

*ISSN 2078-7677. Високі технології в машинобудуванні, 2015, випуск 1 (25)*

УДК.669.15

С.Б. Беликов, д-р техн. наук; И.П. Волчок, д-р техн. наук;  
В.В. Нетребко, канд. техн. наук, Запорожье, Украина;

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ**

*Показано, що вміст вуглецю до 2,4% та хрому до 24%, забезпечує задовільну оброблюваність зносостійких чавунів, легованих Ni та Mn до 2%. Для чавунів, які працюють в корозійному середовищі, а також чавунів які містять більше 4% Mn, рекомендуються проводити відпал при 720° C, для інших – нормалізацію від 1050° C. Надані настанови, щодо розробки складу зносостійких чавунів, легованих Mn та Ni, з урахуванням необхідності проведення механічної обробки різанням.*

*Показано, что содержание углерода до 2,4% и хрома до 24% обеспечивает удовлетворительную обрабатываемость износостойких чугунов, легированных Ni и Mn до 2%. Для чугунов, эксплуатируемых в коррозионной среде, а также чугунов, содержащих более 4% Mn рекомендуется проводить отжиг при 720° C, для других – нормализацию от 1050° C. Предложены рекомендации по разработке составов износостойких чугунов, легированных Mn и Ni, с учетом необходимости проведения механической обработки.*

*It has been shown that content of carbon up to 2.4% and chromium up to 24% provides satisfactory machinability of wear-resistant cast irons alloyed by Ni and Mn up to 2%. It is recommended to carry out annealing at 720° C for cast irons operation in the corrosive media as well as for cast irons containing more than 4% of Mn. Other cast irons require normalization from 1050° C. Recommendations for development of compositions of wear-resistant cast irons alloyed by Ni and Mn, taking into account the necessity of mechanical treatment, have been suggested.*

*Введение. Постановка задачи исследования.* Высокохромистые чугуны используются для деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания в различных средах [1-3]. Структура чугунов состоит из металлической основы, которая может быть ферритной, мартенситной, аустенитной или состоящей из этих фаз в определенных соотношениях и карбидов, в количестве до 40 %. Свойства и применение этих чугунов определяются сочетанием различной металлической основы и количества карбидов.

Металлическая основа износостойких чугунов должна обладать достаточной прочностью и вязкостью для удержания карбидов. Лучшими в этом отношении являются мартенситная основа и аустенитная, образующая мартенсит деформации. Оптимальной основой, в условиях ударно-абразивного изнашивания, является мартенсито-аустенитная, содержащая 50...70 % аустенита [4]. Однако такие чугуны практически невозможно обрабатывать лезвийным инструментом.

Проблема обрабатываемости этих материалов возникает при

---

© С.Б. Беликов, И.П. Волчок, В.В. Нетребко, 2015

изготовлении ремонтного литья в мелкосерийном производстве, где неэффективно использование специализированного оборудования или специальных методов обработки (электроэрозионной или электрохимической). Обрабатываемость резанием зависит от исходной структуры и свойств материала детали, состояния литой поверхности, наличия литейных дефектов (раковин), материала резца, режимов резания, процессов, вызывающих изменение структуры во время обработки и других факторов [5]. Известные способы повышения обрабатываемости (уменьшение содержания углерода и легирующих элементов) снижают износостойкость. Улучшение обрабатываемости высокохромистых чугунов за счет проведения смягчающей термической обработки (отжига) требует проведения восстановительной обработки (нормализации или закалки) после механической обработки [1, 6, 7]. Такая технология является дорогостоящей и энергозатратной.

Наиболее оптимальным решением этой проблемы является получение чугуна с удовлетворительной обрабатываемостью в литом состоянии с последующей термической обработкой, повышающей твердость и износостойкость.

При разработке составов износостойких чугунов с удовлетворительной обрабатываемостью необходимо учитывать:

- наличие коррозионной среды (необходимо содержание хрома в металлической основе более 13%);
- твердость абразива (требуется высокая твердость металлической основы, а также большое количество карбидов прочно закрепленных в основе);
- наличие ударных нагрузок (легирующие Ni и Mn);
- образование крупных заэвтектических карбидов, снижающих износостойкость и ухудшающих обрабатываемость резанием.

В процессе термической обработки протекают процессы, которые влияют на эти ограничения:

- при охлаждении снижается растворимость углерода в  $\gamma$ -Fe, что вызывает образование специальных карбидов Cr, которые снижают содержание Cr в металлической основе особенно в околкарбидных зонах;
- образуются мелкодисперсные карбиды, которые могут выкрашиваться в процессе эксплуатации, что снижает износостойкость.

Целью данной работы являлась определение влияния химического состава чугуна на его обрабатываемость, а также влияние отжига и нормализации на твердость чугуна и химическую неоднородность металлической основы.

*Методика исследования.* Химический состав исследуемых чугунов представлен в таблице. Чугун выплавляли в индукционной печи с основной футеровкой. В сухие формы отливали цилиндрические образцы диаметром 30 мм и длиной 400 мм, которые перед испытаниями обтачивались

до диаметра 25 мм. Оценка обрабатываемости чугунов производилась по методу А.С. Кондратова с построением зависимостей линейного износа задней поверхности резца от скорости резания в двойной логарифмической сетке координат [5], а так же путем определения линейного износа на единицу длины пути резания. Для точения использовали резцы с пластинами 10x10 мм из сплава ВК8 по ГОСТ 19051-80. Режимы резания: глубина резания – 0,8 мм; продольная подача – 0,15 мм/об, частота вращения шпинделя при точении 200...630 об/мин. СОЖ не применяли. Анализ структуры выполняли на оптическом микроскопе Sigeta MM-700 и РЕМ 106И. Свойства чугунов определяли в литом состоянии и после отжига в течение 9 ч при 720 °С, а также после гомогенизирующей выдержки при 1050° С в течение 4,5 ч с последующей нормализацией. Коррозионные испытания чугунов проводили в среде HCl с pH 2,5. Микротвердость структурных составляющих измеряли на приборе ПМТ-3 и Duramin-1, макротвердость сплава – на твердомере Роквелла.

Таблица – Химический состав исследуемых чугунов (масс. %)

№ п/п	C	Cr	Mn	Ni	Si
1	1,1...3,8	17,8	1,5	0,2	1,3
2	3,1	11,4...29,9	1,6	1,4	1,1
3	2,5	18,9	0,7...5,9	0,2	1,3
4	3,4	19,7	5,7	0,2...2,7	1,0

*Результаты исследований и их обсуждение.* Структуры исследуемых чугунов представлены на рис. 1. С ростом содержания углерода в чугуне, с 17,8% Cr, 1,5% Mn и 0,2% Ni (п. 1 табл.) увеличивалось количество карбидов и изменялся тип карбидов от разобщенных  $Me_{23}C_6$ – $Me_7C_3$  при 1,1% C до сплошной ледебуритной сетки из смеси карбидов  $Me_3C$ – $Me_7C_3$  при 3,7% C.

Влияние хрома на карбидную фазу носило противоположный характер. При увеличении содержания хрома в чугуне, содержащем 3,1% C, 1,6% Mn и 1,4% Ni (п. 2 табл.) карбидная фаза изменяется от  $Me_3C$ – $Me_7C_3$  при 11,4% Cr до  $Me_7C_3$  при 29,9% Cr с образованием крупных заэвтектических карбидов.

Влияние марганца и никеля (п. 3, 4 табл.) на структуру высокохромистого чугуна проявлялось в изменении металлической основы. При минимальном содержании марганца и никеля основа была ферритной, а при их максимальном количестве аустенитной.

Структурные изменения в чугунах оказали большое влияние на их свойства, в том числе на обрабатываемость. Зависимости интенсивности изнашивания резца от скорости резания при изменении химического состава чугуна представлены на рис. 2. Влияние Mn и Ni на износ резца показано на рис. 3.

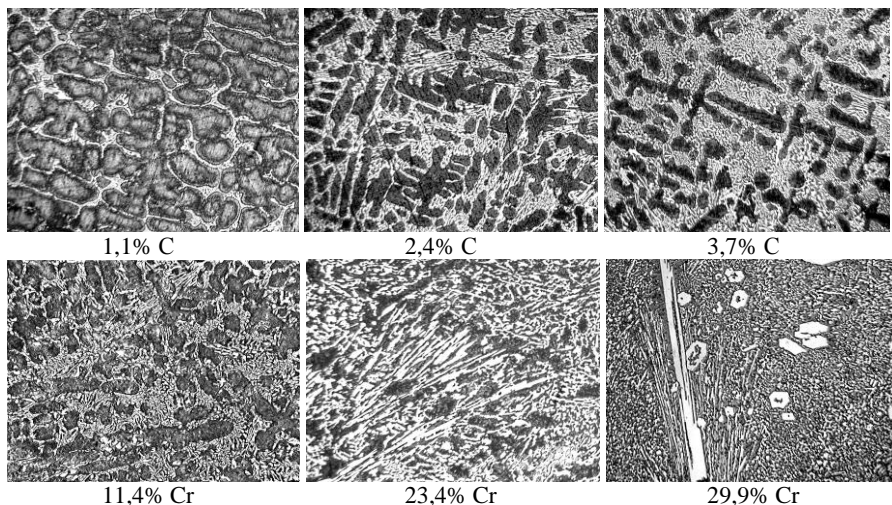


Рисунок 1 – Структура чугунов в литом состоянии с различным содержанием углерода (п. 1 табл.) и хрома(п. 2 табл.), x150

Результаты стойкостных испытаний позволяют отметить следующее. Увеличение содержания углерода и марганца в чугуне увеличивает износ реза. Чугуны, содержащие до 1,6% С обладали удовлетворительной обрабатываемостью. Особенно сильное изнашивание реза происходило при увеличении содержания углерода более 2,4%, что объясняется образованием сплошной сетки цементита с твердостью более 800 HV<sub>50</sub>. Марганец в количествах до 2% незначительно увеличил износ реза, за счет твердорастворного упрочнения. Повышение содержание марганца с 2% до 4% интенсифицировало износ реза в результате появления закалочных структур с твердостью 800...900 HV<sub>50</sub>. Дальнейшее увеличение содержания марганца резко увеличивало износ реза в результате образования аустенитной металлической основы и появления наклепа с твердостью более 1000 HV<sub>50</sub>. Влияние Cr на интенсивность изнашивания реза показывает, что увеличение содержания хрома с 11,4% до 16,4% снижало износ реза в результате появления специальных карбидов (карбидной эвтектики) которые разрушали сетку цементита и улучшили обрабатываемость. Дальнейшее увеличение содержания хрома в чугуне увеличивало износ реза, что связано с возрастанием доли карбидов хрома, обладающих более высокой твердостью, чем у цементита. Особенно сильное изнашивание реза наблюдалось в чугуне, содержащем 29,9% хрома при появлении крупных заэвтектических карбидов (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> твердостью более 1400 HV<sub>50</sub>. Легирование никелем снижало интенсивность изнашивания реза за счет образования аустенита менее склонного к наклепу.

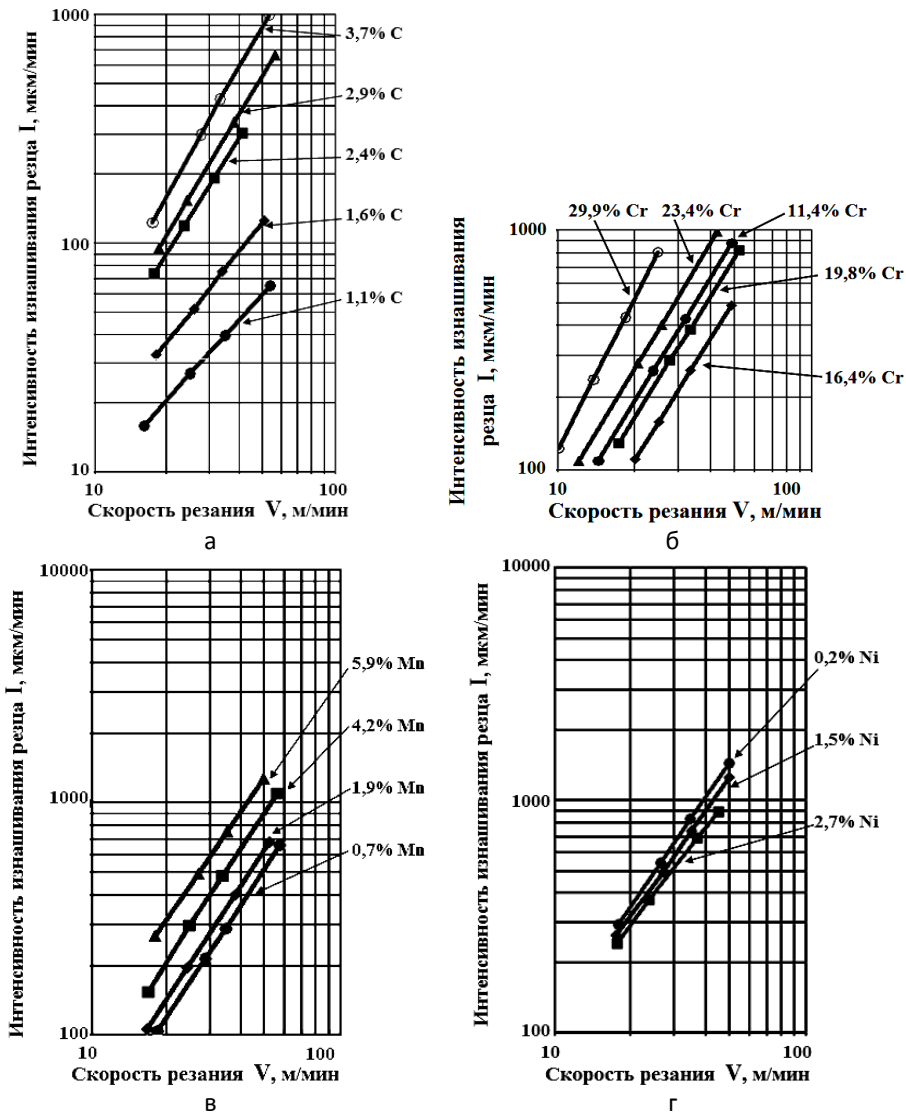


Рисунок 2 – Влияние химического состава чугуна и скорости резания на интенсивность изнашивания реза

а) – влияние C (п. 1 табл.), б) – влияние Cr (п. 2 табл.),  
 в) – влияние Mn (п. 3 табл.), г) – влияние Ni (п. 4 табл.)

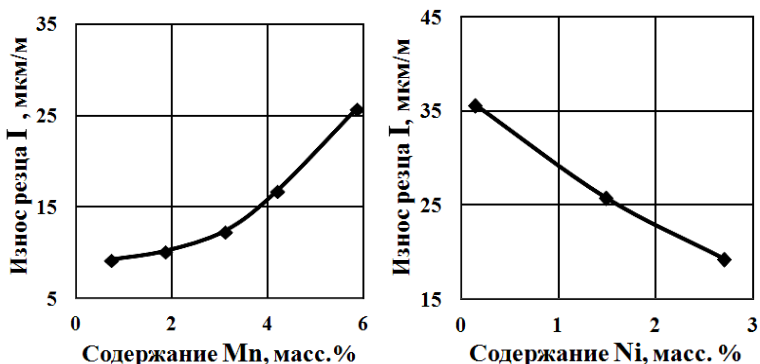


Рисунок 3 – Влияние Mn (п. 3 табл.), и Ni (п. 4 табл.), на износ реза

Увеличение скорости резания увеличивало изнашивание реза во всех случаях. При увеличении содержания углерода и марганца интенсивность изнашивания возрастала, о чем свидетельствует изменение угла наклона линий изнашивания. В чугунах с 1,1% С (рис. 2а) увеличение скорости резания с 20 до 50 м/мин увеличило интенсивность изнашивания с 20 до 65 мкм/мин, а при 3,7% С интенсивность изнашивания возросла со 150 до 900 мкм/мин. При содержании 0,7% Mn (рис. 2в) увеличение скорости резания с 20 до 50 м/мин увеличило интенсивность изнашивания со 110 до 500 мкм/мин, а при 5,9% Mn с 310 до 1200 мкм/мин.

С ростом содержания хрома от 11,4 до 16,4% (рис. 2б) интенсивность изнашивания реза при скорости резания 20 мкм/мин снижалась с 200 до 110 мкм/мин. Дальнейшее увеличение содержания хрома до 29,9% увеличило интенсивность изнашивания реза до 520 мкм/мин.

Положительное влияние никеля (рис. 2г) на интенсивность изнашивания проявляется с возрастанием скорости резания, так при скорости резания 20 м/мин увеличение никеля с 0,2% до 5,7% снижает изнашивание реза с 340 до 280 мкм/мин (17,6%), а при 45 м/мин с 1260 до 900 мкм/мин (28,6%).

Анализ коррозионных процессов протекающих в этих чугунах показал, что коррозия начинается с околокарбидных зон, содержащих менее 12,5% Cr. В чугунах, содержащих 1,1% С и 17,8% Cr коррозионный процесс развивался преимущественно в центре зерен в которых содержание хрома в металлической основе составляло более 12,6% (рис. 4а). При содержании 2,9% С, в этом чугуне, коррозионный процесс развивался преимущественно по границам карбидов, где содержание хрома составляло 8,4% (рис. 4б). При повышении содержания хрома до 29,9% в чугуне с 3,1% С коррозионный процесс носил равномерный характер, минимальное содержание хрома в металлической основе составляло 14,2% (рис. 4в).

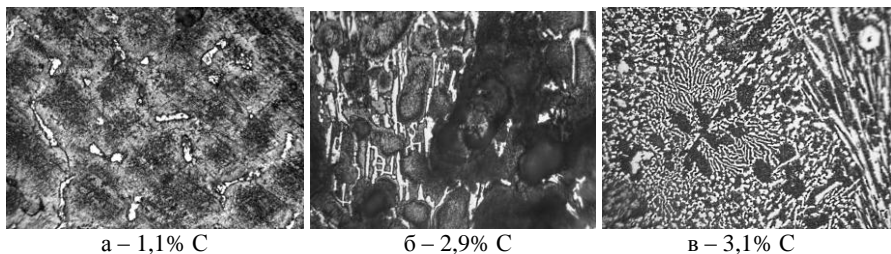


Рисунок 4 – Коррозия высокохромистых чугунов (п. 1 табл.)

Проведение отжига при 720 °С повысило твердость чугуна, содержащего 1,1% С (п. 1 табл.) с 34...35 HRC до 51...52 HRC. После гомогенизирующей выдержки при 1050 °С с последующей нормализацией твердость составила 44...45 HRC. Минимальное содержание хрома в металлической основе повысилось до 13,5...13,7% соответственно. Структура чугунов после термообработки представлена на рис. 5. Специфическое изменение твердости объясняется тем, что при 720 °С происходит распад первородного аустенита с образованием мелкодисперсных карбидов (рис. 5б). Выдержка при 1050 °С вызывала образование высокохромистых карбидов  $Cr_7C_3$ , которые в отличие от карбидов  $Cr_23C_6$ , меньше обедняли основу хромом, что способствовало образованию ферритной основы (рис. 5в).

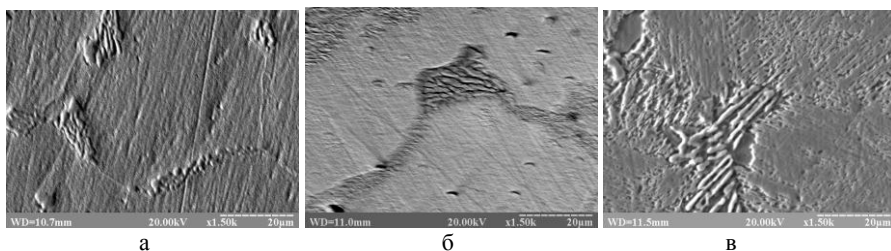


Рисунок 5 – Структура чугуна, содержащего 1,1% С 17,8% Cr, 1,5% Mn и 0,2% Ni (п. 1 табл.): а) в литом состоянии, б) после отжига, в) после нормализации

В чугуне содержащем 3,1% С и 29,9% Cr (п. 2 табл.) твердость в литом состоянии составила 57...59 HRC, после отжига 48...49 HRC, после нормализации 60...62 HRC. Минимальное содержание хрома в основе составляло 14,6% после отжига и 12,0% после нормализации. Структуры чугунов представлены на рис. 6. В процессе отжига в чугуне произошло обеднение основы углеродом, что снизило твердость (рис. 6б). При выдержке в течение 4,5 ч при 1050 °С происходило растворение карбидов, которые при нормализации (охлаждении) выделились в мелкодисперсном виде (рис. 6в), что повысило твердость.

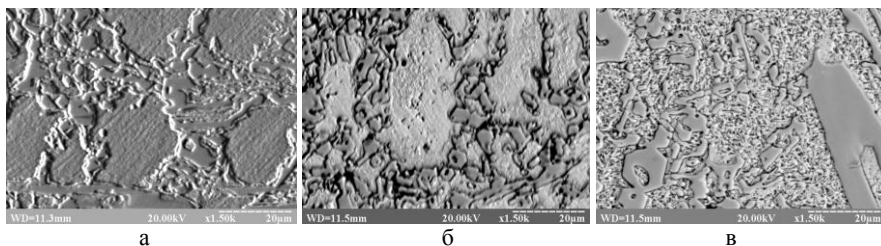


Рисунок 6 – Структура чугуна, содержащего 3,1% С 29,9% Cr, 1,6% Mn и 1,4% Ni (п. 2 табл.): а) в литом состоянии, б) после отжига, в) после нормализации

Чугуны содержащие 2,4...2,9% С, 11,4...19,8% Cr, 1,5% Ni и до 1,9% Mn в литом состоянии имели твердость 50...52 HRC. После отжига твердость этих чугунов понижалась до 37...38 HRC. После нормализации твердость этих чугунов содержащих 11,4% Cr составила 53...55 HRC, а содержащих 19,8% Cr – 59...61 HRC. В чугунах содержащих более 4% Mn отжиг повышал твердость, а нормализация снижала.

Изменение свойств чугунов при отжиге и нормализация объясняется процессами карбидообразования (изменение типа карбидов и их количества), появлением закалочных структур из-за изменения положения критических точек диаграммы Fe-C в результате легирования Cr, Mn, Ni, а также процессами перераспределения этих элементов при термической обработке.

### **ВЫВОДЫ.**

1. Удовлетворительную обрабатываемость, в литом состоянии, имеют износостойкие чугуны, легированные до 2% Mn и 1,5% Ni, содержащие углерод до 2,4% и хром до 24%. Для повышения твердости этих чугунов, после механической обработки, необходимо проведение гомогенизирующей выдержки при 1050° С в течение 4,5ч с последующей нормализацией.

2. Для повышения твердости чугунов, содержащих более 4% Mn, а так же чугунов, эксплуатируемых в коррозионной среде, после обработки резанием рекомендуется проводить отжиг в течение 9 ч при 720° С.

**Список использованных источников.** 1. *Гарбер М.Е.* Износостойкие белые чугуны. – М.: Машиностроение, – 2010. – 280 с. 2. *Цытин И.И.* Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия. – 1983. – 176 с. 3. *Герек А., Байка Л.* Легированный чугун – конструкционный материал. М.: Металлургия. – 1978. – 208 с. 4. *Чейлах А.П.* Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. Харьков: ННЦ ХФТИ. – 2003. – 212 с. 5. *Ящерицын П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э.* Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. – Минск: Выш. шк., 1990. – 512 с. 6. *Чабак Ю.Г., Ефременко В.Г., Кравцов А.С.* Новые подходы к выбору режима смягчающей термической обработки высокохромистых чугунов // Тезисы 73-й междунар. научно-практ. конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Днепропетровск: ДИИЖТ. – 2013. – с. 282-283. 7. *Беркун М.Н., Волчок И.П. и др.* Влияние



термической обработки на свойства высокохромистого чугуна // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1971. – №1. – с. 64-66.

**Bibliography (transliterated):** 1. Garber M.E. Iznosostojkie belye chuguny. – M. : Mashinostroenie, – 2010. – 280 s. 2. Cypin I.I. Belye iznosostojkie chuguny. Struktura i svojstva. M.: Metallurgija. – 1983. – 176 s. 3. Gerek A., Bajka L. Legirovannyj chugun – konstrukcionnyj material. M.: Metallurgija. – 1978. – 208 s. 4. Chejljah A.P. Jekonomnolegированные metastabil'nye splavy i uprochnjajushhie tehnologii. Har'kov: NNC HFTI. – 2003. – 212 s. 5. Jashhericyn P. I., Eremenko M. L., Fel'dshtejn E. Je. Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovyje processy v tehnologicheskix sistemah. – Minsk : Vysh. shk., 1990. – 512 s. 6. Chabak Ju.G., Efremenko V.G., Kravcov A.S. Novye podhody k vyboru rezhima smjagchajushhej termicheskoj obrabotki vysokohromistyh chugunov // Tezisy 73-j mezhdunar. nauchno-prakt. konferencii «Problemy i perspektivy razvitija zheleznodorozhnogo transporta». – Dnepropetrovsk: DIIZhT. – 2013. – s. 282-283. 17. Berkun M.N., Volchok I.P. i dr. Vlijanie termicheskoj obrabotki na svojstva vysokohromistogo chuguna // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1971. – №1. – с. 64-66.