

**МЕТОДИКА АНАЛИЗА БАЗЫ ДИАГРАММ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ
В ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ DEFORM-3D
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Д.С. Боярский

27107357711@mail.ru

SPIN-код: 7988-2142

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложенная методика является необходимым инструментом для обоснованного использования баз данных свойств материалов в программе Deform-3D при изучении разнообразных процессов пластического формообразования. Показано, что при построении баз данных использовались разнообразные модели упрочнения деформируемого тела. В частности, использовались линейная и степенная зависимости между напряжением и деформацией. Это позволяет более точно определить область использования диаграмм напряженно-деформированного состояния, предлагаемых программой Deform-3D. Установлены диаграммы напряженно-деформированного состояния для таких важных представителей, применяемых в производстве, как коррозионно-стойкая сталь AISI-316 (аналог 12X18H9T), титановый сплав Ti-6AL-4V (аналог BT-6), алюминиевые сплавы AL-5056 (аналог АМг5) и AISI-2024(аналог Д16Т).

Ключевые слова

Напряженно-деформированное состояние материала, диаграммы истинного и условного напряжения, коррозионно-стойкая сталь, титановые и алюминиевые сплавы, модели деформируемого тела, математические зависимости между напряжениями и деформациями, сжатие и растяжение цилиндрических образцов, конечноэлементная модель, программа Deform-3D

Поступила в редакцию 03.02.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Программно-математическая среда Deform-3D является мощным средством для изучения процессов пластического формообразования деталей [1]. Чтобы упростить пользователям работу, в программный продукт Deform-3D включена база диаграмм напряженно-деформированного состояния (НДС) для ряда зарубежных материалов. Для российских пользователей интернет-ресурсы предлагают аналогичные зарубежным отечественные материалы [2–5]. Благодаря использованию программы Deform-3D и схожих с ней по возможностям программ успешно исследованы такие важные технологические процессы, как вытяжка [6], штамповка свинцом [7], калибровка [8, 9] и др.

Известно, что диаграммы НДС существенно зависят от особенностей химического состава и термической обработки материала [10–13]. Поэтому применение встроенной базы диаграмм НДС может оказаться недостаточно обоснованным для изучения некоторых процессов пластического формообразования

деталей. Особенно это касается технологических процессов гибки, когда диапазон изменения напряжений включает как положительные, так и отрицательные значения напряжений [14]. В этих условиях крайне важно добиться соответствия диаграмм НДС, используемых в программе Deform-3D, экспериментальным данным во всем диапазоне их изменения.

Цель данной статьи — разработка методики установления свойств диаграммы НДС в программе Deform-3D по названию металлического сплава.

Для исследования свойств материалов, содержащихся в программе Deform-3D, предлагается следующая методика.

1. Принимаем, что исследуемый материал обладает достаточной пластичностью и диаграммы НДС для процессов одноосного растяжения и сжатия совпадают.

2. С помощью интернет-ресурса выбираем иностранный аналог исследуемого материала.

3. В программе Deform-3D подвергаем сжатию цилиндрический образец (рис. 1) диаметром D_0 и длиной $L_0 = \chi D_0$ (при практическом использовании алгоритма в данной статье принято, что $\chi \approx 1$).

4. Программа Deform-3D позволяет по названию материала задать его свойства, как это представлено на рис. 2, и даже проанализировать связь между НДС материала. При этом есть возможность задать дополнительно температуру материала и скорость его деформирования.

5. Цилиндрический образец разбиваем на конечные элементы (рис. 3), которые представляют собой тороидальные тела квадратного сечения.

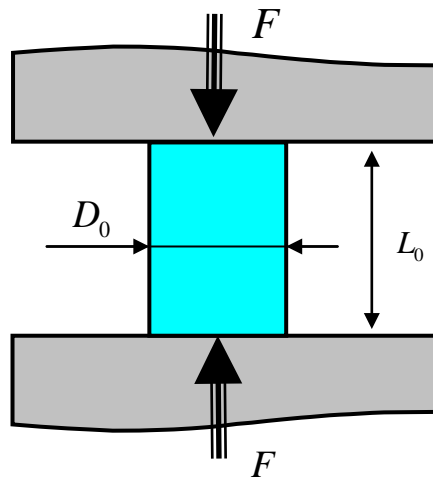


Рис. 1. Схема нагружения цилиндрического образца в программе Deform-3D

6. Принимаем отсутствие трения между плитами пресса и торцами образца, т. е. выбираем модель кулоновского трения с коэффициентом трения, равным нулю.

7. В процессе деформирования сетки конечно-элементной модели цилиндрического образца при обжатии в программе Deform-3D (рис. 3) фиксируем

изменение силы сжатия F , длины L , диаметра D и площади поперечного сечения S образца (рис. 4), которые соответственно измеряются в тоннах и миллиметрах.

8. Определяем функциональную зависимость истинного напряжения $\sigma = F/S$ от логарифмической деформации

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{S}{S_0}\right). \quad (*)$$

9. Принимая независимость диаграммы НДС от характера деформирования (сжатия или растяжения) и учитывая соотношение (*), определяем диаграмму условных напряжений при растяжении:

$$\sigma_{\text{раст}}^y = \frac{F}{S_0} = \sigma \exp(-\varepsilon).$$

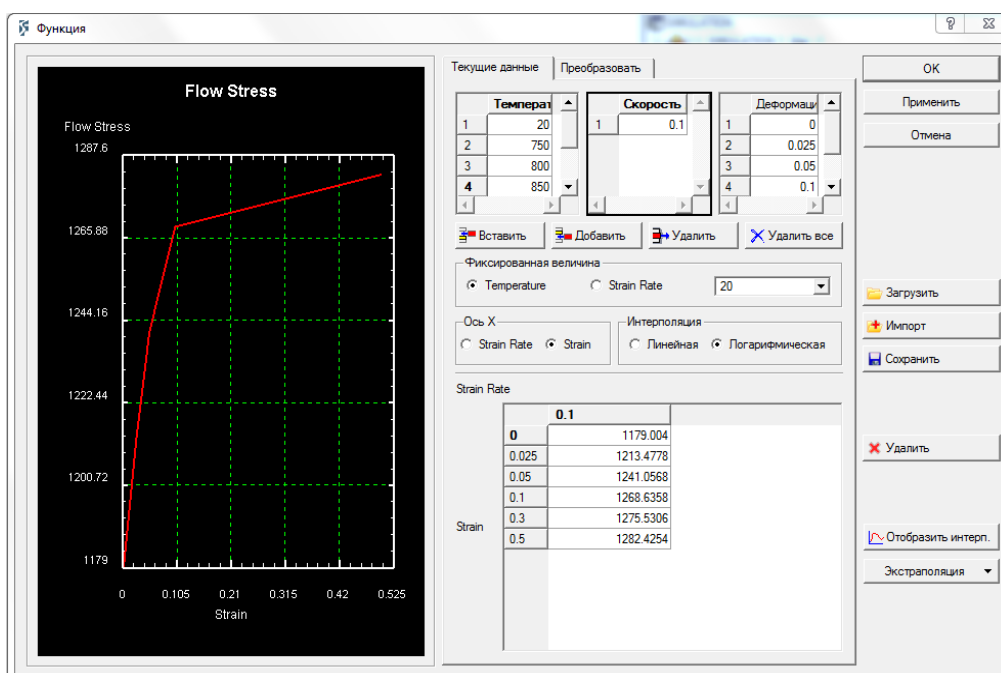


Рис. 2. Скриншот при задании условий деформирования исследуемого материала в программе Deform-3D

Демонстрацию возможностей предложенного алгоритма анализа диаграмм НДС осуществим на примере четырех важных для практики сплавов: коррозионно-стойкой стали AISI 316, титанового сплава Ti-6AL-4V (аналог ВТ-6), а также алюминиевых сплавов AISI-2024 и AL-5056 (аналогов отечественных сплавов Д16Т и АМг5).

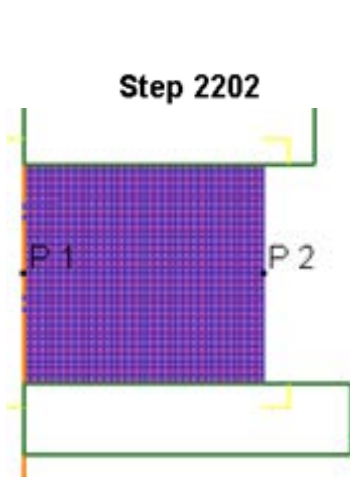


Рис.3. Картина деформирования сетки конечно-элементной модели цилиндрического образца при обжатии в программе Deform-3D

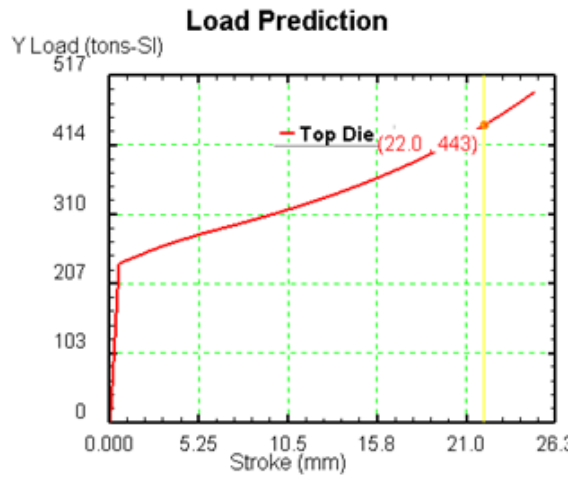


Рис. 4. Расчет силы обжатия цилиндрического образца при обжатии как функции перемещения верхней плиты пресса в программе Deform-3D

Анализ результатов расчета (рис. 5) показывает, что диаграмма НДС стали AISI 316 наиболее близко соответствует традиционным представлениям механики деформируемого тела.

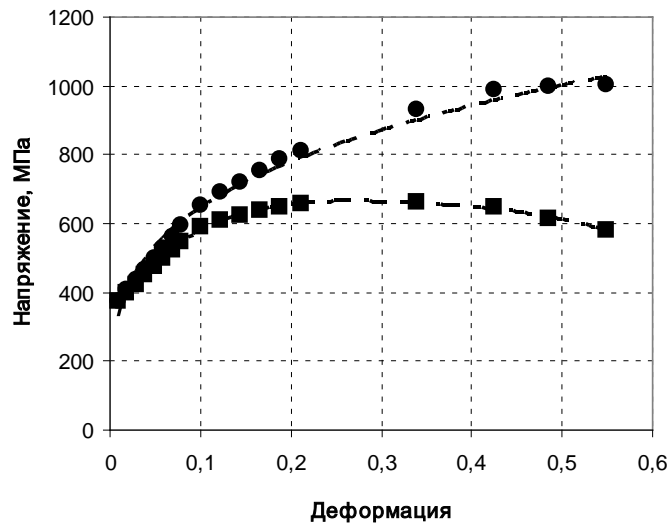


Рис. 5. Коррозионно-стойкая сталь AISI-316:

круглые и квадратные маркеры — истинные и условные напряжения соответственно;
пунктир — аппроксимация результатов расчета с помощью программы Deform-3D

Диаграмма истинных напряжений с высоким значением коэффициента регрессии $R^2 = 0,98$ описывается степенной зависимостью

$$\sigma = 1211,6\epsilon^{0,274} \text{ МПа.}$$

Диаграмма условных напряжений четко определяет предел текучести и временное сопротивление, а деформацию соответствующую временному сопротивлению, можно принять за относительное удлинение материала δ при растяжении. Диаграмма с высокой точностью аппроксимируется полиномом 4-й степени

$$\sigma^y = 333,8 + 3712\varepsilon - 15200\varepsilon^2 + 27420\varepsilon^3 - 19280\varepsilon^4 \text{ МПа.}$$

Диаграмма условных напряжений титанового сплава Ti-6AL-4V (рис. 6) также соответствует традиционному виду с временным сопротивлением. Однако кривая истинных напряжений имеет максимум, что не вписывается в традиционные представления о механике деформируемого тела. Деформация, соответствующая временному сопротивлению, отлична от значения для аналога ВТ-6.

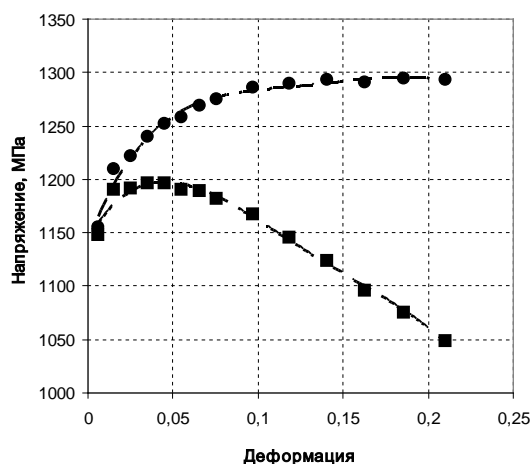


Рис. 6. Титановый сплав Ti-6AL-4V (аналог ВТ-6):

круглые и квадратные маркеры — истинные и условные напряжения соответственно;
пунктир — аппроксимация результатов расчета с помощью программы Deform-3D

Для алюминиевых сплавов в программе Deform-3D выбрана упрощенная модель упруго-пластического тела с линейным упрочнением [15] (рис. 7, 8).

Истинные напряжения в алюминиевом сплаве AL-5056 описываются линейной зависимостью (коэффициент регрессии $R^2 = 0,995$)

$$\sigma = 296,8 + 129,6\varepsilon \text{ МПа.}$$

Условные напряжения с коэффициентом регрессии $R^2 = 0,972$ описываются зависимостью

$$\sigma = 296 - 154,7\varepsilon \text{ МПа.}$$

Истинные напряжения для алюминиевого сплава AL-5056 описываются линейной зависимостью с коэффициентом регрессии $R^2 = 0,972$:

$$\sigma = 273,8 + 169,1\varepsilon \text{ МПа.}$$

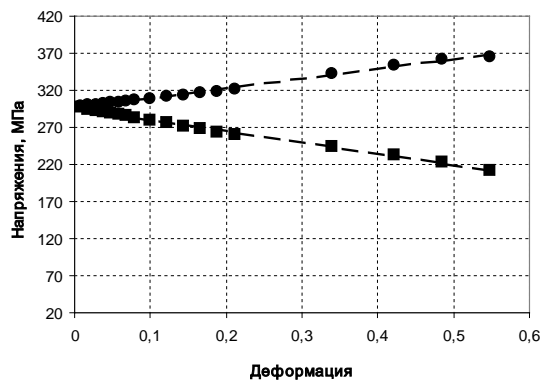


Рис. 7. Алюминиевый сплав AL-5056 (аналог АМг5):

круглые и квадратные маркеры — истинные и условные напряжения соответственно; пунктир — аппроксимация результатов расчета с помощью программы Deform-3D

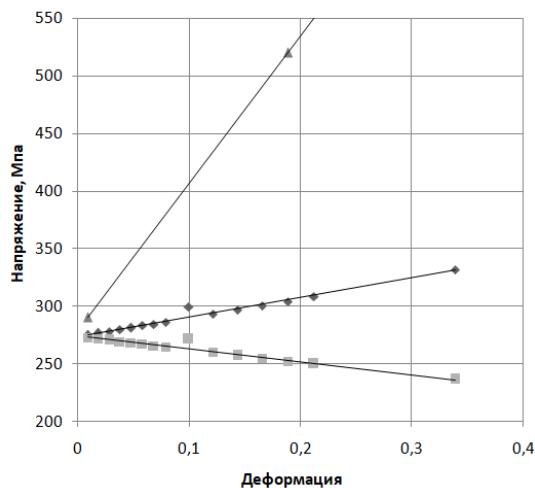


Рис. 8. Алюминиевый сплав AISI-2024 (аналог Д16Т):

круглые и квадратные маркеры — истинные и условные напряжения соответственно; пунктир — аппроксимация результатов расчета с помощью программы Deform-3D; треугольные маркеры — диаграмма истинных напряжений сплава Д16Т

Условные напряжения с коэффициентом регрессии $R^2 = 0,972$ описываются зависимостью

$$\sigma = 274,1 - 111,6\epsilon \text{ МПа.}$$

Такие упрощенные диаграммы НДС пригодны для анализа некоторых технологических процессов пластического формообразования, для которых характерны близкие значения напряжений по объему детали. Однако гибка к таким процессам не относится. Диаграмма условных напряжений имеет ниспадающий характер, что не свойственно металлическим сплавам. Кроме того, на рис. 7 треугольными маркерами указаны значения истинных напряжений, соответствующие

ющих пределу текучести и временному сопротивлению сплава Д16Т. Они показывают, что нет полного соответствия свойств отечественных и зарубежных материалов.

Выводы. По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

1) предложенный алгоритм полезен для анализа баз данных программы Deform-3D;

2) установленные диаграммы НДС программы Deform-3D могут быть с успехом применены для анализа многих технологических процессов листовой штамповки, в которых НДС точек детали близки друг другу;

3) использование диаграмм НДС программы Deform-3D для анализа процесса гибки может приводить к значительным ошибкам.

Литература

- [1] Чечулин Ю.Б., ред. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D. Екатеринбург, УрФу, 2010.
- [2] Марочник стали и сплавов. *splav-kharkov.com: веб-сайт*. URL: http://splav-kharkov.com/z_mat_type.php (дата обращения: 16.12.2019).
- [3] Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. М., ВИЛС, 2000.
- [4] АМг5: характеристики сплава и зарубежные аналоги. *pcmet.su: веб-сайт*. URL: <https://pcmet.su/usefull/stati/item101749/> (дата обращения: 16.12.2019).
- [5] Характеристика материала Д16. *splav-kharkov.com: веб-сайт*. URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1438 (дата обращения: 16.12.2019).
- [6] Сизов Е.С., Бабурин М.А., Сизова К.Г. и др. Штамповка - вытяжка листовых деталей пластичным металлом. Пермь, Изд-во РАЕН, Западно-Уральское отделение, 1996.
- [7] Бабурин М.А., Бараев А.В., Боярская Р.В. и др. Перспективы применения штамповки свинцом для снижения массы металлического лейнера баллонов высокого давления комбинированной конструкции с композитной оболочкой. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 2, с. 18–22.
- [8] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В. и др. Анализ формоизменения заготовок при вытяжке полусферических деталей с применением промежуточных деформируемых сред. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2014, № 7, с. 21–24.
- [9] Мазуркевич А.О., Петюков А.В., Баскаков В.Д. Численное моделирование процесса калибровки менисковых деталей жидкой технологической средой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 7, с. 7–11.
- [10] Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., ред. Справочник по конструкционным материалам. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [11] Арзамасов Б.Н., Мухин Г.Г., ред. Материаловедение. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
- [12] Полухин П.И., Гунн Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М., Металлургия, 1976.
- [13] Чумадин А.С. Теория и расчеты процессов листовой штамповки (для инженеров). М., Экспосервис “ВИП”, 2014.

- [14] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабурин М.А. и др. Методика инженерной оценки погрешности гибки деталей уголкового формы в инструментальном штампе. *Технология металлов*, 2019, № 3, с. 7–13.
- [15] Тарасов В.А. Методы анализа в технологии машиностроения. Аналитическое моделирование динамических процессов обработки материалов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996.

Боярский Даниил Сергеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Михаил Аронович Бабурин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Боярский Д.С. Методика анализа базы диаграмм напряженно-деформированного состояния материалов в программно-математической среде Deform-3D для изучения процессов пластического деформирования. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-02-581>

THE METHODOLOGY FOR ANALYZING THE BASE OF DIAGRAMS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF MATERIALS IN THE SOFTWARE-MATHEMATICAL ENVIRONMENT DEFORM-3D TO STUDY THE PROCESSES OF PLASTIC DEFORMATION

D.S. Boyarskiy

27107357711@mail.ru

SPIN-code: 7988-2142

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The proposed methodology is a necessary tool for the reasoned use of material properties databases in the Deform-3D program when studying various processes of plastic forming. It is shown that in constructing the databases, various models of hardening of the deformable body were used. In particular, linear and power relationships between stress and strain were used. This allows you to more accurately determine the scope of stress-strain diagrams offered by the Deform-3D program. The stress-strain state diagrams are established for such important materials used in production as AISI-316 corrosion-resistant steel (analogue 12Kh18N9T), Ti-6AL-4V titanium alloy (VT-6 analogue), AL-5056 aluminum alloy (AMg5 analogue) and AISI-2024 (D16T analogue).

Keywords

Stress-strain state of the material, diagrams of true and conditional stress, corrosion-resistant steel, titanium and aluminum alloys, models of the deformable body, mathematical relationships between stresses and strains, compression and tension of cylindrical samples, finite element model, Deform-3D program

Received 03.02.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Chechulin Yu.B., ed. *Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu DEFORM-3D* [Practical guidance for DEFORM-3D software pack]. Ekaterinburg, UrFu Publ., 2010 (in Russ.).
- [2] *Marochnik stali i splavov* [Grade guide of steel and alloys]. *splav-kharkov.com: website* (in Russ.). URL: http://splav-kharkov.com/z_mat_type.php (accessed: 16.12.2019).
- [3] Kolachev B.A., Pol'kin I.S., Talalaev V.D. *Titanovye splavy raznykh stran* [Titanium alloys of different countries]. Moscow, VILS Publ., 2000 (in Russ.).
- [4] AMg5: *kharakteristiki splava i zarubezhnye analogi* [AMg5: properties of the alloy and foreign analogues]. *pcmet.su: website* (in Russ.). URL: <https://pcmet.su/usefull/stati/item101749/> (accessed: 16.12.2019).
- [5] *Kharakteristika materiala D16* [Properties of D16 material]. *splav-kharkov.com: website* (in Russ.). URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1438 (accessed: 16.12.2019).
- [6] Sizov E.S., Baburin M.A., Sizova K.G., et al. *Shtampovka — vytyazhka listovykh detaley plastichnym metallom* [Extrusion of sheet parts by ductile metal]. Perm', Izd-vo RAEN, Zapadno-Ural'skoe otdelenie Publ., 1996 (in Russ.).

-
- [7] Baburin M.A., Baraev A.V., Boyarskaya R.V., et al Development of lead stamping for weight reduction of the metal liner of high-pressure cylinders with combined composite shell. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure], 2015, no. 2, pp. 18–22 (in Russ.).
- [8] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., et al. Analysis of workpieces form changing at the drawing of hemispherical parts with the application of intermediate deformed media. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure], 2014, no. 7, pp. 21–24 (in Russ.).
- [9] Mazurkevich A.O., Petyukov A.V., Baskakov V.D. Numerical simulation of meniscus shape parts calibration by liquid process medium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 7, pp. 7–11 (in Russ.).
- [10] Arzamasov B.N., Solov'yeva T.V., eds. *Spravochnik po konstruktionsnym materialam* [Handbook on construction materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006 (in Russ.).
- [11] Arzamasov B.N., Mukhin G.G., ed. *Materialovedenie* [Material engineering]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005 (in Russ.).
- [12] Polukhin P.I., Gunn G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoy deformatsii metallov i splavov* [Resistance to plastic strain of metals and alloys]. Moscow, Metallugiya Publ., 1976 (in Russ.).
- [13] Chumadin A.S. *Teoriya i raschety protsessov listovoy shtampovki (dlya inzhenerov)* [Theory and calculation of sheet forming processes (for engineers)]. Moscow, Eksposervis "VIP" Publ., 2014 (in Russ.).
- [14] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Baburin M.A., et al. Engineering evaluation method of bending error of angle-shape components in tool stamp. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 3, pp. 7–13 (in Russ.).
- [15] Tarasov V.A. *Metody analiza v tekhnologii mashinostroeniya. Analiticheskoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov obrabotki materialov* [Analysis methods in machine engineering technology. Analytical modelling of dynamic processes of metal processing]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996 (in Russ.).

Boyarskiy D.S. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Baburin M.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Boyarskiy D.S. The methodology for analyzing the base of diagrams of the stress-strain state of materials in the software-mathematical environment Deform-3D to study the processes of plastic deformation. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-01-581.html> (in Russ.).