

УДК 621.793.092

М. И. Лискович

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО СОВМЕСТНОЙ ВЫТЯЖКОЙ

UDC 621.793.092

M. I. Liskovich

EQUATIONS FOR CALCULATING THE PRESSURE OF COMPRESSION WHEN PRODUCING A COATING BY USING COMBINED DRAWING

Аннотация

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование силовых параметров процесса совместной вытяжки металлической основы и металлопорошкового покрытия.

Получена пригодная для практического применения расчетная зависимость величины усилия совместной вытяжки от основных параметров процесса.

Ключевые слова:

металлопорошковые покрытия, плотность, пористость, давление прессования порошка.

Abstract

A theoretical and experimental study of the force parameters of the process of combined drawing of a metal base and a metal powder coating has been carried out.

A calculated dependence of the value of a combined drawing force on the main process parameters has been obtained that is suitable for practical use.

Keywords:

metal powder coatings, density, porosity, pressure of powder compression.

Введение

Свойства любых металлопорошковых изделий и покрытий существенно зависят от их плотности и пористости, которые, в свою очередь, зависят от давления прессования.

Процесс прессования порошков является сложным процессом упруго-пластического деформирования огромного числа частиц, при котором и относительное расположение частиц, и картина их упругого взаимодействия беспрерывно изменяются.

Основная часть

В теории прессования металличе-

ских порошков при выводе основного уравнения прессования, связывающего давление и плотность, существуют два основных направления.

Первое из них характеризуется введением целого ряда упрощающих допущений, которые позволяют решать ту или иную задачу элементарным путем, предлагая во многих случаях достаточно простые уравнения, описывающие рассматриваемый процесс с удовлетворяющей нужды практики степенью точности. Сюда входят теории прессования, основанные на использовании гипотезы сплошности, которая предполагает отсутствие разрывов в уплотняемой среде, т. е. ее непрерывность, что в целом противоречит пред-



ставлениям о дискретном строении порошковых тел.

Второе направление характеризуется большей математической точностью и физической обоснованностью решения. Оно предлагает для описания процессов уплотнения весьма сложные зависимости и далеко не всегда приводит к результатам, которые могут быть использованы в инженерной практике. К этому направлению относятся теории, основанные на изучении контактных явлений при взаимодействии частиц.

Четко разграничить эти направления нельзя, т. к. они зачастую взаимно дополняют друг друга.

Рядом авторов предложены различные математические уравнения, характеризующие процесс прессования [1, 2].

Это и К. Конопицкий:

$$A \lg \tau = p + \lg \tau_p = 0,$$

где A – константа; τ_p – относительная плотность порошка в состоянии насыпки, и Г. Смит:

$$\rho_n = k p^{1/3} + \rho_n,$$

где ρ_n – плотность спрессованного брикета; ρ_n – насыпная масса порошка; p – давление прессования; k – фактор уплотнения, и К. Агте:

$$\rho_n = k p^{1/n-1} + \rho_n,$$

где ρ_n – объем утряски порошка; n – числовой коэффициент ($n = 2 \dots 5$); ρ_n – плотность компактного материала.

Наиболее часто применяется уравнение М. Ю. Бальшина [3]

$$m \lg \tau = - \lg p + \lg p_{\max},$$

где τ – относительная плотность; p_{\max} – давление, соответствующее максимальному уплотнению до компактно-

го состояния; m – константа (фактор прессования).

Предложив уравнение прессования, М. Ю. Бальшин отметил, что значения фактора прессования существенно изменяются даже в не очень больших интервалах давлений, в связи с чем попытки дать уравнение прессования с постоянными коэффициентами для всех порошков и во всем интервале давлений обречены на неудачу. Однако в ряде случаев можно получить уравнения с коэффициентами, более или менее постоянными в достаточно широком интервале давлений.

Общее число уравнений прессования, приведенных разными авторами для разных типов порошков и процессов прессования, исчисляется несколькими десятками.

Все они чаще всего были получены эмпирически, путем математической обработки экспериментальных зависимостей, поэтому они могут с достаточной степенью точности описывать процесс прессования лишь тех порошков и при тех условиях прессования, для которых они были получены.

Поэтому для нового способа изготовления полых композиционных изделий совместной вытяжкой покрытия и основы [4] было необходимо разработать уравнение прессования, которое с удовлетворяющей точностью описывало бы его.

Способ, разработанный в ГГТУ им. П. О. Сухого, позволяет получать цельноштампованные композиционные втулки с повышенной по сравнению с получаемыми гибкой и калибровкой точностью размеров. Заключается он в следующем. Полученная предварительной вытяжкой полая металлическая заготовка 1 устанавливается на матрицу 2 (рис. 1). Между боковыми стенками заготовки и пуансоном 3 засыпается порошок 4, и перемещением пуансона осуществляют совместную вытяжку металлической основы и материала покрытия, получая композиционное



изделие 5 (рис. 2).

Наиболее обстоятельно напряженное состояние при вытяжке листового металла в различных участках очага деформации изучено Е. А. Поповым [5, 6]. В приведенную им методику и расчёт-

ные зависимости были внесены дополнения и видоизменения таким образом, чтобы сделать возможным учет влияния процесса деформации порошкового материала на процесс деформации основы.

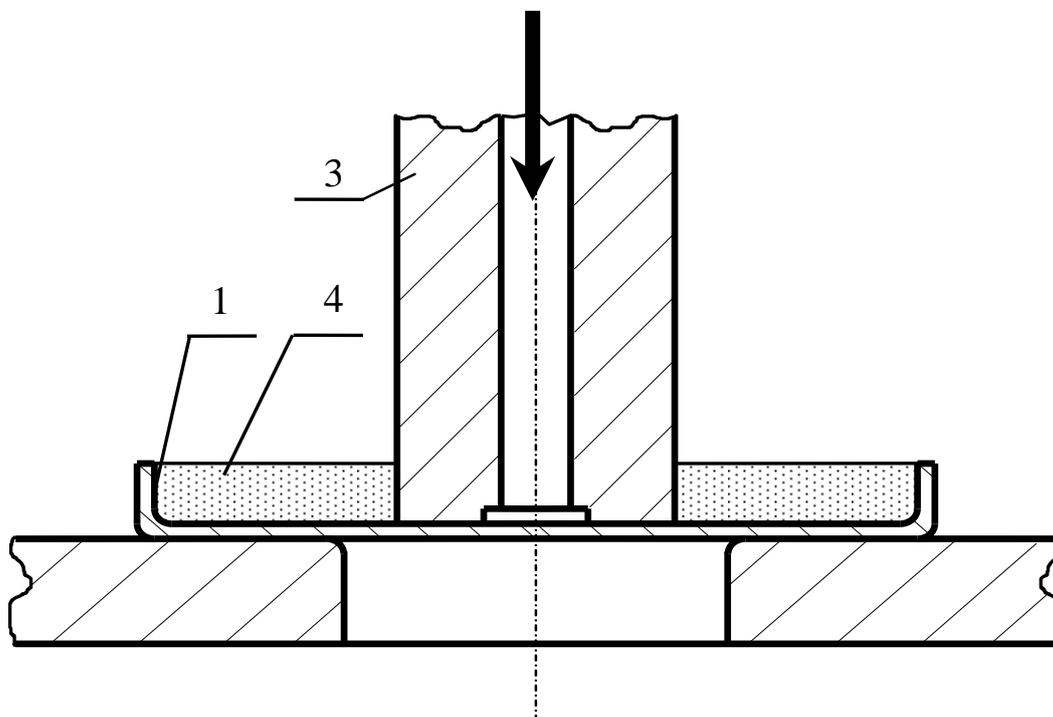


Рис. 1. Схема процесса совместной вытяжки покрытия и основы

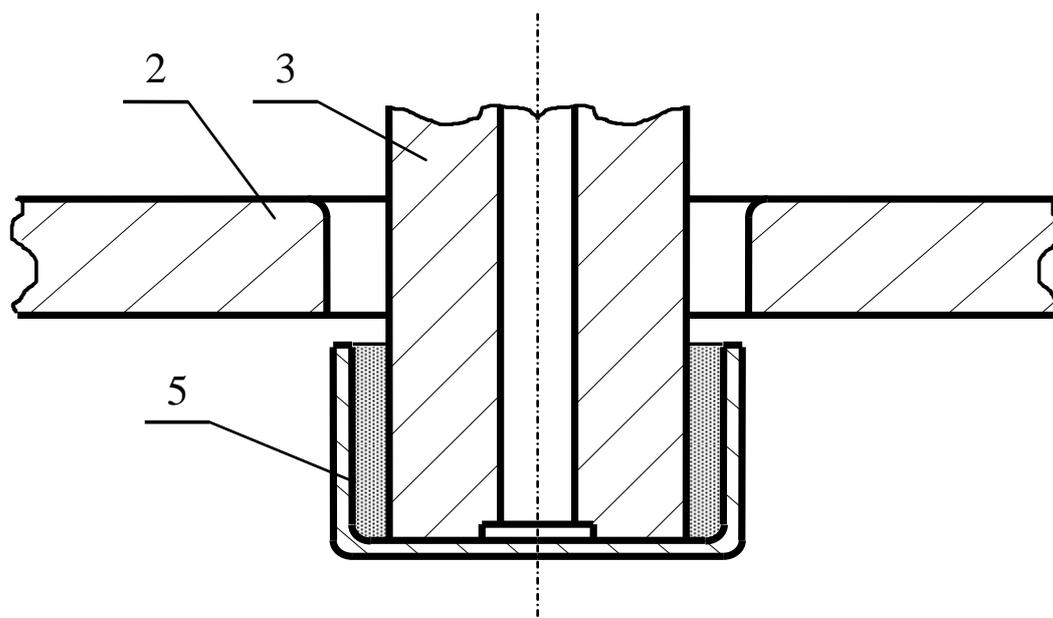


Рис. 2. Схема процесса совместной вытяжки покрытия и основы после получения композиционного изделия



Усилие совместной вытяжки будем определять в следующем виде:

$$P = \sigma_{p_{\max}} \cdot \pi \cdot (D_m - s) \cdot s + P_{mp}, \quad (1)$$

где первое слагаемое учитывает величину усилия, необходимого для вытяжки основы с учётом влияния давления и сил трения со стороны порошка; P_{mp} – усилие, затрачиваемое на трение порошка по пуансону; $\sigma_{p_{\max}}$ – макси-

мальное растягивающее напряжение, действующее в материале основы, направление которой показано на рис. 3; D_m – диаметр цилиндрического отверстия в матрице; s – толщина материала основы.

Для определения σ_{ρ_0} используем зависимость, приведённую Поповым [5, с. 377]:

$$\sigma_{\rho_0} = \sigma_{S_0} \left\{ \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_m} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_p} \right) \left(\frac{\rho}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} \right\}, \quad (2)$$

где σ_{S_0} – сопротивление материала основы пластическому деформированию; α – угол наклона рабочей поверхности матрицы к вертикали; f_m – коэффициент трения основы по матрице; R_1 – радиус среднего слоя основы в начале конического участка:

$$R_1 = R_3 - R_p (1 - \cos \alpha);$$

R_p – радиус кривизны срединной поверхности основы в меридианном сечении на участке перехода цилиндрической части заготовки основы в коническую, для определения которого используется зависимость [5, с. 355]

$$R_p = \frac{\sqrt{R_3 \cdot s}}{\sqrt{2} \cdot \sin \alpha};$$

R_3 – радиус полой заготовки основы по среднему слою,

$$R_3 = \frac{D_0 - s}{2},$$

где D_0 – наружный диаметр заготовки основы;

При совместной вытяжке радиальное напряжение будем определять по формуле

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\rho_0} + \sigma_{don},$$

где σ_{don} – дополнительное напряжение, необходимое на преодоление сил трения между порошком и основой и дополнительных сил трения между основой и матрицей за счет прижима основы и матрицы давлением p .

Поэтому дополним (2) слагаемым, учитывающим $\sigma_{don_{\max}}$ – максимальное дополнительное напряжение, необходимое на преодоление сил трения между порошком и основой и увеличение сил трения между основой и матрицей за счет прижима основы к матрице давлением p :



$$\sigma_{P_{\max}} = \sigma_{S_0} \left\{ \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_M} \right) \left[1 - \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\operatorname{tg} \alpha}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_p} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\operatorname{tg} \alpha}} + \frac{s}{2R_1 + s} + \frac{\sigma_{\text{дон}_{\max}}}{\sigma_{S_0}} \right\} e^{f_M \alpha}. \quad (3)$$

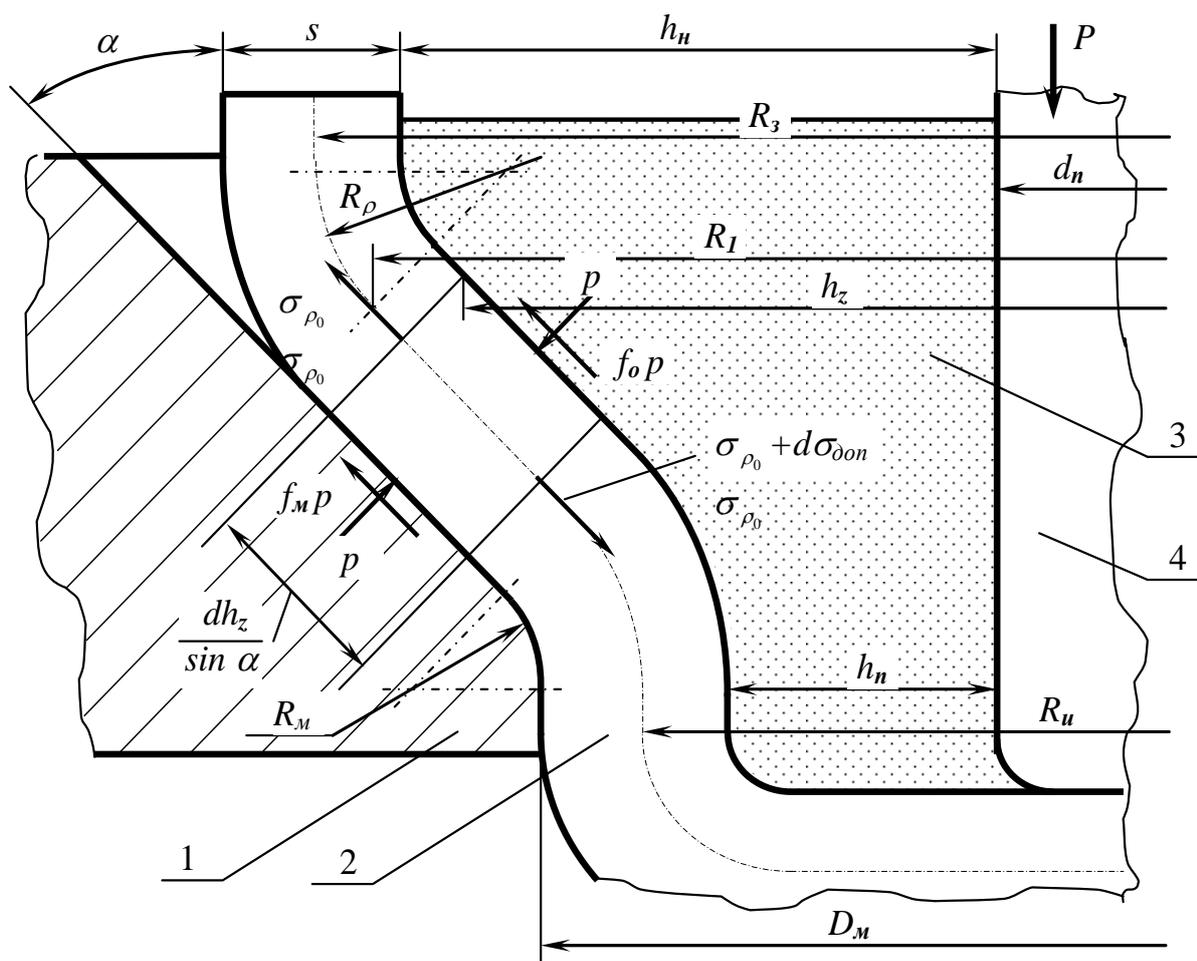


Рис. 3. Схема напряженного состояния при совместной вытяжке покрытия и основы: 1 – матрица; 2 – металлическая основа; 3 – металлопорошковый состав; 4 – пуансон

Величину $\sigma_{\text{дон}_{\max}}$ получим из условия равновесия кольцевого элемента основы толщиной s шириной $\frac{dh_z}{\sin \alpha}$

(см. рис. 3) после интегрирования, используя в качестве величины p давления порошка на основу полученную ранее зависимость [7, формула (6)], при $h_z = h_n$:



$$\sigma_{\partial on_{max}} = \frac{f_o + f_m}{s \cdot \cos \alpha} \left(\frac{h_n}{h_n} v_n \right)^m h_n \left\{ \left[\sigma_s + \sigma_{mc} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f_o - f_n} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right] + \frac{\sigma_{mc}}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}, \quad (4)$$

где f_o – коэффициент трения между порошком и основой; h_n – толщина покрытия; h_n – начальная толщина порошкового слоя; v_n – относительная плотность покрытия; m – опытный коэффициент; σ_s – предел текучести основной металлической составляющей порошка; σ_{mc} – усредненное значение сопротивления деформации основной металлической составляющей порошка.

Величину дополнительного усилия P_{mp} , затрачиваемого на трение по

рошка по пуансону, определим, интегрируя касательные напряжения вдоль поверхности пуансона при изменении h_z в диапазоне от h_n до h_n :

$$P_{TP} = \frac{\pi \cdot f_{II} \cdot d_{II}}{\sin \alpha} \int_{h_n}^{h_n} p \, dh_z, \quad (5)$$

после интегрирования получим

$$P_{mp} = \frac{\pi \cdot f_n \cdot d_n}{\cos \alpha} \left(\frac{h_n}{h_n} v_n \right)^m h_n \left\{ \left[\sigma_s + \sigma_{mc} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f_o - f_n} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right] + \frac{\sigma_{mc}}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}, \quad (6)$$

где d_n – диаметр пуансона.

Подставив в (1) значение $\sigma_{p_{max}}$ из (3) и значение P_{mp} из (6), получим

формулу для расчёта усилия совместной вытяжки:

$$P = \pi \cdot (D_m - s) \cdot s \cdot \sigma_{s_o} \left\{ \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_m} \right) \left[1 - \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_\rho} \right) \cdot \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} + \frac{s}{2R_m + s} + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_{\partial on_{max}}}{\sigma_{s_o}} \right\} e^{f_m \alpha} + \frac{\pi \cdot f_n \cdot d_n}{\cos \alpha} \cdot \left(\frac{h_n}{h_n} v_n \right)^m \cdot \left\{ \left[\sigma_s + \sigma_{mc} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f_o - f_n} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right] + \frac{\sigma_{mc}}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}. \quad (7)$$



По формуле (7) рассчитаны значения усилия совместной вытяжки. Экспериментальные значения были получены при нанесении покрытия 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 мм, матри-

цей диаметром 26 мм, а также толщиной 1 и диаметром 19,5 мм в штампе с пуансоном диаметром 8 мм и матрицей 11 мм (рис. 4). В качестве материала наносимого покрытия использовались такие порошковые составы, как ЖГр2Д10 (железо 88,2 %, графит 1,8 %, медь 10 %) и ЖГр3 (железо 97 %, графит 3 %).

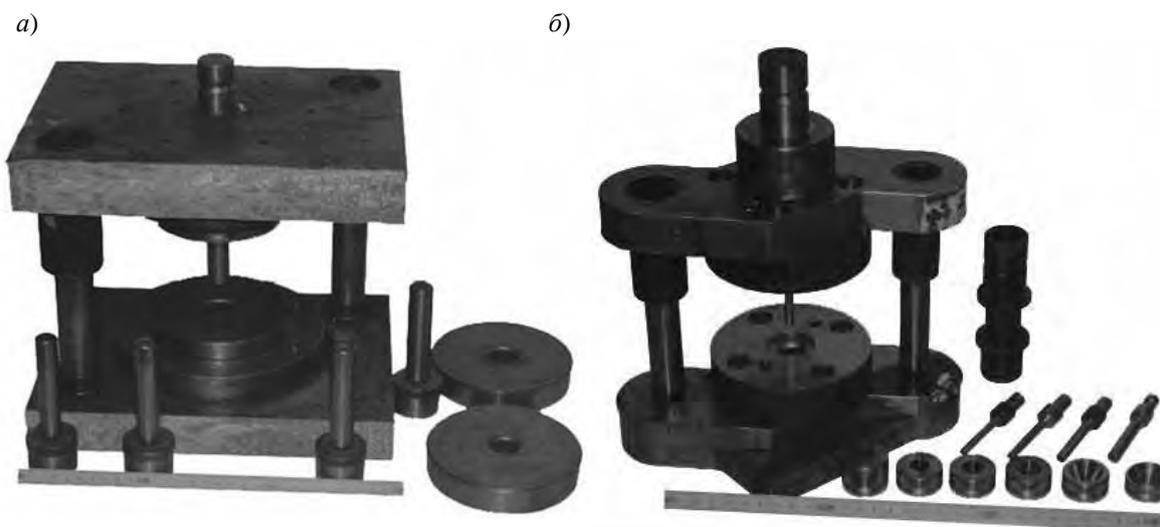


Рис. 4. Общий вид штампов, матриц и пуансонов для совместной вытяжки металлической основы и металлопорошкового покрытия

Таким образом, сравнение расчетных и опытных значений (рис. 5) свидетельствует о возможности использования полученной аналитической зависимости в практических расчетах. Ступенчатый характер средних опытных и расчетных значений вызван разными значениями толщин основы и различием механиче-

ских свойств материала основы.

Оценка значимости уравнения регрессии предложенной теоретической модели выполнена с использованием F -критерия Фишера [8]. Для проверки значимости сравниваются две дисперсии – регрессионная сумма $S^2_{рег}$ и остаточная сумма $S^2_{ост}$ (табл. 1):

$$S^2_{рег} = \frac{\sum P_{экс}^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum P_{экс})^2}{n-1} = \frac{27932183 - \frac{1}{7} \cdot 13908^2}{7-1} = 177467,1; \quad (8)$$

$$S^2_{ост} = \frac{\sum (P_{экс} - P_{расч})^2}{n-2} = \frac{39977}{7-2} = 7995,4; \quad (9)$$



$$F = \frac{S_{рез}^2}{S_{осн}^2} = \frac{177467,1}{7995,4} = 22,196 > F_{(3;2;5\%)}^P = 19,164. \quad (10)$$

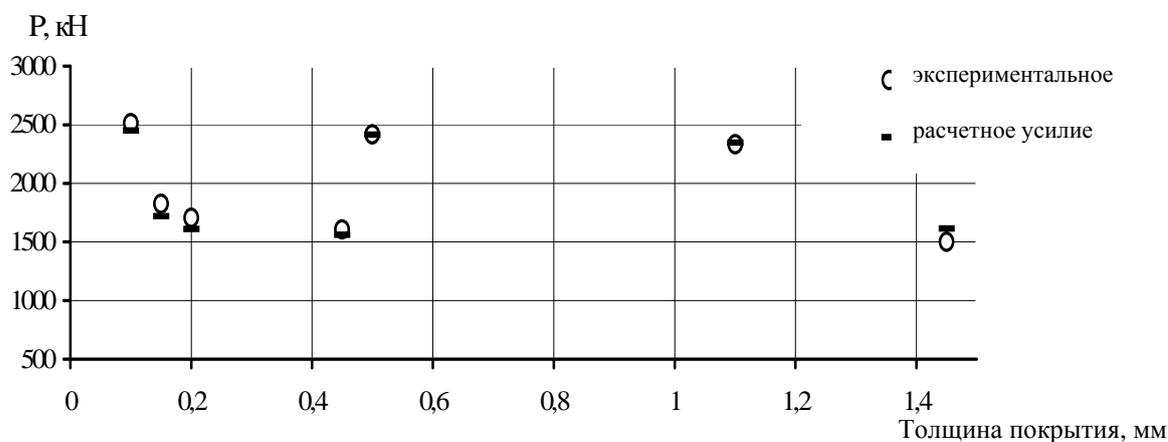


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные значения усилия совместной вытяжки в зависимости от толщины покрытия

Табл. 1. Оценка значимости уравнения регрессии предложенной теоретической модели с использованием F -критерия Фишера

x	$P_{эксп}$	$P^2_{эксп}$	$P_{расч}$	$P^2_{расч}$	$P_{эксп} - P_{расч}$	$(P_{эксп} - P_{расч})^2$
1	2514	6320196	2449	5997601	65	4225
2	1827	3337929	1720	2958400	107	11449
3	1706	2910436	1611	2595321	95	9025
4	1608	2585664	1560	2433600	48	2304
5	2417	5841889	2414	5827396	3	9
6	2333	5442889	2347	5508409	-14	196
7	1503	2259009	1616	2611456	-113	12769
Σ	13908	28698012	13717	27932183	191	39977

Для того чтобы уравнение регрессии было значимо, необходимо, чтобы оно при 5-процентном уровне значимости описывало результаты опытов в 19,164 раза лучше среднего значения параметра ($F_{(3;2;5\%)}^P = 19,164$). Полученное фактическое значение ($F = 22,196$) превышает табличное, следовательно, численное решение статистически значимо описывает результаты экспериментов.

Выводы

Построена математическая модель процесса совместной вытяжки металлической основы и металлпорошкового покрытия.

На основании экспериментальных данных и статистического анализа с использованием F -критерия Фишера подтверждена адекватность полученной математической модели.



Проведенное теоретическое исследование силовых параметров процесса совместной вытяжки металлической основы и металлопорошкового покрытия позволило получить пригодную

для практического применения расчетную зависимость величины усилия совместной вытяжки от основных параметров процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Раковский, В. С.** Порошковая металлургия в машиностроении / В. С. Раковский, В. В. Саклинский. – Москва: Машиностроение. 1973. – 126с.
2. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. Б. С. Митина. – Москва: Металлургия, 1987. – 791 с.
3. **Бальшин, М. Ю.** Порошковая металлургия / М. Ю. Бальшин. – Москва: Metallurgizdat, 1948. – 332 с.
4. Способ изготовления полого композиционного изделия: пат. ВУ / М. И. Лискович, Ю. Л. Бобарикин, Н. И. Стрикель. – Оpubл. 30.08.2008.
5. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 420 с.
6. **Попов, Е. А.** Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 278 с.
7. **Стрикель, Н. И.** Формирование металлопорошкового покрытия при глубокой вытяжке основы / Н. И. Стрикель, Ю. Л. Бобарикин, М. И. Лискович // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. – № 4. – С. 18–22.
8. **Ящерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 286 с.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2020 года

Михаил Ильич Лискович, ст. преподаватель, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел. +375-291-31-21-79.

Mikhail Pyich Liskovich, senior lecturer, Pavel Sukhoi State Technical University of Gmel. Tel.: +375-291-31-21-79.

