



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.01

УДК 621.771

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И УСИЛИЯ ДЕФОРМАЦИИ ШАРООБРАЗНЫХ ЗАГОТОВОК В ЗАКРЫТОЙ МАТРИЦЕ

Ж.А. Ашкеев<sup>1</sup>, В.А. Андреященко<sup>2</sup>, М.Ж. Абишкенов<sup>1</sup>, Ж.У. Буканов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

<sup>2</sup>Екибастузский инженерно-технический институт им. акад. К. Сатпаева, Экибастуз, Казахстан

<sup>3</sup>Карагандинский технический университет, Караганда, Казахстан

### О СТАТЬЕ

Получена: 22 апреля 2021 г.  
Принята: 11 декабря 2021 г.  
Опубликована: 30 декабря 2021 г.

#### Ключевые слова:

деформация, равноканальное угловое прессование, напряженное состояние, компьютерное моделирование, линии скольжения, усилие деформации, интенсивная пластическая деформация.

### АННОТАЦИЯ

На современном этапе развития науки и техники актуальной является проблема повышения качества металлоизделий путем интеграции методов интенсивного пластического деформирования в действующие технологические процессы. Интенсивное пластическое деформирование позволяет получать высококачественные наноструктурированные металлические материалы с привлекательным комплексом свойств за счет насыщения металла дефектами наноуровня. Заготовки с шарообразным утолщением с двумя отрогками по краям являются распространенной формой металлопродукции. Для изготовления таких металлоизделий использован эффект взаимного влияния всестороннего сжатия и равноканального углового прессования в устройстве для реализации равноканального углового прессования в закрытой матрице.

Разработан теоретический подход к определению напряженного состояния и усилия деформации шарообразных заготовок в закрытой матрице. Для этого использовали комплексный подход определения напряженного состояния и усилия деформирования методом линий скольжения и компьютерного моделирования в программном комплексе Deform-3D. Анализ результатов напряженного состояния заготовок, полученных методом линий скольжения, показал, что формируется равномерное напряженное состояние с преобладанием максимальных сжимающих напряжений. Сочетание последних с угловым выдавливанием металла в боковые каналы матрицы прогнозирует получение заготовок с субультрамелкозернистой и/или наноструктурой.

Методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности, а также компьютерного моделирования определено деформирующее усилие заготовок на конечной стадии деформирования при вытекании металла в боковые каналы матрицы. Анализ полученных результатов показывает, что значение усилия деформирования, полученное двумя методами, является сопоставимым с отличием до 2 %, что подтверждает правильность полученных данных.

© ПНИПУ

© Ашкеев Жасулан Аманжолович – к.т.н., доц., e-mail: [jashkeev@mail.ru](mailto:jashkeev@mail.ru), ID: 0000-0001-8992-3984.

Андреященко Виолетта Александровна – к.т.н., доц., e-mail: [Vi-ta.z@mail.ru](mailto:Vi-ta.z@mail.ru), ID: 0000-0001-6933-8163.

Абишкенов Максат Жарылгасынович – магистр, e-mail: [maks91.kz@inbox.ru](mailto:maks91.kz@inbox.ru).

Буканов Жанат Умиртаевич – магистр, e-mail: [heissen69@mail.ru](mailto:heissen69@mail.ru), ID: 0000-0001-6652-3654.

Zhassulan A. Ashkeyev – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [jashkeev@mail.ru](mailto:jashkeev@mail.ru), ID: 0000-0001-8992-3984.

Violetta A. Andreyachshenko – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [Vi-ta.z@mail.ru](mailto:Vi-ta.z@mail.ru), ID: 0000-0001-6933-8163.

Maksat Zh. Abishkenov – Master, e-mail: [maks91.kz@inbox.ru](mailto:maks91.kz@inbox.ru).

Zhanat U. Bukanov – Master, e-mail: [heissen69@mail.ru](mailto:heissen69@mail.ru), ID: 0000-0001-6652-3654.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## DETERMINATION OF THE STRESS STATE AND THE FORCE OF DEFORMATION OF BALL-SHAPED BILLETS IN A CLOSED MATRIX

Z.A. Ashkeyev<sup>1</sup>, V.A. Andreyachshenko<sup>2</sup>, M. Abishkenov<sup>1</sup>, Z.U. Bukanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Karaganda Industrial University

<sup>2</sup>Ekibastuz Engineering Technical Institute named after the academician K. Satpayev

<sup>3</sup>Karaganda Technical University

### ARTICLE INFO

Received: 22 April 2021  
Accepted: 11 December 2021  
Published: 30 December 2021

#### Keywords:

deformation, equal channel angular pressing, stress state, computer simulation, sliding lines, deformation force, severe plastic deformation.

### ABSTRACT

At the present stage of development of science and technology, the problem of improving the quality of metal products by integrating methods of severe plastic deformation into existing technological processes is urgent. Intense plastic deformation makes it possible to obtain nanostructured metallic materials with improved quality and an attractive set of properties due to the saturation of the metal with nanoscale defects. Spherical billets with two ends along the edges are a common form of metal products. For the manufacture of such metal products, the effect of mutual influence of all-round compression and ECAP pressing in a device for the implementation of equal-channel angular pressing in a closed matrix was used.

The purpose of this study is to develop a theoretical approach to determining the stress state and deformation force of spherical blanks in a closed matrix. To achieve this goal, an integrated approach was used to determine the stress state and deformation force by the method of slip lines and computer simulation in the Deform-3D software package. Analysis of the results of the stress state of the workpieces obtained by the slip line method showed that a uniform stress state is formed with a predominance of the maximum compressive stresses. The combination of the latter with angular metal extrusion into the lateral channels of the matrix predicts the production of workpieces with sub-ultrafine-grained and/or nanostructure.

By the method of joint solution of differential equations of equilibrium and plasticity conditions, as well as computer modeling, the deforming force of the blanks at the final stage of deformation, when the metal flows out into the lateral channels of the matrix, is determined. The analysis of the obtained results shows that the value of the deformation force obtained by the two methods is comparable with a difference of up to 2 %, which confirms the correctness of the obtained values.

© PNRPU

### Введение

Интенсификация исследований в области машиностроения и металлургии формирует потребность в технологиях, обеспечивающих новый уровень технико-эксплуатационных свойств металлоизделий. В первом упрощении, последнее регламентируется уровнем и соотношением прочностных и пластических характеристик. Известно [1], что существенного увеличения прочности металлов и сплавов можно достичь двумя основными путями:

- 1) снижением количества несовершенств кристаллического строения;
- 2) насыщением дефектами наноуровня, препятствующими движению дислокаций.

Стоит отметить, что наибольшую эффективность и распространенность при реализации второго метода упрочнения получили методы интенсивного пластического деформирования [2–10].

Материалы, полученные методами интенсивного пластического деформирования (ИПД), обладают повышенным уровнем прочностных характеристик [11, 12], достаточной пластичностью [13, 14], высокими коррозионной стойкостью [15, 16], ударной вязкостью, износостойкостью и др. [17, 18]. Такие материалы обладают, как правило, субультрамелкозернистой (СУМЗ) и/или наноструктурой [19, 20].

Внедрение инновационных методов ИПД в типовой технологический процесс получения различных металлоизделий уже имеет подтвержденный опыт. Однако эта интеграция связана с рядом ограничений. Основные ограничивающие факторы и пути их преодоления приводят авторы работы [21, 22]. В работе [23] выполнена оценка возможности интеграции технологии равноканального углового прессования в метизное производство. Авторами работы [24] ведется разработка группы импортозамещающих сплавов для производства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката, причем реализация технологии планируется на действующем толстолистовом стане 5000. Обработку методами ИПД трубных заготовок предлагают авторы работы [25].

Таким образом, разработка новых инновационных технологий, способных к эффективной интеграции в действующее производство, и обеспечивающих придание уникальных свойств получаемым материалам и металлоизделиям является актуальной, требующей поиска новых путей проблемой.

### 1. Материалы и методы

Цель настоящего исследования заключается в разработке теоретического подхода к определению напряженного состояния и усилия деформации шарообразных заготовок в закрытой матрице.

Получение поковок с формой и размерам, максимально приближенной к форме готовых изделий, обеспечивает снижение затрат на производство металлопродукции. Следует отметить, что в формообразующих штампах невозможно реализовать многоцикловую обработку для получения качественных поковок и деталей. Поковки после горячей объемной штамповки имеют волокнистую структуру, часто на участках облоя наблюдаются перерезанные волокна. Поэтому для придания поковке и соответственно деталям требуемых свойств целесообразно применение предварительной многоциклового обработки.

Широкое распространение в технике имеют изделия с утолщениями на одном или двух участках исходной заготовки, например заготовки с шарообразным утолщением с двумя отростками по краям. Для изготовления таких металлоизделий и в целях развития интеграции процессов наноструктурирования в промышленное производство решено использовать эффект взаимного влияния всестороннего сжатия и равноканального углового прессования (РКУП) в ранее разработанном устройстве для реализации РКУП в закрытой матрице [26].

Закрытая трехканальная матрица для многоциклового обработки исходных заготовок состоит из следующих элементов: обоймы (на рисунке не показана); сферических полуматриц 1 и 2; 3 – боковых пуансонов; 4 – центрального пуансона (рис. 1).

Многоцикловая обработка заготовок в закрытой трехканальной матрице осуществляется следующим образом:

а) цилиндрическая заготовка 5 устанавливается в нижнюю полость полуматрицы 2 через верхнее отверстие полуматрицы 1;

б) затем верхним центральным пуансоном заготовка осаживается до заполнения полости полуматрицы и вытекания излишка металла в боковые отверстия;

в) после штамповая оснастка кантуется на  $90^0$ , и вытесненный металл в боковые отверстия деформируется в обратном направлении, с вытеканием металла в верхнее отверстие полуматрицы.

Далее цикл деформирования повторяется до получения субультрамелкозернистой и/или наноструктуры.

## 2. Описание эксперимента

В исследовании используются матрицы и заготовки со следующими размерами: радиус шара равен 15 мм, диаметры отростков равны  $d_{от} = 20$  мм, диаметр исходной заготовки  $d_3 = 20$  мм.

Объем исходной заготовки  $V_3$  определяем через объем шара  $V_{ш}$ , с учетом объемов отростков  $V_{от}$ , вытекающих в отверстия, т.е.

$$V_3 = V_{ш} + V_{от},$$

Отсюда объем исходной заготовки равен:

$$V_3 = (4/3) \pi R^3 + 3 (\pi/4) d_{от} h_{от},$$

где  $R$  радиус шара, который равен 15 мм, диаметры отростков равны  $d_{от} = 20$  мм, высота отростков составляет  $h_{от} = 10$  мм, тогда, подставляя эти значения, получим:

$$V_3 = 23550 \text{ мм}^3.$$

Принимая диаметр исходной заготовки  $d_3 = 20$  мм, высота исходной заготовки  $h_3$  будет равна:

$$h_3 = V_3 / F_3 = 75 \text{ мм}.$$

Таким образом, для обработки шарообразных заготовок принимаем исходную заготовку размерами  $d_3 = 20$  мм,  $h_3 = 75$  мм.

Возможность получения заготовок с СУМЗ или НС можно предварительно спрогнозировать путем оценки напряженного состояния в очаге пластической деформации при деформировании в закрытой трехканальной матрице.

Для этого строим поле линий скольжения (л.с.) в очаге пластической деформации заготовки в момент вытеснения металла в боковые отверстия матрицы (рис. 1).

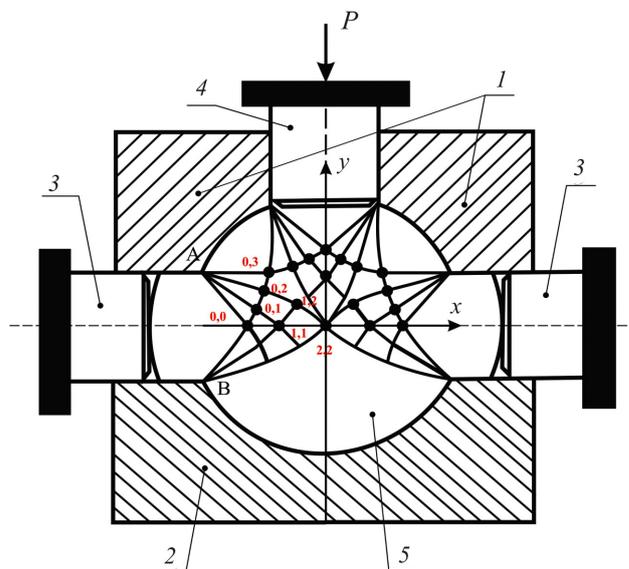


Рис. 1. Закрытая матрица для деформирования заготовки и поле линий скольжения в очаге пластической деформации:

1 – верхний полусферический штамп; 2 – нижний полусферический штамп; 3 – боковые пуансоны; 4 – верхний пуансон; 5 – заготовка

Fig. 1. Closed matrix for deformation of the workpiece and the field of sliding lines in the focus of plastic deformation:

1 – upper hemispherical stamp; 2 – lower hemispherical stamp; 3 – side punches; 4 – top punch; 5 – blank

На выходе металла из очага деформации в боковые отверстия матрицы, т.е. на участке А и В, нормальные напряжения определим из следующего условия:

$$\sigma_x = 0, \sigma_y = -\sigma_T^*.$$

Среднее напряжение на этом участке:  $\sigma_{cp} = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 = -0,5\sigma_T^*$ , где  $\sigma_T^*$  – сопротивление деформации металла при определенных деформационно-скоростных и температурных условиях.

Среднее напряжение в соседних узловых точках 0,1; 0,2 и 0,3 определим через соотношения Генки [27]:

$$\sigma_{0,i} = \sigma_{00} - 2k (\Delta\theta),$$

где  $\sigma_{0,i}$  – среднее напряжение в узловых точках 0.i поля л.с.,  $i = 1,2,3\dots$ , например,  $\sigma_{01}$  и  $\sigma_{0,2}$  среднее напряжение вдоль узловых точек 0,1 и 0,2;  $k$  – постоянная пластичности или предел текучести на сдвиг;  $\Delta\theta$  – шаг угла поворота л.с. при переходе от одной узловой точки к другой, например, при переходе из точки 0,0 в точку 0,1 шаг будет равен  $\Delta\theta = \theta_{0,1} - \theta_{0,0} = \frac{\pi}{12}$  рад., где  $\theta_{0,1}$  и  $\theta_{0,0}$  – соответственно углы наклона л.с. к главным осям в узловых точках 0,1 и 0,0. Отсюда среднее напряжение в узловой точке 0,1 составляет:

$$\sigma_{01} = -0,5\sigma_{\tau}^* - 2k (\Delta\theta), \text{ в остальных узловых точках:}$$

$$\sigma_{0,i} = -0,5\sigma_{\tau}^* - 2k \cdot \Delta\theta = -\sigma_{\tau}^* (0,5 + \frac{i\pi}{12}).$$

Постоянную пластичности  $k$  выразим через сопротивление деформации  $\sigma_{\tau}^*$ , т.е. через соотношение  $k = 0,5 \cdot \sigma_{\tau}^*$ . Сопротивление деформации определим через предел текучести материала  $\sigma_{\tau}$  и соответствующие коэффициенты с помощью соотношения:  $\sigma_{\tau}^* = \sigma_{\tau} \cdot n_{\epsilon} \cdot n_{\sigma} \cdot n_{\beta}$ , где  $n_{\epsilon}$  – деформационный коэффициент,  $n_{\sigma}$  – коэффициент, учитывающих схему напряженного состояния,  $n_{\beta}$  – коэффициент, учитывающий схему плоского деформированного состояния, равный 1,15 (коэффициент Лодэ). Предел текучести алюминиевой заготовки принимаем в пределах 57–63 МПа. Тогда, умножая соответствующие значения коэффициентов на  $\sigma_{\tau}$ , получим:

$$\sigma_{\tau}^* = 63 \cdot 1,5 \cdot 1,4 \cdot 1,15 = -152,145 \text{ МПа.}$$

Отсюда среднее напряжение в узловых точках 0,1; 0,2 и 0,3 после подстановки значения сопротивления деформации составит:

$$\sigma_{0,1} = -\sigma_{\tau}^* (0,5 + \frac{\pi}{12}) = -115,8 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{0,2} = -\sigma_{\tau}^* (0,5 + \frac{2\pi}{12}) = -178,57 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{0,3} = -\sigma_{\tau}^* (0,5 + \frac{3\pi}{12}) = -195,50 \text{ МПа.}$$

Анализ результатов показывает, что в очаге деформации преобладают сжимающие напряжения, что способствует интенсификации пластической деформации и прогнозирует эффективное измельчение зерен металла. При этом средние значения напряжений в зонах заготовки от выхода в боковые каналы матрицы и до центральной зоны заготовки увеличиваются. Возникновение в очаге деформаций, в частности в центральной зоне, сжимающих напряжений вполне справедливо, так как металл будет находиться в состоянии всестороннего сжатия со стороны стенок матрицы. Сочетание эффекта всестороннего сжатия и углового выдавливания металла

в боковые каналы матрицы способствует получению СУМЗ и НС заготовок.

Следующим этапом исследования напряженного состояния металла при деформировании в закрытой матрице является компьютерное моделирование. На рис. 2 приведены результаты компьютерного моделирования процесса деформирования заготовок в трехканальной закрытой матрице. Из данных рис. 2 можно заметить идентичность формы очага деформации, построенного методом линий скольжения и полученного компьютерным моделированием. Значения средних напряжений, полученные методом линий скольжения и компьютерным моделированием, находятся в сопоставимом диапазоне и показывают хорошую сходимость. В очаге деформации преобладают сжимающие напряжения со значениями  $-63 \div -192$  МПа. Такой характер напряженного состояния является благоприятным для эффективного измельчения зерна в результате деформирования и, следовательно, улучшения комплекса механических и эксплуатационных характеристик получаемых металлоизделий.

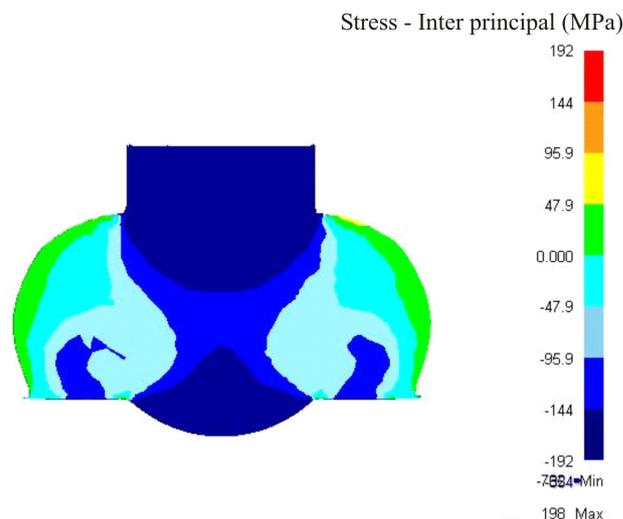


Рис. 2. Распределение среднего напряжения в очаге деформации, полученное компьютерным моделированием

Fig. 2. Distribution of mean stress in the deformation zone, obtained by computer simulation

Следующей задачей настоящего исследования является определение деформирующего усилия при деформации в закрытой матрице. Деформирующее усилие определяем в момент вытекания металла в боковые каналы матрицы, т.е. после заполнения всей полости матрицы металлом за счет воздействия верхнего пуансона, расположенного в верхнем отверстии полуматрицы.

Определение усилия деформирования на начальной стадии процесса нецелесообразно, так как на этой стадии осуществляется осаживание заготовки до полного заполнения полости матрицы и вытекания металла в боковые отверстия, в связи с чем усилие на начальном этапе деформирования будет недостаточным для преодоления сопротивления деформации на конечном этапе. Для определения усилия деформирования применим метод совместного решения дифференциальных уравнений и ус-

ловия пластичности [28]. Решение производим по методике А. Целикова, изложенное в работе [29], для определения контактных напряжений и усилия прокатки.

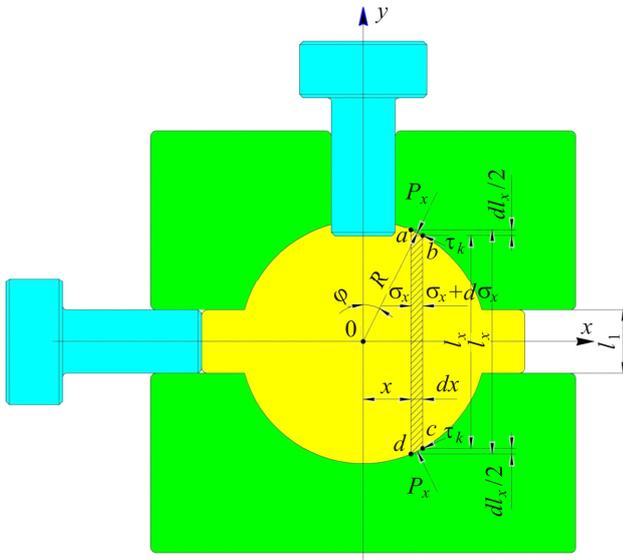


Рис. 3. Условия равновесия элемента *abcd* при определении усилия деформирования заготовки в закрытой матрице

Fig. 3. Equilibrium conditions for the *abcd* element in determining the deformation force of the workpiece in a closed matrix

Из уравнения равновесия элемента *abcd* (рис. 3), можно записать следующее:

$$\Sigma_x = 0. \sigma_x^* (l_x + dl_x) - (\sigma_x + d\sigma_x) l_x - 2\tau_k \cos\phi \frac{dx}{\cos\phi} -$$

$$2p_x \sin\phi \frac{dx}{\cos\phi} = 0, \text{ где } * (l_x + dl_x) = L_x \text{ (рис. 3).}$$

Раскрывая скобки, пренебрегая бесконечно малыми высшего порядка и после преобразования, получим:

$$\sigma_x dl_x - d\sigma_x l_x - 2\tau_k dx - 2p_x \operatorname{tg}\phi dx = 0.$$

Учитывая, что  $\operatorname{tg}\phi = \frac{dl_x}{2dx}$  и  $\tau_k = fp_x$ , получим:

$$\sigma_x dl_x - d\sigma_x l_x - 2fp_x dx - 2p_x \frac{dl_x}{2dx} dx = 0, \text{ сократив на } l_x:$$

$$\sigma_x \frac{dl_x}{l_x} - d\sigma_x - \frac{2fp_x dx}{l_x} - p_x \frac{dl_x}{l_x} = 0.$$

Заменяя дугу элемента хордой, из следующего геометрического соотношения  $l_x \approx R - 0,5 \frac{l_1}{R} x$ , определим

$dx = -\frac{2dl_x R}{l_1}$ , где  $2R = D$  – диаметр обрабатываемого шара, можно записать следующее:

$$\sigma_x \frac{dl_x}{l_x} - dp_x + 2fp_x \frac{D}{l_1} \frac{dl_x}{l_x} - p_x \frac{dl_x}{l_x} = 0.$$

Вводя следующее обозначение:  $s = \frac{2fD}{l_1}$ , а также используя условие пластичности:  $p_x - \sigma_x = \sigma_\tau^*$ , которое после

дифференцирования примет следующий вид:  $dp_x = d\sigma_x$ , подставляя в предыдущее уравнение, получим следующее:

$$(\sigma_x - p_x) \frac{dl_x}{l_x} - dp_x + p_x s \frac{dl_x}{l_x} = 0, \text{ после преобразования}$$

можно представить так:

$$(p_x s - \sigma_m^*) \frac{dl_x}{l_x} - dp_x = 0, \text{ после разделения переменных}$$

и интегрирования примет вид:

$$(p_x s - \sigma_m^*) = C_0 l_x^s.$$

Постоянную  $C_0$  находим из следующих граничных условий: при  $l_x = 0,5 l_1$ ,  $p_x = -\sigma_\tau^*$ , выражая его из последнего и подставляя в предыдущее уравнение, окончательно получим:

$$p_x = -\frac{\sigma_m^*}{s} \left[ (s+1) \left( \frac{2l_x}{l_1} \right)^s - 1 \right].$$

Таким образом, получили уравнение, описывающее распределение контактных напряжений для диапазона заготовки от области выхода металла в боковые отверстия полуматриц до контактной поверхности верхнего пуансона. Допустим, обрабатывается шарообразная заготовка диаметром  $D = 35$  мм. Например, при  $l_x = 0,5 l_1 = 0,5 \cdot 25 = 12,5$  мм,  $p_x = -\sigma_\tau^* = -174,5$  МПа, при  $l_x = R = 17,5$  мм,  $f = 0,5$ ,  $s = 1,4$ , контактное давление на верхнем пуансоне составит:  $p_x = 354,5 \approx 355$  МПа. Тогда полное усилие деформирования шара в закрытой матрице составит  $P = p_x \cdot F_k$ , где  $F_k = \frac{\pi}{4} (d_n)^2$  – площадь

контактной поверхности шара и верхнего пуансона.

Тогда  $P = 355 \cdot 0,785 \cdot 25^2 = 174171,875$  Н.

Полученное максимальное значение усилия деформирования на пуансоне (174171,875 Н), т.е. произведение контактного давления на пуансоне на площадь пуансона, хорошо согласуется со значениями контактного давления и усилия деформирования (179000–171000 Н), полученными компьютерным моделированием (рис. 4).

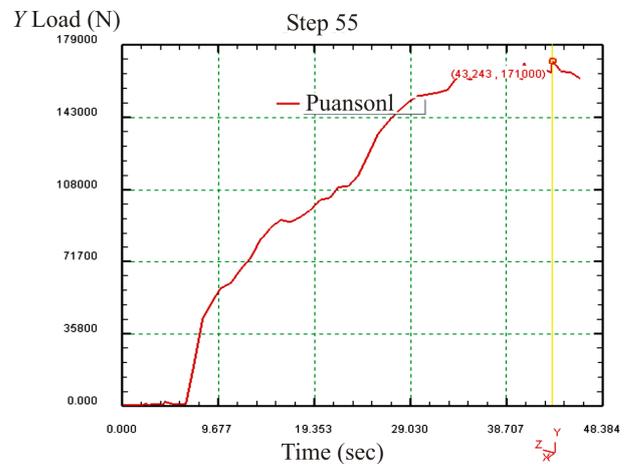


Рис. 4. Изменение контактного давления при перемещении пуансона

Fig. 4. Change in contact pressure by moving the punch

Для решения рассматриваемой задачи существует возможность использования вариационных и других математических методов, которые также хорошо себя зарекомендовали и показывают хорошую сходимость результатов, что отражено в работе [30].

## Заключение

Выполнена оценка напряженного состояния заготовок (шаров) при всестороннем сжатии и угловом выдавливании металла в боковые каналы закрытой матрицы, определено деформирующее усилие заготовок на конечном этапе деформирования. Анализ результатов напряженного состояния заготовок, полученных методом линий скольжения, показывает формирование в объеме заготовки преимущественно сжимающих напряжений. Взаимное влияние условий всестороннего сжатия с угловым выдавливанием металла в боковые каналы матрицы прогнозирует получение заготовок с СУМЗ или НС.

## Библиографический список

1. Матасов А.В., Челноков В.В., Авдеевкова Т.С. Перспективы внедрения объемных наноструктурированных металлических материалов, полученных при кристаллизации в нестационарных условиях поля центробежных сил и среды // Сборник трудов научной конференции академии МАСИ «Системный подход для разработки высоко энергоресурсоэффективных технологий экологически безопасного производства продуктов с высокой добавленной стоимостью, утилизации и переработки отходов» // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2019. – Т. 21. – С. 9–20.
2. Naizabekov A., Andreyachshenko V., Kliber J. Forming of microstructure of the Al – Si – Fe – Mn system alloy by equal channel angular pressing with backpressure // Conf. Proc. 21st International Conference on Metallurgy and Materials (Metal-2012), edited by Tanager (Brno Czech Republic, 2012). – 2012. – P. 391–395.
3. Дорофеев О.В., Курдюмова Л.Н., Родин Н.Н. Формирование градиентных субмикронных и нанокристаллических структур в объемных конструкционных материалах // Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования, металлдеформ – 2009. – 2009. – С. 229–232.
4. Andreyachshenko V.A., Naizabekov A.B. Microstructural and mechanical characteristics of AlSiMnFe alloy processed by equal channel angular pressing // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55, № 3. – P. 353–356.
5. Andreyachshenko V. Evolution of Al – Si – Mn – Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure // Materials Letters. – 2019. – Vol. 254. – P. 433–435.
6. Andreyachshenko V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55, № 4. – P. 829–831.
7. The effect of initial strain in the severe plastic deformation of aluminum on the subsequent work hardening regeneration through low strain amplitude multi-directional forging / C.G. de Faria [et al.] // Materials Letters. – 2021. – Vol. 290. – P. 129462. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129462>

Методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности, а также методом компьютерного моделирования определено деформирующее усилие заготовок на конечном этапе деформирования, т.е. при вытекании металла в боковые каналы матрицы. Анализ полученных результатов показывает, что значение усилия деформирования, полученное двумя методами, имеет хорошую сходимость, отклонение составляет менее 2 %, что подтверждает правильность полученных результатов и возможность их дальнейшего использования для технологических расчетов.

Таким образом, показана возможность интеграции интенсивного пластического деформирования методом деформации в закрытой матрице в действующий технологический процесс. Описан теоретический подход к определению напряженного состояния и усилия деформации. Полученные результаты показывают перспективность рассмотренного метода для получения субультрамелкозернистых и наноструктурных материалов с высоким уровнем механических и эксплуатационных характеристик.

8. Experimental and modelling study of the grain refinement of Fe-30wt % Ni – Nb austenite model alloy subjected to severe plastic deformation process / D.S. Svyetlichnyy [et al.] // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 21, № 1. – P. 1–14.
9. Developing age-hardenable Al – Zr alloy by ultra-severe plastic deformation: Significance of supersaturation, segregation and precipitation on hardening and electrical conductivity / A. Mohammadi [et al.] // Acta Materialia. – 2021. – Vol. 203. – P. 116503. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.116503>
10. Segal V. modes and processes of severe plastic deformation (SPD) // Materials. – 2018. – Vol. 11, № 7. – P. 1175.
11. Dual rolls equal channel extrusion as unconventional SPD process of the ultralow-carbon steel: finite element simulation, experimental investigations and microstructural analysis / M.B. Jabłońska [et al.] // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 21, № 1. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00166-3>
12. A new combined SPD technique to improve mechanical properties and electrical conductivity of long-sized billets / E.V. Bobruk [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1014, № 1. – P. 012004. doi: 10.1088/1757-899X/1014/1/012004
13. Ductility and plasticity of ferritic-pearlitic steel after severe plastic deformation / J.A. Muñoz [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 805. – P. 140624. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140624>
14. Optimizing the strength and ductility of Cu – Al alloy by an ideal grain structure / H. Ran [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 807. – P. 140906. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140906>
15. Applying multi-pass friction stir processing to refine the microstructure and enhance the strength, ductility and corrosion resistance of WE43 magnesium alloy / A.R. Eivani [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – № 3. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.021>
16. Mediating the strength, ductility and corrosion resistance of high aluminum containing magnesium alloy by engineering

hierarchical precipitates / J. Sun [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 857. – P. 158277. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158277>

17. Microstructure, texture evolution and yield strength symmetry improvement of as-extruded ZK60 Mg alloy via multi-directional impact forging / C. Cui [et al.] // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2021. – № 1. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.01.001>

18. Resistance of surface nanostructures and ultrafine grain structures on steel 40Kh to wear and cavitation-erosive destruction / Kyryliv Y. [et al.] // *Applied Nanoscience*. – 2021. – P. 1–6.

19. Phase transformations induced by severe plastic deformation / A. Mazilkin [et al.] // *Materials transactions*. – 2019. – P. 1–11.

20. Edalati K. Metallurgical alchemy by ultra-severe plastic deformation via high-pressure torsion process // *Materials Transactions*. – 2019. – Vol. 60, № 7. – P. 1221–1229. <https://doi.org/10.2320/matertrans>

21. Чукин М.В., Полякова М.А., Гулин А.Е. Особенности влияния комбинирования различных видов пластической деформации на измельчение микроструктуры и механические свойства углеродистой проволоки // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 552–557. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-8-552-557>

22. Особенности структурообразования стальной углеродистой проволоки перлитного класса после комбинированной деформационной обработки / М.А. Полякова [и др.] // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2018. – № 10. – С. 74–81. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-10-74-81>

## References

1. Matasov A.V., Chelnokov V.V., Avdeenkova T.S. Prospects for the introduction of bulk nanostructured metallic materials obtained by crystallization under nonstationary conditions of the centrifugal force field and the environment [Perspektivy vnedreniya ob'emnykh nanostrukturirovannykh metallicheskih materialov, poluchennykh pri kristallizacii v nestacionarnykh usloviyakh polya centrobezhnykh sil i srede]. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii sistemnykh issledovanij. Informatika, ekologiya, ekonomika*, 2019, no. 21, pp. 9-20.

2. Naizabekov A., Andreyachshenko V., & Kliber J. Forming of microstructure of the Al – Si – Fe – Mn system alloy by equal channel angular pressing with backpressure. In *Conf. Proc. 21st International Conference on Metallurgy and Materials (Metal-2012)*, edited by Tanger, Brno Czech Republic, 2012, pp. 391-395.

3. Dorofeev O.V., Kurdyumova L.N., & Rodin N.N. Formirovanie gradientnykh submikro- i nanokristallicheskih struktur v ob'emnykh konstrukcionnykh materialah (Formation of gradient submicro- and nanocrystalline structures in bulk structural materials). *Metallofizika, mekhanika materialov, nanostruktur i processov deformirovaniya. METALLDEFORM-2009*, 2009, pp. 229-232.

4. Andreyachshenko V.A., & Naizabekov A.B. Microstructural and mechanical characteristics of AlSiMnFe alloy processed by equal channel angular pressing. *Metallurgija*, 2016, vol. 55 (3), pp. 353-356.

5. Andreyachshenko V. Evolution of Al – Si – Mn – Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure. *Materials Letters*, 2019, vol. 254, pp. 433-435.

6. Andreyachshenko, V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements. *Metallurgija*, 2016, vol. 55 (4), pp. 829-831.

23. Дорогобид В.Г., Долгий Д.К. Оценка возможности интегрирования процесса равноканального углового прессования в действующие технологические процессы метизного производства // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. – 2011. – № 1. – С. 122–126.

24. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2017. – Т. 15, № 2. – С. 85–88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88>

25. Sadasivan N., Balasubramanian M. Severe plastic deformation of tubular materials – process methodology and its influence on mechanical properties – a review // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.859>

26. Ашкеев Ж.А., Андрященко В.А., Абдираманов С.Т. Исследование процесса закрытой штамповки, реализующей интенсивные пластические деформации // *Обработка материалов давлением*. – 2018. – № 1. – С. 88–92.

27. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

28. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

29. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия. 1972. – 408 с.

30. Stress state and power parameters during pulling workpieces through a special die with an inclined working surface / Z. Ashkeyev [et al.] // *Engineering Solid Mechanics*. – 2021. – Vol. 9, № 2. – P. 161–176. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2020.12.003>

7. De Faria, C.G., Almeida, N.G.S., Balzuweit, K., Aguilar, M.T.P., Cetlin, P.R. The effect of initial strain in the severe plastic deformation of aluminum on the subsequent work hardening regeneration through low strain amplitude multi-directional forging. *Materials Letters*, 2021, vol. 290, pp. 129462. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129462

8. Svyetlichnyy, D. S., Majta, J., Kuziak, R., Muszka, K. Experimental and modelling study of the grain refinement of Fe-30wt% Ni-Nb austenite model alloy subjected to severe plastic deformation process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21 (1), pp. 1-14.

9. Mohammadi, A., Enikeev, N. A., Murashkin, M. Y., Arita, M., Edalati, K. Developing age-hardenable Al – Zr alloy by ultra-severe plastic deformation: Significance of supersaturation, segregation and precipitation on hardening and electrical conductivity. *Acta Materialia*, 2021, vol. 203, pp. 116503. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.116503

10. Segal, V. modes and processes of severe plastic deformation (SPD). *Materials*, 2018, vol. 11 (7), pp. 1175.

11. Jabłońska M.B., Kowalczyk K., Tkocz M., Bulzak T., Bednarczyk I., Rusz S. Dual rolls equal channel extrusion as unconventional SPD process of the ultralow-carbon steel: finite element simulation, experimental investigations and microstructural analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, vol. 21 (1), pp. 1-11. DOI: 10.1007/s43452-020-00166-3

12. Bobruk E.V., Botkin A.V., Murashkin M.Y., Raab G.I. A new combined SPD technique to improve mechanical properties and electrical conductivity of long-sized billets. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1014, no. 1, pp. 012004. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1757-899X/1014/1/012004

13. Jairo Alberto Muñoz, Tarek Khelfa, Alexander Komissarov, José-María Cabrera, Ductility and plasticity of ferritic-pearlitic steel

after severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 805, pp. 140624. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140624

14. Ran H., Jin R.R., Wang Y.F., Wang M.S., He Q., Guo F.J., Wen Y., Huang C.X., Optimizing the strength and ductility of Cu – Al alloy by an ideal grain structure, *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 807, pp. 140906. DOI: 10.1016/j.msea.2021.140906

15. Eivani A.R., Mehdizade M., Chabok S., & Zhou J. Applying multi-pass friction stir processing to refine the microstructure and enhance the strength, ductility and corrosion resistance of WE43 magnesium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, no. 3. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.021

16. Sun J., Xu B., Yang Z., Han J., Liang N., Han Y., Wu G. Mediating the strength, ductility and corrosion resistance of high aluminum containing magnesium alloy by engineering hierarchical precipitates. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 857, pp. 158277. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158277

17. Cui C., Zhang W., Chen W., He J., Chen X., Hou J. Microstructure, texture evolution and yield strength symmetry improvement of as-extruded ZK60 Mg alloy via multi-directional impact forging. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, no. 1. DOI: 10.1016/j.jma.2021.01.001

18. Kyryliv Y., Kyryliv V., Tsizh B., Maksymiv O. Resistance of surface nanostructures and ultrafine grain structures on steel 40Kh to wear and cavitation-erosive destruction. *Applied Nanoscience*, 2021, pp. 1-6.

19. Mazilkin, A., Straumal, B., Kilmametov, A., Straumal, P., & Baretzky, B. Phase transformations induced by severe plastic deformation. *Materials transactions*, 2019. P. 1-11.

20. Edalati, K. Metallurgical alchemy by ultra-severe plastic deformation via high-pressure torsion process. *Materials Transactions*, 2019, vol. 60, no. 7, pp. 1221-1229. DOI: 10.2320/matertrans

21. Chukin M.V., Polyakova M.A., Gulín A.E. Osobennosti vliyaniya kombinirovaniya razlichnyh vidov plasticheskoy deformatsii na izmel'chenie mikrostruktury i mekhanicheskie svoystva uglerodistoy provoloki (Features of the effect of combining various types of plastic deformation on microstructure refinement and mechanical properties of carbon wire). *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya Metallurgiya*, 2016, vol. 59 (8), pp. 552-557. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-552-557

22. Polyakova M.A., Narasimhan K., Prasad M., Pivovarova K.G., Gulín A.E., Efimova YU.YU. Osobennosti strukturoobrazovaniya stal'noj uglerodistoy provoloki perlitnogo klassa posle kombinirovannoy

deformatsionnoy obrabotki (Features of structure formation of pearlite grade steel carbon wire after combined deformation processing). *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*, 2018, vol. 10, pp. 74-81. DOI: 10.32339/0135-5910-2018-10-74-81

23. Dorogobid V.G., Dolgij D.K. Ocenka vozmozhnosti integrirovaniya processa ravnokanal'nogo ugloвого pressovaniya v dejstvuyushchie tekhnologicheskie processy metiznogo proizvodstva (Assessment of the possibility of integrating the process of equal channel angular pressing into the existing technological processes of hardware production). *Modelirovanie i razvitie processov OMD*, 2011, vol. 1, pp. 122-126.

24. Poleckov P.P., Hakimullin K., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Alekseev D. YU., Kuznecova A.S. Naznachenie i oblast' primeneniya ul'trahladostojkogo nanostrukturirovannogo listovogo prokata (Purpose and scope of ultra-cold-resistant nanostructured sheet metal). *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G I Nosova*, 2017, vol. 15 (2), pp. 85-88. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88

25. Sadasivan N., Balasubramanian M., Severe plastic deformation of tubular materials – Process methodology and its influence on mechanical properties – A review, *Materials Today: Proceedings*, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.859

26. Ashkeev ZH.A., Andreyashchenko V.A., Abdiramanov S.T. Issledovanie processa zakrytoj shtampovki, realizuyushchej intensivnye plasticheskie deformatsii (Investigation of the closed stamping process realizing severe plastic deformations), *Obrabotka materialov davleniem*, 2018, vol. 1, pp. 88-92.

27. Storozhev M.V., Popov E.A. Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 423 p.

28. Kolmogorov V.L. Mehanika obrabotki metallov davleniem [Mechanics of metal forming]. Moscow, Metallurgiya, 1986, 688 p.

29. Tomlenov A.D. Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov [The theory of plastic deformation of metals]. Moscow, Metallurgiya, 1972, 408 p.

30. Ashkeyev Z., Abishkenov M., Mashekov S., Kawalek A. Stress state and power parameters during pulling workpieces through a special die with an inclined working surface. *Engineering Solid Mechanics*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 161-176. DOI: 10.5267/j.esm.2020.12.003

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Financing.** The study was not sponsored.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.