

## ПОЛУЧЕНИЕ ШАРОВ ДЛЯ ПОМОЛА ИЗ ИЗНОШЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ МЕТОДАМИ ПРОКАТКИ

<sup>1</sup>Г.В. Кожевникова, <sup>2</sup>В.Я. Щукин

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси

<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»  
г. Минск, Республика Беларусь

*Проведен мониторинг использования рабочих элементов шаровых мельниц на предприятиях Беларуси. Рассчитаны предварительные калькуляции производства шаров мелющих из бывших в употреблении железнодорожных рельсов. Определен ресурс пластичности материала изношенных железнодорожных рельсов.*

**Ключевые слова:** пластическое деформирование, шары мелющие, поперечно-клиноватая прокатка

## THE GRINDING BALLS PRODUCTION BY METHODS OF USED RAILWAY RAILS ROLLING

<sup>1</sup>G.V. Kozhevnikova, <sup>2</sup>V.Y. Shchukin

<sup>1</sup>Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

<sup>2</sup>Science and Technology Park BNTU «Polytechnic»  
Minsk, Republic of Belarus

*Monitoring of the use of working elements of ball mills at Belarussian enterprises was carried out. Preliminary calculations of production of grinding balls from used railway rails are calculated. The resource of plasticity of the material of the used railway rails is determined.*

**Keywords:** plastic deforming, grinding balls, cross-wedge rolling

**E-mail:** fti@tut.by

Мелющие шары [1] диаметром от 30 до 120 мм используются в шаровых мельницах при измельчении железной руды и руд цветных металлов, цементного клинкера, угля, строительных материалов. Используемые в настоящее время мелющие шары делятся на стальные катаные и чугунные литые. Катаные шары не раскалываются, как чугунные, имеют больший удельный вес по сравнению с литыми стальными шарами, за счет всестороннего сжатия имеют более равномерную

структуру, не имеют пор. Мелющие шары практически полностью изнашиваются в процессе эксплуатации и расходы на их приобретение составляют 15–35 % от общих технологических затрат [2]. Задачу повышения качества шаров можно, применяя эффективное оборудование и более совершенные технологические процессы производства.

Правительство Беларуси уделяет большое внимание производству цемента в республике и для этой цели была проведена масштабная реконструкция цементных заводов. Увеличиваются потребности в белорусском цементе, как на внутреннем рынке, так и на внешнем. Соответственно, увеличивается потребность в шарах для помола, которые Беларусь в настоящее время в основном закупает в России. Увеличивающееся производство отечественных сыпучих строительных материалов требует сокращения импортной составляющей в структуре затрат. Поэтому разработка отечественных технологий получения мелющих шаров становится особенно актуальной.

Стойкость мелющих шаров во многом определяется свойствами выбранного для их изготовления материала. При этом условия эксплуатации предъявляют к мелющим шарам два взаимоисключающих требования по специальным свойствам: высокая износостойкость и вязкость, определяющая ударостойкость шаров. А экономические соображения диктуют необходимость применения относительно недорогих материалов.

Мелющие шары, изготовленные из легированной рельсовой стали методами прокатки, будут обладать повышенным комплексом структурных и физико-механических свойств, предназначенных для работы в сложно-нагруженных условиях при повышенном абразивном износе. Актуальным является повышение поверхностной твердости при увеличении глубины залегания упрочненного слоя.

Производство шаров новым методом (комбинированной технологией продольной и поперечной прокатки) уменьшает их себестоимость. Экономический эффект определяется:

1) получением импортозамещающего продукта – шаров для помола шаровых мельниц. В связи с развитием и реконструкцией цементной промышленности РБ потребность в шарах, закупаемых за рубежом, постоянно возрастает. Причем мелющие шары, изготовленные по новой технологии из легированной рельсовой стали методами прокатки, будут иметь более высокую твердость и износостойкость;

2) возможностью увеличения экспорта цемента за рубеж за счет увеличения объемов его производства;

3) рециклингом отходов из изношенных железнодорожных рельсов. В настоящее время используется метод переплава изношенных железнодорожных рельсов, это более дорогая технология, чем комбинированная технология прокатки.

С целью определения потребности Республики Беларусь в мелющих элементах шаровых мельниц был произведен мониторинг белорусских предприятий, занимающихся данным производством [3]. Результаты определения потребности в шарах мелющих с разбивкой потребности по диаметрам шаров показаны на рис. 1.

Общая потребность республики в шарах мелющих составила 2 734 тонны. Максимальная потребность выявилась в шарах диаметром 40 мм — 1030 тонн. Следующая высокая потребность в шарах выявилась: для диаметра 60 мм — 482,5 тонн, для диаметра 70 мм — 340,5 тонн, для диаметра 90 мм — 260,5 тонн.

Потребности по группам твердости шаров по ГОСТ 7524–89 выявлена следующая: по группе твердости 2 — 25 тонн; по группе твердости 3 — 1680 тонн или 61,5 %; по группе твердости 4 — 1029 тонн.

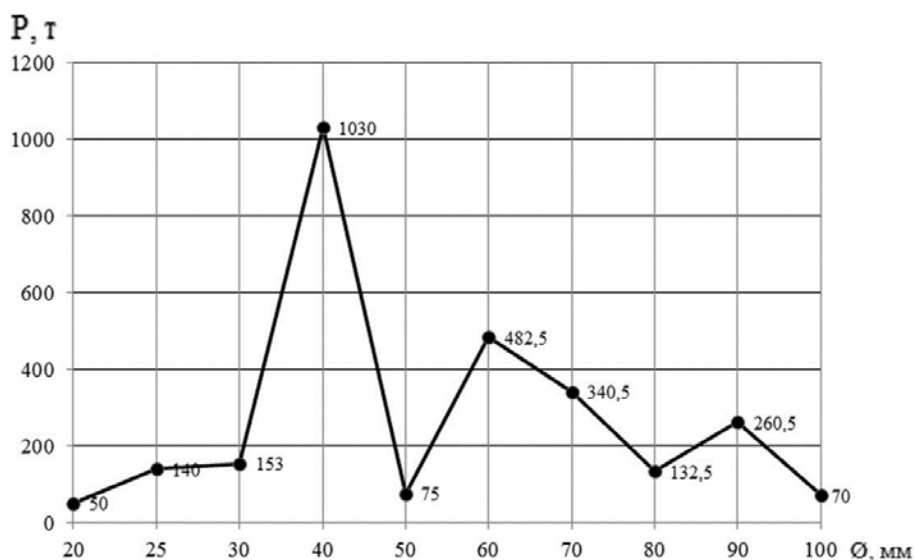


Рис. 1. Потребность предприятий Республики Беларусь в шарах мелющих (тонн) в зависимости от диаметра шара (мм)

Стоимость закупаемых шаров мелющих составила от 1 140 руб. до 1 500 руб. за тонну. Средняя цена определялась как стоимость всех шаров, потребляемых в республике за год, деленная на их общее количество, потребляемое предприятиями в год, и составила 1 300,98 руб. или 670,61 долларов США (по курсу 1,94) за тонну [3].

### **Предполагаемые технологии производства шаров мелющих из изношенных железнодорожных рельсов**

*Технология поперечно-клиновой прокатки (ПКП) производства шаров мелющих строится следующим образом:*

- отрезка «головы» от бывшего в употреблении железнодорожного рельса (предположительно методом плазменной резки);
- резка штучных заготовок для одновременной прокатки 4÷6 шаров (предположительно методом плазменной резки);
- автоматический нагрев ТВЧ заготовки;
- осадка нагретой заготовки на кривошипном прессе вдоль образующей заготовки до отношения двух осей овала менее 1,4;
- автоматическая ПКП шаров на стане К-500;
- термообработка шаров с использованием тепла после прокатки.

Опыт авторов [3] показывает, что ПКП возможна не только в виде цилиндрических прутков, но и заготовок с сечением в виде овала. Процесс протекает стабильно, если отношение максимального размера овала к его минимальному размеру не превышает значение 1,4.

Отношение размеров овала после отрезки головы на рельсах Р43, Р38, Р33 составляет от 1,9 до 2,1. По этой причине заготовку необходимо осадить на прессе, расположив ее продольную ось горизонтально.

Преимущество данного способа заключается в том, что при такой осадке практически отсутствует осевое течение металла (плоско-деформированное состояние) и при этом не уменьшается площадь поперечного сечения заготовки. Площади поперечного сечения головы рельсов Р43, Р38, Р33 составляют соответственно

2317 мм<sup>2</sup>, 2162 мм<sup>2</sup>, 1896 мм<sup>2</sup>, что равноценно диаметрам 54,3 мм, 52,5 мм, 49,0 мм. ПКП может сопровождаться набором металла и увеличением исходного диаметра. Данное обстоятельство позволяет предположить возможность ПКП шара диаметром 60 мм из головы рельса Р43.

Технология продольной прокатки заготовки перед ПКП сопровождается уменьшением поперечного сечения заготовки и в этой связи может быть использована при производстве шаров диаметром 20–30 мм. Недостатком данной технологии является также необходимость дополнительного приобретения заводом оборудования для продольной прокатки. По этой причине целесообразно разработать технологию ПКП шаров диаметром 20–30 мм из рельса Р43. Технически это возможно.

*Технология штамповки шаров мелющих* строится следующим образом:

– отрезка «головы» от бывшего в употреблении железнодорожного рельса (предположительно методом плазменной резки);

– резка штучных заготовок по одной на штампуемый шар (предположительно методом плазменной резки);

– нагрев ТВЧ заготовки;

– штамповка на молоте;

– обрезка облоя на кривошипном прессе (при необходимости);

– термообработка шаров с использованием тепла после штамповки.

Отношение длины заготовки к ее диаметру при свободной осадке ограничено потерей устойчивости заготовки при отношении более 1:2,5. Площадь поперечного сечения головы рельса Р43 равноценна диаметру 54,3 мм. Следовательно, максимально возможная длина заготовки составляет 135,75 мм. Вес такой заготовки составляет  $(\pi \cdot 5,43^2) / 4 \cdot 13,575 \cdot 7,85 = 2466,5 \text{ г} \approx 2,47 \text{ кг}$ .

Согласно ГОСТ 7524-89 шар диаметром 80 мм весит 2,35 кг. Следовательно, это максимально возможный диаметр при традиционной штамповке шара. Большой диаметр шара (например, диаметром 90 мм) возможно получить, используя многопереходную осадку заготовки (по принципу работы горизонтально-ковочной машины).

### **Оборудование для производства шаров мелющих.**

#### **Расчет производительности производства**

##### **Метод ПКП**

ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» [3] располагает тремя станами ПКП модели К-500 Воронежского завода КПО им. Калинина. Все три стана могут быть использованы для производства шаров. Станы обеспечивают прокатку шаров диаметром 40 мм без модернизации. Для прокатки шаров диаметром 50 мм и 60 мм необходима его модернизация, заключающаяся в увеличении мощности привода. Согласно нашим исследованиям [4] при сохранении скорости прокатки мощность должна быть увеличена пропорционально квадрату увеличения диаметра:  $(60/40)^2 = 2,25$  раза, то есть с учетом имеющегося запаса мощности с 30 кВт до 60 кВт.

При одновременной прокатке четырех шаров ширина инструмента составит  $4 \cdot 60 = 240$  мм. Стан же позволяет делать инструмент шириной 300 мм. Возможная длина инструмента менее  $\pi \cdot 500 = 1570$  мм. Примем длину инструмента с учетом участка удаления заготовки 1400 мм.

Угол заострения клинового инструмента в этом случае составит  $\text{tg}\beta = 240 / (2 \cdot 1400) = 0,0857$ , что соответствует углу заострения клинового инструмента  $\approx 5^\circ$ . Данная геометрия обеспечивает стабильную ПКП.

Стан ПКП К-500 обеспечивает 20 рабочих ходов в минуту [3]. Следовательно, в минуту будет производиться 80 шаров или в месяц 1 344 000 шаров.

Расчет по тоннажу проведем по наиболее массовой детали – шару диаметром 40 мм и весом 0,294 кг. В месяц будет произведено  $0,294 \cdot 1\,344\,000 = 395\,136$  кг = 395,14 тонн.

Годовая программа 1 930,5 тонн будет выполнена на одном стане за  $1930,5 / 395,14 = 4,9$  месяцев.

#### **Метод штамповки**

ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» провел опытные работы по штамповке шара мелющего диаметром 70 мм [3]. Завод обладает тремя молотами марки М2140 и МВ2140 с массой падающих частей 1000 кг. Производительность штамповки шара диаметром 70 мм составила 1 500 шт. в смену.

Предположим, что из-за дополнительной операции осадки заготовки при производстве шара диаметром 80 мм производительность уменьшается в 2 раза и составляет 750 шт. в смену.

Программа производства шаров диаметром 70 мм – 340,5 тонны при массе шара 1,6 кг будет выполнена на одном молоте за  $340\,500 / (1500 \cdot 1,6) = 142$  смены или 3,6 месяца при 2-х сменной работе. Программа производства шаров диаметром 80 мм – 132,5 тонны при массе шара 2,35 кг будет выполнена на одном молоте за  $132\,500 / (750 \cdot 2,35) = 75$  смен или 1,9 месяца при 2-х сменной работе.

Таким образом, программа производства шаров диаметром 70 мм и 80 мм для нужд предприятий республики будет выполнена на одном молоте за  $3,6 + 1,9 = 5,5$  месяца.

#### **Объем производства ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» в денежном выражении**

ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» при организации производства шаров мелющих согласно приведенным в отчете расчетам может для нужд республики изготовить из изношенных железнодорожных рельсов методом ПКП шары диаметрами 20 мм, 25 мм, 30 мм, 40 мм, 50 мм, 60 мм в объеме 1930,5 тонн в течении 4,9 месяца; методом штамповки изготовить шары диаметром 70 мм и 80 мм в течении 5,5 месяца в объеме 473,0 тонны.

Стоимость произведенной продукции составит [3]  $(1930,5 + 473,0) \cdot 1300,98 = 3\,126\,905$  руб. или 1 611 807 долларов США (по курсу 1,94).

Дополнительно к этому возможен экспорт шаров мелющих в объеме 469,6 тонн на сумму  $469,6 \cdot 1300,98 / 1,94 = 314\,918$  долларов США.

Указанное производство шаров мелющих на ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» обеспечит потребность республики по данной продукции на  $2403,5 / 2734 \cdot 100 \% = 88 \%$ .

#### **Предварительный расчет себестоимости производства шаров мелющих**

Расчеты выполнены на основании калькуляции производства шара мелющего диаметром 70 мм при производстве опытной партии шаров на ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» (табл.1) [3]. Стоимость материалов определяется в соответствии с письмом ОАО «Белвторчермет» [3]. Рассчитаны калькуляции производства шаров диаметром 40 мм методом ПКП из головы рельса стоимостью 250 долларов США за тонну, шаров диаметром 70 мм методом штамповки из рельса стоимостью 210 долларов США за тонну и головы рельса стоимостью 250 долларов США за тонну (табл. 1).

Табл. 1

## Калькуляция производства шаров мелющих, руб.

	Производство шаров Ø70 мм при производстве опытной партии шаров на ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО»	Производство шаров Ø40 мм методом ПКП из головы рельса стоимостью 250 долларов США×1,94 =485 руб. за тонну	Производство шаров Ø70 мм методом штамповки из рельса стоимостью 210 долларов США×1,94 =407,4 руб. за тонну	Производство шаров Ø70 мм методом штамповки из головы рельса стоимостью 250 долларов США×1,94 =485 руб. за тонну
Основные материалы	1,12	0,1746	1,8548	0,9053
Транспортные расходы	0,0101	0,0008	0,0101	0,0101
Возвратные отходы	–	0,0070	0,3123	0,0286
ИТОГО материальные затраты	1,13	0,1694	1,5526	0,8668
Основная зарплата	0,119	0,0057	0,0694	0,0529
Дополнительная зарплата 16,6%	0,0198	0,0009	0,0115	0,0088
Отчисления на соцстрах (39,7%)	0,0472	0,0023	0,0276	0,0210
Обяз. страхование от несчастных случаев (1%)	0,0012	0,0001	0,0007	0,0005
Энергия на технологии	0,2261	0,0436	0,2261	0,2261
Общепроизводственные расходы (410%)	0,4879	0,0234	0,2845	0,2169
Общехозяйственные расходы (270%)	0,3213	0,0154	0,1874	0,1428
Заводская себестоимость	2,353	0,2598	2,3598	1,5358
Расходы на реализацию 2%	0,0471	0,0052	0,0472	0,0307
Полная себестоимость	2,40	0,2650	2,4070	1,5665
Себестоимость 1 тонны шаров, руб.	1500,00	901,36	1504,38	979,06
Себестоимость 1 тонны шаров, доллар США (по курсу 1,94)	773,20	464,60	775,45	504,07
	Проигрыш в себестоимости по сравнению с импортом (1300,98 – 1500,00) / 1300,98 = –15,3%	Снижение себестоимости по сравнению с импортом 1300,98 / 901,36 = 1,44 раза	Проигрыш в себестоимости по сравнению с импортом (1300,98 – 1504,38) / 1300,98 = –15,6%	Снижение себестоимости по сравнению с импортом 1300,98 / 979,06 = 1,33 раза

## Исследование ресурса пластичности материала изношенных железнодорожных рельсов

Пластичность металлов – это их способность необратимо изменять форму без разрушения. В теории обработки металлов давлением [4, 5] пластичность определять степенью деформации сдвига, которая универсальна для любых пластических деформаций. Расширить диапазон напряжений при испытании пластичности возможно применяя иные экспериментальные методы, например, поперечную прокатку (ПП) дискообразного образца [4]. Метод ПП позволяет определить пластичность в диапазоне среднего напряжения  $+1,51 < \sigma/K < +2,65$  и параметра третьего инварианта девиатора

напряжений  $-0,15 < \sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K < +0,37$ . Для испытания была спроектирована специальная оснастка ФТИ5.792, которая устанавливается в рабочую клетку стана ПКП.

Дискообразный образец диаметром 15 мм нагревается в печи электросопротивления до температуры испытания и устанавливается на неподвижный. Подвижный инструмент перемещается параллельно неподвижному, осуществляя ПП образца. При прокатке фиксируется путь от начала прокатки до вскрытия полости, по значению которого с учетом коэффициента скольжения  $i$  определяется количество оборотов  $N$  образца до вскрытия полости.

Компьютерным моделированием определяются параметры: среднее напряжение  $\sigma/K$ , параметр третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , степень деформации сдвига за цикл прокатки  $\Lambda_{\text{ц}}$ . Предельная степень деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}$  равна:

$$\Lambda_{\text{пр}} = \Lambda_{\text{ц}} \cdot N. \quad (1)$$

За счет клиновой пары оснастки изменяется расстояние между инструментами и тем самым регулируется степень обжатия  $\delta$  при прокатке.

Для расчета параметров напряженно-деформированного состояния использовался пакет программ LS-DYNA.

Результаты исследования пластичности стали М76 ГОСТ 51685-2000 из изношенных железнодорожных рельсов Р43 ГОСТ 7173-54 представлены в табл. 2.

Табл. 2

### Напряженно-деформированное состояние и пластичность стали М76 при ПП дискообразных образцов со степенями обжатия 1,05; 1,10; 1,15 при температуре нагрева 1270 К

$\delta$	$s/K$	$\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$	$\Lambda_{\text{ц}}^*$	$N_{\text{пр}}$	$\Lambda_{\text{пр}}^*$
1,05	2,65	0,37	0,53	7,1	3,76
1,10	1,25	0,19	1,43	4,1	5,86
1,15	0,51	-0,15	2,27	3,3	7,49

Схема деформирования при ПП дискообразных образцов относится к разнонаправленным немонотонным деформациям с изменением угла наклона линии скольжения к материальным волокнам материала до 180°. Известно [5], что зависимость между предельной степенью деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}$  при однонаправленной монотонной деформацией и предельной степенью деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}^*$  при разнонаправленной немонотонной деформации записывается:

$$\Lambda_{\text{пр}}^* = \Lambda_{\text{пр}}^\Omega, \quad (2)$$

где  $\Omega$  – показатель увеличения пластичности при разнонаправленной деформации.

Полученная в результате наших исследований зависимость предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{\text{ГП}}^*$  стали М76 в условиях разнонаправленной деформации от среднего напряжения  $\sigma/K$  и параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  при температуре нагрева 1270 К показана в виде кривой 1 на рис. 2.

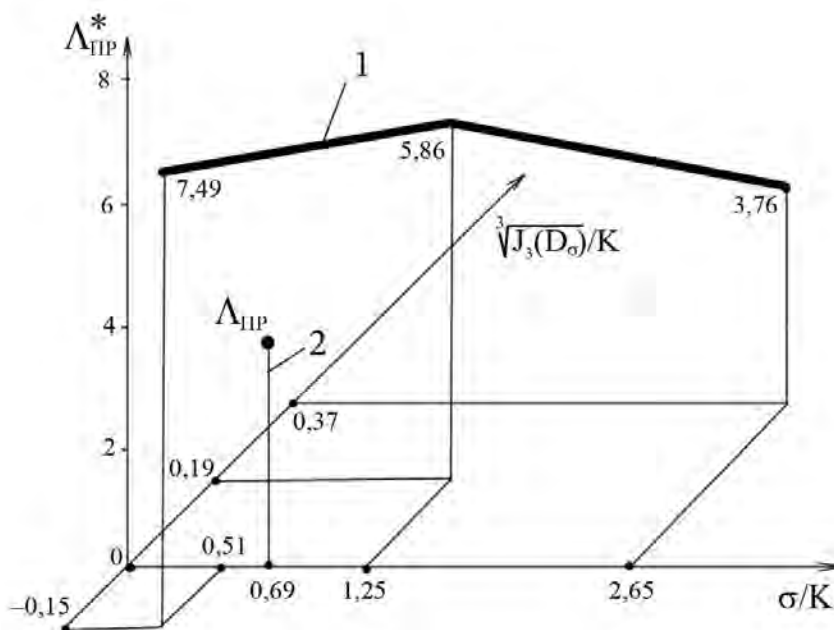


Рис. 2. Зависимости пластичности стали М76 (кривая 1) и стали 65Г (точка 2) от двух независимых параметров напряжения: среднего напряжения  $\sigma/K$  и параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$

Здесь же для сравнения показана (точка 2) предельная степень деформации сдвига при монотонном и однонаправленном растяжении цилиндрического образца при температуре 1270 К стали 65Г, практически совпадающей по химическому составу со сталью М76.

Наглядно видно, что пластичность металла в условиях однонаправленного монотонного деформирования значительно меньше, чем при разнонаправленном немонотонном деформировании.

### Заключение

Проведен мониторинг использования рабочих элементов шаровых мельниц на предприятиях Беларуси. Установлена зависимость объемов потребления мелющих элементов шаровых мельниц на предприятиях Беларуси от их диаметральных размеров.

Установлено, что импорт в Республику Беларусь мелющих элементов шаровых мельниц для производства цемента может быть уменьшен на 88 %.

Установлено, что себестоимость производства мелющих шаров диаметром от 20 до 60 мм из изношенных железнодорожных рельсов (при закупках головы рельса по цене 250 долларов США за тонну) методом ПКП может быть уменьшена в 1,44 раза, методом штамповки (диаметром 70 и 80 мм) может быть уменьшена в 1,33 раза.

Установлено, что закупка изношенных рельсов по цене 210 долларов США за тонну нецелесообразна, так как производство из них шаров методами ПКП и штамповки убыточно.



Объем производства ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» при освоении производства шаров увеличится на 1,9 млн долларов.

Определена зависимость пластичности рельсовой стали М76 от двух независимых параметров напряжения при температуре нагрева 1270 К.

Показано, что уровень пластичности рельсовой стали М76 обеспечивает бездефектное изготовление методом ПКП шаров для шаровых мельниц из изношенных рельсов Р43.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 7524-89. Шары стальные мелющие для шаровых мельниц. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 6 с.
2. Состояние производства и пути повышения качества стальных мелющих шаров / Д.В. Сталинский [и др.] // Сталь, 2017. — № 2. — С. 28–34.
3. Разработка технологии получения шаров для помола из бывших в употреблении железнодорожных рельсов методами прокатки: Отчет о НИР (промежут.) / Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»; Рук. К.Е. Белявин. — № ГР 20161030. — Минск, 2016. — 69 с.
4. Щукин, В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин. — Минск: Наука и техника, 1986. — 223 с.
5. Kozhevnikova, G. Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. — Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. — 321 p.

#### REFERENCES

1. GOST 7524-89. Shary stal'nye melyushchie dlya sharovyh mel'nic. Tekhnicheskie usloviya [ Balls steel grinding for ball mills. Technical conditions]. Moscow, Izd-vo standartov [Moscow: Publishing Standards], 1989. — 6 p. (in Russian).
2. Stalinskij D.V., Rudyuk A.S., Solenyj V.K. , Yudin A.V. Sostoyanie proizvodstva i puti povysheniya kachestva stal'nyh melyushchih sharov [State of production and ways to improve the quality of steel grinding balls] / Stal' [Steel], 2017, № 2, pp. 28–34. (in Russian).
3. Razrabotka tekhnologii polucheniya sharov dlya pomola iz byvshih v upotreblenii zheleznodorozhnyh rel'sov metodami prokatki: Otchet o NIR (promezhut.) [Development of technology for obtaining balls for grinding from used railway rails by rolling methods: Report on research (interim)] / Nauchno-tekhnologicheskij park BNTU «Politehnik»; Ruk. K.E. Belyavin. [Science and Technology Park BNTU "Polytechnic"; Hand. K.E. Belyavin] — № GR 20161030. Minsk, 2016, 69 p. (in Russian).
4. Shchukin V.Y. Osnovy poperechno-klinovoj prokatki [Fundamentals of Cross-Wedge Rolling]. Minsk: Nauka i tekhnika [Minsk: Science and Technology], 1986, 223 p. (in Russian).
5. Kozhevnikova G. Cross-wedge rolling. Minsk: Belorusskaya nauka, 2012, 321 p.

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 02.05.18*