

УДК 621.762

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКЕ ОСНОВЫ

Н. И. СТРИКЕЛЬ<sup>+</sup>, Ю. Л. БОБАРИКИН, М. И. ЛИСКОВИЧ

Гомельский технический университет им. П. О. Сухого, пр-т Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

*Работан новый способ формирования металлопорошкового покрытия совместно с глубокой вытяжкой металлической основы. Проведен энергосиловой анализ процесса, представлены результаты экспериментальных исследований и испытаний полученных образцов.*

### Введение

Среди способов получения покрытий особое место занимают способы совместной пластической деформации покрытия и основы, осуществляемые в процессах обработки материалов давлением. Возникающие в этих процессах высокие давления, превышающие пределы текучести деформируемых материалов, значительные сдвиговые деформации, разрушение окисных плёнок на поверхности основы, образование ювенильных поверхностей, выход дислокаций на границу основы с покрытием способствуют получению прочного соединения. Одним из факторов, отрицательно влияющим на процесс совместного пластического деформирования, является неравномерное распределение сдвиговых деформаций, вызываемое различием физико-механических свойств и характеристик покрытия и основы, характером движения частиц покрытия, основы и поверхностей деформирующего инструмента.

С целью создания высокоэффективного процесса получения качественных полых металлических деталей с металлопорошковым покрытием разработан способ их изготовления совместной пластической деформацией при глубокой вытяжке [1].

### Постановка задачи

Прочность покрытия, его эксплуатационные характеристики во многом определяются величинами напряжений, действующих на границах основы и покрытия при их совместном деформировании.

Для определения этих напряжений рассмотрим схему процесса совместной вытяжки металлической заготовки 2 и порошка 3 с помощью матрицы 1 и пуансона 4 (рис. 1). Для анализа на-

пряженно-деформированного состояния (НДС) материала порошка выделим в очаге деформации бесконечно малый элемент высотой  $dz$  и толщиной  $h_z$ , средний диаметр которого  $D_z$ , и обозначим действующие напряжения:  $p$  – нормальные контактные напряжения на границе между основой и порошком и на границе между пуансоном и порошком;  $\tau_0$  и  $\tau_n$  – касательные контактные напряжения на границах основа–порошок и пуансон–порошок;  $\sigma_z$  и  $\sigma_z + d\sigma_z$  – нормальные напряжения в выделенных сечениях элемента.

Расчет напряжений  $p$  и  $\tau_0$  будем производить, решая совместно дифференциальное уравнение условия равновесия выделенного элемента и уравнение условия пластичности.

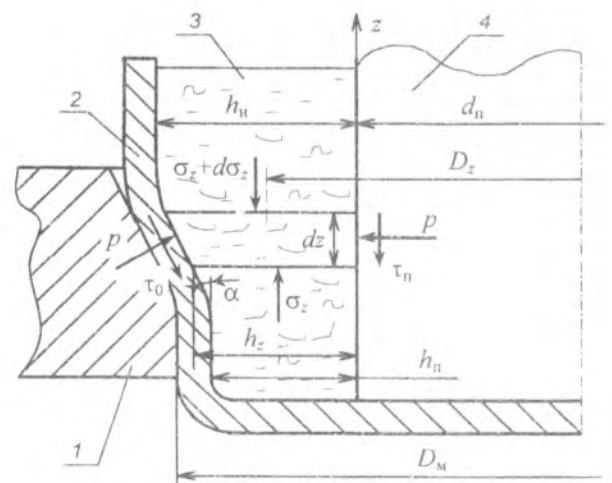


Рис. 1. Схема распределения напряжений в порошковом слое при вытяжке: 1 – матрица; 2 – основа; 3 – металлопорошковый состав; 4 – пуансон

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку.

**Расчет контактных напряжений**

Используя методику анализа процесса пластической деформации металлических порошков, приведенную в работе [2], условие пластичности для металлопорошка сформулируем в следующем виде:

$$p - \sigma_z = \frac{h_n^m \vartheta_n^m}{h_z^m} \sigma_{\tau c}, \tag{1}$$

где  $h_n$  – толщина покрытия;  $\vartheta_n$  – относительная плотность покрытия;  $m$  – опытный коэффициент;  $\sigma_{\tau c}$  – усредненное значение сопротивления деформации металлической составляющей порошка, в свою очередь определяемое по формуле:

$$\sigma_{\tau c} = \sigma_s + \vartheta_n a_m (h_n - h_n^0)^n / 2 h_n^n, \tag{2}$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести металлической составляющей порошка;  $a_m$  и  $n$  – опытные коэффициенты, определяемые по кривой упрочнения металла;  $h_n^0$  – начальная толщина очага деформации.

Зависимости (1) и (2) учитывают уплотнение порошка и упрочнение его металлической составляющей в процессе пластической деформации.

Проецируя действующие на элемент силы на ось  $Z$ , получим условие пластичности в виде

$$\pi p D_z dz \operatorname{tg}(\alpha) - (\sigma_z dh_z + h_z d\sigma_z) \pi D_z - (\tau_o + \tau_n) \pi D_z dz = 0. \tag{3}$$

Представив соотношения между  $\tau$  и  $p$  в виде

$$\tau_o = f_o p; \tag{4}$$

$$\tau_n = f_n p, \tag{5}$$

где  $f_o$  и  $f_n$  – коэффициенты контактного трения порошка по основе и по пуансону, соответственно, и решая совместно уравнения (1) и (3) с учетом (2), получим расчетную зависимость для определения нормального контактного напряжения в зоне соединения порошка и основы:

$$p = \left( \frac{h_n \vartheta_n}{h_n} \right)^m \left\{ \left[ \sigma_s + \sigma_{\tau c} \frac{(m-1) \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \operatorname{tg} \alpha} \right] \times \left( \frac{h_n}{h_z} \right)^{\frac{f_o + f_n}{\operatorname{tg} \alpha}} - \sigma_{\tau c} \frac{(m-1) \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \operatorname{tg} \alpha} \left( \frac{h_n}{h_z} \right)^m \right\}. \tag{6}$$

Анализируя выражение (6), можно определить максимальное и минимальное значения контактных напряжений  $p$ , а следовательно, и  $\tau_o$ .

Максимальные значения контактных напряжений будут присутствовать при  $h_z = h_n$ . Откуда:

$$p_{\max} = \left( \frac{h_n \vartheta_n}{h_n} \right)^m \left\{ \left[ \sigma_s + \sigma_{\tau c} \frac{(m-1) \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \operatorname{tg} \alpha} \right] \times \left( \frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n}{\operatorname{tg} \alpha}} - \sigma_{\tau c} \frac{(m-1) \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \operatorname{tg} \alpha} \left( \frac{h_n}{h_n} \right)^m \right\}; \tag{7}$$

$$\tau_{o \max} = f_o \left( \frac{h_n \vartheta_n}{h_n} \right)^m \left\{ \left[ \sigma_s + \sigma_{\tau c} \frac{(m-1) \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \operatorname{tg} \alpha} \right] \times \left( \frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n}{\operatorname{tg} \alpha}} - \sigma_{\tau c} \frac{(m-1) \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \operatorname{tg} \alpha} \left( \frac{h_n}{h_n} \right)^m \right\}. \tag{8}$$

Эти максимальные напряжения и будут определять качество соединения покрытия и основы.

**Методы испытаний**

Для экспериментального исследования процесса были использованы штампы (рис. 2, а, б) с набором сменных пуансонов диаметром 17; 18,2; 19; 19,5 мм и матрицей диаметром 22 мм для одного штампа и с набором сменных пуансонов диаметром 5; 5,5; 6; 6,5; 7 мм и матриц с углами 5; 10; 15; 20; 30 и 45° для другого. Нанесение покры-

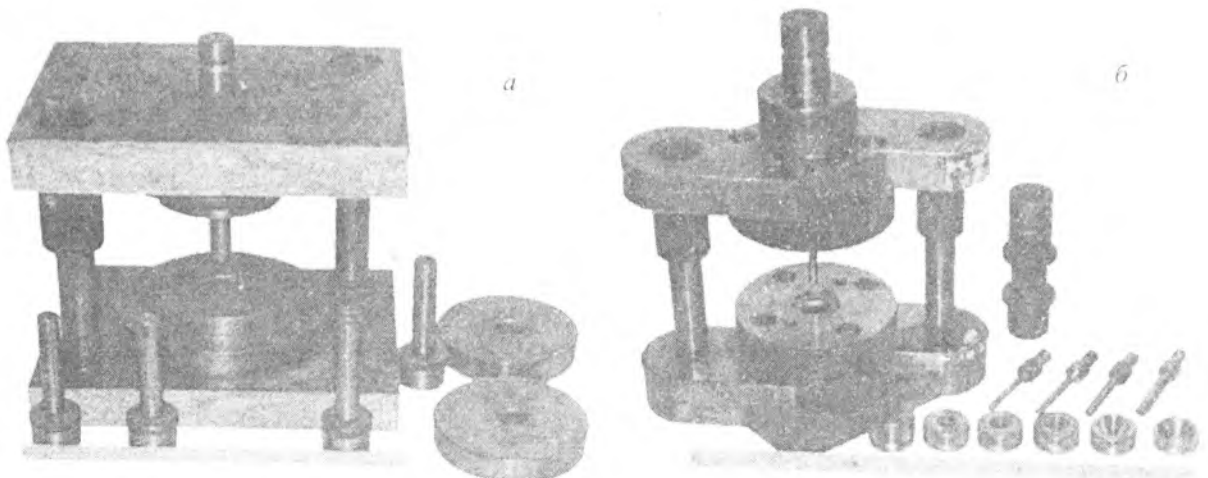


Рис. 2. Общий вид штампов, матриц и пуансонов для совместной выгвозки металлической основы и металлопорошкового покрытия

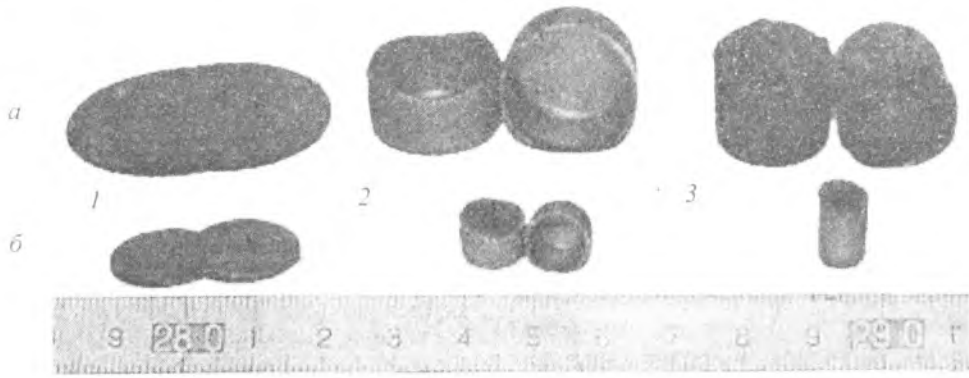


Рис. 3. Образцы: 1 – плоская заготовка; 2 – полая заготовка основы после первого перехода вытяжки; 3 – полное композиционное изделие

тия производилось на полые стальные (сталь 08кпВГ) заготовки, получаемые предварительной вытяжкой из листовых заготовок толщиной 1,5 и диаметром 40 мм в штампе с пуансоном диаметром 22,9, матрицей диаметром 26 мм (рис. 3, а) и толщиной 1 и диаметром 19,5 мм в штампе с пуансоном диаметром 8 и матрицей 11 мм (рис. 3, б). В качестве материала наносимого покрытия использовались следующие порошковые составы: ЖГр2Д10 и ЖГр3.

Штампы устанавливались на универсальную испытательную машину Р-50 с измерением усилия вытяжки и записью диаграммы усилие–перемещение.

Для спекания композиционных изделий использовалась шахтная вакуумная лабораторная электропечь сопротивления СШВЛ-1,2,5/25, температура спекания определялась вольфрам–рениевой термпарой, вакуум измерялся вакууметром ВИТ-2.

Для исследования микроструктуры и микротвердости покрытия, основы и зоны их контакта были подготовлены образцы.

Спеченные образцы были залиты эпоксидным клеем марки «ЭДП» и распилены на четыре части (вдоль и поперек). После шлифовки на абразивном круге, полировки замшей образец был изучен под микроскопом «МЕТАМ-Р1» при увеличении 125 и 317, получены фотоснимки покрытия и границы соединения основы с покрытием (рис. 5).

Для общего обзора объекта применялся слабый по увеличению объектив  $F = 25$  мм,  $A = 0,25$ , для более подробного изучения – объективы  $F = 16$ ,  $A = 0,30$  и  $F = 6,3$ ,  $A = 0,65$ .

Для определения микротвердости покрытия и основы исследуемого образца был использован микротвердомер ПМТ-3.

Пределы измерения диагоналей отпечатков на микротвердомере ПМТ-3 (с объективом  $F = 6,2$  мм,  $A = 0,65$ ) от 0,005 до 0,25 мм, пределы нагрузки от 0,049 до 1,96 Н.

Измерения твердости основы и компонентов покрытия производились при увеличении 138, нагрузке в 1 Н и времени выдержки под нагрузкой

10 с.

Для изучения эксплуатационных характеристик, полученных вытяжкой композиционных изделий типа подшипников скольжения, разработана методика и создано устройство для триботехнических испытаний с определением момента трения в подшипнике и усилия, действующего на подшипник, с помощью тензодатчиков.

Устройство позволяет проводить испытания подшипников скольжения с антифрикционным покрытием в диапазоне изменения числа оборотов в минуту от 80 до 4000 и осевого усилия от 50 до 540 Н.

### Результаты экспериментов

Полученные расчетные значения величин давления в зоне соединения порошка и металлической основы использованы для расчета величины усилия вытяжки. На рис. 4 представлены опытные и расчетные значения величины общего усилия вытяжки при различных отношениях  $h_{II}/h_I$ .

Качественно кривые, характеризующие взаимосвязь величин общего усилия совместной вытяжки, носят близкий и подобный характер, свиде-

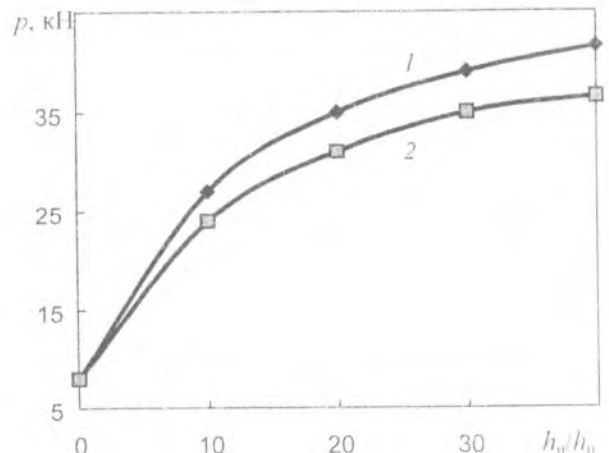


Рис. 4. Расчетные (1) и опытные (2) значения общего усилия совместной пластической деформации покрытия и основы при различных соотношениях  $h_{II}/h_I$

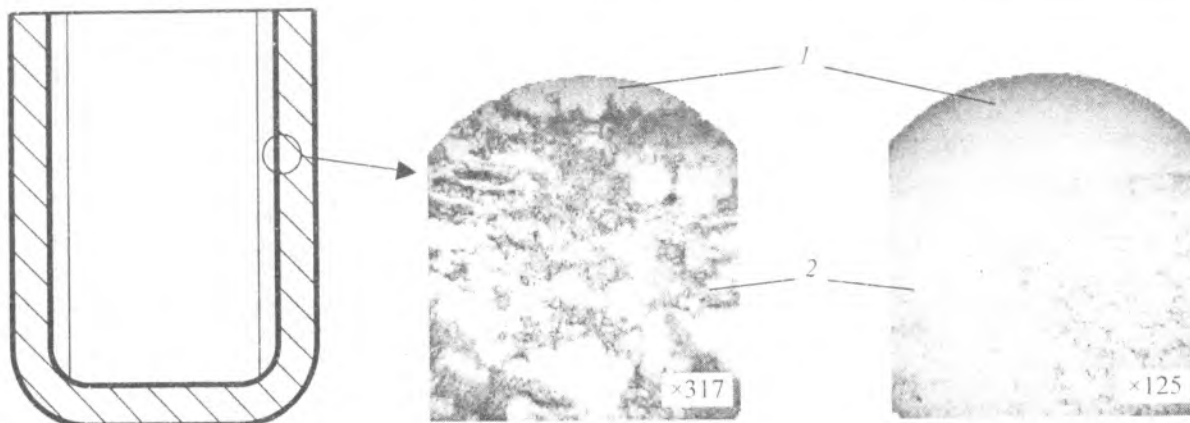


Рис. 5. Вид основы и покрытия: 1 – основа; 2 – покрытие

тельствующий о существенной зависимости величины усилия от относительного деформационного изменения толщины покрытия  $h_w/h_n$ . То, что расчетные значения оказались меньше опытных и эта разница возрастает с увеличением  $h_w/h_n$ , свидетельствует о том, что необходимо учесть чать изменение контактных условий между основой и матрицей.

После изучения структуры основы и покрытия (рис. 5) можно сделать вывод, что между медной составляющей и основой не обнаруживается хрупких интерметаллических соединений, омеднение порошка графита препятствует растворению атомов углерода в материале основы, в образце отсутствуют микро- и макротрещины и отслоения. Все это свидетельствует о хорошей схватываемости покрытия с материалом основы.

Результаты измерений микротвердости сведены в таблицу, в которой указаны также средняя величина твердости каждого компонента  $\bar{x}$ , среднеквадратичное отклонение  $S$  и коэффициент вариации  $v$ .

Они были найдены по следующим формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}; \quad (10)$$

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100, \quad (11)$$

где  $x_i$  – измерение микротвердости,  $i = 1, 2, 3, \dots$ ,

15;  $N$  – количество измерений ( $N = 15$ ).

Для уровня доверительной вероятности 0,95 определены доверительные интервалы для средних значений твёрдости замеренных материалов.

Относительное отклонение выборочного среднего от генерального среднего выражается:

$$t = \frac{\bar{x} - M(x)}{S(\bar{x})}, \quad (12)$$

где распределение величин  $t$  при числе степеней свободы  $f = N - 1$  находят по таблицам  $t$ -распределений (распределение Стьюдента).

Ошибку  $\Delta x$  определения  $\bar{x}$  можно записать так:

$$\Delta x = \pm \frac{tS}{\sqrt{N}}. \quad (13)$$

Для всех материалов  $N = 15$  и степень свободы  $f = N - 1 = 14$ , тогда  $t = 2,145$ .

Таким образом для основы:

$$\Delta x_o = \pm \frac{2,145 \cdot 9,7}{\sqrt{15}} = \pm 5,56;$$

для железа:

$$\Delta x_{ж} = \pm \frac{2,145 \cdot 15,5}{\sqrt{15}} = \pm 8,89;$$

для меди:

$$\Delta x_m = \pm \frac{2,145 \cdot 12,9}{\sqrt{15}} = \pm 7,39;$$

Результаты измерений микротвердости

| Материал              | Измерение $x_i$ , МПа |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | $\bar{x}$ , МПа | $S$  | $v$ , % |
|-----------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|---------|
|                       | 1                     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |                 |      |         |
| Основа (сталь 08кпВГ) | 1288                  | 1288 | 1288 | 1288 | 1097 | 1097 | 1097 | 1097 | 1097 | 097  | 1097 | 1288 | 1288 | 1097 | 1097 | 1173            | 9.7  | 0.8     |
| Железо                | 1097                  | 724  | 642  | 946  | 724  | 1288 | 420  | 642  | 464  | 1097 | 642  | 514  | 724  | 642  | 642  | 747             | 15.5 | 2.0     |
| Медь                  | 420                   | 420  | 724  | 572  | 383  | 383  | 824  | 572  | 724  | 946  | 642  | 514  | 420  | 514  | 464  | 568             | 12.9 | 2.3     |
| Графит                | 280                   | 322  | 350  | 514  | 350  | 254  | 322  | 274  | 322  | 383  | 254  | 254  | 322  | 322  | 297  | 321             | 8.0  | 2.5     |

для графита:

$$\Delta x_r = \pm \frac{2,145 \cdot 8,0}{\sqrt{15}} = \pm 4,59.$$

Следовательно:

$$1167 < \bar{x}_o < 1179;$$

$$738 < \bar{x}_ж < 756;$$

$$560 < \bar{x}_м < 575;$$

$$316 < \bar{x}_r < 325.$$

Таким образом, исследование микротвердости покрытия изделия свидетельствует о сравнительно небольшом разбросе значений величин микротвердости каждой из составляющих компонентов покрытия, подтверждая, в свою очередь, что новый способ формирования металлопорошкового покрытия совместно с глубокой вытяжкой металлической основы позволяет добиться равномерной деформации компонентов и однородных свойств, благоприятно сказывающихся на значениях эксплуатационных характеристик изделий.

Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о том, что в режиме сухого трения подшипник обеспечил величину коэффициента трения от 0,09 до 0,11 при давлении от 2 до 5 МПа и окружной скорости от 0,5 до 1,0 м/с. Продолжительность работы подшипника в процессе промышленных испытаний на Белорусском металлургическом заводе при тех же режимах в машине свивки металлокорда составила 1000 ч.

## Выводы

Получены расчетные зависимости для определения напряжений на границе основа–покрытие при их совместной вытяжке.

Исследования микроструктуры и микротвердости зоны соединения свидетельствуют о том, что новый способ получения покрытия при глубокой вытяжке металлической основы позволяет добиться прочного соединения между слоями, а покрытие имеет равномерные свойства.

При изготовлении этим способом антифрикционных втулок подшипников скольжения достигаются триботехнические характеристики, не уступающие получаемым методами порошковой металлургии, при значительно меньших расходах дорогостоящих порошковых материалов, о чем свидетельствуют стендовые и промышленные ис-

пытания.

Способ может быть также применен для изготовления полых композиционных изделий иного назначения.

## Обозначения

$dz$  – высота бесконечно малого элемента, выделенного в очаге деформации материала порошка;  $D_z$  – средний диаметр бесконечно малого элемента, выделенного в очаге деформации материала порошка;  $p$  – нормальные контактные напряжения на границе между основой и порошком и на границе между пуансоном и порошком;  $\tau_o, \tau_n$  – касательные контактные напряжения на границах основа–порошок и пуансон–порошок;  $\sigma_z, \sigma_z + d\sigma_z$  – нормальные напряжения в выделенных сечениях элемента;  $h_n$  – толщина покрытия;  $\vartheta_n$  – относительная плотность покрытия;  $m$  – опытный коэффициент;  $\sigma_c$  – предел текучести металлической составляющей порошка;  $a_m, n$  – опытные коэффициенты, определяемые по кривой упрочнения металла;  $h_n$  – начальная толщина очага деформации;  $\sigma_{тс}$  – усредненное значение сопротивления деформации металлической составляющей порошка;  $\alpha$  – угол наклона рабочей поверхности матрицы к вертикали;  $f_o, f_n$  – коэффициенты контактного трения при перемещении порошка по поверхностям основы и пуансона, соответственно;  $h_z$  – текущее значение толщины порошкового слоя в процессе деформации;  $d_n$  – диаметр пуансона;  $D_m$  – диаметр матрицы;  $x_i$  – измерение микротвердости,  $i = 1, 2, 3, \dots, 15$ ;  $N$  – количество измерений;  $\bar{x}$  – средняя величина твердости каждого компонента;  $S$  – среднеквадратичное отклонение;  $v$  – коэффициенты вариации;  $t$  – относительное отклонение выборочного среднего от генерального среднего;  $\Delta x$  – величина ошибки при определении  $\bar{x}$ ;  $f$  – число степеней свободы.

## Литература

1. Стрикель Н. И., Бобарикин Ю. Л., Лискович М. И. Сменные композиционные втулки подшипников скольжения // Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы машиноведения», Гомель, 2 (1998), 179–180
2. Степаненко А. В., Исаевич Л. А. Непрерывное формирование металлических порошков и гранул. Минск: Наука и техника (1980)

Strikel N. I., Bobarikin Yu. L., Liskovich M. I.  
Formation of metal-powder coating at deep drawing of the base.

A new method of metal-powder coating formation in combination with deep drawing of the base was developed. Energy-force analysis of the process as well as experimental study of the samples have been done and the results presented.

Поступила в редакцию 23.06.99.

© Н. И. Стрикель, Ю. Л. Бобарикин, М. И. Лискович, 1999.