Н. А. Феоктистов¹, К. Н. Вдовин¹, А. С. Савинов¹, Е. В. Скрипкин²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛИТОЙ
СТРУКТУРЫ ВАЛКОВОЙ СТАЛИ**

¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

² ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков»

e-mail: fna87@mail.ru

В статье рассмотрен процесс кристаллизации валковой стали, а также связанный с этим процесс формирования микроструктуры этого материала при охлаждении изделия. Представленные результаты получены при проведении лабораторных экспериментов, металлографических исследований валковой стали.

В первой части статьи выполнен краткий обзор научной литературы, приводятся сведения о сплавах, применяющиеся в промышленности для изготовления прокатных валков. Кроме того, рассмотрены проблемы производства прокатных валков, с которыми столкнулась промышленность в настоящее время, а также возникшая из-за этого научная повестка для проведения исследовательских работ. На основании выполненного анализа сформулирована цель проводимых исследований.

Во второй части статьи кратко рассмотрены методика и оборудование, на котором выполнялись исследования. Кроме того, рассмотрено влияние скорости охлаждения на параметры микроструктуры валковой стали: размер действительного зерна, количество карбидной фазы и температурные интервалы ее выделения. Определены количественные характеристики микроструктуры валковой стали. Данные, полученные в ходе проведения экспериментальных работ в лабораторных условиях, представлены графически.

В заключительной части статьи сформулированы выводы на основе полученных результатов, а также рекомендации для дальнейших исследований.

Ключевые слова: кристаллизация, валковая сталь, микроструктура, размер зерна, карбидная фаза.

N. A. Feoktistov¹, K. N. Vdovid¹, A. S. Savinov¹, E. V. Skripkin²

STUDING OF ROLL STEEL STRUCTURE FORMATION PROCESS

¹ FSBEI HE «Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov»

² ZAO «Magnitogorsk rolling mill plant»

Roll steel crystallization process, and formation process of its microstructure during cooling are considered in this article. Presented results are received by conducting of laboratory experiments, metallographic researches of roll steel.

Short review of science literature is carried out, data about alloys applied in roll production is showed in first part of the article. Moreover, problems in roll manufacture, with which industry have faced, as well arising due this science obligatoriness for making researches, are considered. Based on performed analysis, the researches' target is formulated.

Methodology and equipment used during researches are short considered in second part of the article. Besides, influence of cooling speed on roll steel parameters: actual grain size, carbide phase quantity, and temperature intervals of its formation are reviewed. Quantity characteristics of roll steel microstructure have determined. Data received due researches in laboratory conditions are presented graphical.

Conclusions based on obtained results, as well as recommendations for further researches are given in final part of the article.

Keywords: crystallization, roll steel, microstructure, grain size, carbide phase.

Валки являются инструментом для прокатных станов. От качества валка, прочностных характеристики его материала зависит надежность работы стана и качество продукции, выпускаемой прокатными цехами [1].

Для обеспечения надежности работы прокатного стана, а также максимальной стойкости прокатных валков их изготавливают из различных сплавов: заэвтектоидных, быстрорежущих и полубыстрорежущих сталей, половинчатых (индефинитных), высокохромистых чугунов и т. д. [2].

С целью повышения срока службы прокатных валков заводы производители разрабатывают различные технологические мероприятия. В основном они сводятся к разработке новых легирующих и модифицирующих комбинаций для валковых сплавов.

В качестве легирующих и модифицирующих элементов очень часто применяют: хром [3–5], никель [6], молибден [7–8], ванадий [9–10], медь [5, 11], ниобий и бор [12, 13]. Легирование и модифицирование указанными элементами обеспечивает требуемый уровень свойств материала прокатного валка, что сказывается на его эксплуатационной стойкости.

Однако чрезмерное добавление легирующих и модифицирующих элементов не всегда приводит к положительному изменению уровня механических и эксплуатационных свойств. Для некоторых марок валковых сплавов возможности повышения уровня свойств через легирование и модифицирование исчерпаны. Кроме того, уровень механических и эксплуатационных свойств прокатного валка задается не только изменением химического состава, но и посредством термической

обработки и условиями формирования литой микроструктуры сплава, либо совокупностью этих факторов [14, 15].

В то же время перед производителями прокатных валков стоит задача увеличения эксплуатационных свойств. В первую очередь такая задача сформирована из-за постепенного наполнения рынка прокатных валков продукцией зарубежных производителей. Следует отметить, что импортные валки в большинстве случаев обладают более высоким уровнем эксплуатационных свойств, чем отечественного производства. По этой причине отечественные производители пытаются решить эту научную проблему на этапах выплавки сплава за счет легирования и модифицирования, на этапе термической обработки посредством корректировки ее режима.

Свойства прокатных валков будут определяться микроструктурой сплава после термической обработки и ее количественными характеристиками. В свою очередь, микроструктура сплава после термической обработки зависит от ее параметров в литом состоянии. Литое состояние определяется не только химическим составом, но и условиями формирования микроструктуры, которые численно выражаются через скорости охлаждения валкового сплава при кристаллизации и его охлаждении в литейной форме.

Целью данной работы является исследование процессов формирования микроструктуры валковой заэвтектоидной стали при различных условиях охлаждения сплава в литейной форме.

В качестве объекта исследований была выбрана валковая сталь марки 150ХНМ. Химический состав стали представлен в таблице.

Химический состав стали марки 150XNM

Марка стали	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
150XNM	1,5	0,4	0,8	0,02	0,04	1,1	1,1	0,35

Для получения различных скоростей кристаллизации расплава в литейной форме, его заливали в формы с различными теплоаккумулирующими способностями: сухая и сырая песчано-глинистая форма, кокиль. Кроме того, изменяли массу изделия в случае заливки расплава в форму из одного типа материала. Типоразмеры изготовленных отливок: 35×35×10 и 50×50×50 мм. Скорости охлаждения при кристаллизации экспериментальных отливок находились в диапазоне от 1,01 до 28,35 °C/с.

Изменение температуры во времени при кристаллизации расплава в литейной форме фиксировали при помощи вольфрам-рениевой термопары, подключенной к аналого-цифровому преобразователю модели LA-50USB.

Изучение микроструктуры отливок осуществляли при помощи оптического микроскопа Meiji с помощью программы Tucsomet Standart Pro по ГОСТ 5639-82 и электронного микроскопа JEOL JSM-6490 LV.

Исследование износостойкости экспериментальных отливок по ГОСТ 23.208-79 «Методы испытания материалов на износостойкость при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы».

Литая микроструктура отливок, от параметров которой зависит уровень механических и эксплуатационных свойств, определяется химическим составом и тепловыми условиями, выражающиеся через скорости охлаждения расплава в литейной форме.

Для проведения анализа влияния скорости охлаждения в лаборатории литья ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова» провели серию экспериментов. Изменяя массу отливок, заливаемых из заэвтектоидной валковой стали, получили экспериментальные отливки, кристаллизация которых происходила в диапазоне скоростей охлаждения в интервале кристаллизации от 1,01 до 28,35 °C/с, а в интервале выделения избыточных фаз – от 0,32 до 4,59 °C/с.

Скорость охлаждения в температурных интервалах кристаллизации и выделения избыточных фаз влияет на разные количественные параметры микроструктуры. Для выбранной валковой стали скорость охлаждения в интервале кристаллизации определяет размер аустенитного (действительного) зерна, которое при дальнейшем охлаждении превращается в перлит. Влияние скорости охлаждения расплава в литейной форме на средний размер действительного зерна представлено на рис. 1.

Рис. 1. Влияние скорости охлаждения на средний размер действительного зерна марки стали 150XNM

Увеличение скорости охлаждения расплава с 1 до 28 °C/с приводит к снижению размера действительного зерна более чем в три раза.

Выявленная зависимость является следствием

влияние переохлаждения на скорость зарождения центров кристаллизации, а также скорости их роста.

Скорость охлаждения в температурном ин-

тервале выделения избыточных фаз влияет в первую очередь на количество вторичной фазы и ее морфологию. В рамках проведенных исследований путем сопоставления полученных кривых охлаждения с результатами металлографического анализа были определены количественные параметры избыточной фазы, а также температурные интервалы ее выделе-

ния и влияние на это скорости охлаждения. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Очевидно, что увеличение скорости охлаждения расплава в период охлаждения приводит к уменьшению количества карбидной фазы на 14 %. При этом температурный интервал начала и окончания выделения избыточной фазы снижается на 73 °С.

Рис. 2. Влияние скорости охлаждения на температуры начала и окончания выделения избыточных фаз и ее общего количества:

◆, ■ – температура начала и окончания выделения карбидной фазы; ▲ – количество избыточной фазы

Уменьшение количества карбидной фазы, а также температурного интервала ее выделения приводит к перераспределению химических элементов между карбидами и твердым раствором.

Проведя микрорентгеноспектральный анализ, определили коэффициенты распределения основных элементов – Mn и Cr, которые имеют большую растворимость и в карбидах, и в твердом растворе. Зависимость коэффициентов

распределения Mn и Cr представлена на рис. 3.

Очевидно, что при увеличении скорости охлаждения расплава в температурном интервале выделения вторичных фаз, происходит снижение количества легирующих элементов в карбидной фазе, при этом его концентрация растет в твердом растворе. Следствием этого является увеличение микротвердости твердого раствора.

Рис. 3. Изменение коэффициента распределения Mn (а) и Cr (б) в зависимости от скорости охлаждения расплава в температурном интервале выделения вторичных фаз

Установленные закономерности позволяют спрогнозировать микроструктуру рабочего слоя прокатного валка, а также параметры микроструктуры после термической обработки и свойства изделия. Кроме того, можно оценить вероятность выделения фазы, необходимой для получения высокого уровня эксплуатационных свойств. Однако для этого требуются исследования, посвященные влиянию термической обработки на микроструктуру и свойства исследуемого материала.

Представленные данные могут быть полезны исследователям, занимающимся коррективкой химического состава валковой заэвтектоидной стали.

Также в рамках работы были определены эксплуатационные свойства валковой стали, экспериментальные отливки из которой кристаллизовались в литевой форме с различными скоростями охлаждения. Полученные отливки прошли термическую обработку по одному режиму в одной печи, после чего были испытаны на износостойкость.

Проведя испытания, установили, что коэффициент износостойкости зависит от количественных параметров микроструктуры сплава, которые определяются скоростью охлаждения. Отливки, скорость охлаждения которых была равна $1,01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, после термической обработки имели среднее значение коэффициента износостойкости ($K_{\text{и}}$) 1,83 ед., для отливок, для скорости охлаждения $11,94\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, среднее значение составило 2,01 ед., для $25,08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ – 2,05 ед. Это еще раз подтверждает, что свойства сплава в изделии после термической обработки взаимосвязаны с параметрами микроструктуры, которые получаются после процесса кристаллизации. Также следует отметить, что управление структурой сплава в литом состоянии является инструментом для управления свойствами изделия.

Подводя итоги всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

- увеличение скорости охлаждения валковой стали марки 150ХНМ приводит к снижению размера действительного зерна более чем в три раза, а количество карбидной фазы снижается на 14 %;

- при увеличении скорости охлаждения расплава в три раза коэффициент распределения марганца и хрома меняется от 2,7 до 1,07 % и от 3,63 до 1,67 % соответственно;

- литая структура влияет на свойства сплава после термической обработки.

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. : ОАО «Институт Цветметобработка», 2006. – С. 268–281.
2. Прокатные валки : моногр. / К. Н. Вдовин, Д. В. Кураев, Н. А. Феоктистов, Д. А. Горленко. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2018. – 335 с.
3. Пути повышения эксплуатационной стойкости двухслойных чугуновых валков / А. В. Науменко [и др.] // Труды четвертого конгресса прокатчиков. – М. : АО «Черметинформация», 2002. – Т. 2. – С. 241–244.
4. Выбор рационального способа получения жидкого чугуна и его химического состава для отливки листовых валков / С. В. Цыбров [и др.] // Литейные процессы. – Магнитогорск : МГТУ, 2004. – Вып. 4. – С. 39–43.
5. Влияние добавок меди на структуру и свойства высокохромистых чугунов / Т. С. Скобло [и др.] // Материаловедение и термическая обработка. – 2010. – № 1. – С. 40–58.
6. Гималетдинов, Р. Х. Производство прокатных валков из высококачественных чугунов / Р. Х. Гималетдинов. – М. : Полтекс, 2000. – 330 с.
7. Gatch John W. Molybdenum bearing nodular irons, Foundry. – 1964. – № 5. – P. 67–71.
8. Rolls Mill Roll, Climax Molybdenum Co, Ntw York, 1987. – P. 120.
9. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях / Э. Х. Ри [и др.]. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 275 с.
10. Влияние карбидообразующих элементов на эксплуатационные свойства прокатных валков / В. В. Саломыкин [и др.] // Сталь. – 2005. – № 5. – С. 63–65.
11. Скобло, Т. С. Исследование структуры высокохромистого комплексно легированного чугуна с применением методов математического анализа / Т. С. Скобло, О. Ю. Ключко, Е. Л. Белкин // Сталь. – 2012. – № 3. – С. 46–52.
12. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Zaizeva A.A. Research of Properties and Structure of Boron-modified Roll-Foundry Iron // Journal of Materials Science Research, vol. 5, № 2, 2016. – P. 88–99.
13. Бор, кальций, ниобий, цирконий в чугуне и стали / пер. с англ. В. А. Мchedlishvili и В. В. Ховрина ; под ред. С. М. Винарова. – М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1961. – 448 с.
14. Вдовин, К. Н. Влияние термической обработки на валковый чугун, модифицированный бором / К. Н. Вдовин, А. А. Зайцева // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2011. – № 4. – С. 13–15.
15. Моделирование процессов кристаллизации и структурообразования прокатного валка из заэвтектоидной стали / К. Н. Вдовин [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2020. – № 1 (32). – С. 18–26.
16. Моделирование процессов кристаллизации и структурообразования прокатного валка из заэвтектоидной стали / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, И. В. Михалкина, Д. А. Горленко, А. И. Норец // Теория и технология металлургического производства. – 2020. – № 1(32). – С. 18–25.