

УДК 621.74

Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Юмабаев А.А., Чернов В.П., Корнилов С.Н., Калмыков В.Н.

ТЕПЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВОЙ ФАЗЫ В РАБОЧЕМ СЛОЕ ПРОКАТНОГО ВАЛКА ЛПХНД-71

***Аннотация.** В статье исследованы тепловые условия выделения графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала ЛПХНД-71, влияющие на его эксплуатационные характеристики. В ходе работы были экспериментально изучены процессы кристаллизации рабочего слоя из легированного чугуна (при 1200–1250 °С) в условиях центробежной силы, а также заливка сердцевины серым чугуном (1370–1450 °С). С помощью СКМ «ПолигонСофт» смоделированы условия первичного выделения графитовой фазы. Полученные данные имеют практическую значимость для оптимизации технологии производства и повышения ресурса работы прокатных валков ЛПХНД-71.*

***Ключевые слова:** графитовая фаза, изотермический отжиг, кристаллизация, прокатные валки, тепловые условия*

Введение

Современное состояние металлургической отрасли характеризуется высокой степенью конкуренции и необходимостью постоянного совершенствования производственных показателей. Важнейшим фактором, влияющим на эффективность прокатного производства и качество готовой продукции, являются характеристики и эксплуатационные свойства прокатных валков.

В структуре рабочего слоя вала графитовая фаза играет определяющую роль, формируя комплекс важнейших эксплуатационных характеристик: износостойкость, термостойкость, антифрикционные свойства, устойчивость к высоким нагрузкам и работоспособность при экстремальных температурных режимах.

Современные требования к качеству прокатной продукции и условиям её производства обуславливают необходимость детального исследования процессов формирования структуры рабочего слоя вала. Особое внимание уделяется изучению тепловых условий выделения графитовой фазы в рабочем слое, поскольку именно этот параметр влияет на эксплуатационные свойства валков.

Технологическая оптимизация производства валков невозможна без глубокого понимания механизмов формирования графитовой фазы. Исследование этих процессов открывает перспективы для разработки инновационных технологий, позволяющих повышать эксплуатационный ресурс валков, улучшать качество прокатной продукции, снижать производственные затраты и увеличивать конкурентоспособность металлургических предприятий.

Таким образом, комплексное изучение тепловых условий формирования графитовой фазы в структуре рабочего слоя прокатного вала представляет собой актуальную научную и практическую задачу, решение которой способствует развитию современных технологий производства валков для чистовых клетей станков горячей прокатки.

Цель работы – изучение тепловых условий выделения графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала ЛПХНД-71.

Изучение состояния вопроса

В железоуглеродистых сплавах углерод может находиться в двух состояниях: в свободном виде (в форме графита) или в связанном – в виде химического соединения (в форме цементита, карбидов). Оба этих компонента могут выделяться при кристаллизации из жидкого расплава, из аустенита, а также в результате эвтектического и эвтектоидного превращений.

Цементит с содержанием 6,67% С по химическому составу ближе к аустениту (до 2,14% С), чем к графиту (100% С). Именно поэтому в реальных условиях охлаждения его кристаллизация происходит в первую очередь. Однако графит обладает большей термодинамической стабильностью по сравнению с цементитом, поскольку система аустенит + графит характеризуется меньшим термодинамическим потенциалом. В результате при медленном охлаждении термодинамические условия способствуют преимущественно выделению графита, а не цементита, что и будет происходить при наиболее медленных скоростях охлаждения. Вторичным явлением также может являться распад цементита на графит, происходящий при определённых температурных условиях кристаллизации [2].

При охлаждении сплава заэвтектического состава ($C > 4,26\%$) графит выделяется из жидкого расплава (ниже линии $C' D'$), такой графит называют первичным. Он входит в состав эвтектики, а также выделяется из аустенита (графит вторичный) и при эвтектоидном превращении. Первичные выделения графита из жидкого расплава выполняют важную функцию центров кристаллизации для последующих выделений графита.

Дальнейшая кристаллизация будет заключаться в присоединении атомов углерода к уже имеющимся графитовым включениям за счет самодиффузии и отвода атомов железа от фронта кристаллизации. Рост графитных включений происходит преимущественно в длину, что приводит к образованию частиц, похожих по форме на лепестки или пластины, поэтому

графит такой формы называют пластинчатым. После полного охлаждения структура сплавов будет состоять из феррита (железа) и графитовых включений пластинчатой формы – неметаллической фазы, не имеющей связи с ферритной металлической основой. Таким образом, вся видимая в структуре графитная фаза будет являться совокупным результатом первичной (эвтектической) кристаллизации и превращений в твердом состоянии при термической обработке.

Причиной выделения графитовой фазы в рабочем слое из легированного чугуна является медленное охлаждение, что является предпосылкой для дальнейшего изотермического отжига [4].

Изотермический отжиг – вид термической обработки чугуна, направленный на улучшение его структуры и свойств. Этот метод особенно эффективен для превращения цементита в графит. Его применение обуславливается еще тем, что сокращается время обработки по сравнению с обычным отжигом, более полное графитизирование структуры чугуна, а также улучшение механических свойств материала и снижение внутренних напряжений.

Процесс изотермического отжига основан на двух ключевых этапах: нагрева до температуры выше точки А1 и выдержки при постоянной температуре для завершения структурных превращений.

Изотермический отжиг включает в себя несколько этапов – предварительный нагрев (650-750°C), основной нагрев (850-870°C), охлаждение (760-780°C), выдержка (при постоянной температуре) и окончательное охлаждение (на воздухе или в печи).

Методы и методика проведения эксперимента

Материалом для исследования является рабочий слой индифинитного центробежно-литого прокатного вала, изготовленного в условиях производства.

Подготовку образцов для изготовления шлифа и дальнейшего исследования осуществляли при помощи отрезного станка, с целью получения необходимых размеров образца для запрессовки в смолу. Изготовление шлифов осуществляли при помощи системы шлифподготовки.

Микроструктуру образцов выявляли травлением в реактиве Марбле.

Изучение микроструктуры проводили при помощи оптического микроскопа при увеличениях от 50 до 1000 крат с использованием системы компьютерного анализа изображения, адаптированного в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82 и ГОСТ 8233-56. При увеличениях от 300 до 5000 крат использовали сканирующий электронный микроскоп методом растровой электронной микроскопии.

Для моделирования процесса применяли СКМ «ПолигонСофт».

Результаты и обсуждения

Температура заливки чугуна в кокиль 1200-1300°C. Кристаллизация рабочего слоя из легированного чугуна начинается при температуре 1150-1200°C во вращающемся кокиле в условиях действия центробежной силы в результате отвода тепла через стенки формы.

Интенсивность отвода тепла меняется со временем и зависит от толщины закристаллизовавшегося металла, что, в свою очередь, влияет на размер дендритов. В тонком поверхностном слое кристаллизуются хаотично ориентированные первичные дендриты аустенита. Далее образуются вытянутые столбчатые кристаллы, которые при обычной кристаллизации располагаются нормально к стенке кристаллизации, а при действии центробежной силы теряют устойчивость относительно направления теплоотвода и ориентируются перпендикулярно этому направлению.

После выделения из жидкой фазы первичных дендритов аустенита кристаллизация заканчивается при температуре 1110–1130°C, хоть и значение фактической температуры солидус при этих условиях кристаллизации равняется примерно 1128°C.

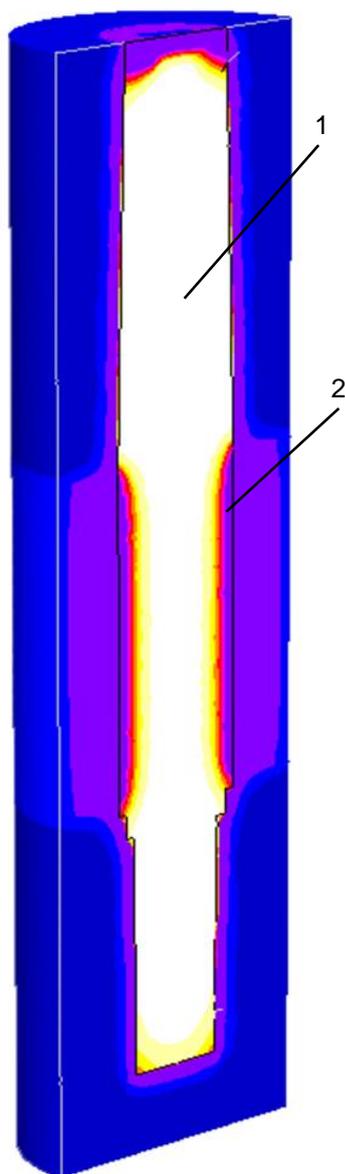
При температуре 1000–1100°C происходит остановка центробежной машины и примерно при 1070°C происходит перенос заливочной формы на плац. Далее при достижении температуры закристаллизовавшегося рабочего слоя 980–1000°C происходит заливка сердцевины серым чугуном, температура которого 1370–1450°C. В результате этого рабочий слой легированного чугуна нагревается и частично подсплавляется.

Для моделирования условий первичного выделения графитовой фазы и на основании снятых температурно-временных характеристик кристаллизации реального прокатного вала провели моделирование данного процесса в СКМ «ПолигонСофт». Снятые температурно-временные характеристики кристаллизации рабочего слоя, а также сердцевины вала представлены графически.

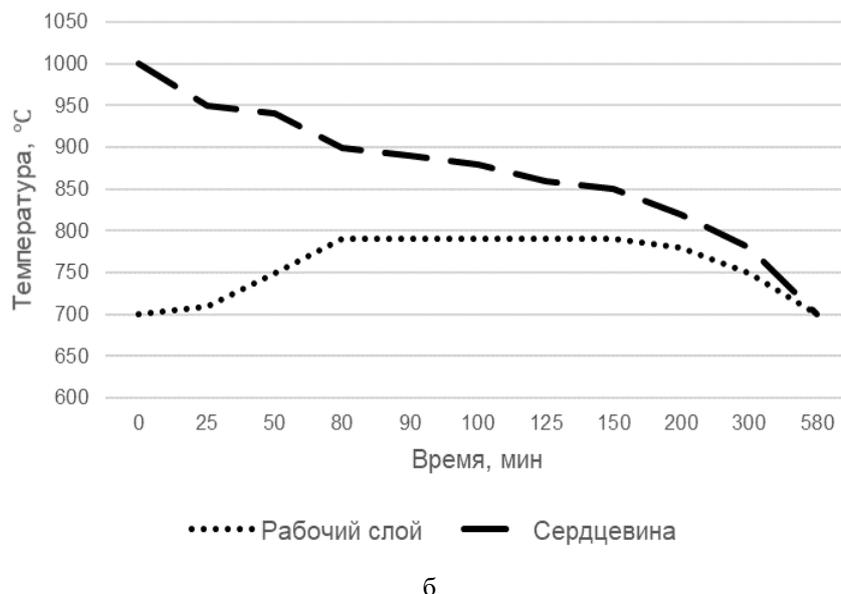
При заливке сердцевины в структуре рабочего слоя происходят процессы частичного распада карбидной фазы и выделение включений графита, это связано с длительным пребыванием рабочего слоя в изотермических условиях при высоких температурах.

Через 80 мин прекращается нагрев рабочего слоя и наступает изотермическая выдержка, которая длится более 2 ч.

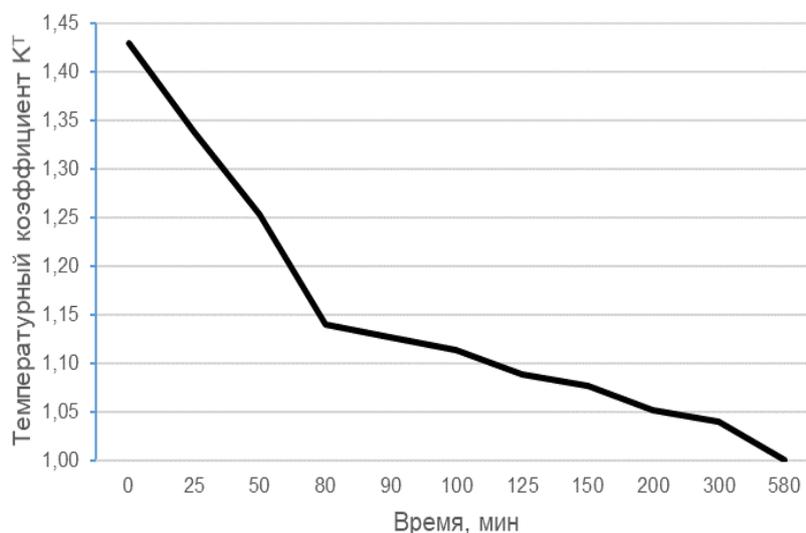
Исходя из полученных данных, вывели соотношение температуры сердцевины к поверхности рабочего слоя, который ввели как безразмерный температурный коэффициент, служащий индикатором термодинамических условий и позволяющий непрямым методом отслеживать зоны, где преобладают условия графитизации (при $K^T=1-1,15$) и процессы карбидообразования (при $K^T=1,15-1,45$) (см. рисунок).



а [1]



б



в

Визуализированная модель кристаллизации сердцевины прокатного вала (а), изменение температурных зон рабочего слоя после заливки сердцевины (б) и изменение температурного коэффициента (в):

1 – сердцевина; 2 – поверхность

Формирование структуры рабочего слоя чугуна заканчивается частичным превращением аустенита в мартенсит.

Таким образом, окончательная структура чугуна рабочего слоя состоит из мартенситно-аустенитной металлической основы, эвтектических карбидов, избыточных фаз в виде вторичных карбидов и включений графита [3].

Выводы

1. Установлены основные температуры заливки кокиль (1200-1300°C), а также температуры начала (1150-1200°C) и конца кристаллизации (1110-1130°C).

2. Проанализированы фазовые превращения при заливке сердцевины.

3. С помощью программного комплекса СКМ «ПолигонСофт» выполнено моделирование условий первичного выделения графитовой фазы и температурно-временных характеристик кристаллизации рабочего слоя и сердцевины вала.

4. Введен безразмерный температурный коэффициент, который позволяет количественно оценить градиент температур в системе и прогнозировать зоны преимущественного выделения графита и карбидов.

Список источников

1. Моделирование тепловых полей при сваривании рабочего слоя прокатного валка с сердцевиной / В.М. Колокольцев, А.С. Савинов, Н.А. Феокистов [и др.] // Литейное производство. 2021. № 8. С. 30-34.
2. Исследование процессов формирования структуры и свойств валковых сталей с целью создания их новых составов / В.М. Колокольцев, Н.А. Феокистов, А.С. Савинов, Е.В. Скрипкин // Черные металлы. 2024. № 3. С. 28-32. DOI: 10.17580/chm.2024.03.05.
3. Влияние технологии получения на структуру и свойства рабочего слоя прокатных валков из чугуна ЛПХНД-71 / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, А.Н. Завалищин, Д.В. Куряев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 4(778). С. 7-11.
4. Вдовин К.Н. Прокатные валки. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 443 с.
5. Влияние ванадия на особенности выделения карбидной фазы в индифинитных чугунах рабочего слоя прокатных валков / К.Н. Вдовин, Н.В. Копцева, Д.С. Горленко [и др.] // Сталь. 2019. № 4. С. 55-59.
6. Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых индифинитных 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.
7. Куряев Д.В., Цыбров С.В. Исследование влияния легирующих элементов на основные свойства чугунных прокатных валков // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2017. № 16. С. 79-84.
8. Цыбров С.В., Вдовин К.Н., Зайцева А.А. Повышение эксплуатационных характеристик индифинитных валков центробежного литья // Литейщик России. 2012. № 3. С. 30.
9. Волчук В.Н. Исследования влияния химического состава чугунных прокатных валков на их механические свойства // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 5(194). С. 12-18.
10. Производство прокатных валков в условиях ЗАО «МЗПВ» / Д.В. Куряев, А.В. Авдиенко, Д.М. Иванов, А.Б. Бойко // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 2(21). С. 32-33.

Сведения об авторах

Щенникова Вероника Алексеевна – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shchennikova_00@mail.ru.

Феокистов Николай Александрович – кандидат технических наук., доцент, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fna87@mail.ru.

Скрипкин Евгений Викторович – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: skripkin-86@yandex.ru.

Юмабаев Азамат Аслямович – старший преподаватель кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com.

Чернов Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tchernov42@.ru.

Корнилов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kornilov_sn@mail.ru.

Калмыков Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: prmpi@magtu.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THERMAL CONDITIONS OF GRAPHITE PHASE PRECIPITATION IN THE WORKING LAYER OF THE LPHND-71 ROLLING ROLL

Shchennikova Veronica A. – graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shchennikova_00@mail.ru.

Feoktistov Nikolay A. – PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru.

Skripkin Evgeny V. – graduate student of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: skripkin-86@yandex.ru.

Yumabaev Azamat A. – Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com.

Chernov Viktor P. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov42@.ru.

Kornilov Sergey N. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kornilov_sn@mail.ru.

Kalmykov Vyacheslav N. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: prmpi@magtu.ru.

Abstract. The article investigates the thermal conditions of graphite phase precipitation in the working layer of the LPHND-71 rolling roll, which affect its operational characteristics. During the study, the crystallization processes of the working layer made of alloyed cast iron (at 1200–1250 °C) under centrifugal force conditions were experimentally examined, as well as the pouring of the core with gray cast iron (1370–1450 °C). Using the SCM «PolygonSoft», the conditions for the primary precipitation of the graphite phase were simulated. The obtained data are of practical importance for optimizing production technology and increasing the service life of LPHND-71 rolling rolls.

Keywords: graphite phase, isothermal annealing, crystallization, rolling rolls, thermal conditions

Ссылка на статью:

Тепловые условия выделения графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала ЛПХНД-71 / Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Юмабаев А.А., Чернов В.П., Корнилов С.Н., Калмыков В.Н. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 15-19.
Shchennikova V.A., Feoktistov N.A., Skripkin E.V., Yumabaev A.A., Chernov V.P., Kornilov S.N., Kalmykov V.N. Thermal conditions of graphite phase precipitation in the working layer of the LPHND-71 rolling roll. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 15-19.