

УДК 621.7.043

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

**Панкратов Д.Л., Шибakov В.Г., Андреев А.П., Андреева С.И., Ситдиков И.М.**

*ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,  
Набережночелнинский институт (филиал), e-mail: chelny@kpfu.ru*

Статья посвящена актуальной задаче в области развития технологии заготовительного производства – разработке и исследованию новых, более технологичных способов достижения интенсивных пластических деформаций (ИПД), одному из методов получения высокопрочных состояний в металлах и сплавах. Важным в статье является разработка принципиальной схемы устройства для деформирования, приведение алгоритма, демонстрирующего различные комбинации деформирования при выдавливании для достижения интенсивных пластических деформаций. В работе приведены результаты имитационного моделирования процесса на различных стадиях выдавливания. Сделаны выводы о применимости результатов имитационного моделирования для получения различных по форме изделий. Достоинством работы является практическое применение феноменологической теории разрушения металлов В.Л. Колмогорова при интенсивной пластической деформации выдавливанием на различных стадиях нагружения образцов.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, высокопрочное состояние в металлах и сплавах, имитационное моделирование процесса

## THE DISTRUCTION PATTERNS INVESTIGATIONS RECEIVED BY INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION BY EXTRUSION

**Pankratov D.L., Shibakov V.G., Andreev A.P., Andreeva S.I., Sitdikov I.M.**

*Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny institute (branch),  
Naberezhnye Chelny, e-mail: chelny@kpfu.ru*

The article of authors covers the topical issue in sphere of blank production technology development – implementation and researching new, more technological methods of reaching intensive plastic deformation (IPD), one of method of receiving high-strength condition in the metals and alloys. Important thing in the article is development of schematic circuit of equipment for deformation, algorithm description which provide different combinations of deformation during extrusion for reaching intensive plastic deformation. In the article mentioned results of simulation modeling process on the different phases of extrusion. There was made conclusions regarding to applying practically results of simulation modeling for getting different configuration products. The most advantage of the article is practical applying phenomenological theory of metal destruction by V.L. Kolmogorov during intensive plastic deformation of extrusion on the different phases of loading patterns.

**Keywords:** intensive plastic deformation, high-strength conditions it the metals and alloys, simulation modelling of process

Значительное измельчение структуры металлов и сплавов, вплоть до возникновения наноструктурных состояний, может быть обеспечено интенсивной пластической деформацией (ИПД).

Известны и хорошо исследованы специальные схемы механического деформирования, такие как интенсивное кручение под высоким давлением, кручение дисковых заготовок на наковальнях Бриджмена, равноканальное угловое (РКУ) прессование, всесторонняя ковка и др. В последнее время появился ряд новых технологических схем ИПД: “песочные часы” [1], винтовое прессование, при котором интенсивные сдвиговые деформации достигаются путем гидромеханического прессования призматических заготовок через матрицу с винтовым каналом, сечение которого ортогонально оси прессования и постоянно вдоль этой оси [2].

Приведенные технологические схемы ИПД имеют ряд достоинств. Во-первых, можно изготовить массивные образцы для проведения механических испытаний. Во-вторых, в получаемых из порошков материалах может быть существенно снижена остаточная пористость. В-третьих, эти методы можно использовать для получения сверхмелкозернистой структуры не только в модельных, но и в промышленных сплавах, что позволяет говорить о перспективах промышленного применения.

К числу таких методов можно отнести и перспективный способ обработки металлов ИПД выдавливанием для измельчения структур [3].

### Материалы и методы исследования

Основные технологические этапы этого метода приведены на рис. 1.

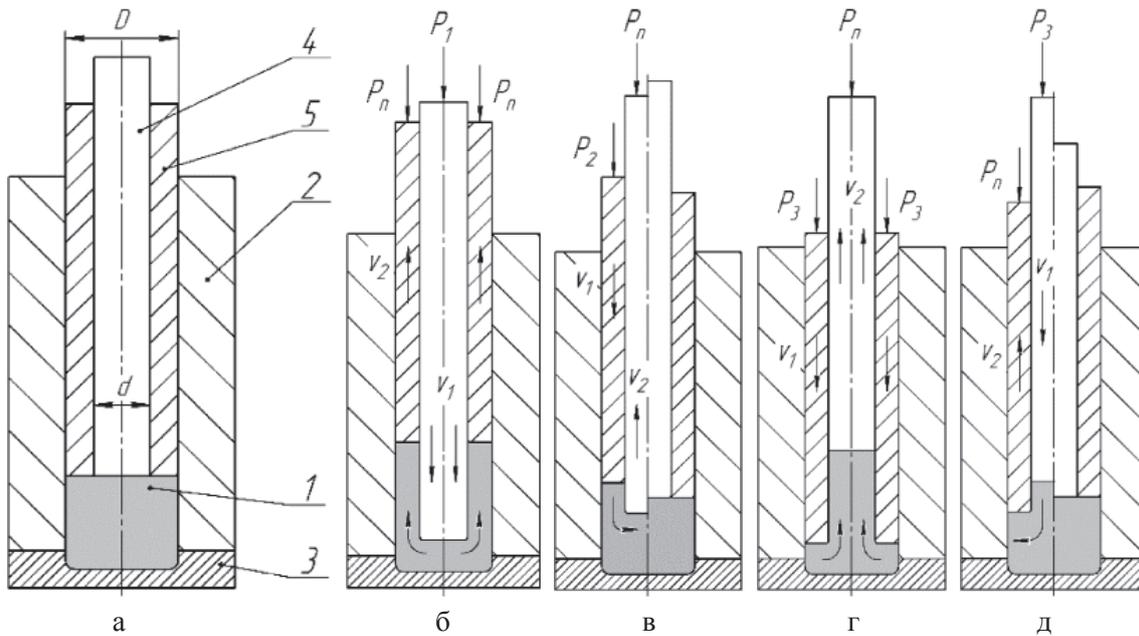


Рис. 1. Схема процесса ИПД выдавливанием:

а – исходное состояние; б – обратное выдавливание «стакана»; в – образование исходной формы радиальным выдавливанием из «стакана»; г – обратное выдавливание стержня с утолщением; д – образование исходной формы радиальным выдавливанием из стержня с утолщением; 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – плита подкладная; 4 – сплошной пуансон; 5 – полый пуансон;  $P_1 - P_3$  – силы выдавливания на разных стадиях;  $P_n$  – сила противодействия ( $0 \leq P_n < P_2$ ,  $0 \leq P_n < P_3$ );  $D, d$  – диаметры пуансонов;  $v_1, v_2$  – скорости движения инструментов

Заготовку 1 помещают в матрицу 2, установленную на специальной плите 3. Высота матрицы превышает высоту заготовки. На заготовку устанавливают сплошной 4 и полый 5 пуансоны, которые попеременно осуществляют деформирование.

На рис. 2 представлен алгоритм, демонстрирующий различные комбинации деформирования при ИПД выдавливанием.

На основе разработанного алгоритма сформирована матрица различных вариантов (табл. 1) процесса ИПД выдавливанием,

где 0 и 1 – булевы переменные, соответствующие выполнению деформирования 1 или невыполнению 0.

Процесс может начинаться с обратного выдавливания «стакана» (деформированием инструментом 4) или стержня с утолщением (деформированием инструментом 5), либо деформирование инструментом 4, до получения исходного контура заготовки (например, варианты 1 и 2 табл. 1).

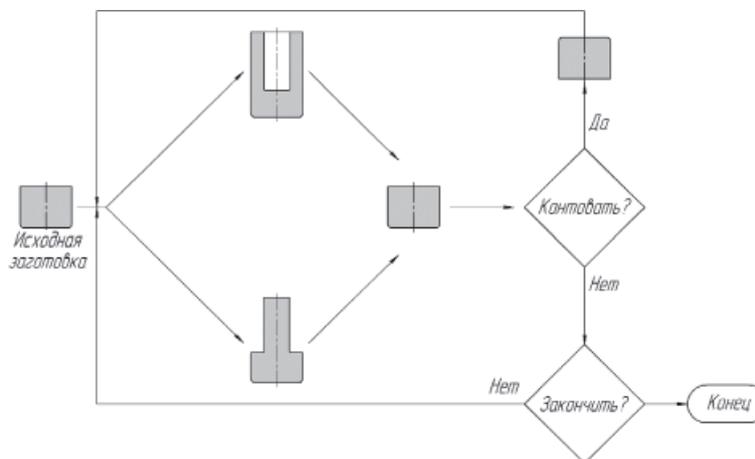


Рис. 2. Алгоритм процесса при ИПД выдавливанием

Таблица 1

Морфологическая матрица вариантов ИПД выдавливанием

Номер варианта								
	Исходная заготовка	Обратное выдавливание «стакана»	Обратное выдавливание стержня с утолщением	Радиальное выдавливание с получением исходной формы	Кантовка			
1	1	1	0	1	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0	0	0	0
3	1	1	0	1	0	0	1	1
4	1	0	1	1	0	1	0	1
5	1	1	0	1	1	1	0	1
6	1	0	1	1	1	0	1	1
7	1	1	0	1	1	0	1	1
8	1	0	1	1	1	1	0	1

Специфика структурообразования и деформационного упрочнения при переходе к интенсивным пластическим деформациям впервые была отмечена и систематически изучена в работах В.И. Трефилова, Ю.И. Мильмана и С.А. Фирстова [4–7]. В.И. Трефилов и С.А. Фирстов с сотрудниками обнаружили, что с ростом деформации в материале формируется качественно новый вид дислокационной структуры – сильно разориентированные ячейки. Основная их особенность – это непрерывное увеличение углов разориентировки с ростом деформации при слабом уменьшении поперечных размеров. Как потом оказалось, подобная эволюция структуры присуща и другим металлам. В.И. Трефилов с сотрудниками предложили оценивать деформационное упрочнение при интенсивных деформациях с позиций уменьшения размера зерна – в предельном случае до размера сильно разориентированной ячейки. Его точка зрения о радикальном изменении механизма упрочнения получила многочисленные подтверждения и в настоящее время признается многими учеными.

Исходя из сказанного, можно заключить, что направленное и непрерывно происходящее в процессе пластической деформации движение дисклинаций должно приводить к фрагментации структуры металла, то есть разбиению его на микрообласти, разориентированные на углы порядка нескольких градусов. Чем больше будет степень пластической деформации, тем мельче должны быть фрагменты и больше их разворот относительно друг друга [8].

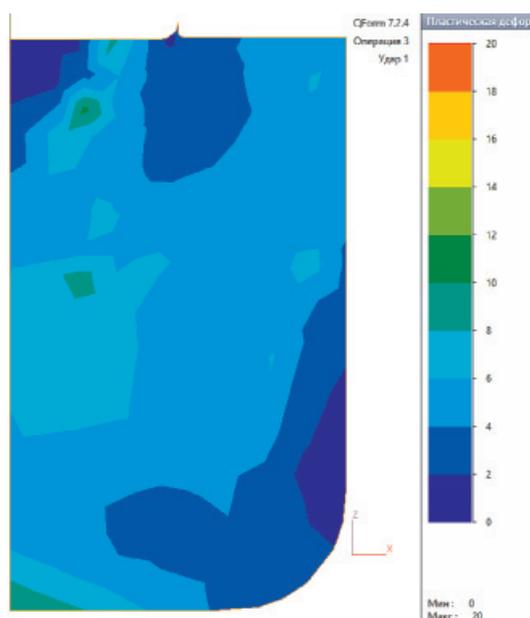


Рис. 3. Пример распределения пластической деформации при выдавливании по варианту № 3

### Экспериментальная часть

Для установления влияния способа на напряженно-деформированное состояние в заготовке и определения наиболее оптимальных вариантов деформирования проведено имитационное моделирование процесса ИПД выдавливанием в среде конечно-элементного моделирования QForm 7.2. Моделирование проводилось по-

следовательно согласно морфологической матрице вариантов (табл. 1). Материал заготовки – алюминиевый деформируемый сплав АД1, температура заготовки 20 °С, температура инструмента 20 °С, графитовая смазка. Скорость деформирования 1 мм/с. Для удобства сравнения полученных результатов шкала пластической деформации при различных вариантах выдавливания одинаковая и имеет градацию от 0 до 20 (рис. 3). Результаты имитационного моделирования при различных вариантах выдавливания сведены в табл. 2.

Анализируя сформированную таблицу с результатами имитационного моделирования после различных вариантов выдавливания, можно сделать заключение, что:

1) интенсивность деформаций по сечению цилиндрической заготовки распо-

ложена неравномерно и использование ее в дальнейшей обработке неперспективно. Возможно применение отдельных вариантов, например вариант № 5 ( $\varepsilon_{\text{ср}} = 7$ ), когда деформация в основном сконцентрирована в центральной части на оси Z (снятие определенного слоя на токарном станке с дальнейшим использованием прочной сердцевины в различных деталях);

2) для получения упрочненных трубных заготовок или цилиндрических полуфабрикатов с прочной стенкой предлагается использовать вариант № 6 с дополнительным выдавливанием металла на последней операции в «станке» – деформации при такой схеме выдавливания распределяются наиболее равномерно по всему сечению полуфабриката ( $\varepsilon_{\text{ср}} = 8$ );

Таблица 2

Сводная таблица результатов имитационного моделирования по различным вариантам выдавливания

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Вариант 6	Вариант 7	Вариант 8
a								
b								
c								

3) для получения различных упрочненных по всему сечению стержневых заготовок необходимо использовать варианты выдавливания № 3, 4, 7, 8 с выдавливанием на последней операции «стержня с утолщением» ( $\epsilon_{icp} = 7$ ). Если необходимы стержневые заготовки с прочной сердцевиной и мягким наружным слоем, то необходимо использовать вариант № 5 с выдавливанием на последней операции «стержня с утолщением» ( $\epsilon_{icp} = 5$ ). Возможно получение стержней с упрочненной периферической частью и мягкой сердцевиной, для этого необходимо провести деформирование по варианту № 2 или 6 с выдавливанием на последней операции «стержня с утолщением» ( $\epsilon_{icp} = 7...9$ ).

Для определения параметров НДС на основе взаимодействия программного обеспечения (ПО) для имитационного моделирования объемной штамповки и ПО, позволяющего производить математические расчеты, в средах Excel и MathCAD, в зонах, где вероятно разрушение, прослеживается история деформирования. Далее эта

информация в виде числовых таблиц передается в ПО для математических расчетов, где реализуется методика (рис. 4) определения критерия поврежденности  $\Psi$ . Далее производится проверка по известному условию В.Л. Колмогорова

$$\Psi = \int_0^{\epsilon_i} \frac{d\epsilon_i}{\epsilon_{np}(\eta)} < 1. \quad (1)$$

После проведения предварительного моделирования выдавливания по вариантам 1 и 2 (табл. 1) в заготовке были определены несколько зон, в которых возможно разрушение. В этих зонах расставлены трассируемые точки (рис. 5). В первую зону входят точки 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10, находящиеся в периферийной области заготовки, т.е. те точки, которые в процессе деформирования непосредственно взаимодействуют с инструментом и матрицей. Во вторую зону входят точки 1, 3, 11, 12, 13, 14, 15 и 16 – точки, находящиеся внутри исследуемой заготовки.

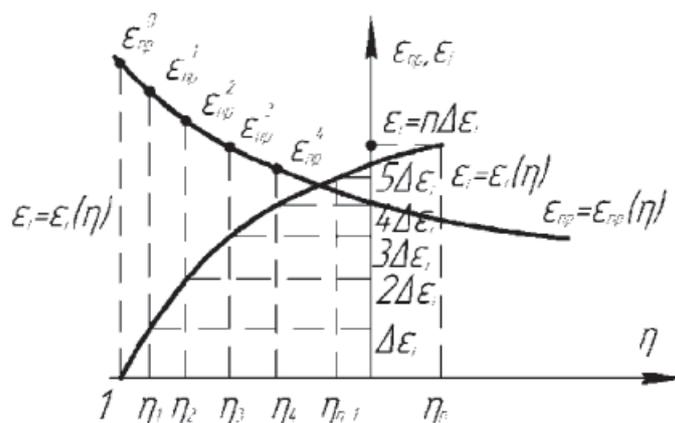


Рис. 4. К оценке деформируемости по критерию (1):  $\epsilon_i = \epsilon(\eta)$  – путь деформирования металла в опасной зоне;  $\epsilon_{np} = \epsilon_{np}(\eta)$  – диаграмма пластичности

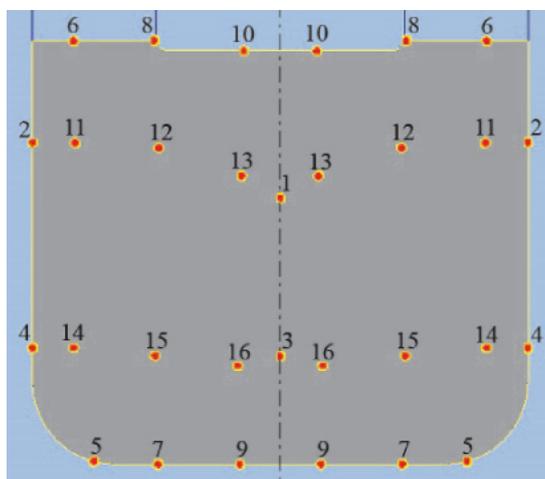


Рис. 5. Расположение трассируемых точек после выдавливания по варианту № 1

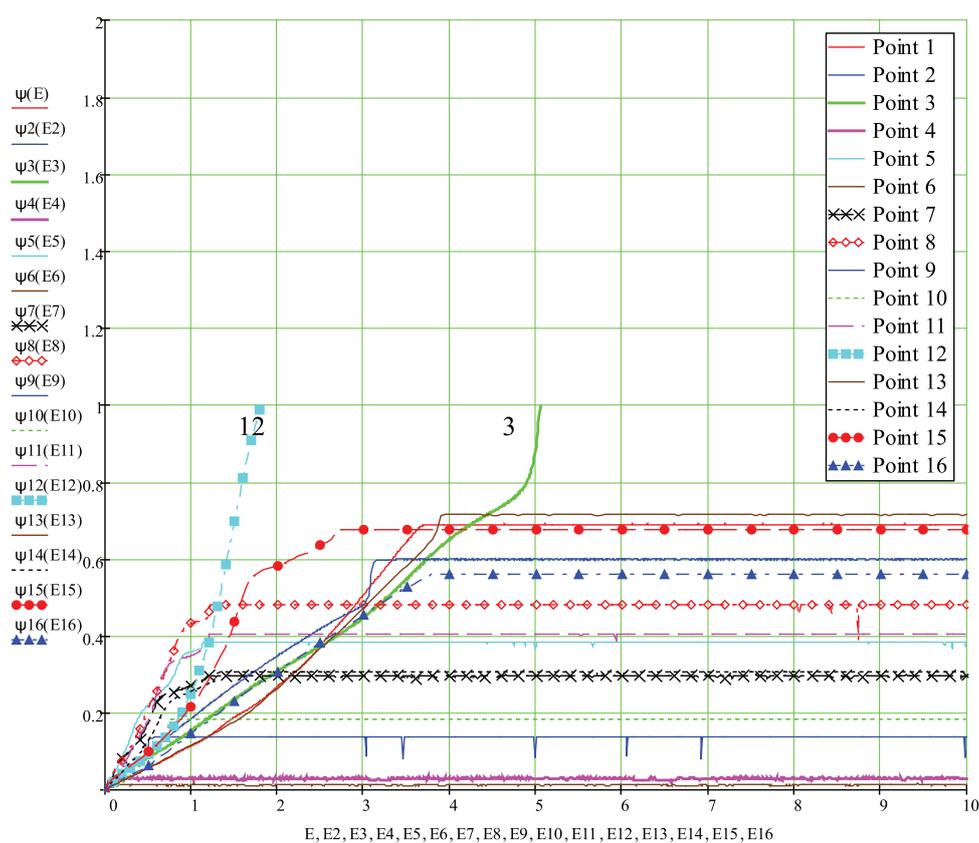


Рис. 6. Изменение использованного ресурса пластичности по ходу деформирования по варианту № 1

Видно, что в точках № 12 и 3 (рис. 6) ресурс пластичности исчерпан и стоит ожидать образования дефектов. В целом при выдавливании по варианту № 1 имеется достаточный запас пластичности для продолжения накопления деформаций с целью повышения прочности заготовки.

Для точек № 3, 12, ресурс пластичности которых приблизился к 1, были проведены дополнительные исследования по влиянию температурного фактора на ресурс пластичности.

Повышение температуры позволило повысить ресурс пластичности для точек № 3 и 12, тем самым избежав образования внутренних дефектов.

#### Выводы

Рассмотренный способ перспективен для осуществления ИПД в крупногабаритных заготовках, в том числе из интерметаллидов и других материалов.

Напряженно-деформированное состояние позволяет обеспечить интенсивные пластические деформации заготовок без разрушения и дефектов.

Сопоставлены результаты имитационного моделирования и НДС в заготовках с возможным применением этих результатов для получения заготовок или полуфабрикатов.

При выдавливании образцов по различным вариантам морфологической матрицы имеется достаточный ресурс пластичности для продолжения деформирования и изменения механических характеристик образцов.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

**Список литературы**

1. Голубев О.В. Разработка технологии получения заготовок холодновысадочного инструмента высокой стойкости. Дис. ... канд. тех. наук. – Уфа, 1999. – 146 с.

2. Орлов Д.В. Формирование структуры металлов винтовым прессом // 7-ая всероссийская научная конференция студентов-физиков: тез. докл. – СПб., 2001. – <http://asf.ur.ru/VNKSF/Tezis/v7>.

3. Патент № 2189883 РФ, МКИ 7 В 21 J 5/00. Способ пластического структурообразования металлов при интенсивной пластической деформации и устройство для его осуществления.

4. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 315 с.

5. Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, Р.К. Иващенко и др. – Киев: Наукова думка, 1983. – 232 с.

6. Рубцов А.С., Рыбин В.В. Структурные особенности пластической деформации на стадии локализации течения // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 44. – Вып. 3. – С. 611–621.

7. Манилов В.А., Ткаченко В.Г., Трефилов В.И., Фирстов С.А. Структурные изменения в хrome при деформации // Металлы. – 1967. – № 2. – С. 114–122.

8. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Metallurgiya, 1986. – 226 с.

**References**

1. Golubev O.V. Razrabotka tehnologii polucheniya zagotovok holodnovysadochnogo instrumenta vysokoy stoykosti. Dis.. kand. tehn. nauk. Ufa, 1999. p 146 .

2. Orlov D.V. Formirovanie struktury metallov vintovym pressom // 7-ya vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya studentov – fizikov: Tez. dokl. St. Petersburg, 2001. <http://asf.ur.ru/VNKSF/Tezis/v7>

3. Patent № 2189883 RF, MKI 7 B 21 J 5/00. Spособ plasticheskogo strukturoobrazovaniya metallov pri intensivnoy plasticheskoy deformatsii I ustroystvo dlya ego osuschestvleniya.

4. Trefilov V.I., Milman Y.V., Firstov S.A. Fizicheskie osnovy prochnosti tugoplavkih materialov. – Kiev: Naukova dumka, 1975. pp. 315.

5. Trefilov V.I., Milman Y.V., Ivacshenko R.K. Struktura, tekstura I mehanicheskie svoystva deformirovannyh spлавov molibdena. Kiev: Naukova dumka. 1983. pp. 232.

6. Rubtsov A.S., Rybin V.V. Strukturnye osobennosti plasticheskoy deformatsii na stadia lokalizatsii techeniya // Fizika metallov I metallovedenie 1977 T. 44. Vyp. 3. pp. 611–621.

7. Manilov V.A., Tkachenko V.G., Trefilov V.I., Firstov S.A. Strukturnye izmeneniya v hrome pri deformatsii // Metally 1967 no. 2. pp. 114–122.

8. Rybin V.V. Bolshie plasticheskie deformatsii I razrushenie metallov. M.: Metallurgiya, 1986. pp. 226.

**Рецензенты**

Симонова Л.А., д.т.н., профессор, зам. директора по научной деятельности, Набережночелнинский филиал ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны;

Асташенко В.И., д.т.н., профессор кафедры материалов, технологий и качества, Набережночелнинский филиал, ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны.