

УДК 669.131.2:621.771.07: 621.746.6

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ, ПО ИХ ТЕРМОСТОЙКОСТИ

ПОЛЯКОВА Н. В., к. т. н.

Кафедра «Качество, стандартизация и сертификация», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (068) 416-46-48; e-mail : [lijanat@mail.ru](mailto:lijanat@mail.ru)

**Аннотация. Цель.** Определяющим качеством материалов рабочего слоя прокатных валков свойством считается износостойкость. Однако в условиях горячей прокатки на ее стабильность могут повлиять такие свойства как коррозионная стойкость и термостойкость. Распространенными материалами для производства прокатных валков горячей прокатки являются белый высокохромистый чугун и быстрорежущая сталь, вопросам термостойкости которых в современной литературе не уделено достаточно внимания. Целью работы является оценка качества высокохромистого чугуна и быстрорежущей стали как материалов валков горячей прокатки по их термостойкости. **Методика.** Экспериментальные образцы высокохромистого чугуна марки ИЧХ16НМФТ и быстрорежущей стали марок Р5М5 и Р6М5 были подвергнуты термоциклированию по режиму: 200 циклов нагрева до 600 °С и охлаждения до 20 °С. После испытаний оценивали изменение микроструктуры и микротвердости структурных составляющих экспериментальных материалов. **Результаты.** Представлены результаты исследований склонности материалов, применяемых для производства прокатных валков, к разрушению, вызванному термической усталостью. Исследованы условия зарождения и роста трещин термической усталости в белом высокохромистом чугуне, оценены структурные изменения, происходящие при термоциклировании. На поверхности образцов белого высокохромистого чугуна в процессе испытаний было выявлено образование макро- и микротрещин термической усталости. Микротрещины проходят по эвтектическому карбиду, в значительной мере распространяясь на остаточный аустенит, по границе раздела карбида с продуктами распада аустенита. На поверхности образцов быстрорежущей стали в описанных условиях испытаний трещинообразование не наблюдалось. В результате термоциклирования белого высокохромистого чугуна происходит снижение микротвердости металлической матрицы, а микротвердость эвтектического карбида в сравнении с исходным литым состоянием увеличивается. Микротвердость структурных составляющих быстрорежущей стали изменяется менее существенно. **Практическая значимость.** Существует возможность снижения износостойкости прокатных валков с рабочим слоем из высокохромистого чугуна в литом состоянии в результате термоусталостного разрушения во время эксплуатации в условиях горячей прокатки. Повысить термостойкость высокохромистого чугуна ИЧХ16НМФТ можно, предположительно, за счёт применения специальных методов термообработки, направленных на получение бейнитной структуры металлической матрицы. Можно рекомендовать учитывать показатели термостойкости материалов прокатных валков горячей прокатки как дополнительный критерий их качества.

**Ключевые слова:** высокохромистый чугун, быстрорежущая сталь, прокатные валки, термическая усталость, термоциклирование.

## ОЦІНКА ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАЛКІВ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ, ЗА ЇХ ТЕРМОСТІЙКІСТЮ

ПОЛЯКОВА Н. В., к. т. н.

Кафедра «Якість, стандартизація та сертифікація», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (068) 416-46-48, e-mail : [lijanat@mail.ru](mailto:lijanat@mail.ru)

**Анотація. Мета.** Властивістю, що визначає якість матеріалів робочого шару прокатних валків, вважається їх зносостійкість. Однак в умовах гарячої прокатки на її стабільність можуть вплинути такі властивості як корозійна стійкість і термостійкість. Поширеними матеріалами для виконання прокатних валків гарячої прокатки є білий високохромистий чавун і швидкорізальна сталь, питанням термостійкості яких у сучасній літературі не приділено достатньо уваги. Метою роботи – оцінка якості високохромистого чавуну і швидкорізальної сталі як матеріалів валків гарячої прокатки за їх термостійкістю. **Методика.** Експериментальні зразки високохромистого чавуну марки ІЧХ16НМФТ і швидкорізальної сталі марок Р5М5 і Р6М5 були піддані термоциклуванню за режимом: 200 циклів нагрівання до 600 °С і охолодження до 20 °С. Після випробувань оцінювали зміни микроструктури і микротвердості структурних складових експериментальних матеріалів. **Результати.** Наведено результати дослідження схильності матеріалів, що застосовуються для виробництва прокатних валків, до руйнування, викликаного термічною втомою. Досліджено умови зародження і росту тріщин термічної втоми в білому високохромистому чавуні, оцінено структурні зміни, що відбуваються в процесі термоциклування. На поверхні зразків білого високохромистого чавуну в процесі випробувань було виявлено утворення макро- і микротріщин термічної втоми. Микротріщини проходять по евтектичному карбїду, значною мірою поширюючись на залишковий аустеніт, по межі

розділу карбіду з продуктами розпаду аустеніту. На поверхні зразків швидкорізальної сталі в описаних умовах випробувань тріщиноутворення не спостерігалось. У результаті термоцикування білого високохромистого чавуну відбувається зниження мікротвердості металевої матриці, а мікротвердість евтектичного карбіду порівняно з вихідним литим станом збільшується. Мікротвердість структурних складових швидкорізальної сталі змінюється менш істотно. **Практична значимість.** Існує можливість зниження зносостійкості прокатних валків із робочим шаром з високохромистого чавуну в литому стані в результаті термовтомного руйнування під час експлуатації в умовах гарячої прокатки. Підвищити термостійкість високохромистого чавуну ІЧХ16НМФТ можна, імовірно, за рахунок застосування спеціальних методів термообробки, спрямованих на отримання бейнітної структури металевої матриці. Можна рекомендувати враховувати показники термостійкості матеріалів прокатних валків гарячої прокатки як додатковий критерій їх якості.

*Ключові слова:* високохромистий чавун, швидкорізальна сталь, прокатні валки, термічна втома, термоцикування.

## EVALUATION OF THE QUALITY OF MATERIALS USED FOR HOT ROLLING MILL ROLLS, BY THEIR HEAT-RESISTANCE

POLYAKOVA N. V., *Cand. Sc. (Tech.)*

Department of quality, standardization and certification, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Ave. Gagarina, Dnipropetrovs'k 49600, Ukraine, tel. +38 (068) 416-46-48, e-mail : [lijanat@mail.ru](mailto:lijanat@mail.ru)

**Abstract. Purpose.** High-chromium cast iron and high speed steel are used for rolling mill rolls production. In hot rolling processes tool's failure can be result from the combination of thermo-mechanical and chemical damage. A better knowledge of thermal fatigue destruction mechanisms in this material could be useful for a better appreciation of its service behaviour and lifetime. **Methodology.** The experimental specimens of high-chromium cast iron and high speed steel were tested by mode : 200 cycles the heating to 600 °C and cooling to 20 °C. The changes in the microstructure and microhardness of structural components after tests are evaluate. **Findings.** The results of studies of materials used for rolling mill rolls production tendency to the destruction caused by thermal fatigue are presented. The influence thermal cycling on structure and properties high chromium cast iron and high speed steel was investigated. The tendency of white cast iron to thermal fatigue damage was shown. Peculiarities of thermal cracks nucleation and growth were studied. Microhardness of structural components after the tests was measured. The structural changes that occur during thermal cycling were analyzed. **Practical value.** It may be recommended to take into account thermal stability of materials hot rolling mill rolls as an additional criterion of quality.

*Keywords:* high chrome cast iron, high speed steel, rolling mill rolls, thermal fatigue, thermal cycling.

### Введение

Горячая прокатка листа осуществляется с использованием в технологическом процессе двухслойных прокатных валков. Для достижения требуемых технологических свойств часто рабочую часть (бочку валка) изготавливают из износостойких материалов, а ось валка – из конструкционной стали с необходимыми прочностными характеристиками.

Критерием качества материалов, применяемых для формирования рабочего слоя прокатных валков, являются высокие показатели их износостойкости [7], которыми в полной мере обладают быстрорежущие стали и белые высокохромистые чугуны. Это обусловлено, в первую очередь, наличием в их химическом составе карбидообразующих элементов, в том числе хрома. Ранее исследования были направлены, главным образом, на достижение показателей износостойкости этих материалов путем получения обеспечивающей их рациональной структуры [12; 14]. В настоящее время имеется тенденция к расширению круга изучаемых свойств материалов, с учетом конкретных условий их эксплуатации, т. к. последние прямо или косвенно влияют на формирование и/или изменение их

структуры и, соответственно, на сохранение высоких показателей износостойкости готовых изделий [11; 15; 16].

Так, прокатные валки горячей прокатки работают в сложных эксплуатационных условиях, включающих, помимо механических нагрузок, нагрев тонкого поверхностного слоя валка во время его контакта с металлом до температур 600 °C и выше, и последующего почти немедленного охлаждения водой до 50...150 °C [13]. Часто при этом наблюдается высокотемпературное окисление поверхности валков, что может сопровождаться ухудшением ряда их технологических характеристик, в том числе износостойкости. Деформация, вызванная температурными полями, может приводить к появлению внутренних напряжений в сплавах [10]. При переменном, циклически повторяющемся воздействии высоких температур, чередующемся с резкими охлаждениями, сплавы могут подвергаться термоусталостному разрушению, связанному с накоплением остаточных термических напряжений в их структуре. Конечным этапом этого вида разрушения является образование термоусталостных трещин, которое может приводить к постепенному ухудшению сопротивления износу или даже резкому выходу изделий из строя [2].

В связи с этим важной технологической характеристикой материалов рабочего слоя прокатных валков является способность противостоять термоусталостному разрушению, т. е. их термостойкость. Известно, что прокатные валки из высокохромистого чугуна склонны к хрупкому разрушению, причем в большей степени, чем валки, изготовленные из быстрорежущей стали [1]. В значительной мере это связано с сильной текстурованностью структуры и высоким содержанием прочных, но малопластичных карбидов.

Большое содержание дорогостоящих легирующих элементов обуславливает высокую стоимость быстрорежущей стали, в связи с чем применение высокохромистого чугуна может быть более экономичным при достаточно продолжительном сроке эксплуатации прокатного валка.

### Цель

Целью настоящего исследования явилась оценка качества материалов на основе экспериментального изучения термостойкости белых высокохромистых чугунов марки ИЧХ16НМФТ и быстрорежущих сталей марок Р6М5 и Р5М5, т. е. способности этих сплавов противостоять термоусталостному разрушению под влиянием циклических термических нагрузок.

### Методика

Для испытаний на термостойкость были изготовлены металлические образцы из высокохромистого чугуна марки ИЧХ16НМФТ и быстрорежущей стали марок Р6М5 и Р5М5.

Чугунные образцы были из поверхностной части экспериментальной отливки, моделирующей прокатный валок, полученной методом центробежного литья. Наружный слой отливки – белый высокохромистый чугун, внутренний слой – серый нелегированный чугун.

Образцы быстрорежущей стали были вырезаны из экспериментальных заготовок, полученных: литьем с последующей деформацией, а также электрошлаковой наплавкой быстрорежущей стали на стержень стали марки 40Х.

Форма металлических образцов – параллелепипед с размерами сторон 15×10×5 мм. Химический и фазовый состав образцов чугуна и стали в исходном состоянии характеризуют данные, приведенные соответственно в [3–5].

Металлические образцы испытывали в течение 200 циклов последовательного нагрева и охлаждения. На каждом из циклов образцы подвергали нагреву до 600 °С в предварительно разогретой муфельной лабораторной печи марки СНОЛ 2.4.2 /12,5И2 в течение 3 мин. и последующему охлаждению в проточной воде течение 30...45 сек.

Микроструктуру образцов до и после испытаний изучали с помощью микроскопа «Neophot-21» в несколько этапов – непосредственно после

термоциклирования, затем после легкой механической обработки, проводимой для снятия продуктов коррозии, и, наконец, после травления образцов в 5 % спиртовом растворе азотной кислоты. Этапность изучения микроструктурных характеристик предпринята в связи с тем, что во время тщательной механической обработки поверхности либо при избыточном травлении мог быть снят слой металла с микротрещинами. Микротвердость фаз и структурных составляющих определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3.

### Результаты

Подробные результаты испытаний термостойкости образцов из высокохромистого чугуна марки ИЧХ16НМФТ приведены в предыдущих работах [8; 9].

Так, при визуальном осмотре поверхности образцов белого высокохромистого чугуна в процессе испытаний было выявлено образование макротрещин. Первые видимые невооруженным глазом трещины появились после 25...30 циклов теплосмен. Исходя из условий образования, они были идентифицированы как трещины термической усталости.

После 100 циклов теплосмен при увеличениях от ×60 до ×200 была изучена морфология термоусталостных трещин. После 200 циклов теплосмен при увеличениях ×400...×1 000 была предпринята попытка определения мест зарождения трещин, направления и скорости их распространения на поверхности и вглубь образцов.

После первых 100 циклов теплосмен дальнейшего образования новых трещин не наблюдалось. Имели место лишь рост, углубление и распространение трещин. Это согласуется с теорией [2], согласно которой зарождение всех образующихся термоусталостных трещин происходит уже во время первой теплосмены, в дальнейшем, при продолжении термоциклирования, происходит лишь рост, углубление и распространение трещин.

Микроструктурные исследования выявили образование как широких, незначительно разветвленных магистральных трещин, видимых невооруженным глазом, так и сетки микротрещин, едва различимых на неподготовленной поверхности при небольших увеличениях. Рост магистральных трещин происходит по длине образцов – от кромок к центру граней. Ширина раскрытия трещин зависит от многих факторов, в том числе от возможности протекания коррозионных процессов по химическому и электрохимическому механизму. Глубина трещин зависит, главным образом, от величины остаточных напряжений в металле [2]. Микротрещины проходят по эвтектическому карбиду, в значительной мере распространяясь на остаточный аустенит, по границе раздела карбида с продуктами распада аустенита, иногда пересекая продукты распада аустенита. Это согласуется с

теорией о зонах упругой и пластической деформации [2].

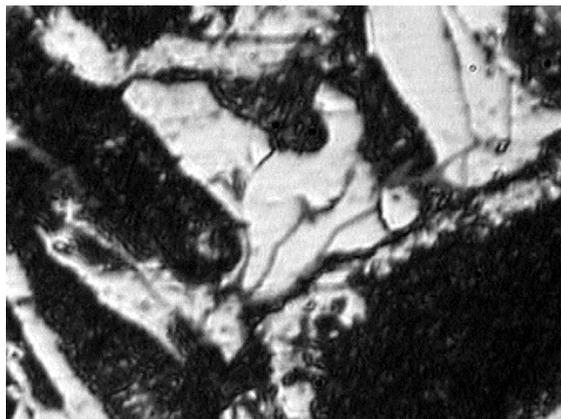
На поверхности образцов быстрорежущей стали в описанных условиях испытаний трещинообразование не наблюдалось. Это может быть связано с меньшим количеством карбидов в структуре образцов, на границах и в объеме которых происходило зарождение трещин в высокохромистом чугуна, иной их морфологией и большей дисперсностью.

В результате термоусталостных испытаний произошло изменение структуры: существенное в образцах белого высокохромистого чугуна и незначительное в образцах быстрорежущей стали, что было выявлено микроструктурными исследованиями и показано на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 а представлен участок макротрещины, которая располагается в области продуктов распада аустенита. Ее образование вызвано напряжениями, обусловленными объемными изменениями при перекристаллизации аустенита. На рисунке 1 б отчетливо видны микротрещины, проходящие по эвтектическому карбиду.



а



б (b)

Рис. 1. Микроструктура термоусталостной макротрещины на образце чугуна,  $\times 400$  (а) и микротрещины (б),  $\times 1\ 000$  /

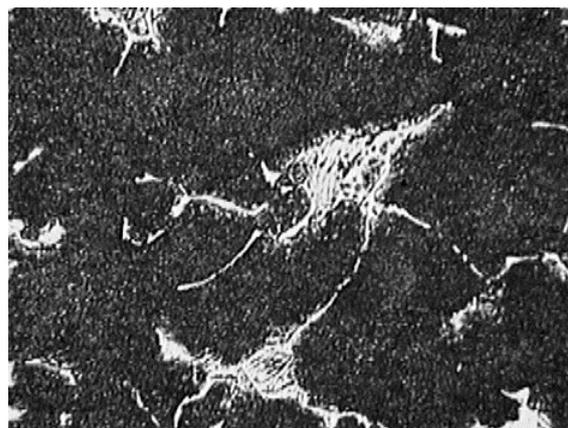
Fig. 1. Microstructure of thermal fatigue macrocrack on iron's specimen,  $\times 400$  (a) and microcrack (b),  $\times 1\ 000$

На рисунке 2 показана структура быстрорежущей стали после термоусталостных испытаний. В отличие

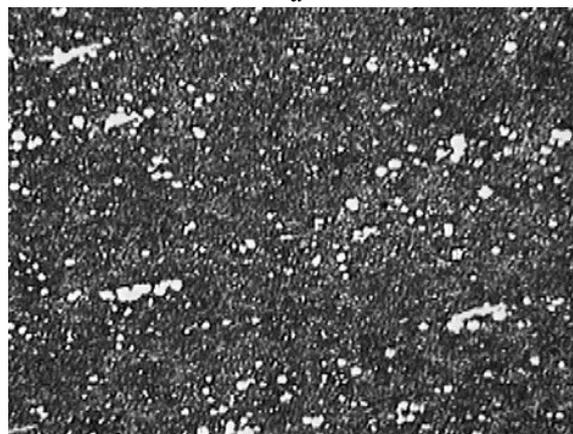
от высокохромистого чугуна, макро- и микротрещины в структуре не были обнаружены. Значительного изменения структуры образцов под действием термоциклических нагрузок не произошло.

Механические характеристики материалов, в частности, их микротвердость, также претерпевают изменения при термоциклировании. Значения микротвердости структурных составляющих белого высокохромистого чугуна и быстрорежущей стали до и после испытаний представлены в таблице.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что в результате термоциклирования белого высокохромистого чугуна происходит снижение микротвердости металлической матрицы, а микротвердость эвтектического карбида в сравнении с исходным литым состоянием увеличивается. Это связано, вероятно, с перераспределением легирующих элементов между фазами и структурными составляющими, обусловленным фазовыми превращениями и структурными изменениями чугуна при термоусталостных испытаниях. Описанные процессы, в свою очередь, приводят к снижению износостойкости чугуна.



а



б (b)

Рис. 2. Микроструктура образцов быстрорежущих сталей после испытаний : P5M5, ЭШН – а; P6M5 – б;  $\times 400$  /

Fig. 2. Microstructure of HSS specimens after the tests : P5M5, EShN – a; P6M5 – b;  $\times 400$

Образцам быстрорежущей стали присущи менее существенные изменения микротвердости структурных составляющих. Несмотря на существенное снижение микротвердости металлической матрицы, микротвердость карбидов осталась практически неизменной. Это дает основания предположить большую стабильность износостойкости быстрорежущей стали в сравнении с высокохромистым чугуном под влиянием термоциклического воздействия

Таблица

**Микротвердость структурных составляющих образцов чугуна и стали / Microhardness of structural components of iron's and steel's specimens**

Тип образцов	Микротвердость, МПа			
	металлической матрицы*		карбидов	
	до испытаний	после испытаний	до испытаний	после испытаний
Высокохромистый чугун	6 262 / 6 890	5 030 / 3 476	7 336	9 526
Быстрорежущая сталь	- / 5 760	- / 3 850	6 920	6 850

\*Через дробь приведены значения микротвердости для светлотравящихся (в числителе) и темнотравящихся (в знаменателе) продуктов распада аустенита.

**Практическая значимость**

Основываясь на результатах исследования, можно предположить, что во время эксплуатации в условиях горячей прокатки прокатные валки с рабочим слоем из высокохромистого чугуна в литом состоянии будут демонстрировать меньшую долговечность, чем валки из быстрорежущей стали, что обусловлено возможностью снижения их

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES**

1. Будагянц Н. А. Литые прокатные валки / Н. А. Будагянц, В. Е. Карский / Москва : Металлургия, 1983. – 175 с.  
 Budagyants N. A. Karskij V.E. [The cast mill rolls.], Moscow, Metallurgy, 1983, 175 p.  
 2. Дульнев Р. А. Термическая усталость металлов / Р. А. Дульнев, П. И. Котов / Москва : Машиностроение, 1980. – 200 с.  
 Dulnev R. A., Kotov P. I. Termicheskaja ustalost' metallov [Thermal fatigue of metals]. – Moscow, Engineering, 1980, 200 p.  
 3. Журавель В. М. Исследование возможности получения биметаллической быстрорежущей стали методом ЭШН ЖМ / В. М. Журавель, А. Н. Головачев, В. В. Жуков, Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко // Nove Technologie i osiagniecia w metalurgii I inzynierii materialowej : 7 Международная научная конференция.

износостойкости в результате термоусталостного разрушения.

Повысить качество рабочего слоя валков горячей прокатки из высокохромистого чугуна ИЧХ16НМФТ по критерию его термостойкости можно, предположительно, за счёт применения специальных методов термообработки, направленных на получение бейнитной структуры металлической матрицы [6].

Исходя из полученных результатов можно дать рекомендацию : учитывать показатели термостойкости материалов прокатных валков горячей прокатки, как дополнительный критерий их качества.

**Выводы**

1. Белый высокохромистый чугун марки ИЧХ16НМФТ обладает склонностью к образованию термоусталостных трещин в большей мере, чем быстрорежущая сталь марок Р6М5 и Р5М5.

2. По сечению образцов белого высокохромистого чугуна за 20...30 циклов теплосмен образуются макротрещины термической усталости, видимые невооруженным глазом. При том же количестве циклов теплосмен макротрещины на образцах из быстрорежущей стали не образуются.

3. В процессе термоусталостных испытаний на поверхности образцов из высокохромистого чугуна образуются микротрещины как по границе раздела продуктов распада аустенита с эвтектическими колониями, так и в объеме первичных дендритов превращенного аустенита. В образцах из быстрорежущей стали изменения микроструктуры не сопровождаются образованием микротрещин.

Таким образом, продолжительность эксплуатации прокатных валков, изготовленных их высокохромистого чугуна, будет меньше, чем валков из быстрорежущей стали. Продлить срок эксплуатации валков из высокохромистого чугуна можно за счёт применения специальных методов термообработки.

Ченстохова, 2 июня, 2006 г. – Ченстохова, 2006. – С. 606– 609.

Zhuravel V. M., Golovachev A. N., Zhukov V. V., Medovar L. B., Stovpchenko A. P. Issledovanie vozmozhnosti poluchenija bimetallicheskoj bystrorezhushej stali metodom ESHN ZH M [Study the possibility of obtaining bimetallic HSS by method ESHN LM]. Nove Technologie i osiagniecia w metalurgii I inzynierii materialowej [New technologies and advances in metallurgy and materials science engineering] : 7 International scientific conference. – Czestochowa, June 2, 2006. – Czestochowa, 2006, pp. 606–609.

4. Кондратенко О. В. Экономические преимущества производства и особенности получения композитной быстрорежущей стали / О. В. Кондратенко, А. Н. Головачев, И. О. Горобец, В. М. Кондратенко, А. П. Стовпченко // Теория и практика металлургии. – № 2–3. – 2007. – С. 24–27.

Kondratenko O. V., Golovachev A. N., Gorobets I. O., Kondratenko V. M., Stovpchenko A. P. Ekonomicheskie preimushchestva proizvodstva i osobennosti polucheniya bystrorezhushhej stali [The economic benefits of production and features high-speed steel producing composite] Teoriya i praktika metalurgii. – Theory and practice of metallurgy. no. 3, 2007, pp. 24–27.

5. Куцова В. З. Закономірності структуроутворення та кінетики фазових перетворень в чавуні ІЧХ16НМФТ / В. З. Куцова, О. В. Швець, А. Ю. Куцов, М. А. Ковзель // МТом / Днепропетровск : ПГАСА, 2002. – № 1–2. – С. 10–17.

Kutsova V. Z., Shvec' O. V., Kutsov A. Y., Kovzel M. A. Zakonomirnosti strukturoutvorenniya ta kinetiki fazovyh peretvoren' v chavuni ICHN16NMFT [Regularities of structure formation and kinetics of phase transformations in iron grade ICHN16NMFT]. МТОМ, Dniepropetrovs'k : PGASA Publ., 2002, – no. 1–2, pp. 10–17.

6. Патент 59272 А, Україна, МКВ С21D 5/04. Спосіб термічної обробки високолегованого чавуну / В. З. Куцова, А. Ю. Куцов, М. А. Ковзель, Г. В. Мамченко. – 20021210426. – Заявлено 23.12.2002. – Опубл. 15.08.2003. Бюл. № 8.– С. 1.

Kutsova V. Z., Kutsov A. Yu., Kovzel M. A., Mamchenko G. V. Patent 59272, Ukraine, MAC C21D 5/04. Sposib termichnoy obrobky visokolegovanogo chavunu [Method of heat treating high chrome cast iron] - 20021210426. Stated 23.12.2002. Publ. 15.08.2003. Bull. no. 8. p. 1.

7. Медовар Л. Б. Проблемы и перспективы производства современных прокатных валков / Л. Б. Медовар, В. К. Грановский // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2001. – № 4. – С. 22–24.

Medovar L. B. Granovskij V.K. Problemy i perspektivy proizvodstva sovremennyh prokatnyh valkov [Problems and perspectives production of modern rolls] Problemy special'noj elektrometallurgii. – Problems of special electrometallurgy, 2001, no. 4, pp. 22–24.

8. Пинчук С. И. Структура и свойства высокохромистого чугуна как материала для производства прокатных валков / С. И. Пинчук, Н. В. Полякова // Металлознавство та термічна обробка металів. – 2008. – № 1. – С. 24–34.

Pinchuk S. I., Polyakova N. V. Struktura i svojstva vysokokhromistogo chuguna kak materiala dlya proizvodstva prokatnyh valkov [Structure and properties of high chrome cast iron as a material for the production of rolling mill rolls]. Metalloznastvo ta termichna obrobka metaliv. – Metal science and heat treatment, 2008, no. 1, pp. 24–34.

9. Полякова Н. Влияние условий нагрева и охлаждения на структуру и свойства материалов, предназначенных для производства прокатных валков / Н. Полякова, Т. Семенец // VIII Міжнародна наукова конференція “Нові технології та досягнення у металургії та інженерному матеріалознавстві”, 25 травня 2007 р. Польща, Ченстохова, 2007. – 738 с. – С. 478–481.

Polyakova N. Semenets T. Vlijanie uslovij nagreva i ohlazhdenija na strukturu i svojstva materialov prednaznachennyh dlya proizvodstva prokatnyh valkov [Influence of conditions of heating and cooling on the structure and properties of materials for the production of rolling mill rolls]. VIII Mizhnarodna Naukova konferentsiya "Novi tehnologii ta dosyagnennya v metalurgii ta inzhenernomu materialoznavstvi" – New technologies and advances in metallurgy and materials science engineering. May 2, 2007. Poland, Czestochowa, 2007, 738 p., pp. 478–481.

10. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Часть вторая. Механические испытания. Конструкционная прочность / Я. Б. Фридман // Москва : Машиностроение, 1974.– 368 с.

Friedman Ya. B. Mehanicheskie svojstva metallov: v dvuh chastyakh [Mechanical properties of metals: In two parts] / Moscow, Engineering, 1974. Chast' vtoraya: mehanicheskie ispytaniya. Konstrukcionnaya prochnost'. [Part Two: Mechanical tests. Structural strength.], 368 p.

11. High Temperature Oxidation Investigation of Hot Roll Material with High-Speed Steel L. Hao, Z. Y. Jiang, Z. X. Chen, D. B. Wei, X. W. Cheng, S.Z. Luo, L. Z. Jiang, M. Luo, L. Ma, Advanced Materials Research, Vol. 1095 (Mar. 2015), pp. 130–134.

<http://www.scientific.net/AMR.1095.130>

12. Hot friction and wear behaviour of high speed steel and high chromium iron for rolls. M. Pellizzari, D. Cescato, M. G. De Flora. 17th International Conference on Wear of Materials, 15 June 2009, Las Vegas, USA // Wear. Volume 267, Issues 1–4, pp. 467–475.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00431648/267/1>

13. Improvement of the work roll performance on 2050 mm hot strip mill at ISCOR VANDERBIJLPARK / R. J. Skoczynski, G. Walmag, J. P. Breyer // International ATS Steelmaking Conference . – Paris (France), 2000.– P. 105–112.

<http://www.mkb.be/abstracts/14.htm>

14. Microstructural, mechanical and tribological characterisation of roll materials for the finishing stands of the hot strip mill for steel rolling / M. Nilssona, M. Olssona // Wear Volume 307, Issues 1–2, (30 September 2013), pp. 209–217.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00431648/307/1-2>

15. Microstructure And Erosion-Corrosion Behaviour Of As-Cast High Chromium White Irons Containing Molybdenum In Aqueous Sulfuric-Acid Slurry / S. Imurai, Ch. Thanachayanont, J. T. H. Pearce, T. Chairuangsril // Archives of Metallurgy and Materials , Volume 60, Issue 2 (August 2015), pp. 919–923.

<http://www.ache.org.rs/HI/>

16. Thermal cracking of multicomponent white cast iron C. R. S. da Silva; M. Boccalini Materials Science and Technology, Vol. 21, Issue 5 (01 May 2005), pp. 565–573.

<http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/174328405X21012>

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Л. Н. Дейнеко (Украина); д-ром техн. наук, проф. С. И. Губенко (Украина)

Статья поступила в редколлегию 24.09.2015