

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА СВОЙСТВА РАБОЧЕГО СЛОЯ ЦЕНТРОБЕЖНО-ЛИТЫХ ИНДЕФИНИТНЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х.

ЗАО «Кушвинский завод прокатных валков», Кушва, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в современных условиях прокатного производства повышаются требования к качеству поверхности прокатной продукции и, соответственно, качеству прокатных валков. Индефинитные валки, работающие в чистовых клетях листопркатных станов, должны обладать высокой износостойкостью и устойчивостью к образованию поверхностных микротрещин. Свойства рабочего слоя индефинитных валков определяются структурой индефинитного чугуна. Повысить свойства индефинитного чугуна можно посредством оптимизации его химического состава. **Цель работы:** исследование влияния химического состава на структуру и твердость рабочего слоя индефинитных валков на основе промышленных данных, определение рациональных концентраций химических элементов для улучшения эксплуатационных характеристик индефинитных валков. **Используемые методы:** искусственные нейронные сети. Для обработки базы данных применена программная реализация нейронных сетей на основе алгоритма двойственного функционирования, позволяющая обрабатывать массивы информации с множеством входных и выходных данных. **Новизна:** в результате обработки получена нейромодель, прогнозирующая свойства индефинитного чугуна в исследованных интервалах варьирования химического состава. Исследовано комплексное влияние углерода, кремния, марганца, хрома, никеля, молибдена, ванадия, ниобия и бора на структуру и твердость индефинитного чугуна. Влияние каждого элемента носит нелинейный характер и зависит от концентраций других элементов. **Результаты:** построены графические диаграммы влияния каждого химического элемента при постоянных концентрациях остальных элементов. Показано изменение соотношения структурных фаз и твердости при варьировании химического состава индефинитного чугуна в рассмотренных пределах. Определены рациональные концентрации химических элементов в изученных пределах. **Практическая значимость:** произведена корректировка химического состава рабочего слоя индефинитных прокатных валков, отливаемых в ЗАО «Кушвинский завод прокатных валков», получены положительные результаты при эксплуатации прокатных валков в прокатных станах российских и зарубежных предприятий.

Ключевые слова: прокатные валки, индефинитный чугун, химический состав, твердость, структура, износостойкость.

Введение

До 30-х годов XX века рабочие валки листопркатных станов отливались из нелегированного чугуна с отбеленным рабочим слоем [1]. Отбеленный рабочий слой получали за счет интенсивного охлаждения отливки в кокиле. Глубина отбела составляла от 10 до 30 мм, увеличение ее было невозможным вследствие уменьшения переохлаждения по мере отдаления от поверхности кокиля. Твердость рабочего слоя отбеленных валков составляла от 50 до 65 HSc.

В условиях интенсивного развития промышленности возникла потребность в увеличении производительности прокатных станов и снижении себестоимости проката. Для этого было необходимо повысить твердость и прочность прокатных валков.

Индефинитные валки были разработаны и освоены в 30-е годы XX века. Изначально они имели чистый отбел в рабочем слое с переходом по глубине на неявно выраженный, отливались стационарным (гравитационным) способом и являлись двухслойными: сначала форма вала сифонным способом заполнялась легированным чугуном для формирования рабочего слоя, затем производилась промывка серым чугуном для формирования сердцевины и шеек [2]. В дальнейшем индефинитные валки с неявно выраженным отбелом пришли на смену валкам с чистым отбелом и имели ряд неоспоримых преимуществ при эксплуатации, как то: изменение коэффициента захвата, снижение интенсивности образования сетки разгара, поскольку графит выступает в качестве смазочного материала и является компенсатором напряжений в рабочем слое; увеличение износостойкости рабочего слоя вследствие

повышения прочности и твердости.

В рабочем слое валков ЛПХНд легирование никелем в количестве 2,5–3,0% обеспечило получение троостита и верхнего бейнита, а при содержании 3,5–4,1% формировалась матрица, состоящая из нижнего бейнита и мартенсита, что позволило существенно повысить прочность рабочего слоя индифинитных валков. Хром при содержании его 0,70–0,80% способствует образованию твердых карбидов $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$, повышающих износостойкость. Легирование молибденом в количестве 0,3–0,6% обеспечило повышение термостойкости и твердости (валки ЛПХНМд).

Однако дальнейшее повышение содержания никеля для получения мартенситной матрицы и хрома для обеспечения наибольшей износостойкости при стационарном способе литья приводило к увеличению брака по трещинам из-за высоких напряжений, возникающих в валках в процессе их остывания в форме. Кроме того, из рабочего слоя в сердцевину валка переходило повышенное количество хрома, и для снижения его содержания требовалось большое количество промывочного чугуна, что резко повышало себестоимость валков.

Индифинитные валки в современном варианте существуют с 70-х годов прошлого столетия. Своим появлением обязаны возникновению и развитию центробежного литья, освоение которого расширило возможности изгото-

вителей валков, позволив адаптировать производство индифинитных валков в соответствии с индивидуальными потребностями прокатчиков. При центробежном способе литья появилась возможность дополнительного легирования чугуна рабочего слоя ($\text{Ni}=4,2\text{--}4,5\%$, $\text{Cr}=1,5\text{--}2,0\%$), получения заданной глубины рабочего слоя, снижения себестоимости изготовления за счет отсутствия операции промывки и уменьшения брака.

Основная часть

С целью изучения влияния химического состава на структуру и твердость рабочего слоя центробежнолитых индифинитных валков выполнена нейросетевая обработка базы данных по 53 валкам с диаметром бочки 675 мм. Содержание химических элементов в рабочем слое валков варьируется в следующих пределах: 3,00–3,26% C, 1,06–1,22% Si, 0,88–0,98% Mn, 1,69–1,80% Cr, 4,29–4,46% Ni, 0,32–0,39% Mo, 0,02–0,15% V, 0,01–0,14% Nb, 0,0014–0,0081% B.

В результате обработки получена нейромодель, прогнозирующая свойства с относительной погрешностью до 10%. Влияние каждого элемента исследовано при постоянных концентрациях остальных элементов.

На рис. 1, 2 показано влияние углерода на твердость и количество графита и цементита.

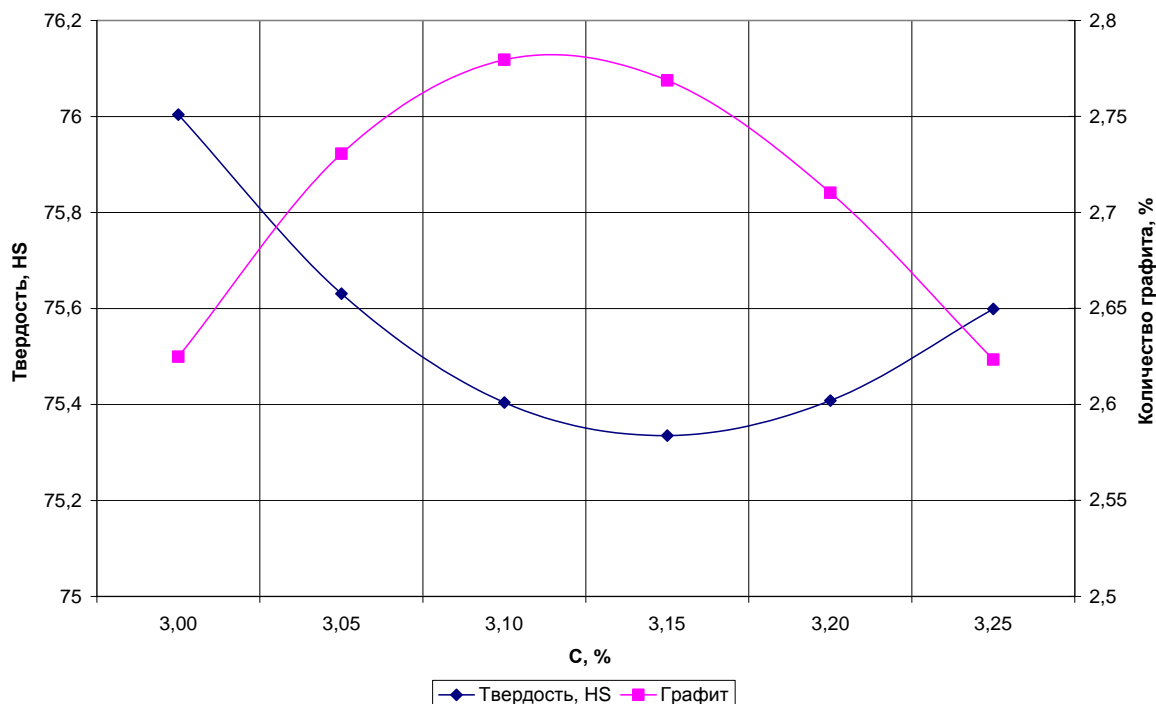


Рис. 1. Влияние углерода на твердость и количество графита в рабочем слое индифинитных валков

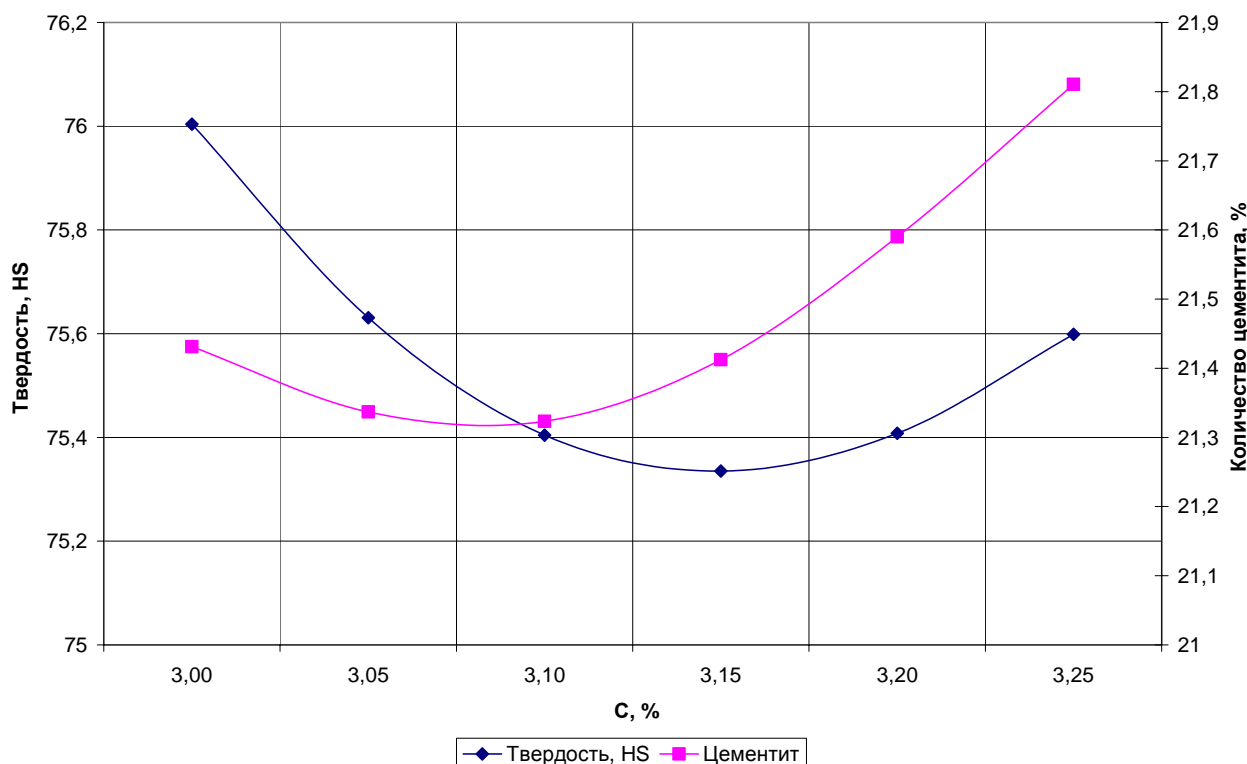


Рис. 2. Влияние углерода на твердость и количество цементита в рабочем слое индифинитных валков

При повышении содержания углерода до 3,15% твердость снижается до минимального значения; при дальнейшем повышении содержания углерода до 3,25% несколько возрастает. Количество графита увеличивается при повышении содержания углерода до 3,10%, затем снижается, при этом количество цементита возрастает. Данные зависимости получены при следующих значениях элементов: Si=1,09%, Mn=0,93%, Cr=1,70%, Ni=4,34%, Mo=0,35%, V=0,05%, Nb=0,10%, B=0,004%. При таком комплексе углерод оказывает графитообразующее влияние до содержания 3,10%, затем проявляет карбидообразующее действие [3]. Влияние углерода на количество мартенситно-бейнитной матрицы в исследованных концентрациях не выявлено, но углерод в присутствии никеля, растворяясь в аустените, обеспечивает образование мартенсита.

На рис. 3–5 показано влияние кремния на твердость и количество графита, цементита, мартенситно-бейнитной матрицы.

Несмотря на то, что кремний увеличивает количество графита и уменьшает количество цементита, при повышении его содержания твердость возрастает за счет увеличения количества мартенсита. При достижении содержания кремния 1,20% его влияние существенно ослабевает.

Марганец в исследованном диапазоне содержания снижает твердость и увеличивает долю мартенситно-бейнитной матрицы (рис. 6). Известно, что марганец легирует цементит, образуя карбид $(Fe, Mn)_3C$, способствующий повышению износостойкости [4]. В то же время повышение содержания марганца снижает температуру мартенситного превращения, что приводит к увеличению доли остаточного аустенита и снижению твердости [5]. Избыточное количество остаточного аустенита при эксплуатации индифинитных валков повышает вероятность образования волосовидных трещин [6], поэтому содержание марганца необходимо ограничивать до 1,00%.

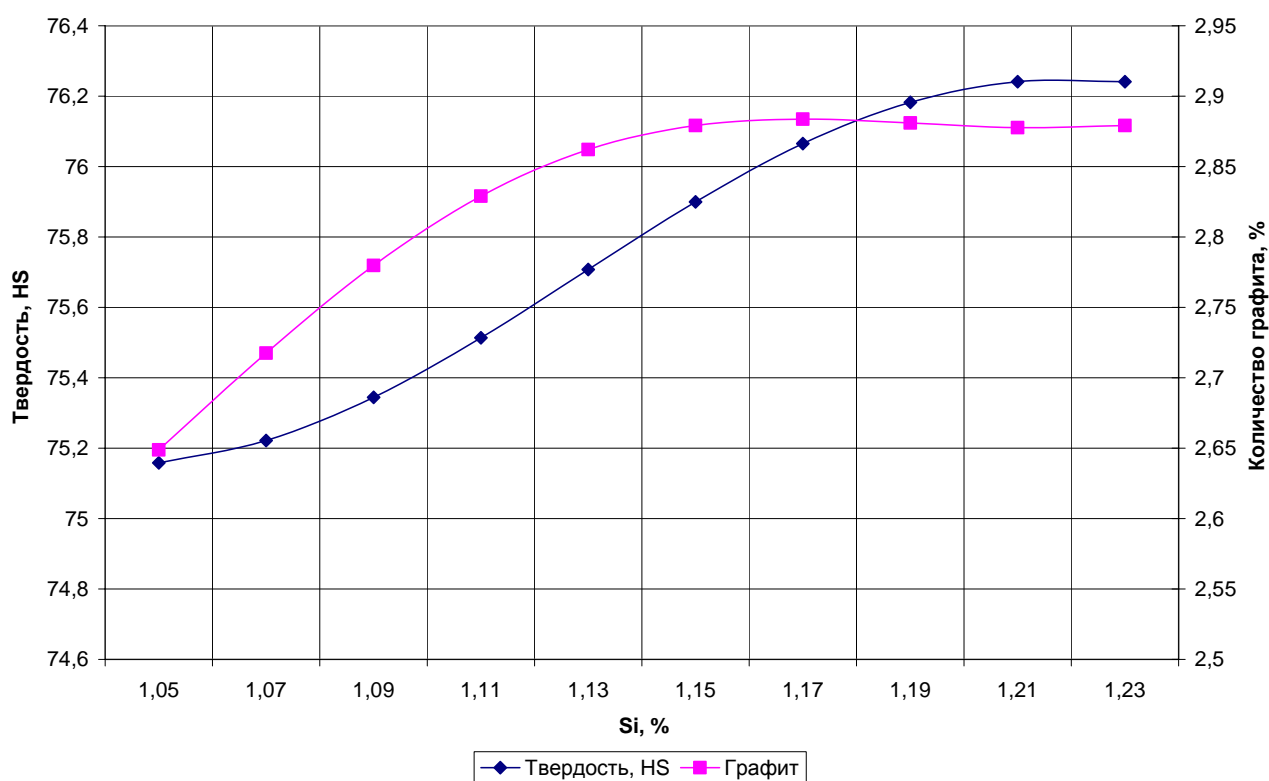


Рис. 3. Влияние кремния на твердость и количество графита в рабочем слое индифинитных валков

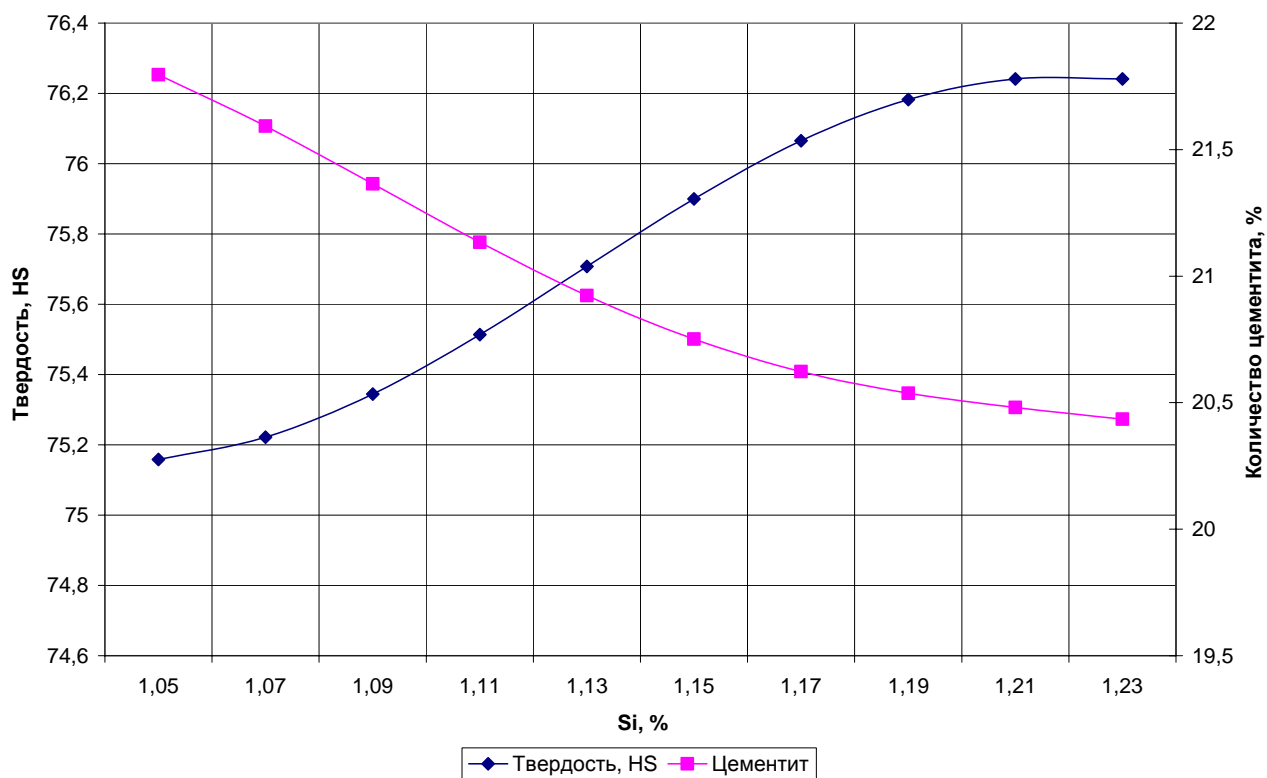


Рис. 4. Влияние кремния на твердость и количество цементита в рабочем слое индифинитных валков

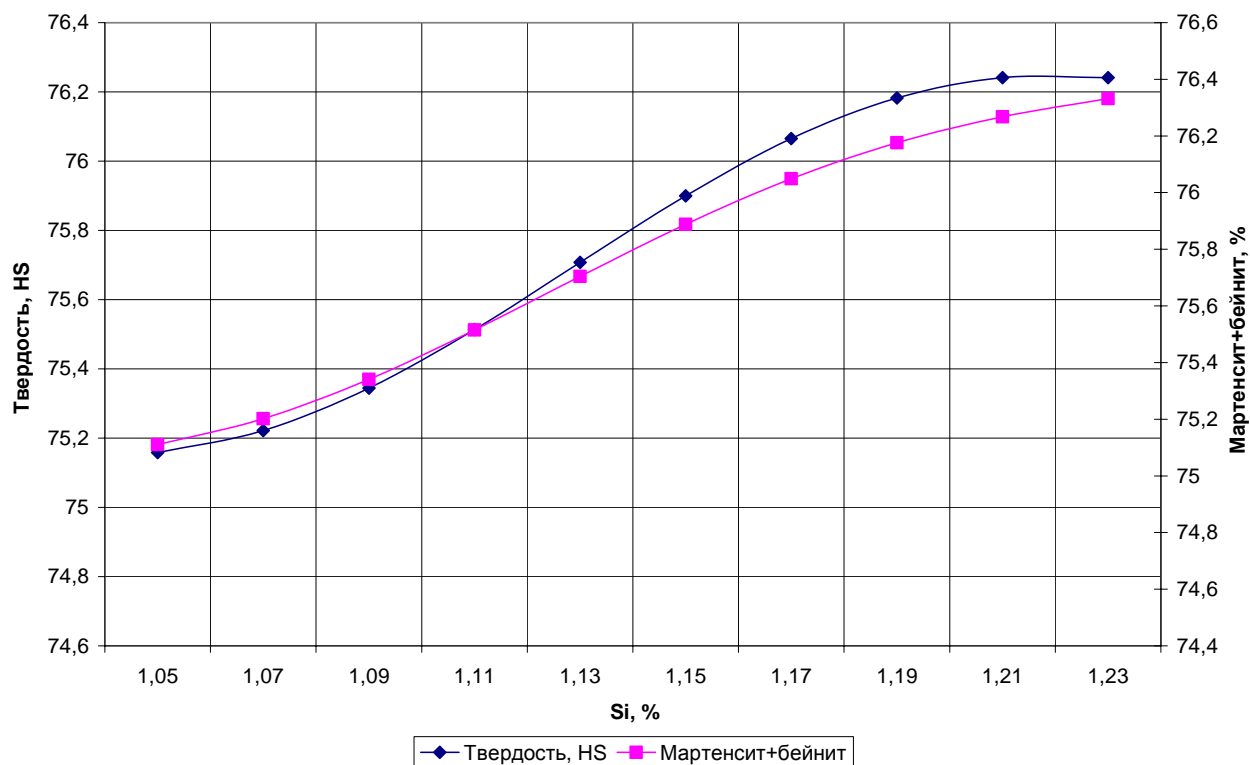


Рис. 5. Влияние кремния на твердость и количество мартенситно-бейнитной матрицы в рабочем слое индифинитных валков

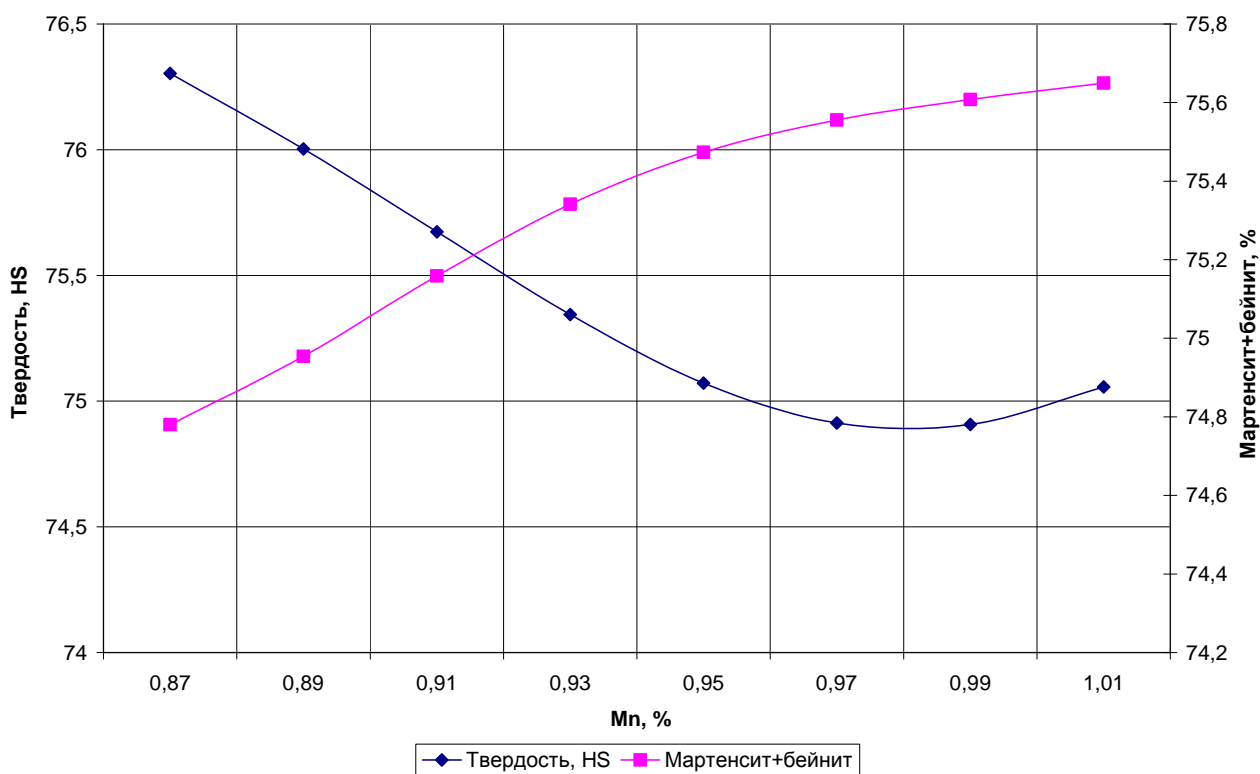


Рис. 6. Влияние марганца на твердость и количество мартенситно-бейнитной матрицы в рабочем слое индифинитных валков

На рис. 7–9 показано влияние хрома на твердость и количество структурных составляющих. Являясь сильным карбидообразующим элементом, хром увеличивает количество цементита и снижает количество графита, а также, повышая устойчивость аустенита в области бейнитного превращения, уменьшает долю мартенситно-бейнитной структуры; при этом твердость возрастает за счет увеличения количества цементита [7]. Хром повышает износостойкость рабочего слоя индифинитного вала, однако чрезмерное легирование хромом приводит к увеличению доли ледебурита, что способствует более интенсивному образованию микротрещин.

Никель является графитизатором, и хотя при исследованных концентрациях химических элементов его влияние на количество графита и цементита не выявлено, он увеличивает количество мартенсита и повышает твердость рабочего слоя (рис. 10).

При повышении содержания молибдена до 0,35% количество графита увеличивается, при дальнейшем повышении содержания молибдена вновь уменьшается; при этом твердость возрастает (рис. 11). Влияние молибдена на карбидообразование в исследованном интервале его содержания не выявлено; при таком содержании молибден легирует металлическую матрицу, увеличивая прокаливаемость чугуна [8]. Таким образом, для повышения износостойкости и

обеспечения необходимого количества графита содержание молибдена должно находиться в интервале 0,35–0,40%.

Ванадий при его содержании в изученном интервале снижает количество графита, увеличивает долю цементита и повышает твердость (рис. 12, 13). Являясь сильным карбидообразующим элементом, ванадий образует высокотвердые мелко-дисперсные карбиды VC, которые повышают износостойкость индифинитного чугуна [9].

Ниобий является карбидообразующим элементом, но в исследованном интервале содержания не проявил существенного влияния. Для изучения влияния его на свойства индифинитного чугуна необходимы исследования при более высоких его концентрациях.

Бор увеличивает количество графита при содержании до 0,005%, при дальнейшем повышении концентрации бора количество графита уменьшается (рис. 14). Аналогичным образом бор влияет на количество цементита (рис. 15). Несмотря на это, твердость практически линейно возрастает при повышении содержания бора в исследованном интервале, что может быть связано с образованием боридов железа и карбидов бора [10, 11]. Влияние бора на индифинитный чугун на сегодняшний день изучено недостаточно, поэтому необходимы дальнейшие исследования в этой области.

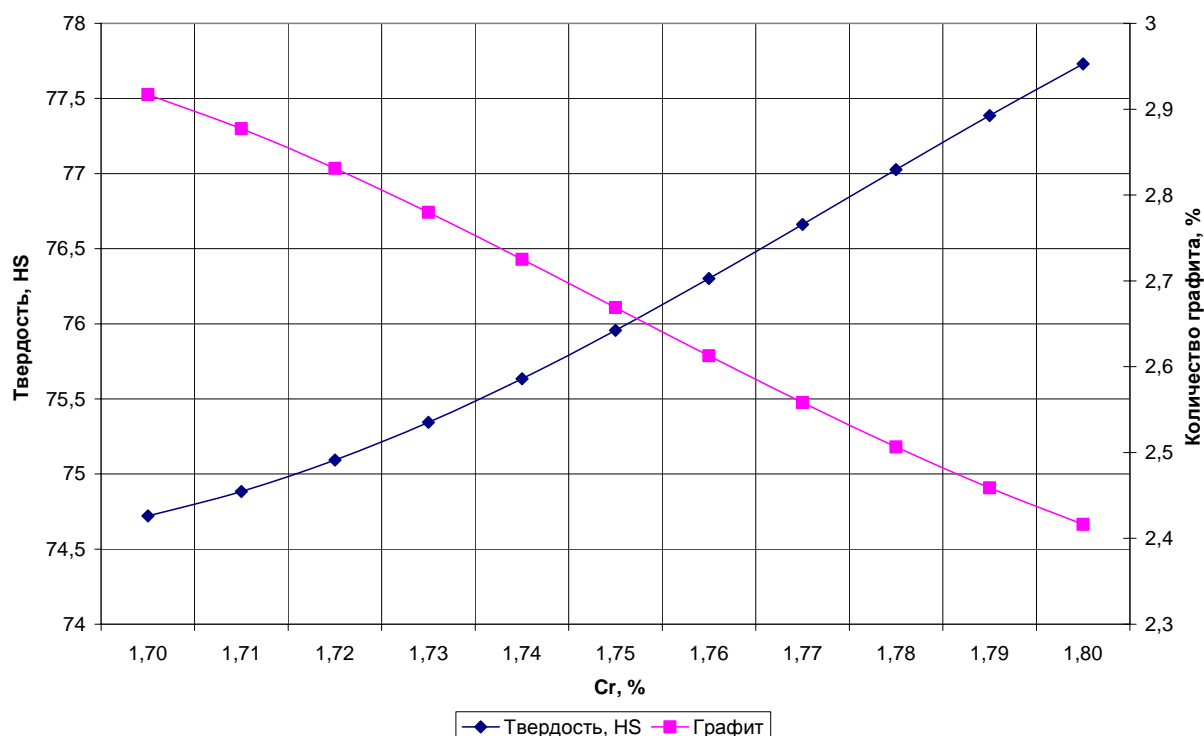


Рис. 7. Влияние хрома на твердость и количество графита в рабочем слое индифинитных валков

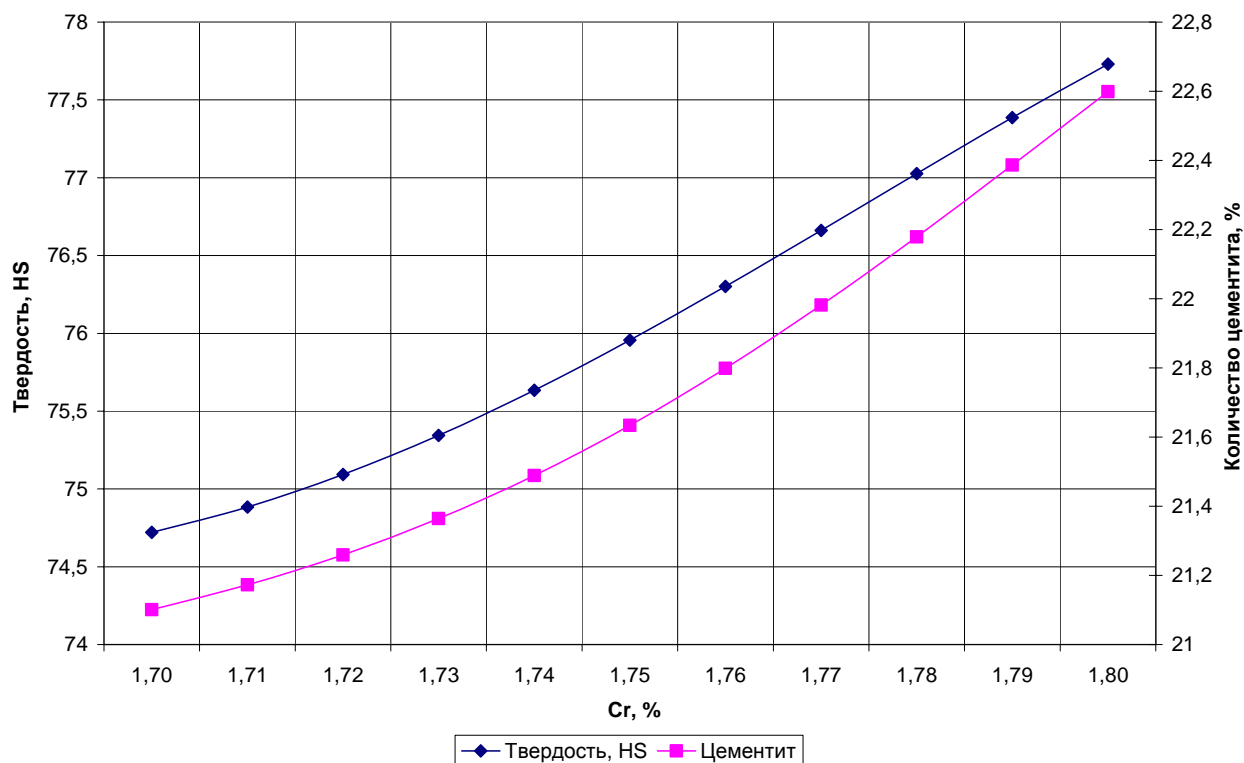


Рис. 8. Влияние хрома на твердость и количество цементита в рабочем слое индифинитных валков

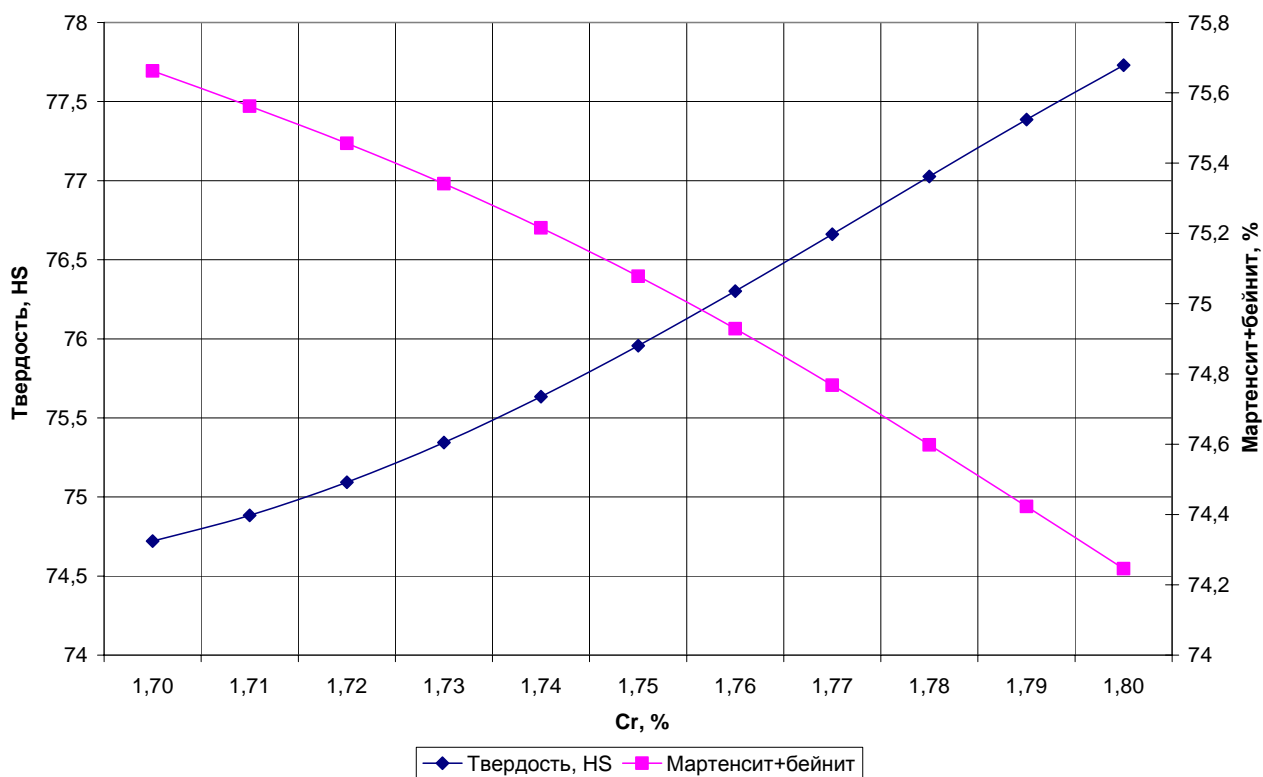


Рис. 9. Влияние хрома на твердость и количество мартенситно-бейнитной матрицы в рабочем слое индифинитных валков

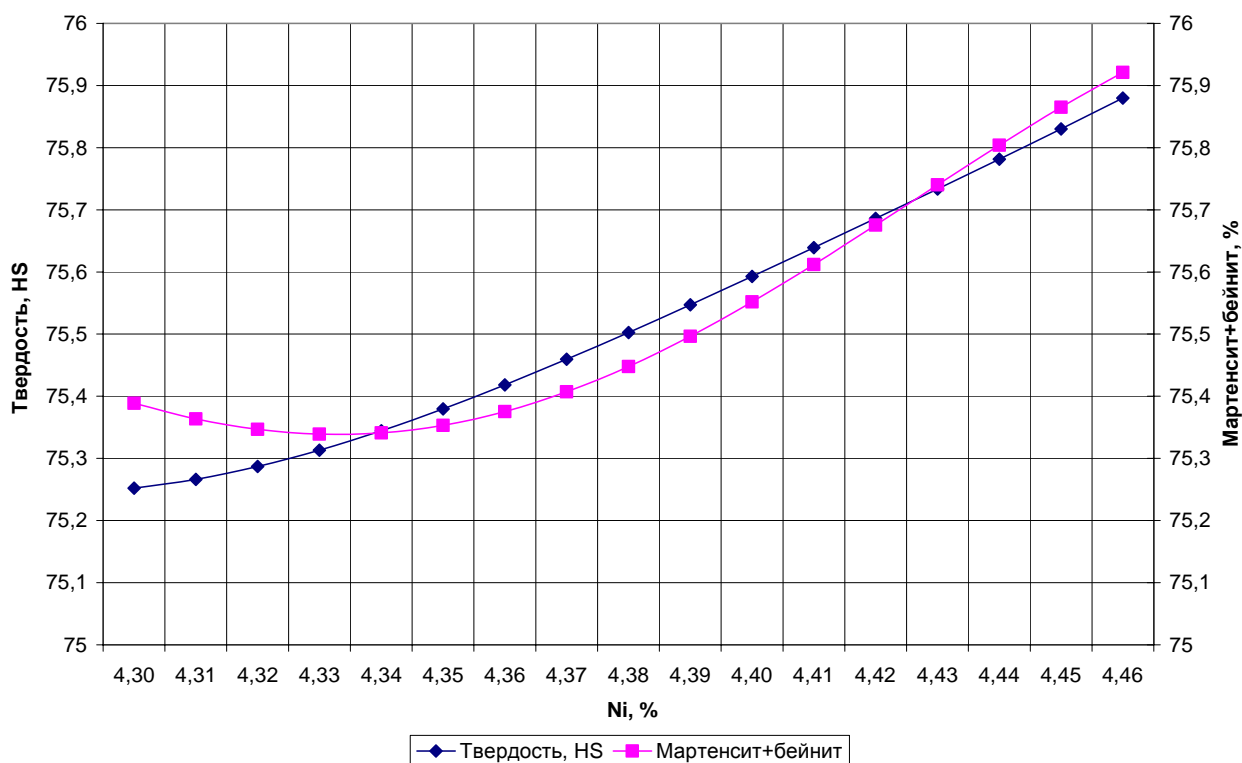


Рис. 10. Влияние никеля на твердость и количество мартенситно-бейнитной матрицы в рабочем слое индифинитных валков

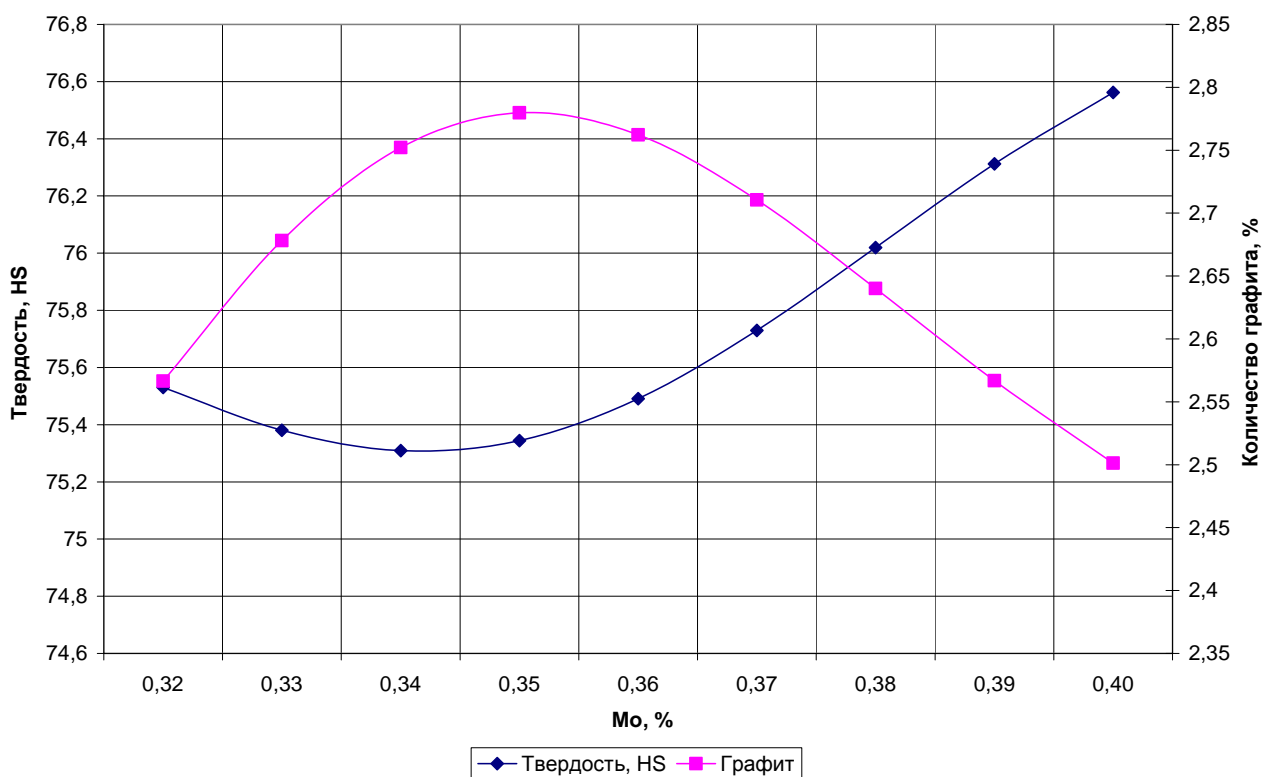


Рис. 11. Влияние молибдена на твердость и количество графита в рабочем слое индифинитных валков

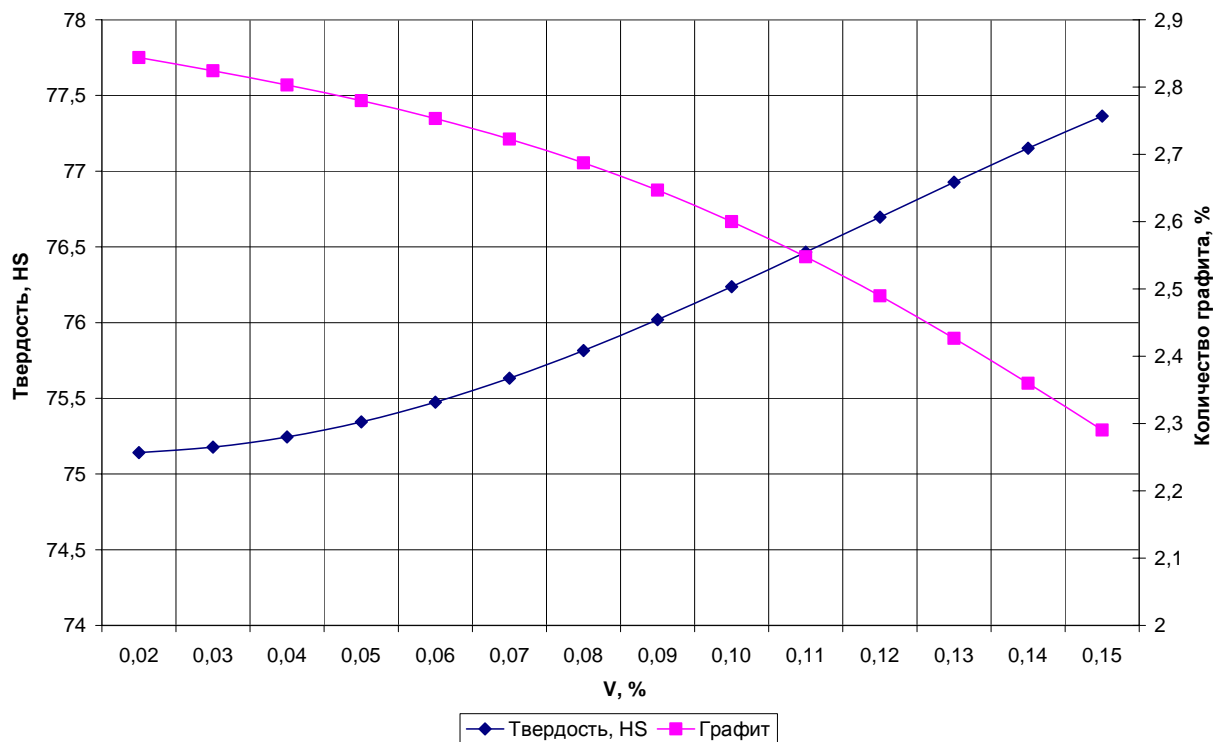


Рис. 12. Влияние ванадия на твердость и количество графита в рабочем слое индефинитных валков

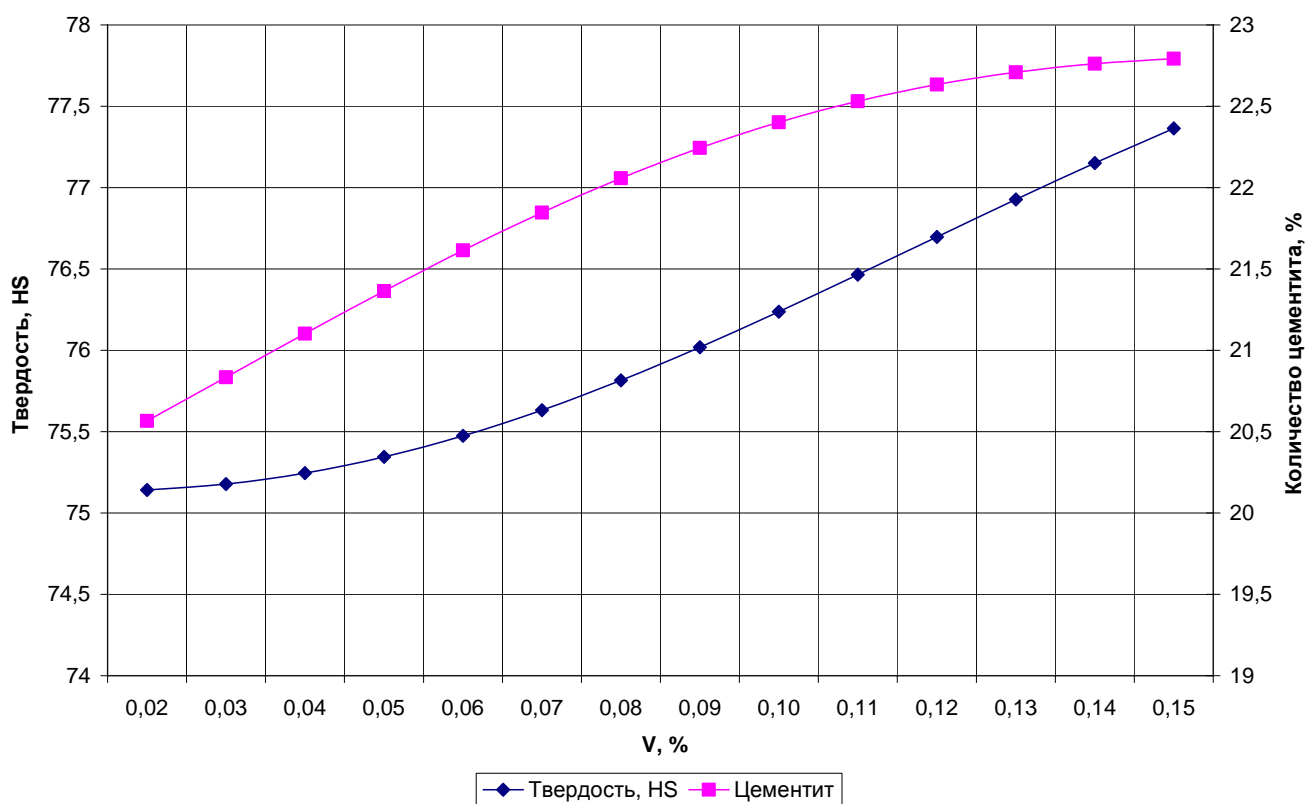


Рис. 13. Влияние ванадия на твердость и количество цементита в рабочем слое индефинитных валков

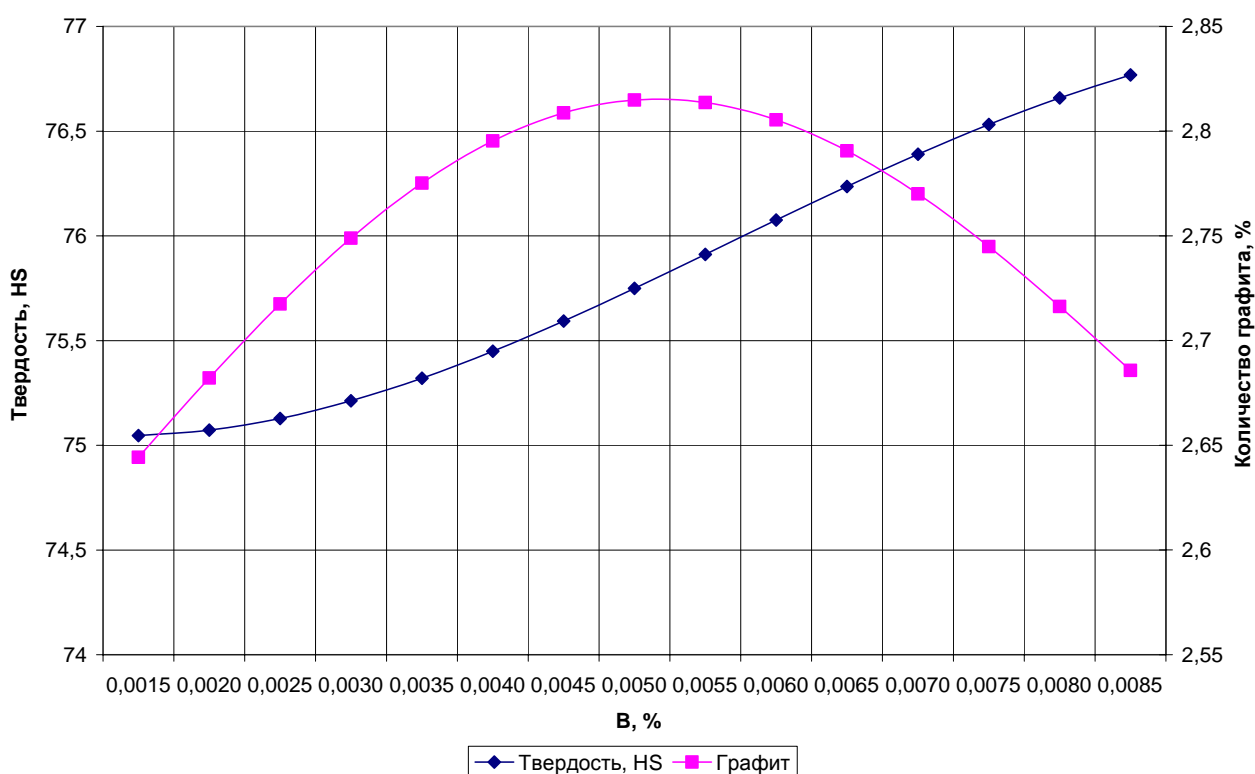


Рис. 14. Влияние бора на твердость и количество графита в рабочем слое индифинитных валков

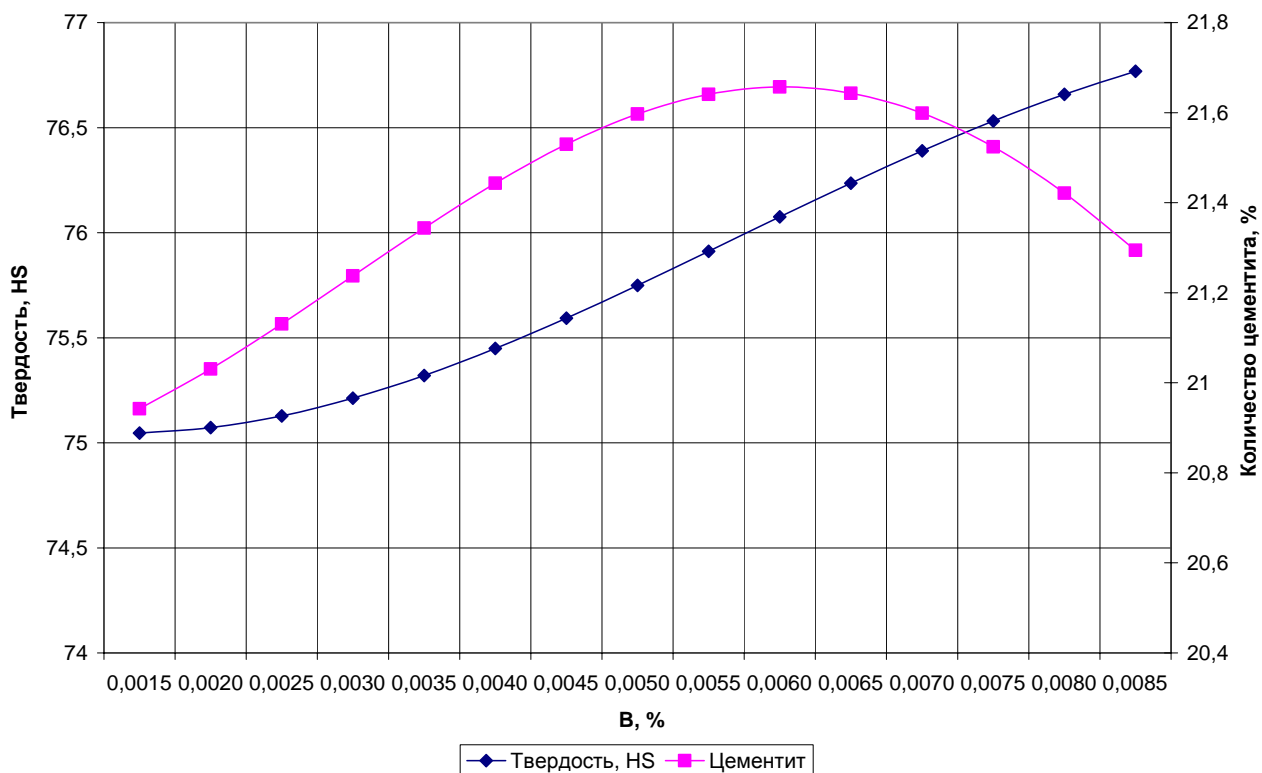


Рис. 15. Влияние бора на твердость и количество цементита в рабочем слое индифинитных валков

Заключение

Проведенные исследования в рассмотренных интервалах концентраций химических элементов позволяют уточнить химический состав индифинитного чугуна с целью повышения износостойкости.

Углерод, проявляющий карбидообразующее действие при содержании более 3,10%, с учетом обеспечения необходимого количества графита, должен находиться в интервале 3,15–3,25%.

Кремний, являющийся графитизатором, должен быть минимальным в исследованных пределах: 1,05–1,10%.

Марганец, являющийся карбидообразующим элементом и в то же время способствующий увеличению доли остаточного аустенита, следует ограничивать в интервале 0,90–0,95%.

Хром, оказывающий сильное карбидообразующее действие, должен находиться в интервале 1,75–1,80%.

Никель, оказывающий решающее влияние на формирование мартенситно-бейнитной матрицы, должен находиться в интервале 4,40–4,45%.

Молибден при содержании его в пределах 0,35–0,40% обеспечит повышение износостойкости и получение необходимого количества графита.

Учитывая практически линейный характер влияния ванадия на структуру и твердость индифинитного чугуна в изученном интервале (см. **рис. 12, 13**), можно прогнозировать изменение свойств чугуна при содержании ванадия более 0,15% и порекомендовать легирование 0,15–0,20% V. Для изучения влияния ванадия при более высоком его содержании необходимы дополнительные исследования.

Изучение влияния ниобия требует дополнительных исследований.

Бор, даже при малых концентрациях его в чугуне, оказывает существенное влияние (см.

рис. 14, 15). По результатам исследований введение 0,010% В окажет положительное влияние на износостойкость индифинитного чугуна. Необходимы более подробные исследования влияния бора на свойства чугуна.

На основании сделанных выводов скорректирован химический состав индифинитных валков, отливаемых в ЗАО «КЗПВ», получены положительные результаты на прокатных станах российских и зарубежных предприятий.

Список литературы

1. Будагянц Н.А., Карсский В.Е. Литые прокатные валки. М.: Металлургия, 1983. 175 с.
2. Гималетдинов Р.Х. Производство прокатных валков из высококачественных чугунов. М.: Полтекс, 2000. 329 с.
3. Вдовин К.Н. Прокатные валки: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 443 с.
4. Воронков Б.В., Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Комплексно-легированные износостойкие чугуны: монография / под ред. В.М. Колокольцева. Челябинск: Печатный салон «Издательство РЕКПОЛ», 2005. 178 с.
5. Хромомарганцевомолибденовые износостойкие чугуны / Л.И. Леви, И.И. Цыпин, М.Е. Гарбер и др. // Литейное производство. 1969. № 9. С. 7–9.
6. Выбор рационального способа получения жидкого чугуна и его химического состава для отливки листовых валков / С.В. Цыбров, А.В. Авдиенко, Е.В. Санарова и др. // Литейные процессы. Магнитогорск: МГТУ, 2004. Вып. 4. С. 39–43.
7. Прокатные валки: монография / Вдовин К.Н., Гималетдинов Р.Х., Колокольцев В.М., Цыбров С.В. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 543 с.
8. Влияние легирующих элементов на свойства чугунных валков для горячей прокатки / В.М. Колокольцев, А.В. Науменко, В.А. Куц и др. // Теория и технология металлургического производства. Магнитогорск, 2001. Вып. 2. С. 210–219.
9. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состоянии / Э.Х. Ри, В.М. Колокольцев, Ри Хосен и др. Владивосток: Дальнаука, 2006. 275 с.
10. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугуне и стали / пер. с англ. В.А. Мchedlishvili и В.В. Ховрина; под. ред. С.М. Винарова. М.: ГНТИ ЧЦМ, 1961. 460 с.
11. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.

Материал поступил в редакцию 01.06.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-78-89

THE EFFECT OF THE CHEMICAL COMPOSITION ON THE WORKING LAYER PROPERTIES OF CENTRIFUGALLY CAST INDEFINITE CHILL ROLLS

Radiy H. Gimaletdinov – D.Sc. (Eng.), Director of Production and Prospective Development
Kushva Roll Manufacturing Factory CJSC, Kushva, Russia. ORCID: orcid.org/0000-0002-1388-9748

Andrey A. Gulakov – Chief Metallurgist

Kushva Roll Manufacturing Factory, Kushva, Russia. E-mail: gulakov@kzpv.ru. ORCID: orcid.org/0000-0002-6519-282X

Ildar H. Tukhvatulin – Ph.D. (Eng.), Deputy Chief Metallurgist

Kushva Roll Manufacturing Factory, Kushva, Russia. E-mail: ildar@kzpv.ru. ORCID: orcid.org/0000-0002-8309-4326

Abstract

Problem Statement (Relevance): Today's rolling industry faces ever increasing requirements for the surface quality of rolled products and, consequently, the quality of rolls. Cast iron indefinite chill rolls used in the finishing stands of rolling mills should offer a high wear resistance and a high resistance to surface microcracking. The working layer properties of cast iron indefinite chill rolls are determined by the structure of cast iron they are made of. The properties of indefinite chill cast iron can be enhanced through an optimized chemical composition.

Objectives: This study focuses on the effect of the chemical composition on the working layer structure and hardness in the cast iron indefinite chill rolls as illustrated by industrial data. The work also attempts to identify what concentrations of the chemical elements will help enhance the roll performance. **Methods Applied:** Artificial neural networks were used for the purpose of the study. Neural network software based on the dual functioning algorithm was applied for database processing, which can process data arrays with numerous input and output data.

Originality: As a result of processing, a neuromodel was obtained that can predict the properties of indefinite chilled cast iron within the chemical composition variation ranges being studied. The authors analysed a combined effect of carbon, silicon, manganese, chromium, nickel, molybdenum, vanadium, niobium and boron on the structure and hardness of indefinite chilled cast iron. The effect of each element is non-linear and depends on the concentrations of the other elements. **Findings:** Graphs were drawn that show the effect of each chemical element at constant concentrations of the other elements. The article describes how the ratio between the structural phases and hardness changes within the studied range of varying chemical composition of indefinite chilled cast iron. The authors determined the optimum concentrations of the chemical elements within the focus range. **Practical Relevance:** There was an adjustment done to the chemical composition of the working layer of the cast iron indefinite chill rolls produced at the Kushva Roll Manufacturing Factory CJSC. The improved rolls showed a good performance when utilized in roll mills both in Russia and abroad.

Keywords: Mill rolls, indefinite chilled cast iron, chemical composition, hardness, structure, wear resistance.

References

1. Budagjanc N.A., Karsskiy V.E. *Litye prokatnye valki* [Cast mill rolls]. Moscow: Metallurgy, 1983, 175 p.
2. Gimaletdinov R.Kh. *Proizvodstvo prokatnykh valkov iz vysokokachestvennykh chugunov* [Manufacturing mill rolls from high quality cast irons]. Moscow: Polteks, 2000, 329 p.
3. Vdovin K.N. *Prokatnye valki: monografiya* [Mill rolls: Monograph] Magnitogorsk: The publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 443 p.
4. Voronkov B.V., V.M., Petrochenko E.V. *Kompleksno-legirovannye iznosostoikiye chuguny: Monografiya* [Complex wear-resistant cast alloys: Monograph]. Chelyabinsk: Izdatelstvo REKPOL, 2005, 178 p.
5. Levi L.I., Tsylin I.I., Garber M.E. et al. Chromium-manganese-molybdenum abrasion-resistant cast irons. *Lit-eynoe proizvodstvo* [Foundry], 1969, no. 9, pp. 7-9.
6. Tsybrov S.V., Avdienko A.V., Sanarova E.V. et al. Choosing an efficient technique for obtaining liquid cast iron and its chemical composition for casting sheet rolls. *Liteinye protsessy* [Casting processes]. Magnitogorsk: NMSTU, 2004, no. 4, pp. 39-43.
7. Vdovin K.N., Gimaletdinov R.Kh., Kolokoltsev V.M., Tsybrov S.V. *Prokatnye valki: monografiya* [Mill rolls: Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2005, 543 p.
8. Kolokoltsev V.M., Naumenko A.V., Kuts V.A. et al. The effect of alloying elements on the properties of cast iron rolls for a hot rolling application. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory of metallurgy and the metallurgical processes]. Magnitogorsk, 2001, no. 2, pp. 210-219.
9. Ri E.Kh., Kolokoltsev V.M., Ri Hosen et al. *Kompleksno-legirovannye belye chuguny funktsional'nogo naznacheniya v litom i termoobrabotannom sostoyaniyakh* [Functional application complex white cast iron alloys in the as-cast and heat treated states]. Vladivostok: Dal'nauka, 2006, 275 p.
10. *Bor, kaltsiy, niobiy i tsirkoniy v chugune i stali* / per. s angl. V.A. Mchedlishvili and V.V. Khovrin; pod red. S.M. Vinarova [Boron, calcium, niobium and zirconium in cast iron and steel. Translation from English by V.A. Mchedlishvili and V.V. Khovrin. Edited by S.M. Vinarov]. Moscow: GNTI ChTSM, 1961, 460 p.
11. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. *Plastichnost' borirovannykh sloev* [The plasticity of borated layers]. Moscow: FIZMATLIT, 2010, 384 p.

Received 01/06/16

Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых indefinitных прокатных валков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 78–89. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-78-89

Gimaletdinov R.H., Gulakov A.A., Tukhvutulin I.H. The effect of the chemical composition on the working layer properties of centrifugally cast indefinite chill rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 78–89. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-78-89