Н. А. Феоктистов, В. П. Чернов, А. С. Савинов, Д. А. Горленко, И. В. Михалкина
**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
И МИКРОСТРУКТУРУ ВАЛКОВОЙ СТАЛИ**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова
e-mail: fna87@mail.ru

Статья посвящена изучению влияния углерода на эксплуатационные свойства валковой стали марки 150ХНМ.

Во введении представлен краткий литературный обзор о влиянии химического состава валковых сплавов на уровень эксплуатационных и механических свойств прокатных валков. Кроме того, сформулирована актуальность представленных исследований.

Рассмотрено влияние элементов – марганец, ниобий, ванадий, никель – на микроструктуру и механические свойства прокатных валков. Также представлена классификация легирующих элементов по оказываемому влиянию на температуры полиморфных превращений, и приведен ряд карбидообразующих элементов по увеличению этой способности.

Вместе с этим рассмотрено влияние карбидной фазы на заэвтектоидную сталь. Приведены карбидные соединения, которые могут образовываться в сталях, а также их классификация. Рассмотрен механизм влияния карбидной фазы на эксплуатационные свойства стального литья.

Во второй части статьи представлена методика проведения исследований; кратко рассмотрены материалы, которые были задействованы при проведении работ, а также лабораторное и аналитическое оборудование.

В третьей части отражены результаты проведенных исследований. Рассмотрено влияние углерода в широких пределах на эксплуатационную стойкость заэвтектоидной валковой стали в условиях изнашивания при комнатной и повышенной (400 °С) температурах.

Кроме всего этого, определено влияние углерода на микроструктуру валкового сплава, а также представлен анализ взаимосвязи микроструктуры с уровнем эксплуатационных свойств заэвтектоидной валковой стали.

В заключении статьи приведены краткие выводы по полученным результатам, а также приведен библиографический список литературных источников, по которым был проведен аналитический обзор.

Ключевые слова: заэвтектоидная сталь, износостойкость, карбидная фаза, углерод, микроструктура, прокатный валок.

N. A. Feoktistov, V. P. Chernov, A. S. Savinov, D. A. Gorlenko, I. V. Mikhalkina

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF CARBON ON PERFORMANCE PROPERTIES AND THE MICROSTRUCTURE OF ROLL STEEL

Nosov Magnitogorsk State Technical University

This paper concentrates on studying the effect of carbon on performance properties of 150KhNM roll steel grade.

The introduction contains a brief literature review on the effect of the roll alloy chemistry on performance and mechanical properties of mill rolls. Besides, it demonstrates the relevance of the presented studies.

The paper describes the effect of chemical elements, such as manganese, niobium, vanadium, nickel on the microstructure and mechanical properties of mill rolls. It also classifies alloying elements by their effect on polymorphic transformation temperatures and shows carbide-forming elements increasing such property.

We also considered the effect of the carbide phase on hypereutectoid steel. The paper contains carbide compounds that may be formed in steels, and their classification. It describes the mechanism of the effect of the carbide phase on performance properties of steel castings.

The second part of the paper presents a research procedure and briefly describes materials used for the research and laboratory and analytical equipment.

The third part of the paper presents the research results. It describes the effect of carbon in a broad range on service durability of hypereutectoid roll steel in conditions of wear at room and elevated (400 °C) temperatures.

Besides, we determined the effect of carbon on the roll alloy microstructure and analyzed relations between the microstructure and performance properties of hypereutectoid roll steel.

The conclusion of the paper summarizes the results and contains the references used for an analytical review.

Keywords: hypereutectoid steel, wear resistance, carbide phase, carbon, microstructure, mill roll.

Введение

Прокатные валки являются главным инструментом станов, назначение которого – не только деформация металла, но и обеспечение качества готовой продукции [1].

В настоящее время в прокатных станах применяют валки из различных материалов – чугунов и сталей.

Доля чугунных валков, эксплуатирующихся в прокатных цехах, составляет около 54 %. Оставшуюся часть представляют стальные прокатные валки.

Технология их изготовления может отличаться в зависимости от условий эксплуатации. Методом литья изготавливают валки из полубыстрорежущих (Semi-HSS) сталей. Кованные валки изготавливают из быстрорежущих (HSS) и полубыстрорежущих сталей. Также в последнее время освоено производство валков HSS методом центробежного литья [2]. С недавнего времени в Европе, Японии и США для производства прокатных валков применяют инструментальные стали (HP), сталь AS180X и многие другие, являющиеся нетрадиционными материалами для валкового производства [3–5].

Из стальных валков на территории Российской Федерации широкое распространение нашли изделия из сталей марок 60XH, 9X2MФ, 90XФ, 75ХМФА, 150ХНМ, 60Х4ГМФ, 60Х2С2МФ и др. [6–9].

По технологии производства стальные валки можно разделить на цельнолитые и банди-

жированные. Опыт производства стальных валков в компаниях АО «Машиностроительный концерн ОРМЕТО-ЮУМЗ» и ПАО «Уралмаш-завод» свидетельствует о том, что наилучшим материалом для цельнолитых и бандажированных валков является сталь 150ХНМ [10]. В условиях прокатного стана «ЕВРАЗ НТМК» применение стальных валков из стали 150ХНМ позволило увеличить межперевалочную компанию в 2,0–2,5 раза по сравнению с аналогичными валками из стали 60ХН и 9Х2МФ [6].

Высокий уровень эксплуатационных свойств валков из упомянутой стали обеспечивается не только химическим составом, но и термической обработкой.

В работах [11–13] рассмотрено влияние углерода и молибдена на уровень эксплуатационных свойств валковых сплавов. Отмечено, что углерод способствует повышению количества карбидной фазы, тем самым повышая уровень эксплуатационных свойств. Влияние молибдена, по мнению авторов работ, сведено к увеличению прокаливаемости, а также увеличению прочности и твердости валковых сплавов. При этом в работе [14] для обеспечения высоких эксплуатационных свойств прокатных валков рекомендовано выдерживать содержание элементов, %: (0,86–1,72) хрома; (0,9–1,32) никеля; (0,16–0,3) молибдена; (1,8–1,9) углерода.

В литом состоянии сталь 150ХНМ имеет перлитную структуру [15–17]. В работах [17–19] представлен рациональный режим термиче-

ской обработки для заготовок стальных валков из этой стали, который включает в себя промежуточный и окончательный этапы. При этом в работе [20] предложено корректировать режим термической обработки в зависимости от концентрации углерода в валковой стали.

Несмотря на большой массив данных в литературных источниках по валковым сплавам, остается открытым вопрос о комплексном влиянии химического состава сплава и условий формирования литой заготовки на параметры микроструктуры и уровень эксплуатационных свойств. Следует отметить, что условия кристаллизации могут меняться в зависимости от габаритов литого изделия, материала формы и некоторых других факторов. В свою очередь, процесс кристаллизации оказывает влияние на литую структуру валкового сплава, которая определяет микроструктуру изделия после термической обработки, а также уровень эксплуатационных свойств.

На кафедре литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова» проведена серия исследовательских работ, объектом исследования в которых являлась заэвтектоидная валковая сталь.

Цель данной работы – изучение влияния углерода и скорости охлаждения расплава в литейной форме на параметры микроструктуры в литом и термообработанном состояниях, а также уровень эксплуатационных свойств валковой стали марки 150XНМ.

Методика проведения исследований

Исследования проводились на литых образцах, размером 35×35×10 мм, залитые в формы с различными теплоаккумулирующими способностями.

Выплавку сплавов осуществляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой. Химический состав образцов определяли на спектрометре фирмы SPECTRO, модель МАХх.

Графики кривых охлаждения расплава в литейной форме получали при помощи вольфрам-рениевой термопары и аналого-цифрового преобразователя. По этим графикам определяли скорость охлаждения расплава в литейной форме.

Термическую обработку экспериментальных отливок проводили в нагревательной печи сопротивления НАКАЛ. Режим включал в себя высокотемпературный отжиг при температуре выше 1050 °С; закалку при температуре 920 °С и высокий отпуск при температуре 520 °С.

Испытание на износостойкость проводили на лабораторной установке в соответствии с ГОСТ 23.208-79 (абразивная износостойкость).

Определение размера зерен и количественный анализ микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Axio Observer с помощью программы Ticsomet Standart Pro по ГОСТ 5639-82. Также исследования микроструктуры проведены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM-6490 LV. Микрошлифы приготовлены путем запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в смеси концентрированных азотной и соляной кислот (HNO_3 – 65 %; HCl – 35 %) методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом (исследования выполнены в ЦКП НИИ наносталей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»).

Микротвердость определяли на твердомере Buchler Mikromet в соответствии с ГОСТ 9450-60 методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке 200 г и длительности нагружения 10 с. Твердость определяли на твердомере EmcoTest M4C 075 G3 в соответствии с ГОСТ 9013-59.

Обсуждение результатов

В лабораторных условиях были получены экспериментальные образцы из стали марки 150XНМ, кристаллизация которых проходила с различными скоростями охлаждения в интервале от 5,77 до 28,35 °С/с в температурном интервале кристаллизации. В интервале выделения вторичных карбидов скорость охлаждения изменяется от 0,89 до 4,23 °С/с.

Химический состав экспериментальных образцов отличался концентрацией углерода, которая находилась в пределах от 1,33 до 1,78 %. Концентрация остальных элементов, входящих в химический состав сплава, была следующей (%): Si 0,48–0,51; Mn 0,71–0,75; Cr 1,15–1,22; Ni 1,29–1,33; Mo 0,41–0,46; Al 0,04–0,05.

График зависимости коэффициента абразивной износостойкости при испытании в условиях комнатной и повышенной температур приведен на рис. 1.

Представленные зависимости показывают, что увеличение концентрации углерода с 1,3 до 1,8 % в заэвтектоидной стали приводит к уве-

личению коэффициента износостойкости на 27–30 % в случае испытания при комнатной тем-

пературе, и более чем в 2 раза при температуре испытания 400 °С.

Рис. 1. Влияние углерода на абразивную износостойкость валковой стали при скорости охлаждения, в литейной форме: — — — 5,77 °C/c; — 11,94 °C/c; — · — · — 28,35 °C/c (температура испытания: а – 20 °C; б – 400 °C)

Сравнительный анализ результатов испытаний экспериментальных образцов показал, что износ одних и тех же образцов при 20 и 400 °С приводит к снижению коэффициента абразивной износостойкости в среднем на 10–35 % при испытаниях в условиях повышенных температур.

Для объяснения полученных зависимостей провели металлографические исследования экспериментальных образцов.

Изначально изучили комплексное влияние углерода и скорости охлаждения расплава в ли-

тейной форме на объемную долю карбидной фазы и средний размер зерна. Полученные зависимости в виде графической интерпретации представлены на рис. 2. Следует отметить, что скорость охлаждения влияет на микроструктуру валковой стали после термической обработки косвенно. В первую очередь, скорость охлаждения расплава в литейной форме оказывает влияние на параметры литой структуры, которые впоследствии определяют параметры микроструктуры стали после термической обработки.

Рис. 2. Зависимость среднего размера зерна (а) и объемной доли карбидной фазы (б) от концентрации углерода в сплаве при скорости охлаждения расплава в форме: — · — · — 5,77 °C/c; — 11,94 °C/c; — — — 28,35 °C/c

Размер зерна после термической обработки определяли по нерастворившейся цементитной сетке.

С увеличением концентрации углерода в стали от 1,3 до 1,8 % размер зерна сокращается на 30 %. Это обусловлено увеличением количества

цементита с 21,5 до 32 %, который тормозит рост зерна.

При низкой концентрации углерода (1,33 %) не обнаружено влияние скорости охлаждения на объемную долю карбидной фазы. При более высоких концентрациях углерода свыше 1,5 % объемная доля карбидной фазы в экспериментальных образцах отличается на 5–18 % в зависимости от скорости охлаждения отливок. Ми-

нимальное значение объемной доли 23,5 %, максимальное – 32,3 %.

Также в ходе проведения исследований оценили карбидную сетку и неоднородность. Эта характеристика микроструктуры является крайне важной, так как она зачастую служит причиной поломки валков. Полученные результаты представлены в виде гистограмм на рис. 3.

Рис. 3. Гистограммы влияния углерода на карбидную сетку (а) и неоднородность (б) при различных скоростях охлаждения литой структуры

Очевидно, что при увеличении концентрации углерода балл карбидной сетки увеличивается, о чем также свидетельствует увеличение объемной доли карбидной фазы. Увеличение концентрации углерода до 1,5 % приводит к снижению карбидной неоднородности. Это говорит о том, что карбидная фаза расположена относительно равномерно по структуре сплава на границах бывших зерен аустенита, а также имеет приблизительно одинаковый размер от 3 до 10 мкм.

При более высоком содержании углерода (свыше 1,5 %) карбидная фаза представлена в виде отдельных включений, также располагающихся по границе бывшего зерна аустенита. Однако сетка не является целостной, как это можно наблюдать в структуре сплава с более низким содержанием углерода, а размер карбидной фазы находится в пределах от 3 до 30 мкм.

Заключение

Проведя исследования, установили, что повышение концентрации углерода в валковой заэвтектоидной стали приводит к уменьшению размера зерна, увеличению объемной доли

карбидной фазы, и, как следствие всего этого, повышению коэффициента износостойкости на 30 %.

Проведя металлографические исследования, установили, что карбидная неоднородность имеет минимальный балл (2–3) при концентрации углерода в пределах 1,45–1,5 %. При большей или меньшей концентрации углерода в составе сплава карбидная сетка имеет максимальный балл.

Износ образцов из заэвтектоидной стали при повышенной температуре снижает коэффициент износостойкости на 10–35 % по сравнению с износом в нормальных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ашихмин, Г. В. Валки как важный технологический элемент прокатного производства / Г. В. Ашихмин, В. А. Николаев, В. П. Полухин // Медь. Латунь. Бронза. – М. : Институт Цветметобработка, 2006. – С. 268–281.
2. J. Mc Cann. Overview of Work Rolls for Cold Rolling // Iron making and steel making. – 2000. – № 1. – Р. 15–18.
3. Мартини, Ф. Свойства рабочих валков из быстрорежущей стали для станов горячей прокатки / Ф. Мартини // Сталь. – 1999. – № 10. – С. 50–54.
4. Разработка новой быстрорежущей стали с оптимизированным новым карбидным составом для валков /

Ж. Лекомт-Беккер, Ж. Чу-фанг Чуинджан, Э. Пирар [и др.] // Сталь. – 2003. – № 3. – С. 88–95.

5. Development of HSS roll in hot strip mill of Cockerill Sambre / D.Steimer, H.Uijtdebroeks, D.Liquet and other // Int. Conf. New Dev. Met. Process Technol., Dusseldorf, June 13–15, 1999, Proc. – Dusseldorf, 1999. – С. 269–277.

6. Прокатные валки: моногр. / К. Н. Вдовин [и др.] // Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2018. – 335 с.

7. Инновационные валки из высокохромистой стали / А. И. Волошин [и др.] // Труды X Конгресса сталеплавильщиков. – М. : Черметинформация, 2010. – С. 61–64.

8. Новые материалы и технологии для производства прокатных валков / Г. И. Скударь [и др.] // Труды шестого конгресса прокатчиков. – М. : Черметинформация, 2005. – С. 279–282.

9. Чигарев, В. В. Повышение трещиностойчивости бандажированных опорных валков / В. В. Чигарев, В. И. Щетинина, С. В. Щетинин // Сталь. – 2014. – № 2. – С. 45–47.

10. Технология многократного использования опорных валков листовых станов за счет бандажирования / А. Ю. Фиркович [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». – 2003. – № 5. – С. 56–57.

11. The development of high steel rolls by extrusion casting / H. Fu, J. Xing, Q. Xiao // Ironmaking and Steelmaking. – 2005. – № 1. – С. 66–70.

12. Gatch John W. Molibdenum bearing nodular irons. Foundry. – 1964. – № 5. – P. 67–71.

13. Rolls Mill Roll, Climax Molibdenum Co. New York, 1987. – P. 120.

14. Rudyuk, S. I., Mikhailova, I. V., & Tomenko, Y. S. The effect of alloying and heat treatment on the properties of hypereutectoid steels for rolling-mill rolls. Metal Science and Heat Treatment. 32 (4). 261–264. doi:10.1007/bf00729866.

15. Taleff, E. M., Lewandowski, J. J., & Poursadian, B. (2002). Microstructure-property relationships in pearlitic eutectoid and hypereutectoid carbon steels. JOM. 54(7). 25–30. doi:10.1007/bf02700982.

16. Filippov, M. A., Gervas'ev, M. A., Plotnikov, G. N., Zhilin, A. S., & Nikiforova, S. M. (2016). Formation of Structure of Wear-Resistant Steels 150KhNML and Kh12MFL Upon Quenching. Metal Science and Heat Treatment. 57(11-12). 641–644. doi:10.1007/s11041-016-9935-5.

17. Kirpichnikov, M. S., Sinitsyn, E. O., & Borovinskikh, M. P. (2011). Heat treatment technology for roll billets of steel 150KhNM for improving their quality and operating life. Metallurgist. 54(11-12). 791–792. doi:10.1007/s11015-011-9375-9.

18. Vdovin K.N., Zavalishchin A.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Structure and properties of cast iron designated for working layer of rolls. Journal of Materials Science Research. 2016. Vol. 5. № 2. Pp. 88–99.

19. Вдовин, К. Н. Влияние термической обработки на валковый чугун, модифицированный бором / К. Н. Вдовин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2011. – № 4 (36). – С. 13–15.

20. The development of high steel rolls by extrusion casting / H. Fu, J. Xing, Q. Xiao // Ironmaking and Steelmaking. 2005. № 1. С. 66–70.