

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 5 2020

• 1930-2020 •



СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ГОРДИМСЯ ПРОШЛЫМ • РАЗВИВАЕМСЯ В НАСТОЯЩЕМ • СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 5, 2020

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 63

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЖУЧКОВ В.И. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэль, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫРЬЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛПИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЕШАЛКИН В.П. (Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва)
МУЛЮКОВ Р.Р. (ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. (Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПИЕТРЕЛЛИ ЛОРИС (Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия)
ПОДГОРОДНИКОВ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАПЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЧУМАНОВ И.В. (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)
ШЕШУКОВ С.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7.
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС 77-35456

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: LEONT'EV L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

Deputy Editor-in-Chief: PROTOPOPOV E.V.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Deputy Coordinating Editor: BASHCHENKO L.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)
G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute
Tsnetmetobrabotka", Moscow)

M.V. ASTAKHOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.O. BAISANOV (Abishev Chemical-Metallurgical
Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

V.D. BELOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.A. BRODOV, Editor of the section "Economic effi-
ciency of metallurgical production" (IP Bardin Central
Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow)

I.V. CHUMANOV (South Ural State Research
University, Chelyabinsk)

A.N. DMITRIEV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

A.V. DUB (JSC "Science and Innovations", Moscow)

M.R. FILONOV, Editor of the section "Material
science" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

A.M. GLEZER (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.M. GORBATYUK (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

K.V. GRIGOROVICH, Editor of the section "Metallur-
gical Technologies" (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.E. GROMOV (Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk)

A.G. KOLMAKOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.M. KOLOKOL'TSEV (Magnitogorsk State Technical
University, Magnitogorsk)

M.V. KOSTINA (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

K.L. KOSYREV (JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow)

YU.A. KURGANOVA (Bauman Moscow State
Technical University, Moscow)

V.V. KURNOSOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

H. LINN (Linn High Therm GmbH, Hirschbach,
Germany)

V.I. LYSAK (Volgograd State Technical University,
Volgograd)

V.P. MESHALKIN (D.I. Mendeleev Russian Chemical-
Technological University, Moscow)

R.R. MULYUKOV (Institute of Metals Superplasticity
Problems of RAS, Ufa)

L.P. MYSHLYAEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

S.A. NIKULIN (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.KH. NURUMGALIEV (Karaganda State Industrial
University, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

O.I. OSTROVSKI (University of New South Wales,
Sidney, Australia)

LORIS PIETRELLI (Italian National Agency for
New Technologies, Energy and Sustainable Economic
Development, Rome, Italy)

G.S. PODGORODETSKII, Editor of the section
"Resources Saving in Ferrous Metallurgy" (National
Research Technological University "MISIS", Moscow)

I.YU. PYSHMINTSEV, Editor of the section
"Innovations in metallurgical industrial and
laboratory equipment, technologies and materials"

(Russian Research Institute of the Pipe Industry,
Chelyabinsk)

TS.V. RASHEV, Editor of the section "Superduty steel"
(Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria)

A.I. RUDSKOI (Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University, Saint-Petersburg)

O.YU. SHESHUKOV (Ural Federal University,
Ekaterinburg)

L.M. SIMONYAN, Editor of the section "Ecology
Rational Use of Natural Resources" (National Research
Technological University "MISIS", Moscow)

R.F. SINGER (Friedrich-Alexander University, Germany)

B.A. SIVAK (VNIIMETMASH Holding Company,
Moscow)

L.A. SMIRNOV (OJSC "Ural Institute of Metals",
Ekaterinburg)

S.V. SOLODOV, Editor of the section "Information
Technologies and Automatic Control in Ferrous
Metallurgy" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

N.A. SPIRIN (Ural Federal University, Ekaterinburg)

TANG GUOI (Institute of Advanced Materials of
Tsinghua University, Shenzhen, China)

M.V. TEMLYANTSEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

E.P. VOLYNKINA (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

A.B. YUR'EV (OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)

V.S. YUSUPOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.I. ZHUCHKOV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

This issue of the journal was prepared by
Siberian State Industrial University

Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel.: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,
Kirova str., 42
Siberian State Industrial University,
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications. in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

The journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is indexed in Scopus.

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications PI number FS77-35456

СОДЕРЖАНИЕ

Протопопов Е.В. СибГИУ – 90! Гордимся прошлым, развиваемся в настоящем, создаем будущее! 291

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянец М.В., Головатенко А.В.** Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов 298
- Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П.** Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование 305
- Фастыковский А.Р., Никитин А.Г., Белиев С.В., Добрянский А.В.** Особенности освоения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане 313
- Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В.** Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами 318
- Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И.** Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок 327
- Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксидно-железосодержащих отходов металлургического производства ... 335

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения 344

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Осколкова Т.Н., Симачев А.С.** Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и бором поверхности твердого сплава VK10KS на его структуру и свойства 351
- Зоря И.В., Полегаев Г.М., Старостенков М.Д., Ракитин Р.Ю., Коханенко Д.В.** Влияние примесей легких элементов на процесс кристаллизации никеля в области тройного стыка границ зерен: молекулярно-динамическое моделирование 357

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Рыбенко И.А., Роос Х.-Г. Метод и инструментальная система для моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа 364

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Зимин А.В., Золн И.А., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование развертывания сервисных активов, основанное на данных о применении ИТ-сервисов 373

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глушакова О.В., Черникова О.П., Стрекалова С.А. Интегральная оценка эффективности реализации корпоративных стратегий предприятиями черной металлургии 379

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

Цымбал В.П., Буинцев В.Н., Кожемяченко В.И., Калашников С.Н., Сеченов П.А. Математическое моделирование в учебном процессе, исследованиях и малоэнергетических металлургических технологиях 389

CONTENTS

E.V. Protopopov To the 90th Anniversary of Siberian State Industrial University 291

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- E.V. Protopopov, V.V. Chislavlev, M.V. Temlyantsev, A.V. Golovatenko** Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes 298
- N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko** Welding of differentially heat-strengthened rails. Industrial testing 305
- A.R. Fastyskovskii, A.G. Nikitin, S.V. Belyaev, A.V. Dobryanskii** Features of the rolling-separation technology development on operating continuous small-grade mill 313
- A.A. Umanskii, V.V. Dorofeev, L.V. Dumova** Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties 318
- O.G. Prikhod'ko, V.B. Deev, E.S. Prusov, A.I. Kutsenko** Influence of thermophysical characteristics of alloy and mold material on castings solidification rate 327
- A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva** Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production 335

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, A.I. Edil'baev, B.A. Edil'baev Manganese ores of the Kemerovo Region – Kuzbass and methods of their enrichment 344

MATERIAL SCIENCE

- T.N. Oskolkova, A.S. Simachev** Influence of pulse-plasma modification of VK10KS solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties 351
- I.V. Zorya, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov, R.Yu. Rakitin, D.V. Kokhanenko** Effect of light elements impurity on process of nickel crystallization near the triple interface of grain boundaries: A molecular dynamics simulation 357

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

I.A. Rybenko, Roos Hans-Georg Technological modes of metals direct reduction in an aggregate of jet-emulsion type 364

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

A.V. Zimin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin Planning service assets deployment based on information about dynamics of IT services use 373

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

O.V. Glushakova, O.P. Chernikova, S.A. Strekalova Integral assessment of corporate strategies implementation efficiency of ferrous metallurgy enterprises 379

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

V.P. Tsybmal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov Mathematical modeling in education process, research and low-energy metallurgical technologies 389

УДК 621.74

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА И МАТЕРИАЛА ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ НА СКОРОСТЬ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК*

*Приходько О.Г.¹, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества
и инноваций (prihodko_og@rambler.ru)*

*Деев В.Б.², д.т.н., ведущий эксперт кафедры обработки металлов
давлением (deev.vb@mail.ru)*

*Прусов Е.С.³, к.т.н., доцент кафедры технологии функциональных и конструкционных
материалов (eprusov@mail.ru)*

*Куценко А.И.¹, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества
и инноваций (aik_mail@mail.ru)*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4)

³ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых
(600000, Россия, Владимир, ул. Горького, 87)

Аннотация. Получение отливок заданного качества является основной задачей литейного производства. Одним из этапов технологии литья является затвердевание расплава в форме. При изучении процесса затвердевания отливок необходимо максимально полно учитывать все особенности теплообмена между отливкой и формой. Рассмотрено влияние различных теплофизических параметров сплава и материала литейной формы на формирование отливки. При анализе использованы оригинальные математические модели для расчета коэффициента и времени полного затвердевания отливок в песчано-глинистой и металлической формах, которые учитывают геометрические параметры отливки, основные теплофизические параметры металла отливки и материала формы, условия теплообмена на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма и на поверхности формы. Проведен анализ зависимости времени и скорости затвердевания отливок от теплофизических параметров: теплоемкости, плотности, теплопроводности материала отливки и формы, удельной теплоты кристаллизации металла. Аккумулирующая способность и процесс аккумуляции тепла достаточно полно характеризуются значением коэффициента аккумуляции тепла. Коэффициент теплоаккумуляции практически определяет интенсивность потери тепла отливкой, что играет решающую роль в процессе формирования ее свойств. Поэтому этот параметр выбран для комплексного анализа характера тепловых процессов, протекающих в отливке и форме. Рассмотрено влияние толщины и коэффициента теплопроводности слоя кокильной краски на затвердевание отливок в металлических формах. Представлены основные расчетные формулы и исходные данные, используемые для расчета. Вычисления проведены для отливок типа бесконечная плита, бесконечный цилиндр, шар. Результаты проведенного моделирования параметров процесса затвердевания приведены в графическом виде. На примере различных сплавов расчетным путем показано, что при изменении состава и свойств материала формы можно изменять время и скорость затвердевания сплавов в широком диапазоне. При этом происходит управление процессами формирования структуры и свойств отливок.

Ключевые слова: отливка, время затвердевания, коэффициент затвердевания, условия теплообмена, коэффициент теплоаккумуляции, песчано-глинистая форма.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-327-334

ВВЕДЕНИЕ

Процессы затвердевания играют ключевую роль в формировании литой структуры и механических свойств изделий [1]. При этом важной технологической характеристикой является скорость затвердевания отливок и слитков. Очевидно, что скорость затвердевания напрямую определяет дисперсность дендритной структуры литых заготовок, а также существенно влияет на распре-

деление и морфологические характеристики различных фазовых составляющих [2 – 5]. Известно, что увеличение скорости затвердевания (или сокращение времени полного затвердевания) уменьшает расстояние между осями вторичных дендритов и количество вторичных фаз между ними [6 – 8]. Варьирование скорости затвердевания также позволяет управлять степенью дендритной сегрегации растворенных легирующих элементов [9].

Для понимания особенностей затвердевания отливок и слитков в различных условиях большое значение имеют исследования тепловых процессов [10]. Обще-

* Исследования проводили в рамках Российского научного фонда (проект № 19-79-30025).

принято, что для учета значимых факторов математическое моделирование затвердевания отливок должно предусматривать моделирование макропроцессов теплопередачи при затвердевании [11 – 13] и моделирование микропроцессов – кинетики затвердевания [14, 15]. Подобный подход позволяет с достаточной точностью прогнозировать усадочные процессы, в том числе формирование различных литейных дефектов, а также особенности макро- и микроструктуры получаемых отливок и, как следствие, уровень их механических свойств [16]. Однако во многих случаях для решения уравнений, лежащих в основе тех или иных математических моделей, требуются различные упрощающие допущения. В результате полученные решения, несмотря на их несомненную теоретическую значимость, зачастую не представляют существенной практической ценности.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК

В настоящей работе представлена расчетная оценка влияния теплоаккумулирующей способности материалов литейной формы и отливки на скорость затвердевания с использованием разработанной математической модели, учитывающей основные теплофизические параметры металла отливки и материала формы, условия теплообмена на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма и на поверхности формы.

Время полного затвердевания отливок в песчано-глинистой форме можно определить по следующей формуле [17]:

$$\tau = A_1 \varepsilon + A_2 \varepsilon^2 + A_3 \varepsilon^3 + A_4 \varepsilon^4, \quad (1)$$

где τ – время полного затвердевания отливки в песчано-глинистой форме, с; ε – толщина затвердевшей корочки, м; A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты, определяемые по выражениям, приведенным ниже:

– для отливки типа «бесконечная плита»

$$A_1 = Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}; \quad (2)$$

$$A_2 = \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right), \text{ с/м}^2; A_3 = 0; A_4 = 0;$$

– для отливки типа «бесконечный цилиндр»

$$A_1 = Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м};$$

$$A_2 = \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right) - \frac{Bb}{2R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}^2; \quad (3)$$

$$A_3 = \frac{Bb}{3R} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right); A_4 = 0;$$

– для отливки типа «шар»

$$A_1 = Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м};$$

$$A_2 = \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right) - \frac{Bb}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}^2;$$

$$A_3 = \frac{Bb}{3R} \left[\frac{1}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - 2 \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right) \right];$$

$$A_4 = \frac{Bb}{4R^2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right),$$
(4)

где B – коэффициент, Дж/(м³·К); b – безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз для бесконечной плиты толщина δ_ϕ прогретого слоя формы больше толщины ε затвердевшей корочки металла; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма, Вт/(м²·К); λ_ϕ и λ_m – коэффициент теплопроводности формы и металла, Вт/(м·К); $R = V_0/F_0$ – приведенный размер отливки (введение приведенного размера отливки приводит задачу затвердевания отливки к одномерному варианту); V_0 и F_0 – объем и площадь поверхности отливки.

Безразмерный коэффициент можно определить по следующему уравнению:

$$b = \frac{L_{кр} \rho_m + c_m \rho_m (T_3 - \bar{T}_m)}{c_\phi \rho_\phi (\bar{T}_\phi - T_\phi^0)}, \quad (5)$$

где $L_{кр}$ – теплота кристаллизации металла, Дж/кг; ρ_m и ρ_ϕ – плотность сплава и формовочной смеси, кг/м³; c_m и c_ϕ – теплоемкость сплава и формовочной смеси, Дж/(кг·К); T_3 – температура заливки сплава, К; \bar{T}_m и \bar{T}_ϕ – средние значения температур затвердевшей корочки и прогретого слоя формы, К; T_ϕ^0 – начальная температура формы, К.

Коэффициент B определяют по выражению

$$B = c_\phi \rho_\phi \frac{\bar{T}_\phi - T_\phi^0}{T_3 - T_\phi^0}. \quad (6)$$

Коэффициенты теплоаккумуляции формы и металла (b_ϕ, b_m , Вт·с^{0,5}/(м²·К)) определяются по формулам

$$b_\phi = \sqrt{c_\phi \rho_\phi \lambda_\phi}; b_m = \sqrt{c_m \rho_m \lambda_m}. \quad (7)$$

Преобразуя уравнение (1), можно получить выражение для определения толщины затвердевшей корочки при кристаллизации отливок:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{A_1}{\varepsilon} + A_2 + A_3 \varepsilon + A_4 \varepsilon^2 \right)^{-1}} \sqrt{\tau}. \quad (8)$$

Формула (8) эквивалентна закону квадратного корня уравнения (1). Из этого следует, что значение константы затвердевания можно определить по выражению

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_1}{\varepsilon} + A_2 + A_3\varepsilon + A_4\varepsilon^2\right)}} \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение для определения времени полного затвердевания отливок в металлических формах имеет вид [18]:

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^0)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{пов}}{F_o}(T_{пов} - T_{окр})} \frac{F_{кр}}{F_o} d\varepsilon; \quad (10)$$

– для отливки типа «бесконечная плита»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^0)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{пов}}{F_o}(T_{пов} - T_{окр})} d\varepsilon; \quad (11)$$

– для отливки типа «бесконечный цилиндр»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^0)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_{\phi}}{R}\right)(T_{пов} - T_{окр})} \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right) d\varepsilon; \quad (12)$$

– для отливки типа «шар»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^0)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_{\phi}}{R}\right)(T_{пов} - T_{окр})} \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)^2 d\varepsilon, \quad (13)$$

где \bar{T}_K^{τ} – средняя калориметрическая температура системы отливка – кокиль, К; $T_{пов}$ и $T_{окр}$ – температуры наружной поверхности кокиля и окружающей среды, К; α_3 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности кокиля в окружающую среду, Вт/(м²·К); x_{ϕ} – толщина стенки кокиля, м; K_T – коэффициент теплопередачи для плоской многослойной стенки, Вт/(м²·К); $L_{кр}$ – теплота кристаллизации сплава, кДж/кг; b' – коэффициент, определяемый по формуле

$$b' = \frac{L_{кр}\rho_m + c_m\rho_m(T_3 - \bar{T}_K^{\tau})}{c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^0)} \quad (14)$$

Увеличение теплоемкости и плотности металла приводит к увеличению времени полного затвердевания отливки и снижению коэффициента затвердевания. Увеличение плотности, теплоемкости и теплопроводности формовочной смеси приводит к уменьшению времени полного затвердевания и повышению коэффициента затвердевания отливки, что соответствует данным работы [19]. Изменение коэффициента теплопроводности металла приводит к незначительному изменению времени затвердевания, так как при литье в песчаную форму определяющую роль играет коэффициент теплопроводности формовочной смеси.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЛИТОЙ ФОРМЫ И ОТЛИВКИ НА СКОРОСТЬ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

На рис. 1 представлены зависимости времени полного затвердевания (кривая 1) и коэффициента затвердевания (кривая 2) для цилиндрической отливки из алюминиевого сплава с приведенным размером 7,5 мм от коэффициента теплоаккумуляции формы.

При проведении расчетов коэффициент b_{ϕ} теплоаккумуляции формы меняли в пределах от 900 Вт·с^{0,5}/(м²·К) (асбест многослойный [19]) до 14 000 Вт·с^{0,5}/(м²·К) (чугунный кокиль [20]). Характер кривой 1 (рис. 1) аналогичен экспериментальной кривой, полученной в работе [19]. При увеличении коэффициента тепловой аккумуляции формы от 900 до 1100 Вт·с^{0,5}/(м²·К) время полного затвердевания уменьшается примерно на 100 с, а скорость затвердевания увеличивается.

На рис. 2 представлены зависимости времени (кривая 1) и коэффициента затвердевания (кривая 2) для цилиндрической отливки с приведенным размером

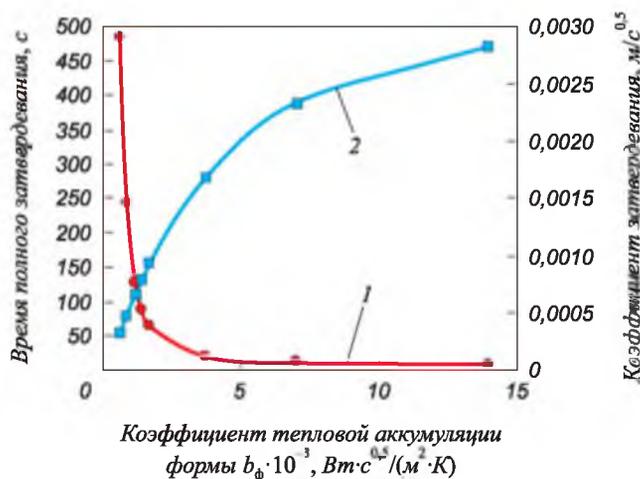


Рис. 1. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливки из алюминиевого сплава от коэффициента тепловой аккумуляции формы

Fig. 1. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of casting from an aluminum alloy on coefficient of thermal storage of the form

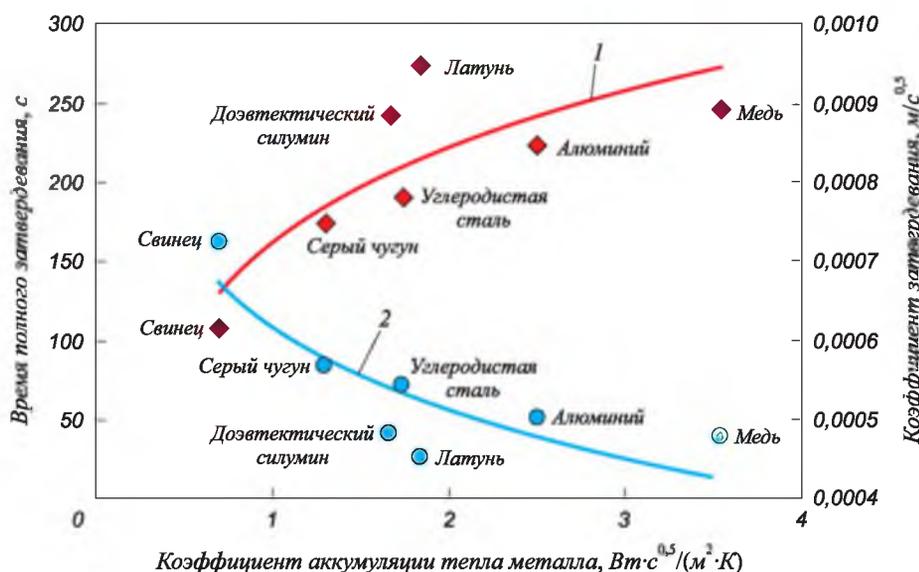


Рис. 2. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливки от коэффициента тепловой аккумуляции металла

Fig. 2. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of the casting on coefficient of thermal storage of the metal

7,5 мм, затвердевающей в песчано-глинистой форме при $b_{\phi} = 950 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0,5}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, от коэффициента b_m тепловой аккумуляции металла, рассчитанные по разработанной математической модели. Усредненные теплофизические характеристики сплавов, использованные для расчета, представлены в таблице.

Можно сделать вывод, что прямой зависимости между временем, коэффициентом затвердевания и коэффициентом аккумуляции тепла нет, но заметна тенденция к увеличению времени полного затвердевания и, следовательно, к уменьшению коэффициента затвердевания при увеличении коэффициента b_m аккумуляции тепла металлом.

Для определения степени влияния теплоты кристаллизации металла, выделяющейся при затвердевании отливок, на время и скорость процесса затвердевания была проведена серия расчетов по разработанной математической модели, при этом значения теплоты кри-

сталлизации варьировали в следующих пределах: для алюминия – от 370 до 410 кДж/кг; для доэвтектического силумина – от 170 до 370 кДж/кг; для меди – от 190 до 230 кДж/кг; для серого чугуна – от 180 до 220 кДж/кг; для углеродистой стали – от 220 до 280 кДж/кг (другие данные для расчета взяты из таблицы). Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Таким образом, время полного затвердевания растет при увеличении теплоты кристаллизации сплава. Например, при затвердевании отливки из доэвтектического силумина в песчано-глинистой форме (рис. 3, кривая 1 – доэвтектический силумин) время полного затвердевания при увеличении теплоты кристаллизации от 170 до 370 кДж/кг увеличивается в 2,7 раза.

На скорость затвердевания отливок в металлических формах большое влияние оказывает краска, наносимая на рабочую поверхность формы. Краска обладает большим термическим сопротивлением по сравнению

Теплофизические характеристики сплавов

Thermophysical characteristics of the alloys

Материал	ρ_m , кг/м ³	c_m , Дж/(кг·К)	λ_m , Вт/(м·К)	b_m , Вт·с ^{0,5} /(м ² ·К)	$L_{кр}$, кДж/кг	$T_{кр}$, К	Перегрев, К
Свинец	11 300	130	33,5	7015	26,5	600	100
Алюминий	2700	1090	213,0	25 037	390,0	933	100
Серый чугун	7200	560	42,0	13 013	215,0	1470	100
Довзвектический силумин	2500	1080	104,0	16 757	365,0	840	100
Медь	8920	440	320,0	35 439	214,0	1356	100
Углеродистая сталь	7500	750	54,0	17 428	259,0	1740	100
Латунь	8600	390	101,0	18 405	221,0	1305	100

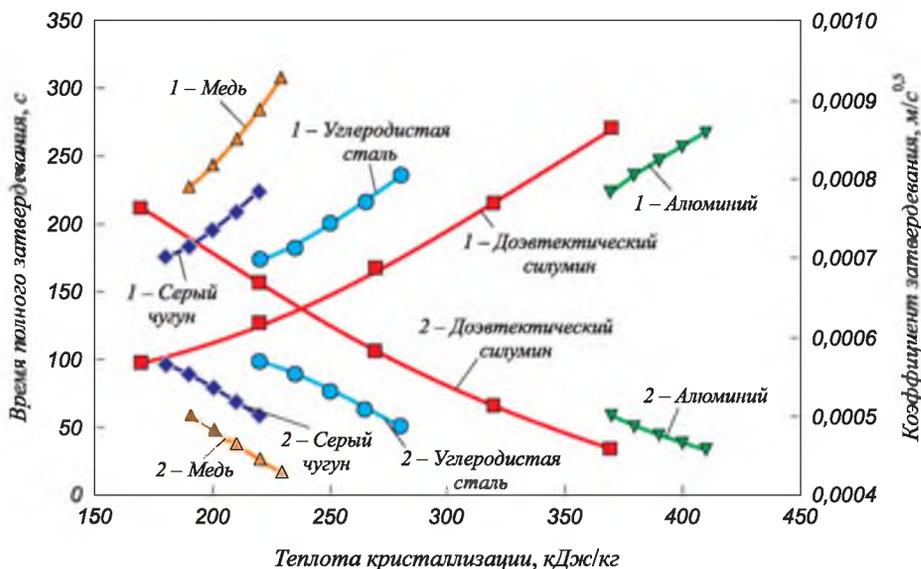


Рис. 3. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания отливки (2) в песчаной форме от удельной теплоты кристаллизации металла

Fig. 3. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification of the casting (2) in sand mold on specific heat of metal crystallization

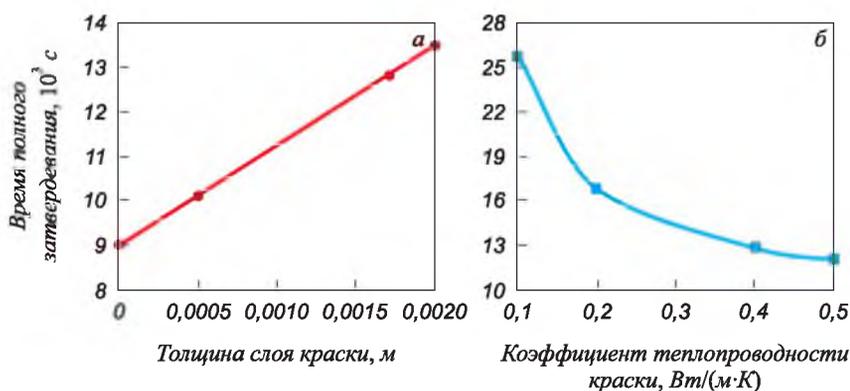


Рис. 4. Зависимость времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки в чугунном кокиле от толщины слоя краски (а) и коэффициента теплопроводности краски (б)

Fig. 4. Dependence of the time of complete solidification of cylindrical cast iron casting in cast iron chill mold on thickness of the paint layer (a) and thermal conductivity of paint (b)

с металлом формы, поэтому изменение толщины и теплофизических характеристик слоя краски приводит к значительному изменению скорости затвердевания отливок в кокиле. На рис. 4, а представлено изменение времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки диам. 1,16 м в чугунном кокиле в зависимости от толщины слоя краски. Изменение толщины слоя краски от 0 до 2 мм приводит к увеличению времени полного затвердевания в 1,5 раза.

На рис. 4, б представлено изменение времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки диам. 1,16 м в чугунном кокиле от коэффициента теплопроводности краски. При увеличении коэффициента теплопроводности краски от 0,1 до 0,5 Вт/(м·К) время полного затвердевания уменьшается в два раза. Очевидно, что путем варьирования толщины и состава ко-

кильной краски можно влиять на время и скорость затвердевания отливки.

Разработанная математическая модель содержит теплофизические параметры материала формы и отливки, значения которых являются функциями температуры и их точные значения зачастую неизвестны или приводятся в справочниках в виде диапазона значений. Для оценки влияния теплоемкости, теплопроводности и плотности материалов отливки и формы, удельной теплоты кристаллизации на результат определения времени и коэффициента затвердевания по предлагаемой модели была проведена серия расчетов. Характер влияния теплофизических характеристик материала отливки и кокиля на течение процесса затвердевания отливки в металлической форме оказался таким же, как и для песчано-глинистой формы.

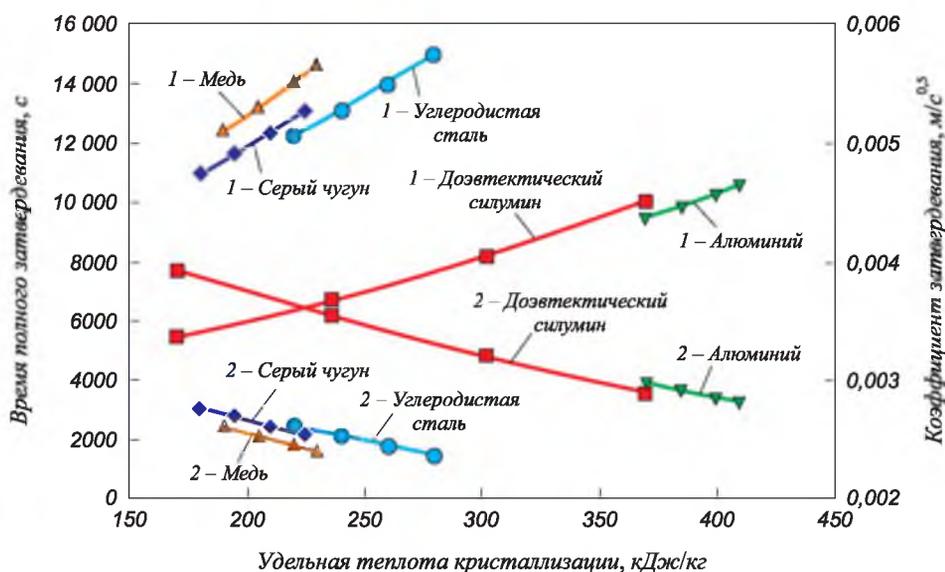


Рис. 5. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливок в окрашенной металлической форме от удельной теплоты кристаллизации металла

Fig. 5. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of castings in painted metal form on the specific heat of metal crystallization

Влияние теплоты кристаллизации металла, выделяющейся при затвердевании цилиндрических отливок, на время и скорость процесса представлено на рис. 5. Данные для расчета взяты из таблицы. Видно, что время полного затвердевания увеличивается при повышении удельной теплоты кристаллизации сплава, но по сравнению с неметаллической формой теплота кристаллизации оказывает меньшее влияние на скорость процесса затвердевания.

Например, для дозвектического силумина увеличение теплоты кристаллизации от 170 до 370 кДж/кг приводит к увеличению времени полного затвердевания от 5500 до 10 000 с, то есть в 1,8 раза. Это связано с различием теплофизических характеристик материалов форм: металлическая форма быстрее отводит тепло кристаллизации, выделяющееся при нарастании твердой корочки, чем песчано-глинистая.

Выполненные вычисления показывают, что теплофизические характеристики материалов отливки и литейной формы (в частности, коэффициенты тепловой аккумуляции металла и формы, удельная теплота кристаллизации металла) являются важными факторами управления процессами формирования структуры получаемых литых заготовок и, как следствие, их физико-механических и эксплуатационных свойств. В частности, увеличение коэффициента тепловой аккумуляции формы во всех случаях приводит к уменьшению времени полного затвердевания отливки. Для всех рассмотренных типов сплавов и материалов литейной формы время полного затвердевания отливки растет при увеличении теплоты кристаллизации. При этом использование металлической формы при сохранении общих тенденций по изменению времени полного за-

твердевания снижает влияние теплоты кристаллизации на скорость затвердевания.

Выводы

На примере различных сплавов расчетным путем показано, что при изменении состава и свойств материала формы можно менять время и скорость затвердевания сплавов в широком диапазоне, управляя за счет этого процессами формирования структуры и свойств отливок. При этом использование формовочных смесей с низким коэффициентом тепловой аккумуляции приводит к увеличению времени полного затвердевания отливки и, соответственно, к снижению скорости затвердевания. И напротив, увеличение интенсивности теплоотвода за счет увеличения коэффициента тепловой аккумуляции формы приводит к росту скорости затвердевания отливки и формированию более мелкозернистой структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stefanescu D.M. Science and Engineering of Casting Solidification. 3rd ed. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 559 p.
2. Kostyryzhev A.G., Slater C.D., Marenych O.O., Davis C.L. Effect of solidification rate on microstructure evolution in dual phase microalloyed steel // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Article 35715.
3. Cai Z., Zhang C., Wang R., Peng C., Qiu K., Wang N. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al – Si alloy // Progress in Natural Science: Materials International. 2016. Vol. 26. No. 4. P. 391 – 397.
4. Xu C., Du R., Wang X., Hanada S., Yamagata H., Wang W., Ma C. Effect of cooling rate on morphology of primary particles in Al – Sc – Zr master alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24. No. 7. P. 2420 – 2426.

5. Deev V.B., Prusov E.S., Shunqi M., Ri E.H., Bazlova T.A., Temlyantsev M.V., Smetanyuk S.V., Ponomareva S.V., Vdovin K.N. The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. No. 2. Article 022080.
6. Jabbari M., Davami P., Varahram N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron // Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 528. No. 2. P. 583 – 588.
7. Brionne G, Loucif A, Zhang CP, Lapierre-Boire LP, Jahazi M. 3D FEM simulation of the effect of cooling rate on SDAS and macrosegregation of a high strength steel // Materials Science Forum. 2018. No. 941. P. 2360 – 2364.
8. Ali M., Porter D., Komi J., Eissa M., El Faramawy H., Mattar T. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels // Journal of Iron and Steel Research International. 2019. No. 26. P. 1350 – 1365.
9. Jia L., Yu L., Sun W., Zhang W., Fang L., Feng Q., Guo S., Hu Z. Effect of solidification rates on microstructures and segregation of IN718 alloy // Chinese Journal of Materials Research. 2010. Vol. 24. No. 2. P. 118 – 122.
10. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification. Taylor & Francis Group. CRS Press, 2009. – 621 p.
11. Ciesielski M., Mochnecki B. Comparison of approaches to the numerical modelling of pure metals solidification using the control volume method // International Journal of Cast Metals Research. 2019. Vol. 32. No. 4. P. 213 – 220.
12. Shahane S., Aluru N., Ferreira P., Kapoor S.G., Vanka S.P. Finite volume simulation framework for die casting with uncertainty quantification // Applied Mathematical Modelling. 2019. Vol. 74. P. 132 – 150.
13. Hirata N., Anzai K. Heat transfer and solidification analysis using adaptive resolution particle method // Materials Transactions. 2019. Vol. 60. No. 1. P. 33 – 40.
14. Wang H., Liu F., Yang G., Zhou Y. Modeling the overall solidification kinetics for undercooled single-phase solid-solution alloys. I. Model derivation // Acta Materialia. 2010. Vol. 58. No. 16. P. 5402 – 5410.
15. Zhu M., Zhang L., Zhao H., Stefanescu D.M. Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spherical graphite irons // Acta Materialia. 2015. Vol. 84. P. 413 – 425.
16. Wang T., Wei J., Wang X., Yao M. Progress and Application of Microstructure simulation of alloy solidification // Acta Metallurgica Sinica. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 193 – 203.
17. Разработка методики расчета времени и коэффициента затвердевания отливок в песчано-глинистых формах / В.Б. Деев, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, А.И. Куценко, Меи Шунқи, Э.Х. Ри, С.В. Сметанюк, К.В. Пonomарева, Г.Н. Гаврилов. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Metallurgiya – 2019: Труды XXI Международной научно-практической конференции. 23-24 октября 2019 г. Ч. 1.* – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 139 – 146.
18. Разработка методики расчета времени затвердевания отливок и слитков в металлической форме / В.Б. Деев, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, А.И. Куценко, Меи Шунқи, Э.Х. Ри, Т.А. Базлова, С.В. Сметанюк, А.А. Соколев. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Metallurgiya – 2019: Труды XXI Международной научно-практической конференции. 23-24 октября 2019 г. Ч. 1.* – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 146 – 151.
19. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. – М.: Машгиз, 1960. – 436 с.
20. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. 1. Тепловые основы теории литья. Затвердевание и охлаждение отливки. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.

Поступила в редакцию 13 февраля 2020 г.

После доработки 17 марта 2020 г.

Принята к публикации 18 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 5. PP. 327–334.

INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF ALLOY AND MOLD MATERIAL ON CASTINGS SOLIDIFICATION RATE

O.G. Prikhod'ko¹, V.B. Deev², E.S. Prusov³, A.I. Kutsenko¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

³ Vladimir State University named after Alexandr Grigor'evich and Nikolai Grigor'evich Stoletov, Vladimir, Russia

Abstract. Obtaining castings of given quality is the main task of foundry production. One of the stages of casting technology is solidification of melt in the mold. When studying the process of castings solidification, it is necessary to fully take into account all the features of heat transfer between casting and mold. Influence of various thermophysical parameters of alloy and mold material on casting formation is considered. In the analysis, original mathematical models were used to calculate the coefficient and time of complete solidification of castings in sand-clay and metal forms. These models take into account geometric parameters of casting, main thermophysical parameters of casting metal and mold material, heat transfer conditions at crystallization front, on casting-mold boundary and on the mold surface. Analysis of dependence of time and rate of castings solidification on thermophysical parameters (heat capacity, density, heat conductivity of casting material and mold, specific heat of metal crystallization) was carried out. Storage capacity and process of heat storage are quite fully characterized by the value of heat storage coefficient. This coefficient

practically determines the rate of heat loss by the casting which plays a decisive role in its properties forming. Therefore, this parameter is selected for a comprehensive analysis of thermal processes occurring in casting and mold. The influence of thickness and thermal conductivity of chill paint layer on solidification of castings in metal molds is considered. The basic calculation formulas and initial data are presented. Calculations were carried out for castings of the following types: endless plate, endless cylinder, ball. The results of simulation of solidification process parameters are presented in graphic form. Using various alloys as an example, it has been shown by calculation that when changing composition and properties of mold material, it is possible to change time and speed of alloys solidification in a wide range. In this case, processes of forming the structure and properties of castings are controlled.

Keywords: casting, solidification time, solidification coefficient, heat transfer conditions, heat storage coefficient, sand-clay form.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-327-334

REFERENCES

1. Stefanescu D.M. *Science and Engineering of Casting Solidification*. 3rd ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 559 p.
2. Kostryzhev A.G., Slater C.D., Marenych O.O., Davis C.L. Effect of solidification rate on microstructure evolution in dual phase microalloyed steel. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, article 35715.

3. Cai Z., Zhang C., Wang R., Peng C., Qiu K., Wang N. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al–Si alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2016, vol. 26, no. 4, pp. 391–397.
4. Xu C., Du R., Wang X., Hanada S., Yamagata H., Wang W., Ma C. Effect of cooling rate on morphology of primary particles in Al–Sc–Zr master alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014, vol. 24, no. 7, pp. 2420–2426.
5. Deev V.B., Prusov E.S., Shunqi M., Ri E.H., Bazlova T.A., Temyantsev M.V., Smetanyuk S.V., Ponomareva S.V., Vdovin K.N. The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 537, no. 2, article 022080.
6. Jabbari M., Davami P., Varahram N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron. *Materials Science and Engineering: A*. 2010, vol. 528, no. 2, pp. 583–588.
7. Brionne G., Loucif A., Zhang CP, Lapierre-Boire LP, Jahazi M. 3D FEM simulation of the effect of cooling rate on SDAS and macrosegregation of a high strength steel. *Materials Science Forum*. 2018, no. 941, pp. 2360–2364.
8. Ali M., Porter D., Komi J., Eissa M., El Faramawy H., Mattar T. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2019, no. 26, pp. 1350–1365.
9. Jia L., Yu L., Sun W., Zhang W., Fang L., Feng Q., Guo S., Hu Z. Effect of solidification rates on microstructures and segregation of IN718 alloy. *Chinese Journal of Materials Research*. 2010, vol. 24, no. 2, pp. 118–122.
10. Dantzig J.A., Rappaz M. *Solidification*. Taylor & Francis Group, CRS Press. 2009. 621 p.
11. Ciesielski M., Mochnacki B. Comparison of approaches to the numerical modelling of pure metals solidification using the control volume method. *International Journal of Cast Metals Research*. 2019, vol. 32, no. 4, pp. 213–220.
12. Shahane S., Aluru N., Ferreira P., Kapoor S.G., Vanka S.P. Finite volume simulation framework for die casting with uncertainty quantification. *Applied Mathematical Modelling*. 2019, vol. 74, pp. 132–150.
13. Hirata N., Anzai K. Heat transfer and solidification analysis using adaptive resolution particle method. *Materials Transactions*. 2019, vol. 60, no. 1, pp. 33–40.
14. Wang H., Liu F., Yang G., Zhou Y. Modeling the overall solidification kinetics for undercooled single-phase solid-solution alloys. I. Model derivation. *Acta Materialia*. 2010, vol. 58, no. 16, pp. 5402–5410.
15. Zhu M., Zhang L., Zhao H., Stefanescu D.M. Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spheroidal graphite irons. *Acta Materialia*. 2015, vol. 84, pp. 413–425.
16. Wang T., Wei J., Wang X., Yao M. Progress and application of microstructure simulation of alloy solidification. *Acta Metallurgica Sinica*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 193–203.
17. Deev V.B., Prikhod'ko O.G., Prusov E.S., Protopopov E.V., Temyantsev M.V., Kutsenko A.I., Mei Shunqi, Ri E.Kh., Smetanyuk S.V., Ponomareva K.V., Gavrilov G.N. Development of methodology for calculating time and solidification coefficient of castings in sandy-clay forms. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Metallurgiya – 2019: Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 23-24 oktyabrya 2019 g. Ch. 1* [Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. Metallurgy – 2019: Proceedings of the XXI Int. Sci. and Pract. Conf., October 23-24, 2019. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SiBGIU, 2019, pp. 139–146. (In Russ.).
18. Deev V.B., Prikhod'ko O.G., Prusov E.S., Protopopov E.V., Temyantsev M.V., Kutsenko A.I., Mei Shunqi, Ri E.Kh., Bazlova T.A., Smetanyuk S.V., Sokorev A.A. Development of methodology for calculating solidification time of castings and ingots in metal form. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Metallurgiya – 2019: Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 23-24 oktyabrya 2019 g. Ch. 1* [Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. Metallurgy – 2019: Proceedings of the XXI Int. Sci. and Pract. Conf., October 23-24, 2019. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SiBGIU, 2019, pp. 146–151. (In Russ.).
19. Veinik A.I. *Teoriya zatverdevaniya otlivki* [Theory of casting solidification]. Moscow: Mashgiz, 1960, 436 p. (In Russ.).
20. Balandin G.F. *Osnovy teorii formirovaniya otlivki. Ch. 1. Teplovye osnovy teorii lit'ya. Zatverdevanie i okhlazhdenie otlivki* [Fundamentals of the theory of casting formation. Part 1. Thermal foundations of casting theory. Solidification and cooling of casting]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 328 p. (In Russ.).

Funding. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-79-30025).

Information about the authors:

O.G. Prikhod'ko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Quality Management and Innovation (prikhodko_og@rambler.ru)

V.B. Deev, Dr. Sci. (Eng.), Leading Expert of the Chair of Metal Forming (deev.vb@mail.ru)

E.S. Prusov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Functional and Structural Materials Technology (eprusov@mail.ru)

A.I. Kutsenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Quality Management and Innovation (aik_mail@mail.ru)

Received February 13, 2020

Revised March 17, 2020

Accepted March 18, 2020

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Башенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 25.05.2020. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

