

УДК 679.7.025.7

Рябичева Л. А.  
Негрей Ю. А.**ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ СИЛ ТРЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ  
ДЕТАЛЕЙ С ПОЛОСТЬЮ**

Известно, что повышение гидростатического давления в очаге пластической деформации увеличивает пластичность металла [1]. Это особенно важно для порошковых материалов, при деформировании которых одновременно с повышением пластичности необходимо добиться высокой равноплотности. Изменение гидростатического давления в очаге пластической деформации при прямом выдавливании можно получить с помощью сил активного трения на контактных поверхностях, приложением к свободным поверхностям заготовки сил противодействия и др. Развитие активного действия сил контактного трения путем изменения кинематики движения, деформирующего инструмента позволяет управлять деформированным состоянием заготовки за счет интенсивного увеличения сдвиговых деформаций, снижения нормального давления на инструмент [2, 3]. Общие закономерности контактного трения позволяют определить рациональные режимы выполнения операций обработки давлением, предельно достижимую величину активных сил контактного трения [4].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния активных сил трения на распределение деформаций и плотности при прямом выдавливании деталей с полостью из порошковых заготовок.

Для выполнения исследований образцы изготавливали из медного порошка марки ПМС-1 по следующей технологии: прессование на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН заготовок диаметром 32 мм пористостью 15 %; спекание по ступенчатому режиму в среде синтез-газа: нагрев до температуры 200, 300, 400 °С и выдержка при каждой температуре по 0,5 ч, – подъем до 500 °С и выдержка 15 мин, нагрев до 920 °С и выдержка – 1 ч.; прямое выдавливание на том же прессе с противодействием 120 МПа в штампах с неподвижной и подвижной матрицей (рис. 1). В качестве смазки применяли дисульфид молибдена. После выдавливания размеры образцов составили: диаметр  $D=32,0$  мм, глубина полости  $h=14,8$  мм, толщину стенки принимали равной  $b=2, 4, 6, 7, 8$  мм.

На рис. 1, а показана схема штампа с неподвижной матрицей для прямого выдавливания образца с полостью. На первой стадии выдавливания происходит осадка и уплотнение пористого образца пуансоном 1. На второй стадии происходит истечение уплотненного металла в кольцевую щель между контрпуансоном 4 и неподвижной матрицей 2. Обойма 3 создает противодействие равное 120 МПа для доуплотнения и устранения дефекта типа утяжины на торце образца.

На рис. 1, б представлена схема штампа для прямого выдавливания с наличием сил активного трения с противодействием 120 МПа. Величина противодействия выбрана исходя из устранения дефектов на торце образца и равномерности напряженно-деформированного состояния [5]. На первой стадии также происходит осадка и уплотнение пористого образца пуансоном 1. Скорость движения пуансона и подвижной матрицы 2 равны  $V_1 = V_2$ . При дальнейшем перемещении пуансона 1 происходит истечение уплотненного металла в кольцевую щель между контрпуансоном 4 и подвижной матрицей 2. Металл на участке  $H_2$  движется с большей скоростью, чем матрица 2, здесь возникают реактивные силы трения, на участке  $H_1$  – активные. Это продолжается до тех пор, пока  $H_2 < H_1$ . В случае если  $H_2 > H_1$  силы трения на участке  $H_2$  становятся больше, чем на участке  $H_1$  вследствие роста высоты  $H_2$ . При этом скорости  $V_2 > V_1$  и меняется характер сил трения металла о матрицу: на участке  $H_2$  силы трения равны нулю, на участке  $H_1$  – активные.

Для анализа кинематики прямого выдавливания на меридиональном сечении порошковых заготовок наносили координатную сетку с шагом  $2\pm 0,002$  мм с помощью координатно-расточного станка. После выдавливания элементы сетки измеряли на инструментальном микроскопе и рассчитывали поле интенсивности деформаций [6].

По искаженной сетке определяли компоненты линейных деформаций:

$$e_z = \ln a_0/a, \quad e_\varphi = \ln b/b_0, \quad (1)$$

где  $a_0, a$  – размер координатной сетки после деформации по оси  $y$ ;

$b_0, b$  – размер координатной сетки после деформации по оси  $z$ .

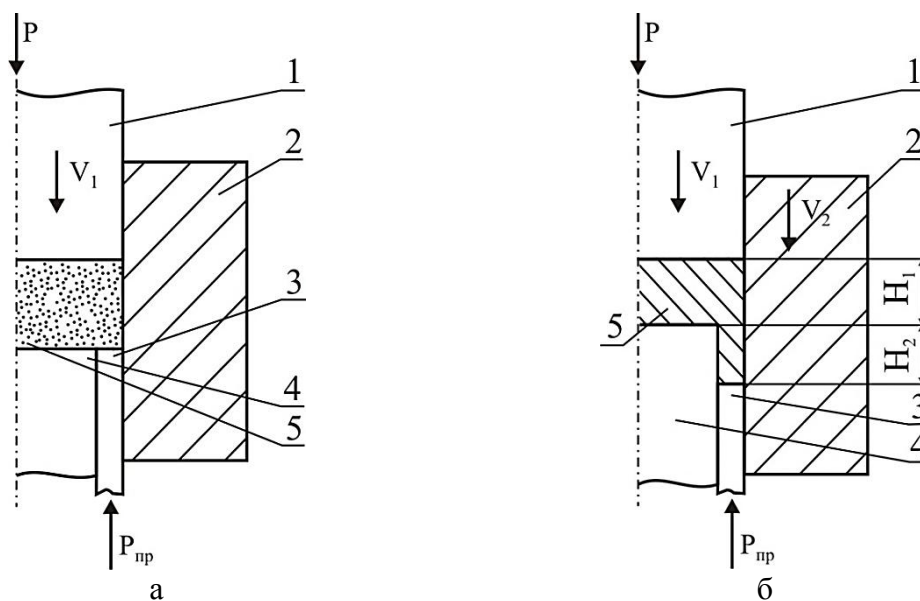


Рис. 1. Схемы штампов для прямого выдавливания пористого образца: а – без активных сил трения; б – с активными силами трения

Интенсивность деформации для плоской деформации рассчитывали по формуле:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – компоненты тензора деформаций.

Оценку неравномерности деформированного состояния и плотности в объеме заготовки оценивали по выражениям:

$$e_{inh} = \frac{\sum_{j=1}^N \sqrt{(e_i^{ave} - e_i^j)^2}}{e_i^{ave} N}, \quad \gamma_{inh} = \frac{\sum_{j=1}^N \sqrt{(\gamma_i^{ave} - \gamma_i^j)^2}}{\gamma_i^{ave} N}, \quad (3)$$

где  $e_i^{ave}$  – среднее арифметическое интенсивностей деформаций в объеме заготовки;

$\gamma_i^{ave}$  – среднее арифметическое плотности в объеме заготовки;

$e_i^j$  – интенсивностей деформаций в  $j$ -м элементе объема заготовки;

$\gamma_i^j$  – плотность в  $j$ -м элементе объема заготовки.

После выдавливания определяли плотность методом гидростатического взвешивания. Микроструктуру изучали на микроскопе МИМ 8. Твердость измеряли на приборе Роквелла (ГОСТ 9013–59) шариком 1,587 мм при нагрузке 1000 Н по шкале HRB и на приборе Бринелля.

Процесс прямого выдавливания проходит в две стадии. На первой стадии осуществляется радиальное течение металла и заполнение полости матрицы. Прямое выдавливание заготовки с истечением металла в щель наступает тогда, когда плотность материала достигает некоторой критической величины, которая определяется свойствами порошкового материала и геометрическими параметрами изделия. Эксперименты показали, что пористость такой заготовки после деформирования составляет около 6 %. Такое разделение процесса выдавливания позволяет исследовать течение металла на второй стадии, когда происходит практически выдавливание компактного материала и течение металла можно охарактеризовать, применяя законы несжимаемого тела.

В обоих случаях анализ координатной сетки после деформирования показывает существование трех кинематических модулей очага деформации: в донной, угловой и кольцевой частях (рис. 2). Высокое противодавление 120 МПа обеспечивает отсутствие утяжины на кольцевой части образца и относительно равномерное распределение координатной сетки. При наличии активных сил трения на кольцевой части образца с внешней стороны наблюдается деформация растяжением элементов сетки по направлению их действия (рис. 2, б).

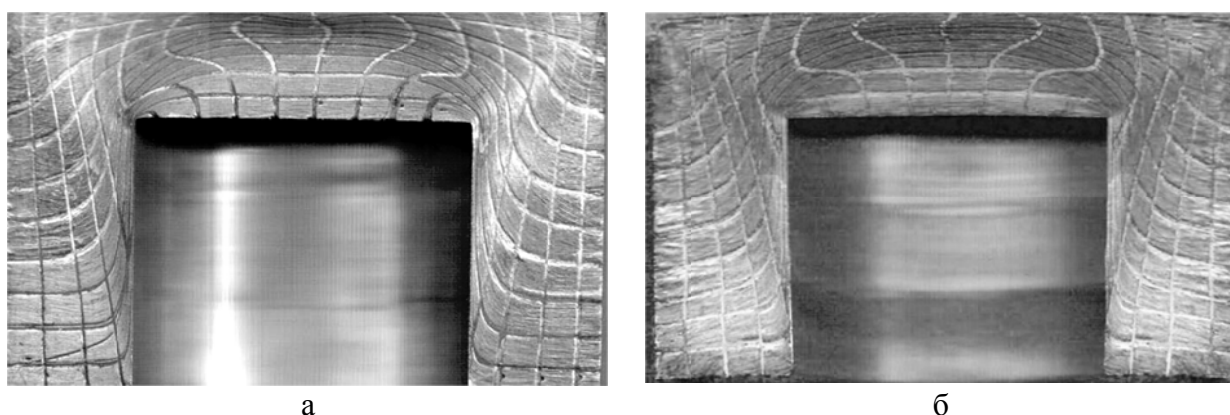


Рис. 2. Фотографии образцов с координатной сеткой после прямого выдавливания: а – без активных сил трения; б – с активными силами трения

Изучение интенсивности деформаций по трем сечениям образца показало практически одинаковый характер изменения и величину в донной части для обоих случаев деформирования (рис. 3). В угловой части образца со стороны действия активных сил трения величина интенсивности деформации несколько уменьшается (рис. 3, б). Значительно она изменяется и в кольцевой части, где происходит наиболее активное проявление трения. Величина интенсивности деформаций уменьшается за счет действия напряжений обратного знака.

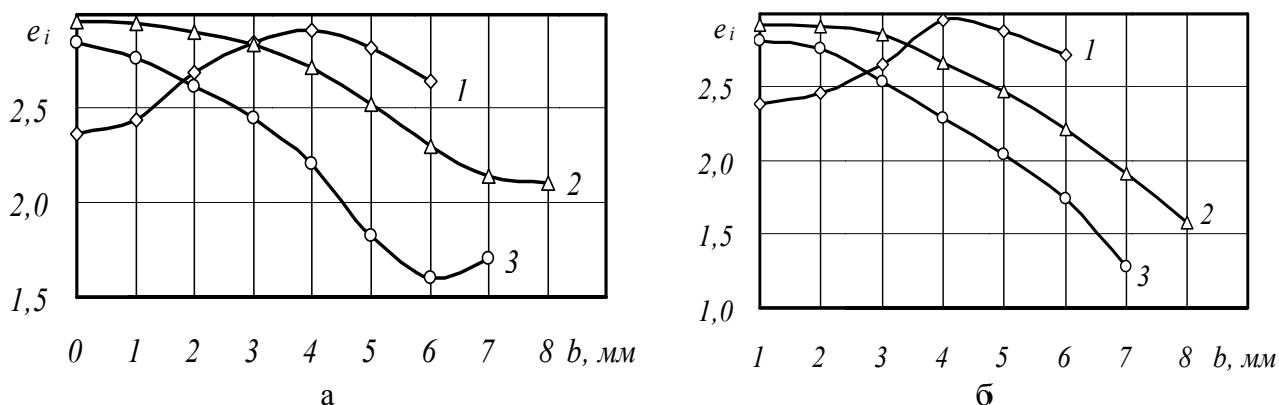


Рис. 3. Распределение интенсивности деформаций по трем сечениям образца: а – без активных сил трения; б – с активными силами трения; 1 – донная часть; 2 – угловая часть; 3 – кольцевая часть

На рис. 4 представлено изменение интенсивности деформаций в кольцевой части образца при наличии активных сил трения в зависимости от ее толщины. Как видно, уменьшение толщины кольцевой части приводит к более высокому значению интенсивности деформаций и ее уменьшению во внешних слоях образца.

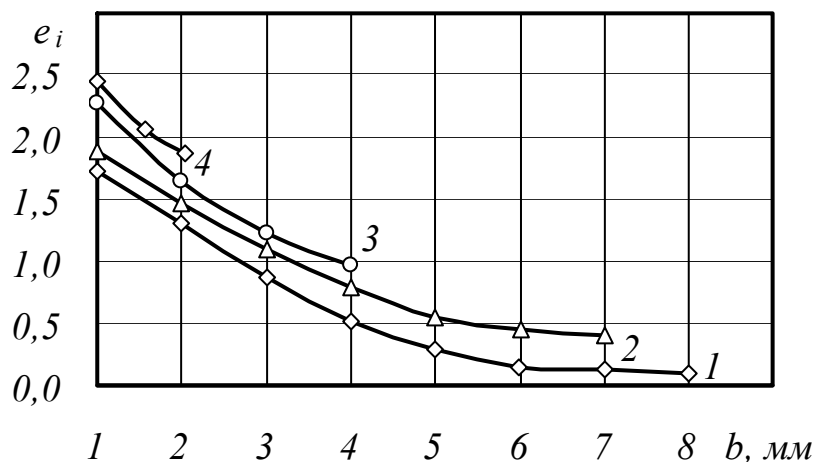


Рис. 4. Зависимость интенсивности деформации от толщины кольцевой части при наличии активных сил трения:

1 – 8 мм; 2 – 6 мм; 3 – 4 мм; 4 – 2 мм

Наличие активных сил трения влияет на изменение плотности по объему образца. Активные силы трения приводят к увеличению разноплотности (табл. 1). Однако величина плотности при всех условиях деформирования находится в пределах допустимой ошибки. Неравномерность деформированного состояния при наличии активных сил трения также увеличивается (табл. 1).

Таблица 1

Неравномерность деформированного состояния и распределения плотности в объеме образца

Условия деформирования	Толщина стенки, мм	$\gamma_{inh}$	$e_{inh}$
Без активных сил трения	8	0,16	0,19
	6	0,11	0,15
	4	0,06	0,11
	2	0,03	0,60
С активными силами трения	8	0,18	0,16
	6	0,14	0,18
	4	0,11	0,13
	2	0,09	0,10

Структура образцов, полученных при наличии активных сил трения, также характеризуется неравномерностью. Область донной части в очаге деформации имеет мелкозернистую структуру. Балл зерна 7–9 мкм. Зерна вытянуты в направлении, перпендикулярном оси выдавливания. Периферийные области донной части имеют более равномерную структуру, но более крупные зерна с баллом зерна 10–12 мкм. Структура донной части под пуансоном

характеризуется крупнозернистостью с баллом зерна 12–15 мкм. В местах перехода от донной к кольцевой части, где наблюдается наибольшая деформация, структура мелкозернистая с баллом зерна 5–7 мкм. Активные силы трения оказывают влияние и на формирование структуры. В кольцевой части образца с внешней стороны наблюдается мелкозернистая структура с баллом зерна 8–10 мкм (рис. 5, а); с внутренней стороны – с баллом зерна 5–7 мкм (рис. 5, б).

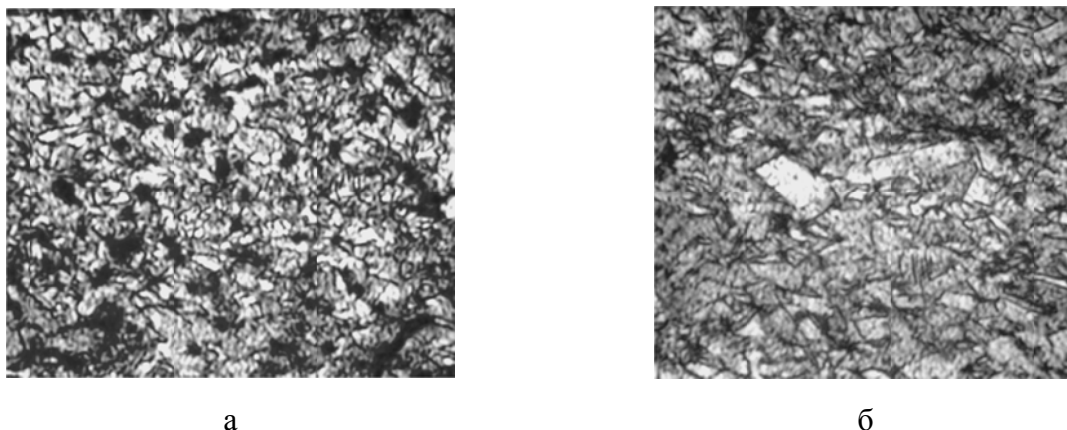


Рис. 5. Микроструктура кольцевой части образца:  
а – структура с внешней стороны; б – структура с внутренней стороны

Высокая интенсивность деформации обеспечивает мелкозернистую структуру и высокую твердость. В кольцевой части образца вследствие действия растягивающих напряжений твердость на внешней поверхности образца меньше, но с увеличением толщины кольцевой части она увеличивается. При выдавливании без активных сил трения образцов с толщиной стенки 7 мм самая высокая твердость равная HRC 130 получена в очаге деформации, наименьшие ее значения на торцах – HRC 70. При выдавливании с активными силами трения высокую твердость также имеют центральные области очага деформации в донной части HRC 140. Еще выше твердость в области перехода от донной к кольцевой части HRC 147. Большую твердость имеют периферийные области донной части HRC 147. В кольцевой части твердость поверхностных слоев ниже, чем внутренних и составляет HRC 105. Величина твердости зависит от толщины кольцевой части. Чем меньше толщина стенки образца, тем больше твердость, что связано с увеличением упрочнения материала. При толщине стенки 2 мм средняя величина твердости на кольцевой части составила HRC 111.

После деформирования образцы подвергали отжигу. После отжига твердость снизилась до HB 55–58 со стороны пуансона, HB 52–54 в кольцевой части образца, HB 50–52 в торцевой части и распределена более равномерно. Структура мелкозернистая как в донной, так и в кольцевой части с баллом зерна 2–4 мкм (рис. 6).

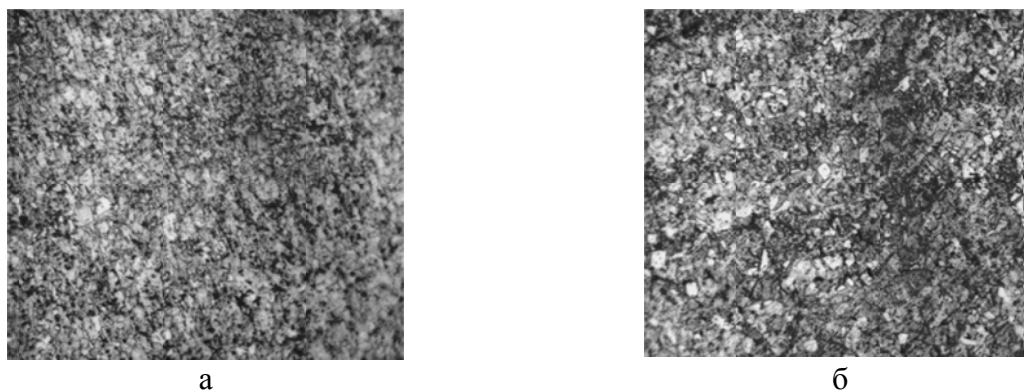


Рис. 6. Микроструктура после отжига:  
а – донной и б – кольцевой частей образца

## ВЫВОДЫ

Установлено влияние активных сил трения на изменение интенсивности деформаций, плотности, структуры и твердости при прямом выдавливании деталей с полостью из порошкового материала. Наличие активных сил трения увеличивает деформации растяжения с внешней стороны образца и сжатия с внутренней стороны. Это повышает разнородность в объеме образца. Вместе с тем плотность остается на уровне теоретической. Активные силы трения увеличивают разнородность по объему образца, и, соответственно, твердость разных объемов образца отличается. Отжиг устраняет разнородность и выравнивает твердость.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриджмен П. У. *Исследования больших пластических деформаций и разрыва: Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов* / П. У. Бриджмен – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 448 с.
2. Леванов А. Н. *Технологическая эффективность осадки и штамповки с активным действием сил трения* / А. Н. Леванов // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 2. – С. 6–8.*
3. Леванов А. Н. *Гидравлические прессы для осесимметричной осадки и штамповки с кручением* / А. Н. Леванов, В. А. Паршин // *Обработка металлов давлением: межвуз. сб. Свердловск : УПИ, 1986. – Вып. 13. – С. 125–129.*
3. Евдокимов А. К. *Учет противодействия при обратном выдавливании с активными силами трения* / А. К. Евдокимов, А. В. Назаров // *Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 11. – С. 28–33.*
4. Леванов А. Н. *Общие закономерности и полезные эффекты контактного трения в процессах обработки металлов давлением* / А. Н. Леванов // *Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 10. – С. 31–36.*
5. Рябичева Л. А. *К определению противодействия при прямом выдавливании порошковых пористых заготовок* / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // *Ресурсосберегающие технологии производства та обробки матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 2012. – № 1 (13). – С. 211–219.*
6. Рене И. *Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки* / И. Рене – Тула : ТПИ, 1970. – 146 с.

## REFERENCES

1. Bridzhmen P. U. *Issledovanija bol'shikh plasticheskikh deformacij i razryva: Vlijanie vysokogo gidrostatischeckogo davlenija na mehanicheskie svojstva materialov* / P. U. Bridzhmen – M. : Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2010. – 448 s.
2. Levanov A. N. *Tehnologičeskaja jeffektivnost' osadki i shtampovki s aktivnym dejstviem sil trenija* / A. N. Levanov // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. – 1995. – № 2. – S. 6–8.*
3. Levanov A. N. *Gidravličeskie pressy dlja osesimmetričnoj osadki i shtampovki s krucheniem* / A. N. Levanov, V. A. Parshin // *Obrabotka metallov davleniem: mezhvuz. sb. Sverdlovsk : UPI, 1986. – Vyp. 13. – S. 125–129.*
3. Evdokimov A. K. *Uchet protivodavlenija pri obratnom vydavlivanii s aktivnymi silami trenija* / A. K. Evdokimov, A. V. Nazarov // *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. – 2008. – № 11. – S. 28–33.*
4. Levanov A. N. *Obshhie zakonomernosti i poleznye jeffekty kontaktного trenija v processah obrabotki metallov davleniem* / A. N. Levanov // *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. – 2007. – № 10. – S. 31–36.*
5. Rjabicheva L. A. *K opredeleniju protivodavlenija pri prjamom vydavlivanii poroshkovyh poristyh zagotovok* / L. A. Rjabicheva, D. A. Usatjuk // *Resursozberegajuchi tehnologii virobництва ta obrobki materialiv u mashinobuduванні : zb. nauk. pr. – Lugans'k : Vid-vo SNU im. V. Dalja. – 2012. – № 1 (13). – S. 211–219.*
6. Rene I. *Jeksperimental'nye metody issledovanija plasticheskogo formoizmenenija v processah obrabotki metallov davleniem s pomoshh'ju delitel'noj setki* / I. Rene – Tula : TPI, 1970. – 146 s.

Рябичева Л. А. – д-р. техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля

Негрей Ю. А. – аспирант ВНУ им. В. Даля

ВНУ им. В. Даля – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск.

E-mail: [ryabic@gmail.com](mailto:ryabic@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 12.08.2014 г.