

Куцова В. З. /д. т. н./, Миронова Т. М. /д. т. н./,  
Чухлеб В. Л. /к. т. н./, Ашкелянец А. В. /к. т. н./,  
Донская Т. Р., Кулаков А. Ю., Пасунков Д. В.  
НМетАУ

## Влияние способов и режимов горячей обработки давлением на структурные изменения в белых чугунах

Изучено поведение белых экономнолегированных чугунов в процессе горячего деформирования методом сжатия на пластометре,ковки и прокатки с различными скоростями и обжатиями. Установлено влияние легирования ванадием и хромом на характер упрочнения чугуна в процессе горячей деформации. Исследовано влияние соотношения размеров заготовок ( $h/d$ ) на их структурную неоднородность при горячей ковке с разной скоростью. Наиболее однородная структура по сечению образца формируется при ковке на молоте в несколько этапов при  $h/d = 2$ . Определены оптимальные обжатия и температурные режимы прокатки чугунолист толщиной до 2 мм из предварительно прокованной заготовки, при которых в чугуне формируется структура обеспечивающая улучшение комплекса свойств. Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** белый чугун, горячая обработка давлением, карбидное превращение, пластометрические испытания, параметры деформации, структурная неоднородность,ковка, прокатка

*It was studied the behavior of economical alloyed white cast irons during a hot working by measuring on the rheometer, forging and rolling with different speeds and compression. Also it was investigating influence of alloying by Vanadium and Chromium on the strain hardening of white cast iron during a hot working. It was found the effect of ratio of the size of workpieces ( $h/d$ ) on their structural heterogeneity in hot forging at different speeds. The most homogeneous structure over the cross section of the workpiece is formed by forging hammer in several stages at  $h/d = 2$ . It was identified optimal compression and temperature modes of rolling iron sheets up to 2 mm from the pre-forged workpieces, which forms structure in white cast iron that provides improvement set of properties.*

**Keywords:** cast iron, hot pressure treatment, tests of plastometr, deformation's parameters, heterogeneity of the structure, forging, rolling

В современной металлургии и машиностроении белые чугуны занимают одно из ведущих мест среди износостойких материалов. Использование горячей деформации для этих сплавов является не только способом формоизменения литых заготовок, но и эффективным способом повышения механических и эксплуатационных свойств [1]. После пластического деформирования прочность и ударная вязкость белых чугунов повышается в 2–4 раза и становится сопоставимой с уровнем свойств высококачественных легированных сталей, а показатели твердости и износостойкости в ряде случаев значительно превышают последние (1,5–2 раза). Трудность применения обработки давлением белых чугунов объясняется их низкой пластичностью в литом состоянии. Благодаря использованию карбидных превращений удалось разработать экономнолегированные чугуны, имеющие повышенный уровень пластичности, который обеспечивает их успешную деформацию на промышленном оборудовании [1–3]. Себестоимость изделий, полученных деформацией из экономнолегированных белых чугунов ниже, чем стальных изделий.

### Материал и методика

В работе исследовали поведение в процессе горячей деформации доэвтектических белых чугунов (табл. 1).

Таблица 1

#### Химический состав экспериментальных чугунов

№ сплава	Содержание элементов, % по массе					
	C	Cr	V	Si	S	P
1	2,35	0,89	1,5	0,45	0,04	0,05
2	2,78	0,81	1,89	0,43	0,03	0,05
3	3,03	0,96	2,76	0,34	0,04	0,04
4	2,36	0,45	–	0,36	0,04	0,03
5	3,00	0,81	–	0,41	0,035	0,04
6	2,89	4,5	0,5	0,36	0,025	0,05
7	2,76	4,5	1,5	0,44	0,03	0,04

Первоначально при температурах 900, 950, 1050 °С проводили горячее сжатие образцов на кулачковом пластометре конструкции ЮУМЗ. Образцы испытывали при двух скоростях деформации – 1–3 и 30 с<sup>-1</sup>. В процессе каждого акта деформации скорость деформации сохранялась постоянной, что обеспечивалось профилем кулачка. Нагрузку проводили однократно и

двукратно. Деформация за один проход составляла 25–51 %, а за два прохода достигала 80 % без разрушения. В дальнейшем, в условиях, приближенном к промышленным, выполняли горячую ковку и прокатку.

#### Результаты исследований

Микроструктура экспериментальных чугунов в литом состоянии состоит из дендритов первичного аустенита (продуктов его распада при охлаждении), ледебурита и колоний ванадиево-карбидной эвтектики. Причем количество ледебурита составляло 25–30 %, а эвтектики на базе карбидов ванадия 0–15 % в зависимости от содержания ванадия (рис. 1а, б).

Проведенные испытания показали, что чем больше ледебурита в структуре чугуна, тем выше сопротивление деформации. При легировании хромом и ванадием сопротивление деформации чугунов также увеличивается, однако имеются существенные отличия в поведении сплавов, у которых в эвтектическом цементите происходит фазовое превращение, а именно, распад пересыщенного ванадием карбида железа:  $(\text{Fe,V})_3\text{C} \rightarrow \text{VC} + \text{A} + \text{Fe}_3\text{C}$ . К таким сплавам относятся, так называемые, дактилированные чугуны [1], содержащие более 1,5 % V (№ 1–3, табл. 1). Характерным отличием при введении ванадия является не только более интенсивное упрочнение уже при малых степенях деформации, но и также появляющееся циклическое разупрочнение (рис. 2а, б), обусловленное развитием карбидного превращения непосредственно в процессе горячего деформирования [2, 3]. Выделение карбидов ванадия в цементите способствует повышению дефектности цементита и появлению дополнительной плоскости скольжения. В результате этого происходит пластическое течение карбида железа, ледебуритные ко-

лонии сплющиваются, вытягиваются в волокна, дробятся (рис. 1в, г).

С увеличением скорости деформации увеличивается и сопротивление деформации чугунов, а повышение температуры способствует его снижению. Однако вид кривой текучести сохраняется независимо от температуры испытаний (рис. 2). При повторном нагружении, хотя характер кривой, в общем, сохраняется, напряжение течения уменьшается более чем в 2 раза.

Пластометрические испытания чугунов (сплавы № 6, 7, табл. 1), легированных хромом, проводили только при скоростях  $(1,0 \dots 3,8) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ . Независимо от температуры, при меньших скоростях деформирования, осадку образцов осуществить не удалось, вследствие высокого сопротивления деформации. Несмотря на то, что образцы были подвергнуты деформации на 27–50 % без разрушения, все же эти сплавы имеют пониженную пластичность по сравнению с ванадиевыми чугунами, что объясняется иной природой фазовых превращений в эвтектическом цементите [4].

Практический и научный интерес представляло изучение влияния соотношения размеров заготовок (высота / диаметр) на их структурную неоднородность при горячей ковке. Для этого из литых стержней диаметром 38 мм из чугуна, содержащего 2,4 % C; 3,2 % V; 1,78 % Cr, вырезали заготовки разной высоты ( $h = 38 \text{ мм}$  и  $h = 76 \text{ мм}$ ). После предварительного отжига [5] образцы деформируют на пневматическом молоте с массой падающих частей 50 кг ( $\Sigma \varepsilon = 55 \%$ ), а также с меньшей скоростью деформации в 15–20 раз на гидравлической разрывной машине с номинальной силой 35 МН ( $\Sigma \varepsilon = 50 \%$ ). Ковку на молоте проводили двумя выносами с целью дополнительного нагрева после деформации  $\varepsilon = 37 \%$ .

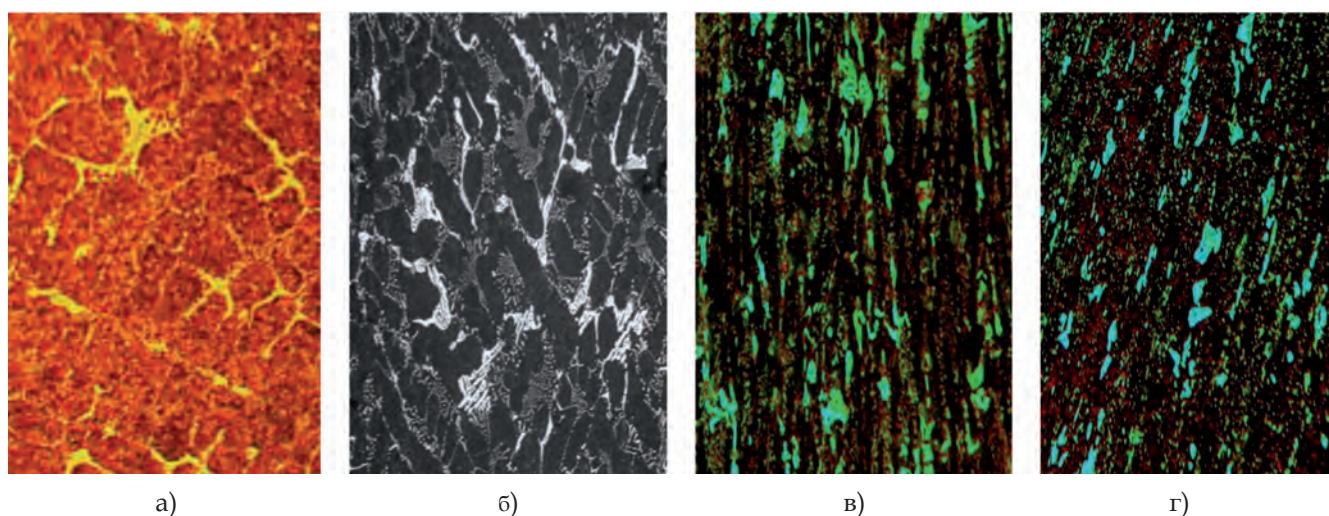


Рис. 1. Структуры экспериментальных чугунов в исходном состоянии (а, б) и послековки (в, г),  $\times 200$ : а – сплав № 1; б – сплав № 3; в – на молоте; г – на разрывной машине

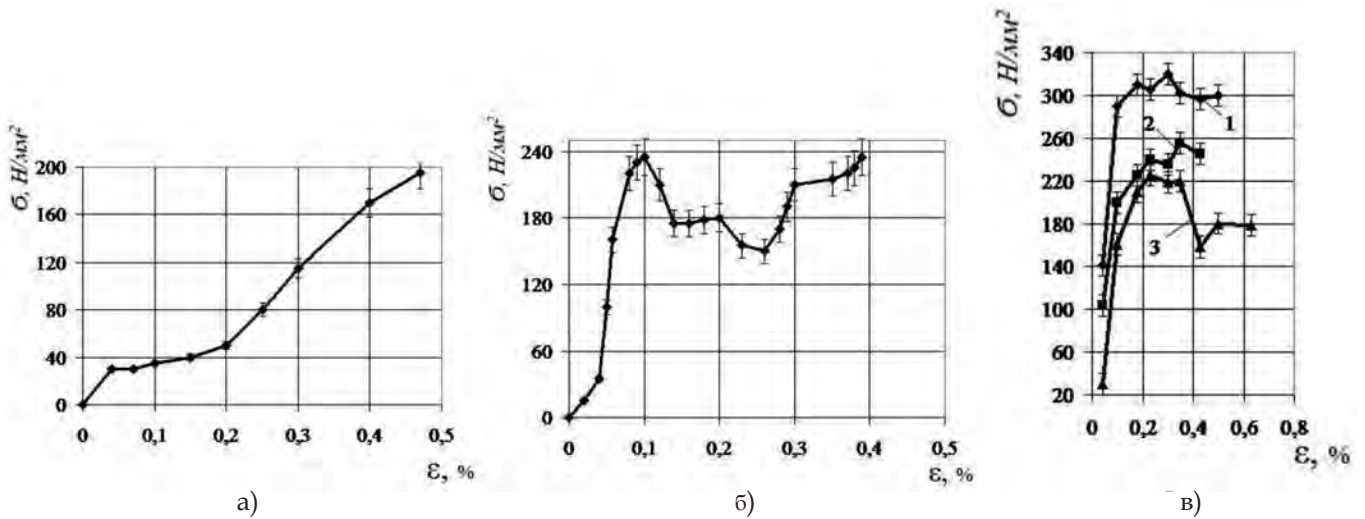


Рис. 2. Истинные кривые текучести исследуемых чугунов, продеформированных на пластометре: а – сплав № 5; б, в – сплав № 2, (1 – 900 °С, 2 – 980 °С, 3 – 1050 °С); а, б – со скоростью 1–3 с<sup>-1</sup> при 950 °С; в – со скоростью 30 с<sup>-1</sup>

В дактилированных чугунах, к которым относятся экспериментальные сплавы, наблюдается пластическое течение эвтектического цементита, который пластифицируется в результате карбидного превращения. Структура чугуна после деформации напоминает полосчатость в сталях, а по ширине *b* между сплюснутыми эвтектическими колониями можно судить о распределении степени деформации по высоте заготовки.

Количественный микроструктурный анализ выполняли методом секущих [6, 7], причем первоначально определяли ось, вдоль которой ориентированы зерна, и перпендикулярно ей проводили секущие через каждые 2 мм для *h* = 38, и 4 мм для *h* = 76 мм. Результаты данных исследований показали, что более однородная структура формируется при ковке на молоте, причем при увеличении высоты образца ветви аустенита сплюсчиваются в большей степени (рис. 1 и рис. 3а), располагаясь параллельно поверхности образца, то есть перпендикулярно действующим сжимающим напряжениям. При ковке с меньшими скоростями на разрывной машине структура чугуна изменяется неравномерно, особенно в заготовке, имеющей *h* / *d* = 2. В центральной части такого образца эвтектическая сетка полностью дробится, поэтому определить ширину «карбидных зерен» не представляется возможным (рис. 1, рис. 3б).

Таким образом, при ковке на молоте, которая происходит в несколько этапов, заготовки имеют лучшую деформируемость [8], формируется более однородная структура по сечению образца.

Возможность производства изделий из разработанных составов ледебуритных чугунов была

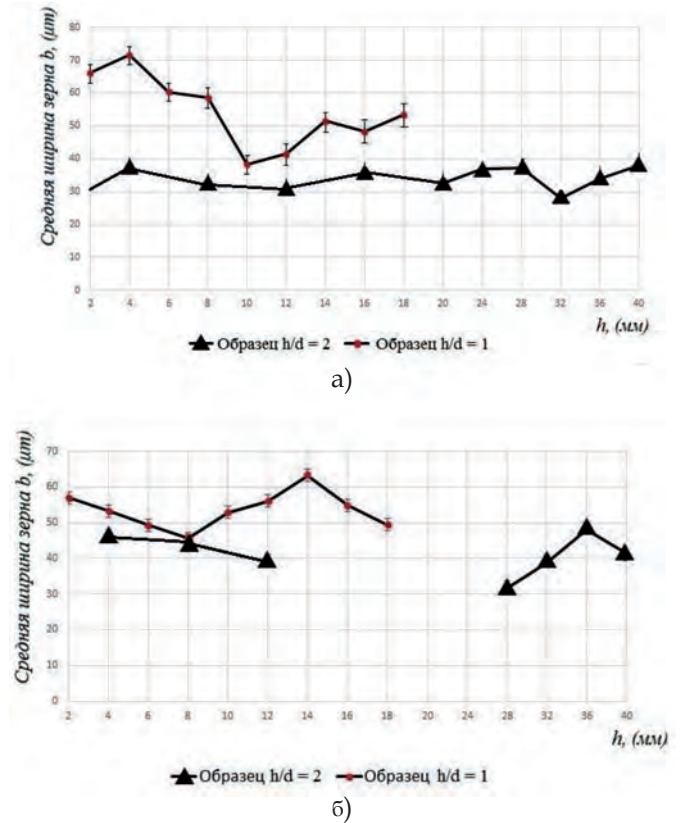


Рис. 3. Результаты количественного микроструктурного анализа чугунных образцов, подвергнутых ковке: а – на пневматическом молоте; б – на разрывной машине

опробована в промышленных условиях на кузнечном оборудовании ЗАО «Феррит» (ранее КПУ № 4 завода ДЗМО). Слитки массой 30 кг (высотой в прибыльной части 215 мм, сечением вверху 135×135 мм, внизу 100×100 мм) подвергали ковке на молоте с массой падающих частей 1 т на полосу 30×100 мм. Степень деформации за

четыре выноса составила 70 %. Ковку проводили при температурах 1050-850 °С. Между двумя выносами применяли промежуточный отжиг при 1000 °С в течение 1 ч, который привел к снижению твердости и повышению пластичности чугуна. Такая схема обеспечила хорошее качество поверхности и высокую деформируемость поковок, которые были использованы в дальнейшем для прокатки листа.

Дальнейшая деформация прокованных заготовок проводилась на двухвалковом лабораторном стане на валках с гладкой бочкой. Наиболее оптимальной температурой нагрева под прокатку является 1050 °С. Повышение температуры до 1100 °С является нежелательным, так как может вызвать локальное оплавление эвтектической составляющей.

Прокатку заготовок проводили поэтапно, с обжатиями в каждом проходе 1-2 мм. Первоначально, когда суммарная деформация не превышала 30 %, подогревы заготовок до исходной температуры проводили после каждого прохода. Затем нагревы проводили после трех последовательных проходов. Выдержку при температуре 1050 °С промежуточных листовых заготовок варьировали в пределах 0,1-1,0 ч.

Микроскопические исследования показали, что длительные высокотемпературные выдержки приводят к интенсивной сфероидизации и коалесценции эвтектических карбидов, зарастанию сот аустенита и огрублению колоний ледебурита. Поэтому длительность высокотемпературных выдержек катаной заготовки должна быть минимально сокращена. Минимальные обжатия за 1 проход составляли 1,0 мм, максимальные – 10,0 мм.

Режимы деформации полосы существенно влияют на конечную структуру листа (рис. 4). Например, увеличение обжатия в каждом проходе до 10 мм и нагрев заготовки после каждого обжатия до исходной температуры с краткосрочной выдержкой 0,25 ч приводит к развитию рекристаллизационных процессов и преимущественному делению эвтектических карбидов по образующимся границам. Карбидное превращение в цементите протекает слабо. Напротив, деформация с малыми обжатиями (1-2 мм) и

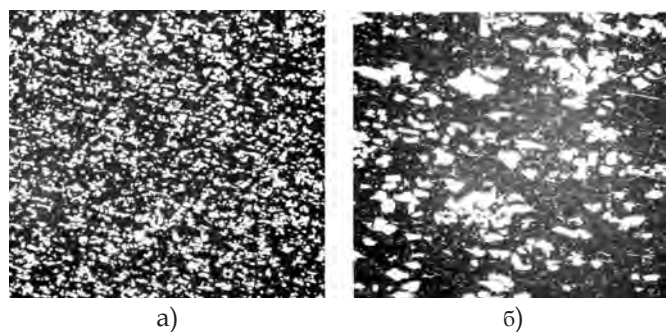


Рис. 4. Микроструктура чугунного листа толщиной 2,0 мм, прокатанного с обжатиями за каждый проход: а – 10 мм; б – 1 мм,  $\times 100$

промежуточными нагревами заготовки до исходной температуры приводит к более интенсивному выделению карбидов ванадия в цементите и значительному пластифицированию цементита. Таким образом, карбидная фаза при больших обжатиях измельчается интенсивней и более равномерно распределяется в твердом растворе (рис. 4).

Твердость чугунного листа толщиной 2,0-2,6 мм составляет 48-51 HRC<sub>3</sub>. Применяя термическую обработку, можно варьировать механическими свойствами чугуна (табл. 2). Например, с помощью отжига возможно снижение твердости [9], необходимое в случае дальнейшей гибки листа с целью получения трубной заготовки.

Для проведения формовки полученного листа проводился отжиг при температуре 660 °С в течение 3 часов, который привел к некоторому снижению твердости до 35-37 HRC, а большее снижение твердости было достигнуто с помощью повторного отжига при температуре 860 °С – до 23-25 HRC. Опытную формовку провели на приборе в круглых штампах со скоростью 20-200 мм/с. Результаты эксперимента показали, что в интервале исследуемых скоростей деформирования чугунный лист обладает удовлетворительной формованием (рис. 5).

Механические свойства полученного листа можно изменять в широких пределах, применяя термическую обработку, которая изменяет структуру металлической матрицы, в которой равномерно распределяются раздробленные эвтектические карбиды. Применение оптималь-

Таблица 2

#### Механические свойства дактилированного чугуна

Состояние чугуна перед испытаниями	$S_B$ , МПа	$S_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, КДж/м <sup>2</sup>	Твердость, HRC
После кристаллизации	370	–	0	0	30	30-32
После ковки и отжига	590	485	6,7	4,4	45	25-27
После прокатки и двукратного отжига	630	515	7,1	5,7	48	22-25
После закалки от 860 °С отпуска при 200 °С	1100	–	–	1,60	52	62-64



Рис. 5. Внешний вид трубных заготовок, полученных формовкой чугунного листа (скорость 2 м/с)

ных режимов закалки и отпуска позволяет повысить твердость до 62–64 HRC, а также прочность и ударную вязкость в 1,5–2 раза (табл. 2). Поэтому можно рекомендовать использование чугунного листопроката для износостойких деталей, например, лемехов плугов и броневых плит.

### Выводы

1. Изучено влияние различных режимов горячего деформирования методом сжатия на поведение белых экономнолегированных чугунов. Характерным отличием при введении ванадия является не только более интенсивное упрочнение уже при малых степенях деформации, но и также появляющееся циклическое разупрочнение, обусловленное развитием карбидного превращения непосредственно в процессе горячего деформирования. С увеличением скорости деформации увеличивается и сопротивление деформации чугунов, а повышение температуры способствует его снижению.

2. Исследовано влияние соотношения размеров заготовок ( $h/d$ ) на их структурную неоднородность при горячей ковке с разной скоростью деформирования. Результаты количественного микроструктурного анализа показали, что при ковке с меньшими скоростями структура чугуна изменяется неравномерно, особенно в заготовке, имеющей  $h/d = 2$ . При ковке на молоте, которая происходит в несколько этапов, формируется наиболее однородная структура по сечению образца.

3. В промышленных условиях из предварительно прокованной заготовки получен чугунный лист толщиной до 2 мм. Определены оптимальные обжатия и температурные режимы прокатки, при которых в чугуне формируется структура обеспечивающая улучшение комплекса свойств.

4. Показано, что с помощью термической обработки свойства чугунного листа можно изменять в широких пределах, изменяя структуру твердорастворной матрицы, в которой распределены раздробленные карбидные частицы. Применение дополнительного отжига обеспечивает повышение пластичности и удовлетворительную формуемость листа в трубную заго-

товку, а закалка и отпуск способствуют повышению твердости, прочности и ударной вязкости в 1,5–2 раза, что позволяет рекомендовать дальнейшее использование деформированного белого чугуна для броневых плит, а также износостойких изделий, таких как лемеха плугов.

### Библиографический список

1. Миронова Т. М. Структура и свойства деформируемых чугунов / Т. М. Миронова, В. З. Куцова. – Днепропетровск: Дриант, 2009. – 190 с.
2. Куцова В. З., Миронова Т. М. Влияние карбидных превращений на технологическую пластичность сталей карбидного класса и белых чугунов / Т. М. Миронова, В. З. Куцова // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2012. – № 7. – С. 251-254.
3. Миронова Т. М. Исследование карбидных превращений с помощью электронной микроскопии / Т. М. Миронова // *Збірник наук. праць. Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії.* – Дніпропетровськ: НМетАУ. – 2014. – № 17. – С. 40-50.
4. Миронова Т. М. О механизмах влияния фазовых переходов на поведение эвтектических карбидов при деформировании / Т. М. Миронова, Т. Р. Донская, А. Ю. Сидорова // *Серія Фізика. Радіоелектроніка.* – Вісник Дніпропетровського університету. – 2012. – Т. 20. – Вип. 19. – № 2 – С. 97-104.
5. Пат. № 106820, Україна, МПК(2014.01) C21D 5/00. Спосіб обробки обробки бывшего чугуна / Т. М. Миронова, Ю. П. Синиціна, К. Д. Підгорна. Т. Р. Донська, А. Ю. Сидорова – Заявл. 25.02.2013; Опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. – 2 с.
6. Филинов М. В. Оптическая структуроскопия: проблемы моделирования и анализа / М. В. Филинов, Ф. С. Фурсов // *Контроль и диагностика.* – 2003. – № 7. – С. 8, 13-17.
7. Миронова Т. М. Застосування кількісного аналізу для дослідження впливу модифікування на первинну структуру доевтектичних білих чавунів / Т. М. Миронова / *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць – Системні технології: Дніпропетровськ: НметАУ.* – 2014. – № 1 (94). – С. 157-162.
8. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. – М.: *Металлургия*, 1990. – 302 с.
9. Миронова Т. М. Влияние горячей деформации и термической обработки на свойства белых чугунов. / Т. М. Миронова, Т. Р. Донська, З. Страдомский / *New Technologies And Achievements In Metallurgy And Materials Engineering.* – 2013. – Nr. 37. – *Czestochowa Series: S.* 111-115.

Поступила 29.07.2015