

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 18 Выпуск 4

УДК 519.6:539.52

DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-4-268-284

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ
ДИЛАТИРУЮЩИХ СРЕД К ПРОЦЕССАМ УПЛОТНЕНИЯ
ПОРОШКОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Э. С. Макаров, А. Е. Гвоздев, Г. М. Журавлев, А. Н. Сергеев,
И. В. Минаев (г. Тула), А. Д. Бреки (г. Санкт-Петербург), Д. В. Малий (г. Тула)

Аннотация

В работе проведен расчет основных параметров процесса уплотнения порошков металлических систем (металлов, сталей, цветных сплавов различных систем легирования) при пластическом деформировании прессованием. Рассмотрены варианты вычисления распределения давлений и плотностей в порошковых брикетах различного поперечного сечения в различных системах координат. Установлено, что наибольшая плотность порошкового брикета прямоугольного сечения после прессования наблюдается у стенки матрицы под прессующим пуансоном, причем в середине короткой стороны прямоугольника плотность выше, чем в середине длинной стороны; наименьшая плотность наблюдается у стенки матрицы над неподвижным пуансоном, причем в середине короткой стороны прямоугольника плотность ниже, чем в середине длинной стороны; наименьшая плотность под прессующим пуансоном и наибольшая плотность над неподвижным пуансоном наблюдаются в центрах соответствующих прямоугольных сечений. Показано, что в брикетах эллиптического сечения из порошков металлических систем после прессования при положительной величине ζ ($\zeta > 0$) давление и плотность у концов большой оси эллипса больше, чем у концов малой оси и, наоборот, при $\zeta < 0$ давление и плотность у концов большой оси меньше, чем у концов малой оси. Полученные результаты могут быть использованы при разработке малоотходных и ресурсосберегающих процессов и технологий обработки промышленных материалов в различных условиях и состояниях.

Ключевые слова: порошковый материал, уплотнение, прессование, пластическая деформация, поперечное сечение, давление, плотность.

Библиография: 35 названий.

**APPLICATION OF PLASTICITY THEORY OF DILATING
MEDIA TO SEALING PROCESSES OF POWDERS OF
METALLIC SYSTEMS**

E. S. Makarov, A. E. Gvozdev, G. M. Zhuravlev, A. N. Sergeev, I. V. Minaev (Tula),
A. D. Breki (St. Petersburg), D. V. Maliy (Tula)

Abstract

The authors carried out the basic parameters calculation of compacting powders of metallic systems (metals, steels, non-ferrous alloys of different alloying systems) during plastic compression deformation. The paper considers variants of calculating the pressures and densities distribution in powder compacts of various cross sections in different coordinate systems. The authors found that the highest density of the rectangular cross-section powder compact after pressing is observed near a die wall under the pressing punch, at the middle of the short side of the rectangle the density is higher than in the middle of the long side; the lowest density is observed at the die wall above the fixed punch, and in the middle of the short side of the

rectangle the density is lower than in the middle of the long side; the lowest density under the pressing punch and the highest density over the fixed punch are observed at the centers of the corresponding rectangular sections. It is shown that in elliptical section compacts of the powders of metal systems after pressing at positive value ζ ($\zeta > 0$) the pressure and density at the ends of the ellipse major axis are higher than at the ends of the minor axis and, conversely, when the $\zeta < 0$ pressure and density at the ends of the major axis are less than at the ends of the minor axis. The obtained results can be used to develop low-waste and resource-saving processes and technologies for processing industrial materials under various conditions and states.

Keywords: powder material, sealing, pressing, plastic deformation, cross-section, pressure, density.

Bibliography: 35 titles.

1. Введение

Необратимое изменение объема материала возникает во многих технологических процессах. Учет необратимого изменения объема материала необходим при расчетах многих технологических процессов, например, при обработки давлением и резанием пористых металлов, уплотнении порошков металлических систем прессованием. На основании экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом, разработаны методы расчета основных параметров процессов пластического деформирования порошковых материалов. Однако дальнейшее развитие техники выдвигает все более сложные задачи, эффективное решение которых связано изучением основных параметров процессов пластического деформирования порошков металлических систем, которые являются основой для разработки современных малоотходных ресурсосберегающих технологических процессов производства.

В работе рассмотрены варианты расчета распределения давлений и плотностей в брикетах различного поперечного сечения при уплотнении порошков металлических систем (металлов, сталей, сплавов различных систем легирования) прессованием.

2. Прямоугольное сечение

Для проведения расчета воспользуемся теорией пластичности дилатирующих сред, основные положения которой изложены в работе [1].

Пусть поперечное сечение брикета является прямоугольником со сторонами $2a$ и $2b$ (рис. 1а).

Ввиду симметрии сечения относительно осей x и y полагаем, что произвольные постоянные

$$A_n = B_n = C_n = 0, D_n \neq 0.$$

Находим геометрические характеристики поперечного сечения брикета.

$$H_n = \frac{4}{k_n l_n} (k_n c h k_n a s h l_n b + l_n s h k_n a c h l_n b) \quad (1)$$

$$T_n = \frac{4}{k_n l_n} s h k_n a s h l_n b \quad (2)$$

Поскольку эти и другие формулы должны быть справедливы и для квадратного сечения (рис. 1,б), имеющего еще две оси симметрии, а именно, $y = \pm x$, следует положить [1]

$$k_n = l_n = \nu_n / \sqrt{2} \quad (3)$$

Формулы (1) и (2) принимают вид:

$$H_n = \frac{4}{k_n} shk_n(a+b), T_n = \frac{4}{k_n^2} shk_n ashk_n b \quad (4)$$

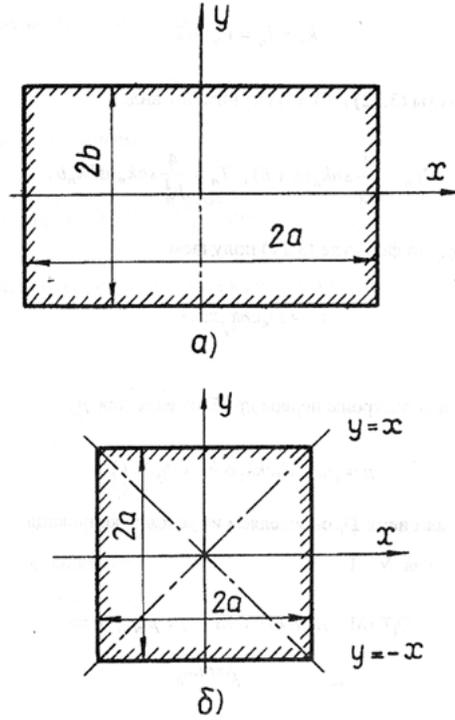


Рис. 32: Сечения: а) прямоугольное, б) квадратное

Для q_n получаем

$$q_n = D_n chk_n x chk_n y \quad (5)$$

Сначала построим первое приближение для p :

$$p = p_0 + D_1 chk_1 x chk_1 y sh(\zeta/h) \quad (6)$$

Коэффициент D_1 определяем из условия коллокации для пары сечений $\zeta_1 = 0$ и $\zeta_2 = h$, записанного для случая $N = 1$:

$$\begin{aligned} D_1 T_1 sh1 - \mu \xi h D_1 H_1 (ch1 - 1) &= \mu \xi p_0 L h \Rightarrow \\ \Rightarrow D_1 &= \frac{\mu \xi L h p_0}{T_1 sh1 - \mu \xi h H_1 (ch1 - 1)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Возьмем следующие числовые данные

$$a = 2b; h = 4b; \xi = 0,4; \mu = 0,25.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \nu_1 &= 0,395/b; k_1 = l_1 = 0,279/b; L = 12b; \\ shk_1 a &= 0,587; shk_1 b = 0,283; shk_1(a+b) = 0,938; \\ H_1 &= 13,448b; T_1 = 8,536b^2. \end{aligned}$$

По формуле (7) получаем

$$D_1 = 0,657p_0.$$

Согласно (6) имеем

$$p = p_0 \left(1 + 0,675ch \frac{0,279x}{b} ch \frac{0,279y}{b} sh \frac{\zeta}{4b} \right) \quad (8)$$

где нетто-давление p_0 , определяемое из условия постоянства массы, составляет

$$p_0 = \frac{M^m p_{\max}}{V^m \rho_k^m} = \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_k} \right)^m p_{\max}, \quad (9)$$

а $\bar{\rho}$ - средняя плотность брикета.

Рассчитываем давления в различных точках сечения при одностороннем прессовании:

а) под прессующим пуансоном

$$p(0, 0, h) = 1,793p_0, p(a, 0, h) = 1,920p_0,$$

$$p(0, b, h) = 1,824p_0, p(a, b, h) = 1,956p_0;$$

б) в среднем сечении

$$p(x, y, 0) = p_0 \forall (x, y) \in [-a, a] \times [-b, b];$$

в) над неподвижным пуансоном

$$p(0, 0, -h) = 0,207p_0, p(a, 0, -h) = 0,080p_0,$$

$$p(0, b, -h) = 0,176p_0, p(a, b, -h) = 0,044p_0.$$

Рассчитаем по этим данным отношение наибольшей плотности Θ_1 в брикете к наименьшей плотности Θ_2 . Используя

$$p = p_{\max} \Theta^m,$$

где p_{\max} - давление прессования, обеспечивающее получение беспористой заготовки; m - константа, причем, согласно [2], для любых металлических порошков $m \geq 3$, получаем

$$\frac{p(a, b, h)}{p(a, b, -h)} = \left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2} \right)^2 \Rightarrow \frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \sqrt[m]{44,45}, \quad (10)$$

что, например, при $m = 6$ дает $\Theta_1 = 1,88\Theta_2$, т.е. наибольшая плотность превышает наименьшую на 88 %.

Теперь построим второе приближение для p :

$$p = p_0 + D_1 ch k_1 x ch k_1 y sh \frac{\zeta}{2h} + D_2 ch k_2 x ch k_2 y sh \frac{\zeta}{h} \quad (11)$$

При тех же исходных числовых данных имеем:

$$\nu_1 = 0,198/b \Rightarrow k_1 = l_1 = 0,140b,$$

$$\nu_2 = 0,395/b \Rightarrow k_2 = l_2 = 0,279/b,$$

$$sh k_1 a = 0,283, sh k_1 b = 0,140, sh k_1 (a + b) = 0,432,$$

$$sh k_2 a = 0,587, sh k_2 b = 0,283, sh k_2 (a + b) = 0,938,$$

$$H_1 = 12,343b, T_1 = 8,086b^2, H_2 = 13,448b, T_2 = 8,536b^2.$$

Для нахождения D_1 и D_2 формулируем при $N = 2$ условия коллокации, используя следующие пары сечений:

а) $\zeta_1 = 0$ и $\zeta_2 = h$, б) $\zeta_1 = 0$ и $\zeta_2 = \frac{1}{2}h$

$$\left[T_1 sh \frac{1}{2} - 2\mu\xi h H_1 \left(ch \frac{1}{2} - 1 \right) \right] D_1 + [T_2 sh 1 - \mu\xi h H_2 (ch 1 - 1)] D_2 = \mu\xi p_0 Lh;$$

$$\left[T_1 sh \frac{1}{4} - 2\mu\xi h H_1 \left(ch \frac{1}{4} - 1 \right) \right] D_1 + \left[T_2 sh \frac{1}{2} - \mu\xi h H_2 \left(ch \frac{1}{2} - 1 \right) \right] D_2 = \frac{1}{2} \mu\xi p_0 Lh.$$

Эти условия после преобразований принимают вид

$$\left. \begin{aligned} 2,949D_1 + 7,109D_2 &= 4,8p_0 \\ 1,740D_1 + 3,758D_2 &= 2,4p_0 \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

откуда по правилу Крамера находим

$$D_1 = -0,759p_0, D_2 = 0,990p_0.$$

Внося эти значения коэффициентов в (11), получаем

$$p = p_0 \left(1 - 0,759ch \frac{0,140x}{b} - ch \frac{0,140y}{b} sh \frac{\zeta}{8b} + 0,990ch \frac{0,279x}{b} - ch \frac{0,279}{b} sh \frac{\zeta}{4b} \right) \quad (13)$$

По формуле (13) рассчитываем давления в различных точках поперечного сечения при одностороннем прессовании:

а) под прессующим пуансоном

$$p(0, 0, h) = 1,767p_0, p(a, 0, h) = 1,938p_0,$$

$$p(0, b, h) = 1,808p_0, p(a, b, h) = 1,986p_0;$$

б) в среднем сечении

$$p(x, y, 0) = p_0 \forall (x, y) \in [-a, a] \times [-b, b];$$

в) над неподвижным пуансоном

$$p(0, 0, -h) = 0,233p_0, p(a, 0, -h) = 0,062p_0,$$

$$p(0, b, -h) = 0,192p_0, p(a, b, -h) = 0,014p_0.$$

Из рассмотрения результатов, полученных на основе обоих приближений (8) и (13), вытекают следующие выводы:

- наибольшая плотность наблюдается у стенки матрицы под прессующим пуансоном, причем в середине короткой стороны прямоугольника плотность выше, чем в середине длинной стороны;

- наименьшая плотность наблюдается у стенки матрицы над неподвижным пуансоном, причем в середине короткой стороны прямоугольника плотность ниже, чем в середине длинной стороны;

- наименьшая плотность под прессующим пуансоном и наибольшая плотность над неподвижным пуансоном наблюдаются в центрах соответствующих прямоугольных сечений.

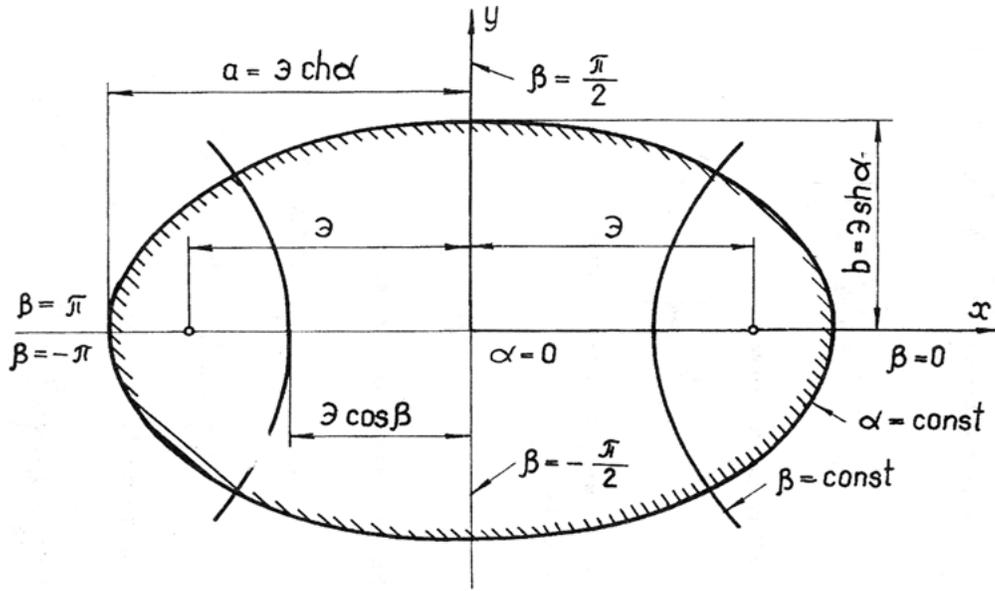


Рис. 33: Эллипс в декартовых и эллиптических координатах.

3. Эллиптическое сечение

Сечение в виде эллипса с полуосями a и b показано на рис. 2.

Для вычисления q_n принимаем выражение (5), и рассчитываем геометрические характеристики сечения, учитывая (3). При этом используем параметрическое представление уравнения эллипса

$$x = a \cos \varphi, y = b \sin \varphi \forall \varphi \in [0, 2\pi].$$

Очевидно,

$$dL^2 = dx^2 + dy^2 = (a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi) d\varphi^2.$$

Поэтому

$$H_n = 4 \int_0^{\pi/2} ch(k_n a \cos \varphi) ch(k_n b \sin \varphi) \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi} d\varphi.$$

Интеграл вычисляем по правилу трех восьмых [3].

Обозначим

$$\psi(\varphi) = ch(k_n a \cos \varphi) ch(k_n b \sin \varphi) \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}. \quad (14)$$

Находим значения ψ в точках $0, \pi/6, \pi/3, \pi/2$:

$$\psi(0) = achk_n a, \psi\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{1}{2} \sqrt{3a^2 + b^2} ch\left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_n a\right) ch\left(\frac{1}{2} k_n b\right),$$

$$\psi\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + 3b^2} ch\left(\frac{1}{2} k_n a\right) ch\left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_n b\right), \psi\left(\frac{\pi}{2}\right) = bchk_n b.$$

Окончательно для H_n получаем

$$H_n = \frac{\pi}{4} \left\{ achk_n a + bchk_n b + \frac{3}{2} \left[\sqrt{3a^2 + b^2} ch \left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_n a \right) ch \left(\frac{1}{2} k_n b \right) + \sqrt{a^2 + 3b^2} ch \left(\frac{1}{2} k_n a \right) ch \left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_n b \right) \right] \right\}. \quad (15)$$

Для T_n предварительно имеем:

$$T_n = \frac{4}{k_n} \int_0^a ch k_n x sh \left(k_n b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right) dx.$$

Снова применяем правило трех восьмых.
Обозначим

$$\chi(x) = ch k_n x sh \left(k_n b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right). \quad (16)$$

Находим χ в точках $0, a/3, 2a/3, a$:

$$\chi(0) = shk_n b, \chi \left(\frac{a}{3} \right) = ch \frac{k_n a}{3} sh \frac{2\sqrt{2}k_n b}{3},$$

$$\chi \left(\frac{2a}{3} \right) = ch \frac{2k_n a}{3} sh \frac{\sqrt{5}k_n b}{3}, \chi(a) = 0.$$

Окончательно для T_n получаем

$$T_n = \frac{a}{2k_n} \left[shk_n b + 3 \left(ch \frac{k_n a}{3} sh \frac{2\sqrt{2}k_n b}{3} + ch \frac{2k_n a}{3} sh \frac{\sqrt{5}k_n b}{3} \right) \right]. \quad (17)$$

Ограничимся рассмотрением первого приближения для p при следующих числовых данных:

$$a = 2b, h = b, \xi = 0, 4, \mu = 0, 25.$$

Как известно [4], длина L обвода эллипса выражается полным эллиптическим интегралом 2-го рода

$$L = 4aE(\varepsilon), \quad (18)$$

где эксцентриситет эллипса вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}. \quad (19)$$

При указанных выше числовых данных получаем

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow E \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 1, 211 \Rightarrow L = 9, 688.$$

Если применить правило трех восьмых, то найдем

$$L = 4 \int_0^{\pi/2} \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = \frac{\pi}{4} \left[a + b + \frac{3}{2} \left(\sqrt{3a^2 + b^2} + \sqrt{a^2 + 3b^2} \right) \right] = 9, 721$$

с относительной погрешностью 0,34 %, что в практических расчетах вполне приемлемо. Далее согласно (3) получаем

$$\nu_1 = 1,581/b \Rightarrow k_1 = 1,118/b.$$

Проводим вычисления по формулам (15) и (17):

$$H_1 = \frac{\pi}{4}b[2ch2,236 + ch1,118 + 1,5(3,606 \times \\ \times ch1,936ch0,559 + 2,646ch1,118ch0,968)] = 34,144b, \\ T_1 = \frac{b^2}{1,118} [sh1,118 + 3(ch0,745sh1,054 + ch1,491sh0,833)] = 11,429b^2.$$

Расчет по формуле (7) дает

$$D_1 = 0,084p_0.$$

Следовательно

$$p = p_0 \left(1 + 0,084ch \frac{1,118x}{b} ch \frac{1,118y}{b} sh \frac{\zeta}{b} \right). \quad (20)$$

По этой формуле определяем давления в различных точках сечения при одностороннем прессовании:

а) под прессующим пуансоном

$$p(0,0,h) = 1,099p_0, p(a,0,h) = 1,468p_0, p(0,b,h) = 1,168p_0;$$

б) в среднем сечении

$$p(x,y,0) = p_0 \forall (x,y) \in F;$$

в) над неподвижным пуансоном

$$p(0,0,-h) = 0,901p_0, p(a,0,-h) = 0,532p_0, p(0,b,-h) = 0,832p_0.$$

Вычисляем отношение наибольшей плотности Θ_1 в брикете к наименьшей плотности Θ_2 :

$$\frac{p(a,0,h)}{p(a,0,-h)} = \left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2} \right)^m \Rightarrow \frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \sqrt[m]{2,76},$$

что, например, при $m = 6$ составляет 1,184, т.е. наибольшая плотность превышает наименьшую на 18,4 %.

Приведенные расчеты показывают, что под прессующим пуансоном плотность возле концов большой оси эллипса выше, чем возле концов малой оси, а над неподвижным пуансоном плотность возле концов большой оси эллипса ниже, чем возле концов малой оси. Аналогичные результаты получаются и при рассмотрении второго и последующих приближений.

Рассмотрим важный частный случай эллиптического сечения – сечение в виде круга радиуса R .

Полагая $a = b = R$ в формулах (15) и (17), находим

$$H_n = \frac{\pi}{2}R \left(chk_nR + 3ch \frac{k_nR}{2} ch \frac{\sqrt{3}k_nR}{2} \right), \quad (21)$$

$$T_n = \frac{R}{2k_n} \left[shk_nR + 3 \left(ch \frac{k_nR}{3} sh \frac{2\sqrt{2}k_nR}{3} + ch \frac{2k_nR}{3} sh \frac{\sqrt{5}k_nR}{3} \right) \right]. \quad (22)$$

Возьмем следующие числовые данные:

$$h = R, \xi = 0,4, \mu = 0,25, L = 2\pi R.$$

Отметим, что точное значение длины окружности получается и по правилу трех восьмых:

$$L = \frac{\pi}{4} \left[R + R + \frac{3}{2} \left(\sqrt{3R^2 + R^2} + \sqrt{R^2 + 3R^2} \right) \right] = 2\pi R.$$

Далее в рамках первого приближения имеем:

$$\nu_1 = 1,581/b \Rightarrow k_1 = 1,118/b.$$

Проводим вычисления по формулам (15) и (17):

$$H_1 = \frac{\pi}{2} R (ch1,118 + 3ch0,559ch0,968) = 10,891R,$$

$$T_1 = \frac{R^2}{2 \cdot 1,118} [sh1,118 + 3(ch0,373sh1,054 + ch0,745sh0,833)] = 4,036R^2.$$

$$D_1 = 0,151p_0.$$

Таким образом,

$$p = p_0 \left(1 + 0,151ch \frac{1,118x}{R} ch \frac{1,118y}{R} sh \frac{\zeta}{R} \right). \quad (23)$$

По этой формуле получаем

$$p(0,0,h) = 1,177p_0, p(0,0,-h) = 0,823p_0.$$

Справедливо приближенное равенство

$$ch(k_n R \cos \varphi) ch(k_n R \sin \varphi) \approx ch k_n R \forall \varphi \in [0, 2\pi].$$

Поэтому на контуре сечения под прессующим пуансоном и над неподвижным пуансоном соответственно имеем

$$p_{\max} = 1,3p_0, p_{\min} = 0,7p_0.$$

В среднем сечении $p = p_0$.

Отношение наибольшей плотности в брикете к наименьшей плотности составляет

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \sqrt[m]{\frac{p_{\max}}{p_{\min}}} \Rightarrow \frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \sqrt[m]{1,857}.$$

Например, при $m = 6$ наибольшая плотность превышает наименьшую на 10,9%.

Найдем решение для брикета с круговым сечением в круговых цилиндрических координатах r, φ, ζ . Ввиду осевой симметрии уравнение для вычислений согласно [1] записывается в следующей форме

$$\frac{1}{r} \frac{dq_n}{dr} + \frac{d^2 q_n}{dr^2} = \nu_n^2 q_n, (n = 1, 2, \dots, N), \quad (24)$$

где ν_n вычисляется по методике [1].

Решение уравнения (24) представляется в бесселевых функциях [5]

$$q_n(r) = C_{n1}J_0(i\nu_n r) + C_{n2}N_0(i\nu_n r), \quad (25)$$

где $i = \sqrt{-1}$, J_0 и N_0 — бesselевы функции нулевого порядка соответственно первого и второго рода.

Поскольку решение (25) должно быть конечным в точке $r = 0$, то постоянную следует взять равной нулю. Тогда

$$q_n(r) = C_{n1}J_0(i\nu_n r) \quad (26)$$

и находим

$$p(r, \zeta) = p_0 + \sum_{n=1}^N C_{n1}J_0(i\nu_n r) sh \frac{n\zeta}{Nh}. \quad (27)$$

Для расчета констант $C_n (n = 1, 2, \dots, N)$ необходимо сформулировать систему N уравнений. Предварительно получаем

$$\int_L q_n dL = 2\pi C_{n1}R J_0(i\nu_n R), \quad (28)$$

$$\iint_F q_n dF = 2\pi C_{n1} \int_0^R J_0(i\nu_n r) dr = -\frac{2\pi}{\nu_n} C_{n1} i J_1(i\nu_n R), \quad (29)$$

где J_1 — бesselева функция первого порядка первого рода.

Уравнение с учетом (28) и (29) принимает вид:

$$\begin{aligned} \mu\xi \left[p_0 (\zeta_2 - \zeta_1) + Nh \sum_{n=1}^N \frac{C_{n1}}{n} \left(ch \frac{n\zeta_2}{Nh} - ch \frac{n\zeta_1}{Nh} \right) J_0(i\nu_n R) \right] + \\ + i \sum_{n=1}^N \frac{C_{n1}}{\nu_n} \left(sh \frac{n\zeta_2}{Nh} - sh \frac{n\zeta_1}{Nh} \right) J_1(i\nu_n R) = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

Условие коллокации (30) для пары сечений $\zeta_1 = 0$ и $\zeta_2 = h$ записывается в виде

$$\mu\xi h \left[p_0 + N \sum_{n=1}^N \frac{C_{n1}}{n} \left(ch \frac{n}{N} - 1 \right) J_0(i\nu_n R) \right] + i \sum_{n=1}^N \frac{C_{n1}}{\nu_n} J_1(i\nu_n R) sh \frac{n}{N} = 0. \quad (31)$$

Ограничимся рассмотрением первого приближения, - тогда вместо (27) и (31) будем иметь:

$$p(r, \zeta) = p_0 + C_{11}J_0(i\nu_1 r) sh \frac{\zeta}{h}, \quad (32)$$

$$\mu\xi h [p_0 + C_{11} (ch1 - 1) J_0(i\nu_1 R)] + i \frac{sh1}{\nu_1} J_1(i\nu_1 R) C_{11} = 0. \quad (33)$$

При тех же числовых данных находим:

$$J_0(i\nu_1 R) = J_0(1, 118i) = 1, 3378,$$

$$-iJ_1(i\nu_1 R) = -iJ_1(1, 118) = 0, 6510,$$

$$sh1 = 1,1752, ch1 = 1,5430.$$

Решаем относительно C_{11} уравнение (33):

$$C_{11} = 0,163p_0.$$

Внося это в (32), получаем

$$p(r, \zeta) = p_0 \left[1 + 0,163J_0 \left(\frac{1,118r}{R} i \right) sh \frac{\zeta}{h} \right]. \quad (34)$$

По таблицам [10] находим значения бесселевой функции J_0 в характерных точках сечения:

$$J_0(0) = 1, J_0(0,559i) = 1,0797, J_0(1,118i) = 1,3378.$$

Теперь получаем

$$\begin{aligned} p(0, h) &= 1,191p_0, p\left(\frac{R}{2}, h\right) = 1,207p_0, p(R, h) = 1,256p_0, \\ p(0, -h) &= 0,809p_0, p\left(\frac{R}{2}, -h\right) = 0,793p_0, p(R, -h) = 0,744p_0, \\ p(r, 0) &= p_0 \forall r \in [0, R]. \end{aligned}$$

Как видно, результаты расчетов в декартовых и круговых цилиндрических координатах достаточно хорошо согласуются между собой.

Рассмотрим задачу о прессовании брикета с сечением в виде эллипса в эллиптических цилиндрических координатах (рис. 2).

С учетом симметрии и равенства (3) получаем

$$p(\alpha, \beta, \zeta) = p_0 + \sum_{n=1}^N D_n ch(k_n \ni ch \alpha \cos \beta) ch(k_n \ni \sin \alpha \sin \beta) sh \frac{n\zeta}{Nh}. \quad (35)$$

На оси брикета

$$p\left(\alpha, \pm \frac{\pi}{2}, \zeta\right) = p_0 + \sum_{n=1}^N D_n sh \frac{n\zeta}{Nh}.$$

На контуре сечения

$$p\left(\text{Arch} \frac{a}{\ni}, \beta, \zeta\right) = p_0 + \sum_{n=1}^N D_n ch(k_n \alpha \cos \beta) ch(k_n b \sin \beta) sh \frac{n\zeta}{Nh}.$$

У концов малой оси эллипса

$$p\left(\text{Arch} \frac{a}{\ni}, \pm \frac{\pi}{2}, \zeta\right) = p_0 + \sum_{n=1}^N D_n ch k_n b sh \frac{n\zeta}{Nh}.$$

У концов большой оси эллипса

$$p\left(\text{Arch} \frac{a}{\ni}, 0, \zeta\right) = p\left(\text{Arch} \frac{a}{\varepsilon}, \pm \pi, \zeta\right) = p_0 + \sum_{n=1}^N D_n ch k_n a sh \frac{n\zeta}{Nh}.$$

Очевидно, при $\zeta > 0$ давление и плотность у концов большой оси эллипса больше, чем у концов малой оси и, наоборот, при $\zeta < 0$ давление и плотность у концов большой оси меньше, чем у концов малой оси.

4. Заключение

В работе приведены примеры расчета распределения давлений и плотностей в порошковых брикетах из металлических систем различного поперечного сечения для различных систем координат с использованием теории пластичности дилатирующих сред.

Результаты проведенных исследований дают возможность определять основные количественные характеристики параметров процессов уплотнения и пластического деформирования порошков различных металлических систем, и совершенствовать методы расчета, которые являются основой для разработки малоотходных ресурсосберегающих технологий.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих процессов и технологий обработки промышленных материалов в различных условиях и состояниях с использованием новых наноконструкционных смазок и покрытий [6–34].

Работа выполнена по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по проекту «Разработка прототипа инженерного программного обеспечения (ИПО) на основе высокопроизводительных вычислений для оценки механических характеристик изделия, изготовленного с использованием аддитивных технологий (методом селективного лазерного спекания) с учетом стратегии изготовления изделия» (уникальный идентификатор проекта RFMEF 157717X0271).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е. Теория пластичности дилатирующих сред. – Москва-Тула: Изд-во «Гриф и К», 2000. - 358 с.
2. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под. ред. Б.С. Митина. - М.: Металлургия, 1987. - 792 с.
3. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. – М.: Физматгиз. -1959. – 328 с.
4. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: Т.2. – М.: Наука, 1970.– 800 с.
5. Янке Е., Эмде Ф. Таблицы функций с формулами и кривыми. – М.Л.: Гостехиздат, 1949. – 420 с.
6. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии превращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39–42.
7. Гетерогенное зарождение графита в углеродистых сталях при распаде цементита в процессе ТЦО вблизи точки А0 / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2013. № 10. С. 48–52.
8. Гвоздев А.Е., Шкатов М.И., Лукин А.С. Эволюция микроструктуры при развитии динамической рекристаллизации в процессе горячей прокатки конструкционных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 10. С. 31–34.
9. Барчуков Д.А., Романенко Д.Н., Гвоздев А.Е. Исследование возможности упрочнения быстрорежущей стали в результате выполнения высокотемпературного отпуска после поверхностного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 9. С. 3–6.

10. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels / A.E. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. P. 41–44.
11. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation // A.E. Gvozdev, D.N. Bogolyubova, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. P. 32–40.
12. Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets / A.E. Gvozdev, I.V. Golyshev, I.V. Minayev, A.N. Sergeyev, N.N. Sergeyev, I.V. Tikhonova, D.M. Khonelidze, A.G. Kolmakov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 4. P. 305–310.
13. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 4. P. 283–288.
14. Зависимость показателей сверхпластичности труднодеформируемых сталей Р6М5 и 10Р6М5-МП от схемы напряженного состояния / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.Н. Боголюбова // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. № 11. С. 42–46.
15. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // *Технология металлов*. 2015. № 11. С. 17–29.
16. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // *Производство проката*. 2015. № 12. С. 9–13.
17. Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // *Производство проката*. 2015. № 10. С. 18–26.
18. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А.Е. Гвоздев, И.В. Голышев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.М. Хонелидзе, А.Г. Колмаков // *Материаловедение*. 2015. № 2. С. 31–36.
19. To the effective properties estimation of materials / G.M. Zhuravlev, A.N. Sergeyev, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, A.N. Privalov, D.A. Provotorov // *IEJME: Mathematics Education*. 2016. Т. 11. № 6. P. 1481–1493.
20. Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DADE polyimide matrix and fillers on tungsten dechalcogenide nanoparticles upon dry sliding friction / A.D. Breki, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, A.G. Kolmakov, N.N. Sergeyev, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, Y.A. Fadin // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Т. 7. № 4. P. 542–546.
21. Burnishing with wear-resistant mineral-ceramic and hard-alloy indenters / V.N. Gadalog, D.N. Romanenko, I.V. Vornacheva, A.E. Gvozdev, S.V. Kovalev // *Russian Engineering Research*. 2016. Т. 36. № 9. P. 731–734.
22. Исследование изнашивания стали ШХ15 в среде пластичных смазочных композиционных материалов, содержащих дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, Ю.А. Фадин, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев,

- С.Е. Александров, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.В. Малий // Технология металлов. 2016. № 7. С. 9–15.
23. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // Технология металлов. 2016. № 1. С. 23–32.
24. Вариант расчета максимального упрочнения малоуглеродистых сталей в процессах пластической деформации / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2016. № 7. С. 9–13.
25. Вытяжка с утонением анизотропного упрочняющего материала / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2016. № 4. С. 5–10.
26. Бреки А.Д., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г. Использование обобщенного треугольника Паскаля для описания колебаний силы трения материалов // Материаловедение. 2016. № 11. С. 3–8.
27. Сопряженные поля в упругих, пластических, сыпучих средах и металлических труднодеформируемых системах: монография / Э.С. Макаров, В.Э. Ульченкова, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев / под ред. А.Е. Гвоздева. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 526 с.
28. О состоянии предпревращения металлов и сплавов: монография / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 245 с.
29. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshv, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. T. 8. № 1. С. 148–152.
30. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. T. 8. № 1. С. 126–129.
31. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. T. 8. № 1. С. 32–36.
32. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. T. 8. № 1. С. 56–59.
33. Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов «ЛИТОЛ 24 – частицы гидросиликатов магния» / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, С.Е. Александров, Д.А. Провоторов // Материаловедение. 2017. № 3. С. 38–42.
34. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeyev, O.M. Gubanov // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. № 6. P. 399–411.

35. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // *Материаловедение*. 2017. № 7. С. 11–22.

REFERENCES

1. Makarov, E.S. & Gvozdev, A.E. 2000, “*The Theory of Plasticity Dilatating Media*”, Moscow-Tula. Izdatelstvo “Grif i K”, 358 p.
2. Mitina, B.S. 1987, “*Powder Metallurgy and Spraying Coatings*”, M. Metallurgiya, 792 p.
3. Krylov, V.I. 1959, “*Approximate Calculation of Integrals*”, M. Fizmatgiz, 328 p.
4. Fikhtengolts, G.M. 1970, “*Course of Differential and Integral Calculus*”, M. Nauka, 800 p.
5. Yanke, E. & Emde, F. 1949, “*Tables of Functions with Formulas and Curves*”, M.: Gostekhizdat, 420 p.
6. Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., Kuzovleva, O.V., Sergeev, N.N. & Tihonova, I.V. 2013, “Mechanical Properties of Structural and Tool Steels in the State of Pre-Transformation Under Thermomechanical Action”, *Deformation and destruction of materials*, no. 11, pp. 39–42.
7. Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., Malyarov, A.V., Sergeev, N.N. & Tihonova, I.V. 2013, “Heterogeneous Nucleation of Graphite in Carbon Steels During the Decomposition of Cementite in the Process of TCT near the Point A0”, *Materialovedenie*, no. 10, pp. 48–52.
8. Gvozdev, A.E., Shkatov, M.I. & Lukin, A.S. 2013, “Evolution of Microstructure in the Development of Dynamic Recrystallization During Hot Rolling of Structural Steel”, *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, no. 10, pp. 31–34.
9. Barchukov, D.A., Romanenko, D.N. & Gvozdev, A.E. 2014, “Investigation of the Possibility of Hardening of High-Speed Steel as a Result of High-Temperature Tempering After Surface Plastic Deformation”, *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, no. 9, pp. 3–6.
10. Gvozdev, A.E., Minaev, I.V., Sergeev, N.N., Kolmakov, A.G., Provotorov, D.A. & Tikhonova, I.V. 2015, “Grain Size Effect of Austenite on the Kinetics of Pearlite Transformation in Low-And Medium-Carbon Low-Alloy Steels”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 6, no. 1, pp. 41–44.
11. Gvozdev, A.E. Bogolyubova, D.N., Sergeev, N.N., Kolmakov, A.G., Provotorov, D.A. & I.V. Tikhonova 2015, “Features of Softening Processes of Aluminum, Copper, and Their Alloys Under Hot Deformation”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 6, no. 1, pp. 32–40.
12. Gvozdev, A.E., Golyshev, I.V., Minayev, I.V., Sergeyev, A.N., Sergeyev, N.N., Tikhonova, I.V., Khonelidze, D.M. & Kolmakov, A.G. 2015, “Multiparametric Optimization of Laser Cutting of Steel Sheets”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 6, no. 4, pp. 305–310.
13. Gvozdev, A.E., Sergeyev, N.N., Minayev, I.V., Kolmakov, A.G. & Tikhonova, I.V. 2015, “Role of Nucleation in the of First-Order Phase Transformation”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 6, no. 4, pp.283–288.
14. Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., Provotorov, D.A., Sergeev, N.N. & Bogolyubova, D.N. 2015, “Dependence of Superplasticity Indices of Hard-Deformed Steels P6M5 and 10P6M5-MP from the Stress State Scheme”, *Deformation and destruction of materials*, no. 11, pp. 42–46.

15. Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M. & Kolmakov, A.G. 2015, "Formation of Mechanical Properties of Carbon Steels in Drawing Processes with Thinning", *Metals Technology*, no. 11, pp. 17–29.
16. Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N. & Provotorov, D.A. 2015, "Influence of Deformation Damage on the Formation of Mechanical Properties of Low-Carbon Steels", *Rolled Products Manufacturing*, no. 12, pp. 9–13.
17. Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N., Zolotukhin, V.I. & Provotorov, D.A. 2015, "Statement of the Problem of Calculating the Deformability of Metals and Alloys", *Rolled Products Manufacturing*, no. 10, pp. 18–26.
18. Gvozdev, A.E., Golyshev, I.V., Minayev, I.V., Sergeyev, A.N., Sergeyev, N.N., Tikhonova, I.V., Khonelidze, D.M. & Kolmakov, A.G. 2015, "Multiparametric Optimization of Laser Cutting Parameters for Steel Sheets", *Materialovedenie*, no. 2, pp. 31–36.
19. Zhuravlev, G.M., Sergeyev, A.N., Gvozdev, A.E., Sergeyev, N.N., Privalov, A.N. & Provotorov, D.A. 2016, "To the Effective Properties Estimation of Materials", *IEJME: Mathematics Education*, vol. 11, no. 6, pp. 1481–1493.
20. Breki, A.D., Vasilyeva, E.S., Tolochko, O.V., Didenko, A.L., Kudryavtsev, V.V., Kolmakov, A.G., Sergeyev, N.N., Gvozdev, A.E., Starikov, N.E., Provotorov, D.A. & Fadin, Y.A. 2016, "Synthesis and Tribotechnical Properties of Composite Coatings with PM-DADE Polyimide Matrix and Fillers on Tungsten Dechalcogenide Nanoparticles Upon Dry Sliding Friction", *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 7, no. 4, pp. 542–546.
21. Gadalov, V. N., Romanenko, D. N., Vornacheva, I. V., Gvozdev, A. E. & Kovalev, S. V. 2016, "Burnishing with Wear-Resistant Mineral-Ceramic and Hard-Alloy Indenters", *Russian Engineering Research*, vol. 36, no. 9, pp. 731–734.
22. Medvedeva, V.V., Breki, A.D., Krylov, N.A., Fadin, Yu.A., Starikov, N.E., Gvozdev, A.E., Aleksandrov, S.E., Sergeev, A.N., Provotorov, D.A. & Maliy, D.V. 2016, "The Study of Wear of SHH15 Steel in a Medium of Plastic Lubricating Composite Materials Containing Dispersed Particles of a Layer-Modifying Friction Modifier", *Metals Technology*, no. 7, pp. 9–15.
23. Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M., Kolmakov, A.G., Provotorov, D.A. & Sergeev, N.N. 2016, "Calculation of Deformation Damageability in the Processes of Reverse Extrusion of Metal Products", *Metals Technology*, no. 1, pp.23–32.
24. Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N. & Provotorov, D.A. 2016, "The Calculation of Maximum Hardening of Low Carbon Steels in Plastic Deformation Processes", *Rolled Products Manufacturing*, no. 7, pp. 9–13.
25. Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., Zolotukhin, V.I. & Provotorov, D.A. 2016, "Extraction with Thinning of Anisotropic Reinforcing Material", *Rolled Products Manufacturing*, no. 4, pp. 5–10.
26. Breki, A.D., Gvozdev, A.E. & Kolmakov, A.G. 2016, "Using the generalized Pascal triangle for describing the friction oscillations of materials", *Materialovedenie*, no. 11, pp. 3–8.
27. Makarov, E.S., Ul'chenkova, V.E., Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N. & Sergeev, A.N. 2016, "Conjugate Fields in Elastic, Plastic, Bulk Media and Metallic Hard-Deformed Systems", Izdatel'stvo TulGU, Tula, 526 p.
28. Kuzovleva, O.V., Gvozdev, A.E., Tikhonova, I.V., Sergeev, N.N., Breki, A.D., Starikov, N.E., Sergeev, A.N., Kalinin, A.A., Maliy, D.V., Titova, Yu.E., Aleksandrov, S.E. & Krylov, N.A.

- 2016, “*On the State of the Pre-Transformation of Metals and Alloys*”, Izdatel'stvo TulGU, Tula, 245 p.
29. Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N., Minayev, I.V., Tikhonova, I.V., Sergeev, A.N., Khonelidze, D.M., Maliy, D.V., Golyshev, I.V., Kolmakov, A.G. & Provotorov, D.A. 2017, “Temperature Distribution and Structure in the Heat-Affected Zone for Steel Sheets After Laser Cutting”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 8, no. 1, pp. 148–152.
 30. Breki, A.D., Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., Starikov, N.E., Provotorov, D.A., Sergeev, N.N. & Khonelidze, D.M. 2017, “On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 8, no. 1, pp. 126–129.
 31. Breki, A.D., Didenko, A.L., Kudryavtsev, V.V., Vasilyeva, E.S., Tolochko, O.V., Kolmakov, A.G., Gvozdev, A.E., Provotorov, D.A., Starikov, N.E. & Fadin, Yu.A. 2017, “Synthesis and Dry Sliding Behavior of Composite Coating with (R-OOO)FT Polyimide Matrix and Tungsten Disulfide Nanoparticle Filler”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 8, no. 1, pp. 32–36.
 32. Breki, A.D., Didenko, A.L., Kudryavtsev, V.V., Vasilyeva, E.S., Tolochko, O.V., Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N., Provotorov, D.A., Starikov, N.E., Fadin, Yu.A. & Kolmakov, A.G. 2017, “Composite Coatings Based on A-OOO Polyimide and WS₂ Nanoparticles with Enhanced Dry Sliding Characteristics”, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 8, no. 1, pp. 56–59.
 33. Breki, A.D., Medvedeva, V.V., Krylov, N.A., Kolmakov, A.G., Fadin, Yu.A., Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N., Aleksandrov, S.E. & Provotorov, D.A. 2017 “Antiwear Properties of Grease Plastic Composites “LITOL 24 – Particles of Magnesium Hydrosilicates”, *Materialovedenie*, no. 3, pp. 38–42.
 34. Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., Cheglov, A.E., Sergeev, N.N. & Gubanov, O.M. 2017 “Maximum Plastic Strengthening in Tool Steels”, *Steel in Translation*, vol. 47, no. 6, pp. 399–411.
 35. Baranov, V.P., Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., Sergeev, N.N. & Chukanov, A.N. 2017, “Multi-Level Approach to the Problem of Delayed Destruction of High-Strength Structural Steels Under the Influence of Hydrogen”, *Materialovedenie*, no. 7, pp. 11–22.