

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Михалкина И.В., Горленко Д.А., Норец А.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРОКАТНОГО ВАЛКА ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

Аннотация. Целью работы являлось изучение процессов кристаллизации отливки прокатного валка, описание закономерностей формирования микроструктуры валковой стали, выполненной на базе химического состава марки 150ХНМ. Работа логически состоит из двух частей – компьютерного моделирования литейных процессов при изготовлении прокатного валка, а также компьютерного моделирования структурообразования отливки из различных модификаций указанной марки стали.

В первой части статьи рассмотрены вопросы кристаллизации прокатных валков в комбинированной литейной форме, которые изучены посредством компьютерного моделирования в программном обеспечении «ПолигонСофт». Представлены температурно-временные кривые процесса кристаллизации бочки прокатного валка на различном удалении от поверхности раздела отливка-форма. Определены скорости охлаждения, при которых происходит структурообразование стальных прокатных валков.

Процесс выделения твёрдой фазы в отливке смоделирован посредством программного комплекса Thermo Calc. Полученные данные объясняют процесс формирования микроструктуры в бочке прокатного валка, а также дают широкое представление о влиянии химического состава сплава на процессы графитизации валковой стали. Представленные данные могут быть полезны промышленным предприятиям, производящим прокатные валки, а также для исследователей, занимающихся валковой тематикой.

Ключевые слова: прокатный валок, компьютерное моделирование, скорость охлаждения, аустенит, химические элементы, литейная форма.

Механические и эксплуатационные свойства литой продукции зависят не только от химического состава сплава. Их определяет совокупность факторов, так или иначе влияющих на технологический процесс на разных его стадиях [1].

На стадии выплавки механические и эксплуатационные свойства определяют технологией выплавки, которая обеспечивает или не обеспечивает заданный химический состав, а также необходимое содержание неметаллических включений в сплаве [2–4].

Литейная форма влияет на свойства посредством теплообмена с литой заготовкой, который с той или иной интенсивностью протекает при кристаллизации и охлаждении отливки. Тем самым при этом могут изменяться количественные показатели структуры сплава, химический состав фаз и структурных составляющих, а также меняться соотношение между фазами, образующимися в микроструктуре изделия.

Следует отметить, что параметры литой структуры определяют её параметры после термической обработки.

Однако проведение исследований, нацеленных на изучение процессов структурообразования на реальном объекте и тем более в условиях промышленного производства, является затруднительным, а главное – экономически необоснованным. Особенно если речь идёт об экспериментах на крупных изделиях [5, 6].

Именно по этой причине для исследования процессов кристаллизации отливки а форме, структурообразования в настоящее время применяют компью-

терное моделирование, которое позволяет в кратчайшие сроки и с минимальными экономическими затратами исследовать процессы получения изделия, скорректировать технологию производства ещё на стадии её разработки, а также снизить количества брака [7].

Изучение процессов кристаллизации осуществляли в специализированном программном обеспечении СКМ ЛП «ПолигонСофт». Решение задач теплообмена в этой программе осуществляется методом конечных элементов.

Для получения корректных результатов на начальном этапе сгенерировали конечно-элементную модель отливки. При подготовке к расчёту были заданы следующие входные данные: материал формы для шейки валка – холодно-твердеющая смесь (α – set процесс); материал формы для бочки валка – сталь 45Л; материал отливки – сталь 150ХНМ, базовый химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали марки 150ХНМ

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

На первоначальном этапе компьютерного моделирования была рассчитана скорость охлаждения сплава в бочке прокатного валка диаметром 920 мм. Для этого в бочку на этапе моделирования кристаллизационного процесса было установлено 5 датчиков от поверхности раздела отливка-форма к центру бочки валка. Расстояние между датчиками составляло

92 мм, что позволило поделить половину сечения валка на равные участки.

На рис. 1 представлены трёхмерные модели процесса кристаллизации валка в разные промежутки времени.

Полная кристаллизация отливки «Прокатный валок» наступает спустя 260 мин с момента окончания заливки. При этом посредством компьютерного моделирования установили, что в сечении бочки валка, а

также его шеек отсутствуют дефекты усадочного происхождения, что является индикатором качественной технологии.

Для оценки температурно-временных показателей кристаллизации бочки валка сняли показания датчиков температуры, установленных в бочке при моделировании. Кривые охлаждения слоёв отливки на определённом расстоянии друг от друга представлены на графике рис. 2.

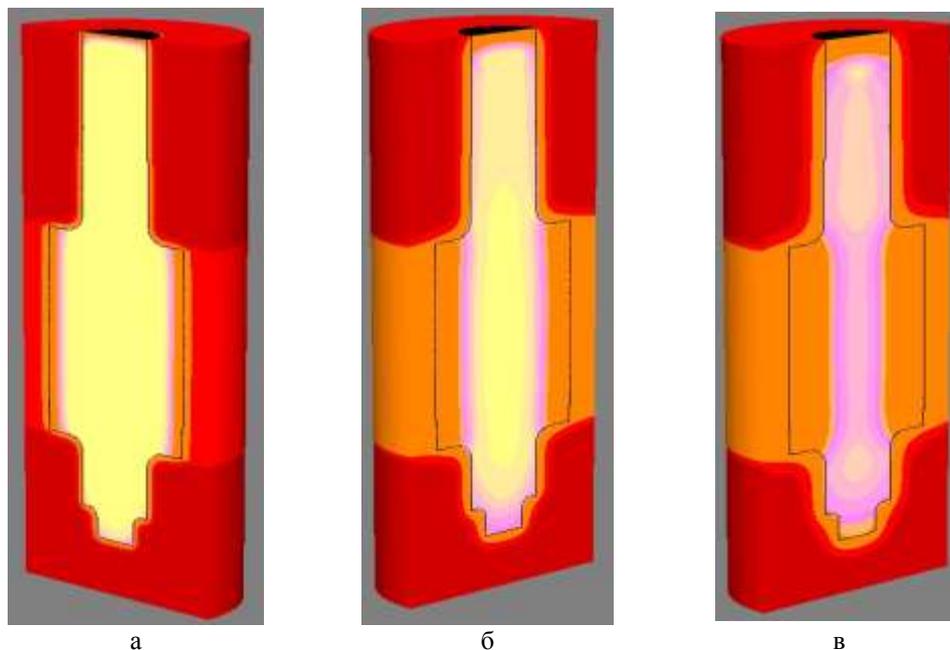


Рис. 1. Визуализация процесса кристаллизации валка:
а – через 10 мин; б – через 40 мин; в – через 80 мин

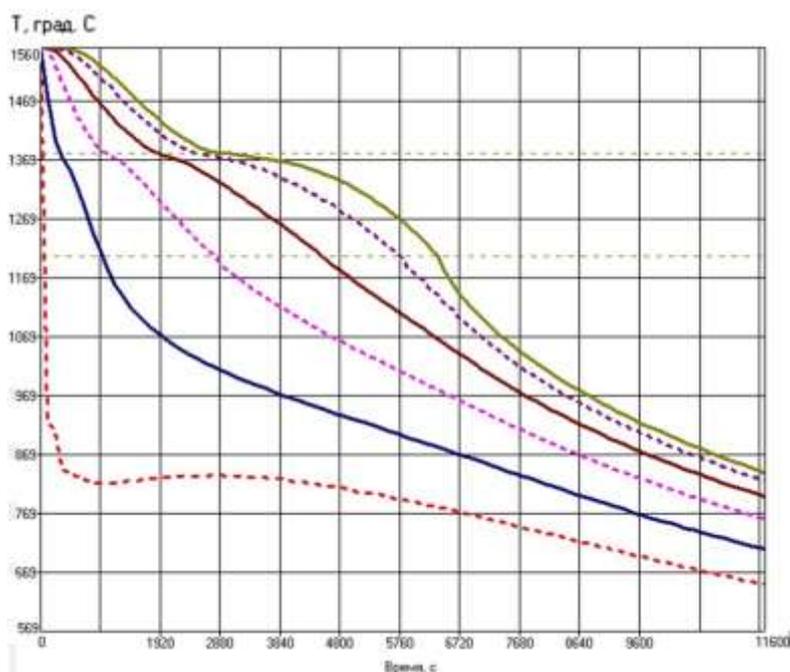


Рис. 2. Кривые охлаждения слоёв бочки валка на расстоянии (мм) от поверхности раздела отливка-форма:
1 – 5; 2 – 97; 3 – 189; 4 – 281; 5 – 373; 465

При помощи проведённого компьютерного моделирования установили, что разница в скоростях охлаждения слоёв металла бочки вала, расположенных на расстоянии 460 мм от поверхности контакта с формой до центра отливки, составляет почти 400 °С/мин.

Слой расплава, расположенные в непосредственной близости к форме (менее 5 мм), кристаллизуются со скоростью охлаждения 395,4 °С/мин, в то время как слои, находящиеся на осевой линии прокатного вала, кристаллизуются со скоростью 2,82 °С/мин.

Данные по скоростям охлаждения в точке, удалённой на определённое расстояние от поверхности раздела отливка-форма, представлены на графике (рис. 3).

Сплав, имея одинаковый химический состав, но охлаждаясь в литейной форме с разными скоростями, может кардинально отличаться по микроструктуре [8–10].

Для определения влияния скорости охлаждения стали марки 150XHM на микроструктуру сплава было проведено термодинамическое моделирование в программе Thermo Calc, а также физические эксперименты в литейной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Общий процесс образования твёрдой фазы, а также выделения из неё избыточной фазы показаны на графике рис. 4.

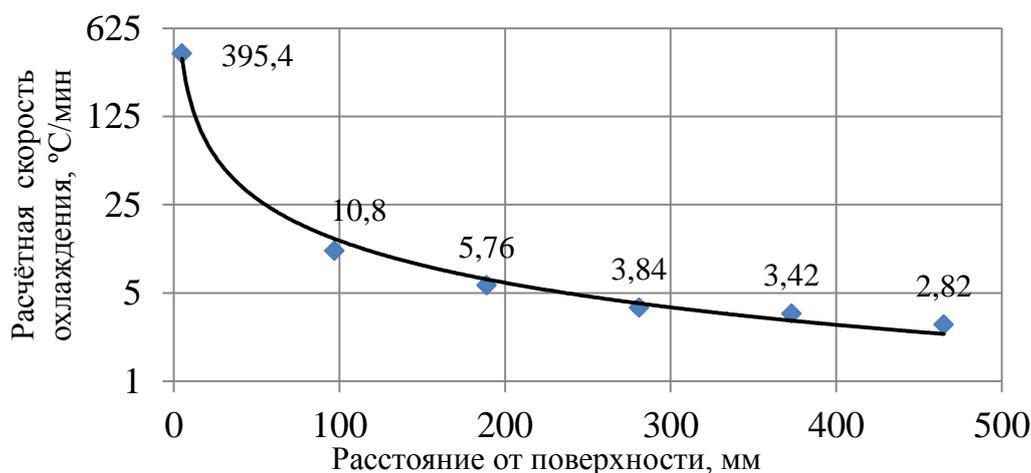


Рис. 3. Изменение скорости охлаждения слоёв расплава по мере удаления от поверхности раздела металл-отливка

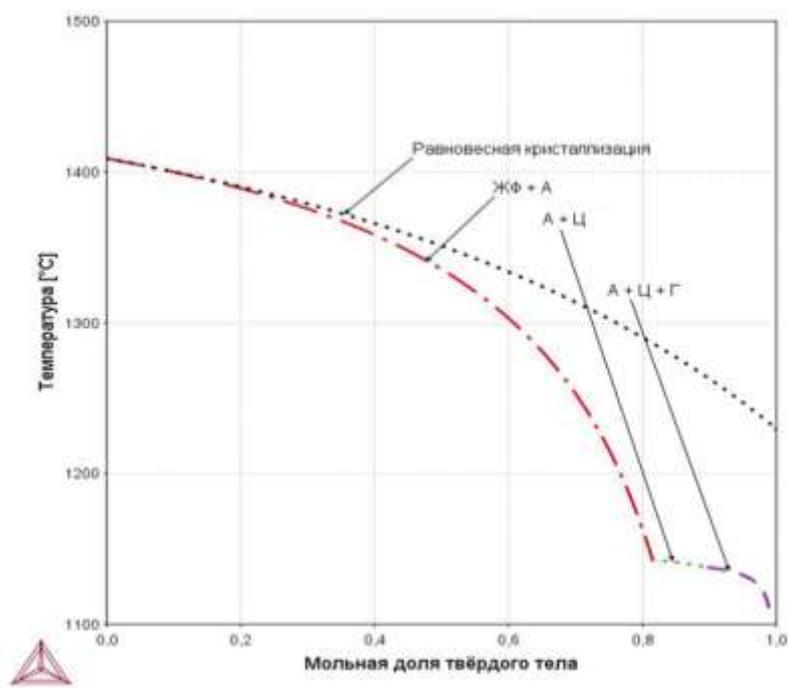


Рис. 4. Температурная зависимость изменения твёрдой фазы, а также выделения из неё избыточной при кристаллизации и охлаждении стали марки 150XHM

Модель Шайля, заложенная в расчёт процессов кристаллизации, позволила исследовать температурные интервалы образования фаз, существования двухфазной области, а также процесс выделения избыточной фазы [11, 12].

В процессе структурообразования при понижении температуры происходит выделение аустенита из жидкой фазы.

Следующим этапом в образовании микроструктуры прокатного валка из стали марки 150ХНМ является выделение цементита по границам аустенитного зерна, а также внутри него.

Заканчивается процесс выделением графита, который протекает при более низких температурах, близких к 1100 °С.

Графит является желательной фазой в микроструктуре прокатных валков, так как он способствует предотвращению налипания проката на валок в производственном процессе [13–15].

Известно, что разные элементы по-разному влияют на процесс выделения графита. Другими словами говоря, некоторые элементы способствуют процессу графитизации – С, Si, Ni и др., а другие элементы, которые связывают углерод в карбиды – Cr, Mo, Ti и т.д. – препятствуют.

Химический состав исследуемой валковой стали в промышленности обычно несколько изменяется, преследуя те или иные цели. Например, концентрация углерода может изменяться от 1,3 до 2,0%, а хрома – от 0,9 до 1,5%. Следовательно, изменяя концентрацию того или иного элемента, можно регулировать количественные характеристики этой фазы.

Для оценки влияния различных элементов на процесс графитизации, а также уточнения концентрационных интервалов элементов, находясь в которых этот элемент не будет препятствовать выделению графита, провели моделирование в Thermo Calc.

Условия моделирования были таковы, что в целом химический состав сплава оставался неизменным, менялась лишь концентрация отдельных элементов в разумных пределах.

На рис. 5 показаны графики влияния хрома и никеля на количество графита в структуре заэвтектидной стали. Известно, что хром является элементом, который препятствует графитизации, а никель способствует выделению графита. Это подтверждено графиками, показанными на рис. 5.

Для оценки влияния химических элементов на объёмную долю карбидной фазы, провели моделирование фазового равновесия в ПО Thermo Calc. При этом меняли концентрацию какого-либо одного элемента, оставляя неизменным содержание других на уровне, указанном в табл. 1. Полученные результаты представлены в табл. 2.

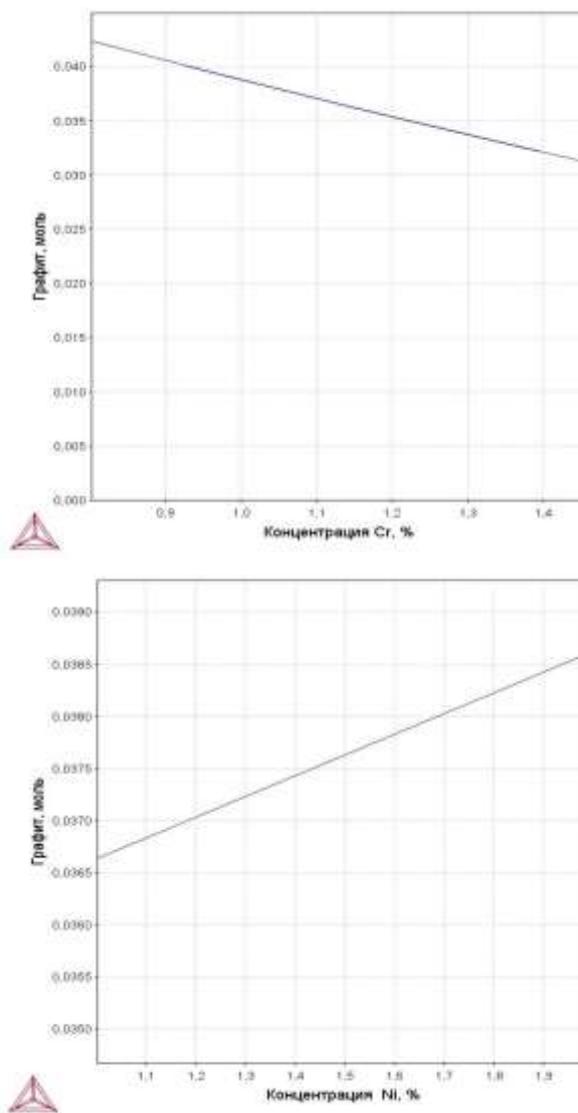


Рис. 5. Влияние хрома и никеля на мольную долю графитовой фазы

Таблица 2

Обобщённые данные по влиянию химических элементов на объёмную долю (V_Г) графитовой фазы

№	Концентрация элемента, %	V _Г , %
1	C = 1,3	0,03508
	C = 1,8	0,05171
2	Si = 0,4	0,04178
	Si = 0,8	0,04178
3	Mn = 0,5	0,04183
	Mn = 1,0	0,04175
4	Cr = 0,9	0,04336
	Cr = 1,5	0,03862
5	Ni = 0,8	0,04145
	Ni = 1,4	0,04146
6	Mo = 0,1	0,04243
	Mo = 0,4	0,04146

Анализ полученных данных показал, что существенное влияние на объёмную долю графита при прочих равных условиях оказывает углерод, а также хром. При этом, углерод способствует увеличению объёмной доли графитовой фазы на 47%, а хром снижает на 11%.

Следует отметить, что повышение концентрации элементов, способствующих графитизации (Ni, Si), не приводит к существенному увеличению объёмной доли графита без увеличения углерода.

В реальных условиях на процесс структурообразования оказывает влияние скорость охлаждения изделия. Кроме того, модель Шайля не учитывает структурных превращений, которые протекают в реальных литых изделиях.

Для изучения процесса были проведены лабораторные эксперименты по изучению процессов структурообразования валковой стали. Также были исследованы образцы, вырезанные из бочки прокатного валка на различном расстоянии от поверхности «отливка-форма».

В лабораторных условиях изготовили экспериментальные образцы, имеющие химический состав, представленный в табл. 1. Формирование литой

структуры экспериментальных отливок протекало при различных скоростях охлаждения в температурном интервале кристаллизации: от 60,6 до 402 °С/мин.

При высоких скоростях охлаждения расплава в форме, достигнутых при получении лабораторных экспериментов, а также в поверхностных слоях бочки валка, аустенит претерпевает мартенситное превращение. Также наблюдали выделение цементита по границам действительного зерна (рис. 6, а, б).

При более низких скоростях охлаждения расплава (менее 10,8 °С/мин) литая структура представлена различными формами перлита – пластинчатым и зернистым. По границам действительного зерна, как и при более высоких скоростях охлаждения, также выделяется цементитная сетка (рис. 6, в, г). Нежелательная мартенситная структура для прокатного валка, которая образуется в поверхностных слоях его бочки, устраняется посредством термической обработки [16 - 18]. Таким образом, после термической обработки микроструктура сплава состоит из перлита и карбидной фазы.

При исследовании образцов, вырезанных из бочки валка, был обнаружен графит (рис. 7).

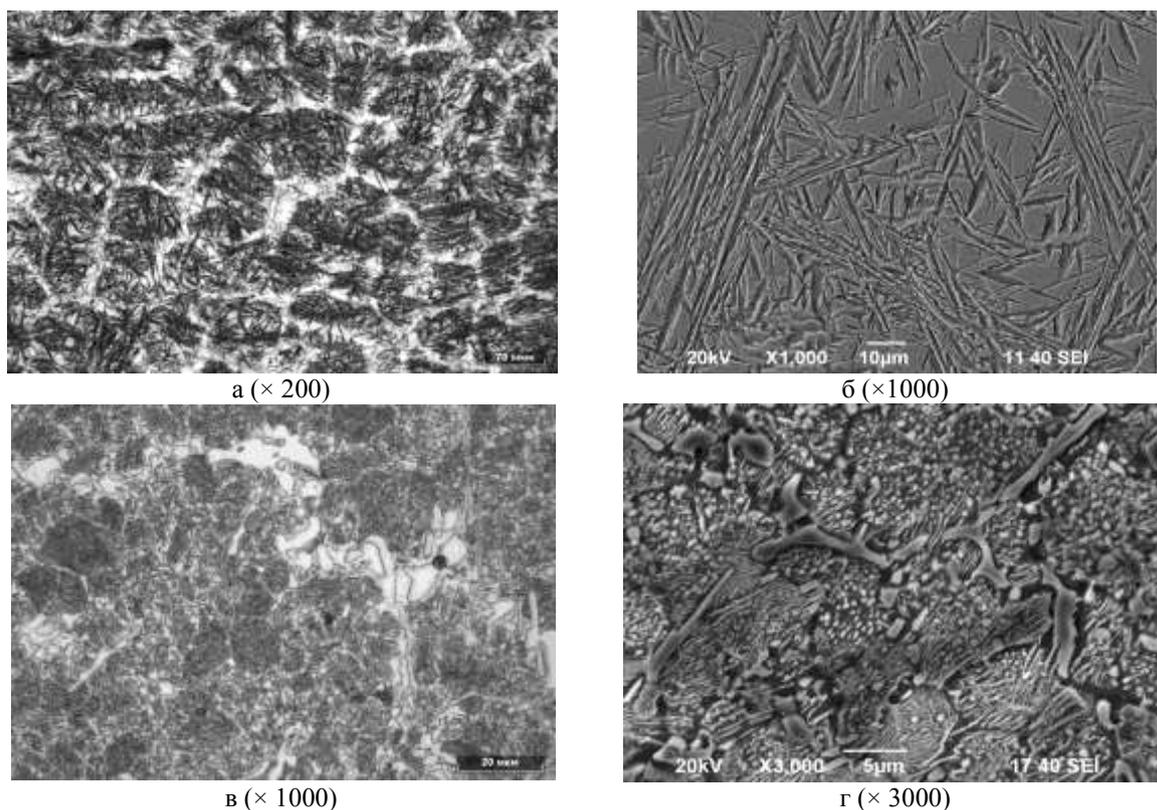


Рис. 6. Литая структура, сформировавшаяся при скоростях охлаждения:
а, б – 60,6 °С/мин; в, г – 10,8 °С/мин

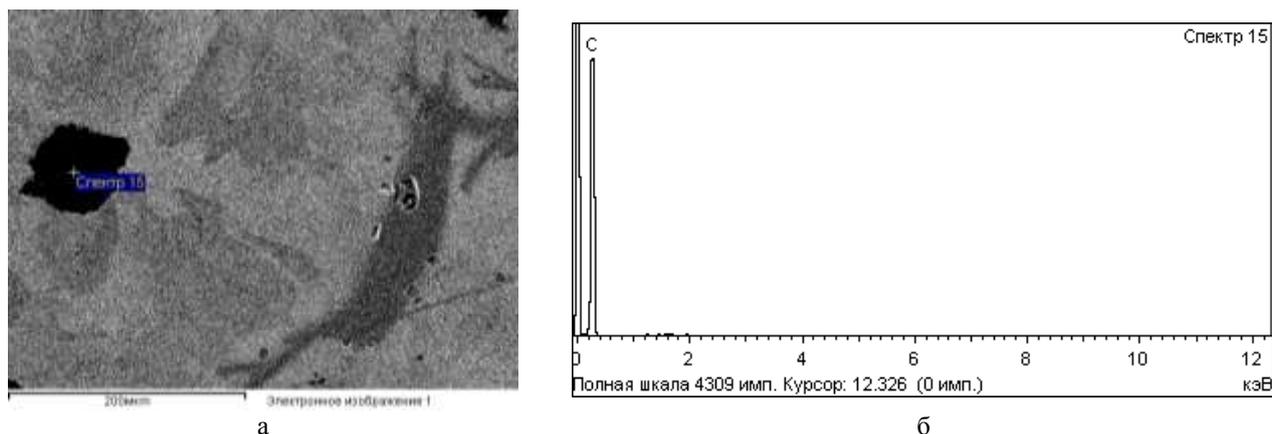


Рис. 7. Включение графита в микроструктуре бочки прокатного валка

Процесс его выделения в литом изделии требует проведения дополнительных исследований.

Подводя итог всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

– формирование литой структуры по сечению бочки прокатного валка осуществляется при различных скоростях охлаждения, которые могут отличаться более чем в 200 раз;

– литая структура состоит из мартенсита, перлита и цементитной сетки, выделяющейся по границам действительного зерна;

– согласно полученным расчётным данным на процесс выделения графита существенное влияние оказывает концентрация углерода. Изменение её с 1,3 до 1,8% приводит к увеличению объёмной доли графита примерно на 50%. Также значительное влияние оказывает хром, увеличение которого в составе стали с 0,9 до 1,5% приводит к снижению количества графита на 11%. Увеличение концентрации элементов, способствующих графитизации, без увеличения содержания углерода не приводит к повышению объёмной доли графитовой фазы.

Список литературы

1. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г. Исследование физических свойств углеродистой стали для крупных отливок // *Сталь*. 2014. № 4. С. 34–36.
2. Чайкин В.А., Чайкин А.В., Феоктистов Н.А. Повышение эффективности диффузионного раскисления при выплавке стали в кислых и основных дуговых электропечах // *Литейщик России*. 2012. № 8. С. 40–42.
3. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Влияние обработки стали 25Л силикокальцием на содержание неметаллических включений и механические свойства литой заготовки // *Технология металлов*. 2012. № 2. С. 21–26.
4. Вдовин К.Н. Феоктистов Н.А. Влияние серы, кальция и алюминия на пластические свойства металла // *Теория и технология металлургического производства*. 2010. № 10. С. 107–103.
5. Вдовин К.Н., Савинов А.С., Феоктистов Н.А. Технологические особенности производства крупного стального литья: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 195 с.
6. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Технология изготовления шлаковых чаш // *Вестник Магнитогорского государственного технического им. Г.И. Носова*. 2010. № 2 (30). С. 27–30.
7. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Modeling of slag chalice's potting and crystallization process // *Литейщик России*. 2012. № 3. С. 12–15.
8. Изучение влияние скорости охлаждения на механические и эксплуатационные свойства стали 110Г13Л / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, И.Б. Хренов и др. // *Литейщик России*. 2015. № 12. С. 23–24.
9. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Влияние энергии дефектов упаковки на абразивную износостойкость отливок из стали FE – 12MN – 1,2C, охлаждённых с различными скоростями // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 9. С. 603–609.
10. Исследование влияния скорости охлаждения при кристаллизации на размер аустенитного зерна литой стали 110Г13Л / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, Н.А. Феоктистов, О.А. Никитенко // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 10 – 2 (41). С. 28–31.
11. Chekmyshev, K.E., Ovcharenko, P.G. Numerical simulation of bimetallic casting cooling during the process of lost foam casting // *Journal of Crystal Growth*. 2019. P. 527. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125243.
12. Hao, Y., Li, J., Li, X., Liu, W., Cao, G., Li, C., Liu, Z. Influences of cooling rates on solidification and segregation characteristics of Fe-Cr-Ni-Mo-N super austenitic stainless steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. P. 275. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116326
13. Современные технологии производства рабочих валков для толстолистовых прокатных станков / Ю.Крюгер, П. фон Швайнихен, А. Майр и др. // *Черные металлы*. 2017. № 7. С. 31–35.

14. Оптимизация валковых станов горячей прокатки с целью снижения общих затрат / М. Брандер, Л. Элизандо, Т. Триколь и др. // Черные металлы. 2017. № 7. С. 24-30.
15. Применение сталей заэвтектидных марок дляковки валков горячей прокатки / А.И. Потапов, Е.Н. Шестаков, Т.А. Орлов и др. // Черные металлы. 2015. № 2 (998). С. 33-37.
16. Development of abrasion-resistant Ni-hard 4 cast irons / Liu Jinzhu, Man Yongfa. // Wear. 1993. V. 162–164. Pp. 833–836.
17. Correlation of microstructure and thermal fatigue property of three work rolls / Sunghak Lee, Do Hyung Kim, Jae Hwa Ryu, Keesam Shin // Metallurgical and Materials Transactions A. 1997. V. 28. Pp. 2595–2608.
18. Wear resistance of Ni-hard 4 and high-chromium cast iron re-evaluated / Liu Jinzhu, Li Shizhuo, Man Yongfa // Wear. 1993. V. 166. Pp. 37–40.

Сведения об авторах

Вдовин Константин Николаевич – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kn.vdovin@gmail.com.

Феоктистов Николай Александрович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fna87@mail.ru.

Горленко Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, ст. преп., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: gorldima@yandex.ru.

Михалкина Ирина Владимировна – канд. техн. наук, ст. преп., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: miv.mgtu@mail.ru.

Норец Александр Иванович – канд. пед. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: norets_a@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CRYSTALLIZATION AND STRUCTURE FORMATION PROCESSES MODELING OF ROLL FROM ZAEUTEKTOID STEEL

Konstantin N. Vdovin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kn.vdovin@gmail.com.

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

Dmitry A. Gorlenko – PhD (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gorldima@yandex.ru.

Irina V. Mikhalkina – PhD (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: miv.mgtu@mail.ru.

Alexander I. Norets – PhD, Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: norets_a@mail.ru.

Abstract: *studying of casting roll's crystallization processes and description of roll steel consistent pattern microstructure formation, which is made on steel 150XHM basis, are purpose of the work. The work logically consists of two parts – casting processes computer simulation during rolls manufacturing, and computer simulation of casting formation from various modifications of the specified steel grade.*

In the first part of the article questions of the rolls crystallization in a combined casting mold are considered, it were studied by computer simulation in the PolygonSoft software. The temperature-time curves of a roll barrel' crystallization process at different distances from the interface of casting-mold are presented.

The cooling rates, at which the steel rolls structure formation are carried out, are determined.

The solid phase emissions process in the casting has modeled using the Thermo Calc software package. Received data explain the process of microstructure formation in a roll barrel, also give a broad picture of the chemical composition influence on the roll steel graphitization processes. Presented data can be useful for industrial enterprises, which produced rolls, as well as for researchers studied rolls.

Keywords: *roll, computer simulation, cooling rate, austenite, chemical elements, mold.*

Ссылка на статью:

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Михалкина И.В., Горленко Д.А., Норец А.И. Моделирование процессов кристаллизации и структурообразования прокатного валка из заэвтектоидной стали // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 18-25.
Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Mihalkina I.V., Gorlenko D.A., Noretch A.I. Crystallization and structure formation processes modeling of roll from zaeutektoid steel. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 18-25.