_{\Sigma} \int_0^t i dt + L_{\text{изм}} \int_0^{I_{\text{уст}}} di.$$

Левая часть уравнения:

$$N_{\text{изм}} \int_0^{\Phi_{\text{уст}}} d\Phi = N_{\text{изм}} \Phi.$$

Первый интеграл правой части уравнения:

$$R_{\Sigma} \int_0^t i dt = R_{\Sigma} Q,$$

где Q – количество электричества в измерительном контуре от тока i .

Второй интеграл правой части равен нулю, тогда:

$$N_{изм} \Phi = R_{\Sigma} Q.$$

Откуда:

$$Q = \frac{N_{изм} \Phi}{R_{\Sigma}}. \tag{3}$$

С другой стороны, при измерении магнитного потока выходное напряжение интегратора $U_{вых}$ и количество электричества Q связаны с помощью постоянной по количеству электричества в соответствии с формулой (1).

Приравнявая поочерёдно правые части уравнений (3) и (4), получаем выражение для постоянной установки по магнитному потоку:

$$\Phi = \frac{K_{QC} R_{\Sigma}}{N_{изм}} U_{вых},$$

а с учётом значения K_{QC} :

$$\Phi = \frac{CU}{U_{вых.C}} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{N_{изм}} \cdot U_{вых} = K_{\Phi C} U_{вых},$$

где $K_{\Phi C} = \frac{CU}{U_{вых.C}} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{N_{изм}}$ – постоянный коэффициент уставки по магнитному потоку;

U – напряжение источника питания, до которого зарядился конденсатор C ; $U_{вых.C}$ – выходной сигнал при градуировке измерительного контура по количеству электричества; $U_{вых}$ – выходной сигнал при измерении рабочего магнитного потока.

Используя постоянную установки по магнитному потоку, определялись значения магнитных потоков и индукций в стальной части сердечника и порошке. Изложенные в литературе традиционные способы измерения твёрдости материала применяются, в основном, для металлов и пластмасс, которые не находятся в намагниченном состоянии, поэтому все серийно выпускаемые измерительные приборы и механизмы для этих целей изготовлены из ферромагнитных материалов и совершенно не пригодны для работы с намагниченным ферромагнитным порошком: они вносят большие искажения в конфигурацию магнитной цепи, при приближении вызывают взрывы на поверхности намагниченного порошка. Поэтому для проводимых измерений были изготовлены инденторы из неферромагнитных материалов: латуни и бронзы, имеющие значительно большую твёрдость, по сравнению с намагниченным ферромагнитным порошком.

Для выбора оптимального варианта и сравнения получаемых результатов твёрдость (прочность) намагниченного порошка была измерена несколькими способами.

Индентор в виде шара диаметром 8 и 6 миллиметров внедрялся в поверхность намагниченного порошка под нагрузкой 1 или 2 кг. При этом для различных значений индукции в порошке (измеренной вышеописанным методом) измерялся диаметр отпечатка с последующим определением поверхности внедрённой части шара и определение предела прочности (использовалась методика способа Бринелля).

Аналогичный способ определения твёрдости с применением индентора в виде конуса с углом 120°. В отличие от метода Роквелла, было получено не просто отвлечённое число, равное глубине погружения конуса, но по измеренному диаметру отпечатка так же, как и в предыдущем способе, определялась поверхность внедрённой в порошок части конуса с последующим определением предела прочности (использовались те же нагрузки: 1 и 2 кг).

Характеристика прочности ферромагнитного порошка из реактивного восстановленного железа в магнитном поле, измеряемая различными инденторами, приведена на рис. 2.

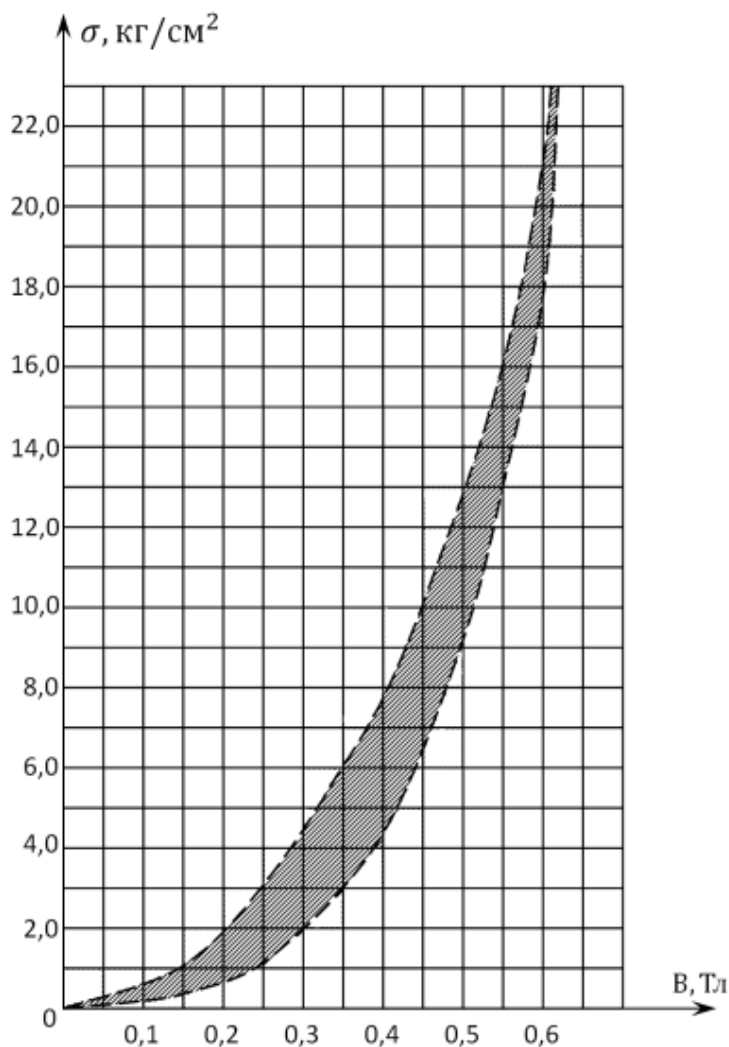


Рис. 2. Характеристика прочности ферромагнитного порошка из реактивного восстановленного железа в магнитном поле, измеряемая различными инденторами.

В дальнейшем был выполнен регрессионный анализ экспериментально полученных зависимостей, исходя из гипотезы, что характеристики прочности ферромагнитного порошка могут быть описаны экспоненциальными или степенными регрессионными функциями вида:

$$\sigma(B) = \exp\left(\frac{B+a_1}{a_2}\right) \text{ и } \sigma(B) = \left(\frac{B+b_1}{b_2}\right)^{\frac{1}{b_3}},$$

где a_1, a_2, b_1, b_2, b_3 – неизвестные коэффициенты регрессии, которые можно определить, воспользовавшись методом наименьших квадратов [4].

После выполнения аппроксимации экспериментальных зависимостей методом наименьших квадратов были получены следующие уравнения характеристик прочности (табл. 1)

Таблица 1

Уравнения регрессионных зависимостей, полученные после аппроксимации экспериментальных точек для инденторов различной формы

Форма индентора	Вид функции регрессии	
	Экспоненциальная	Степенная
Шар диаметром 8 мм	$\sigma(B) = \exp\left(\frac{B-0,057}{0,175}\right)$	$\sigma(B) = \exp\left(\frac{B+0,291}{0,411}\right)^{\frac{1}{0,225}}$
Конус с углом 120°	$\sigma(B) = \exp\left(\frac{B-0,226}{0,124}\right)$	$\sigma(B) = \exp\left(\frac{B+0,192}{0,444}\right)^{\frac{1}{0,199}}$

На рис. 3 и рис. 4 показаны регрессионные кривые из табл. 1 с нанесёнными в одной системе координат с ними экспериментальными точками.

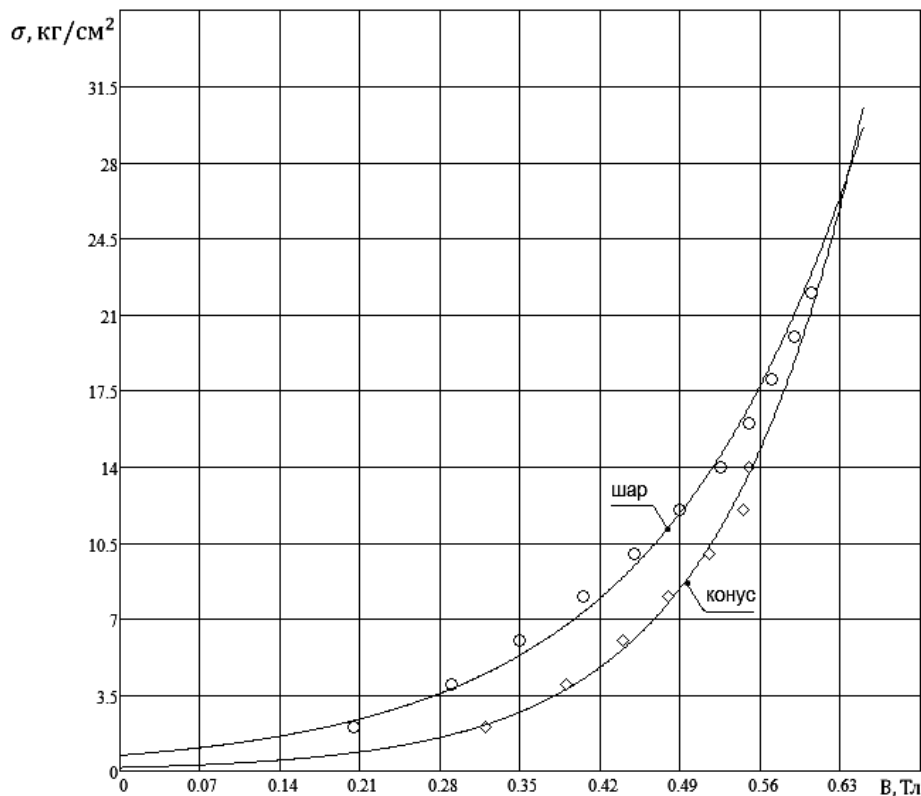


Рис. 3. Экспоненциальные регрессионные кривые с экспериментальными точками, полученными для шарообразной и конусной формы индентора

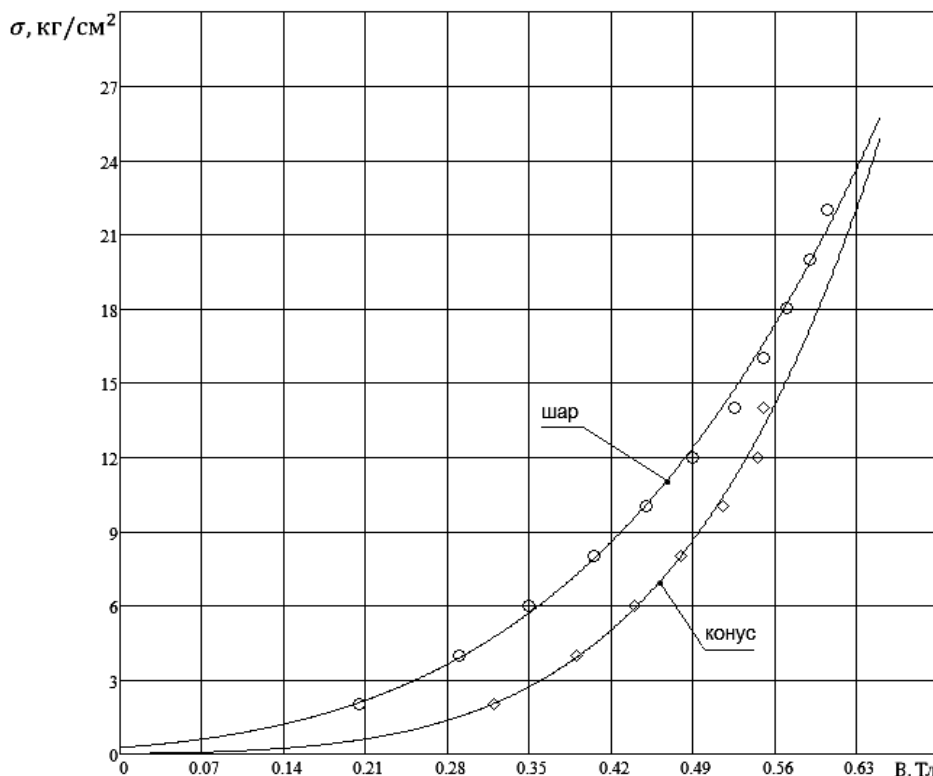


Рис. 4. Степенные регрессионные кривые с экспериментальными точками, полученными для шарообразной и конусной формы индентора

Исходя из рис. 3 и рис. 4, были определены значения среднеквадратических ошибок регрессионного анализа, показанные в табл. 2.

Таблица 2

Значения среднеквадратических ошибок регрессионного анализа

Форма индентора	Вид функции регрессии	
	Экспоненциальная	Степенная
Шар диаметром 8 мм	4,626	1,744
Конус с углом 120°	1,706	1,368

ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные зависимости прочности ферромагнитного порошка из реактивного восстановленного железа от электромагнитной индукции. Выполнен экспоненциальный и степенной регрессионный анализ полученных экспериментальных зависимостей, получены уравнения соответствующих кривых. Установлено, что степенной регрессионный анализ более точно описывает полученные зависимости: среднеквадратическая ошибка для экспериментов с шаровым индентором сокращается в 2,65 раза, а с конусным – в 1,25 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агурок И. П. Влияние погрешности сборки и установки корректора на результаты контроля формы поверхности несферических зеркал / И. П. Агурок // ОМЕ. – 1980. – № 3. – С. 16–18.
2. Айсин Т. М. Макет автоматизированной установки для шлифования крупногабаритных оптических даталей / Т. М. Айсин, Ю. Н. Умнов, Л. С. Цеснек // ОМИ. – 1979. – № 12. – С. 31–33.
3. Хайкин Б. Е. Построение аппроксимационных математических моделей в условиях обработки металлов давлением : учебное пособие / Б. Е. Хайкин. – Свердловск : УПИ, 1991. – 101 с.
4. Сигал Э. Практическая бизнес-статистика / Э. Сигал. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2002. – 1056 с.

Статья поступила в редакцию 01.11.2011 г.