

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 1 (40) 2022

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК), по специальностям: 2.6.2 Металлургия черных, цветных и редких металлов; 2.6.3 Литейное производство; 2.6.4 Обработка металлов давлением. Сведения о журнале содержатся в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Редакционный совет

Председатель ред. совета:

В.А. Бигеев – проф., д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Члены ред. совета:

С.В. Денисов – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

А.Н. Емельянин – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

И.Е. Илларионов – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

А.А. Казаков – д-р техн. наук, проф.
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

В.М. Колокольцев – президент
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
д-р техн. наук, проф.

З. Конопка – д-р техн. наук, проф.
Ченстоховского технологического
университета, Польша

О. Островский – д-р техн. наук, проф.
UNSW, Австралия

А.М. Песин – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

М. Дабала – д-р техн. наук, проф.
Университет Падуи, Италия

П. Тандон – д-р техн. наук, профессор
и руководитель машиностроения, Индийский
институт информационных технологий, дизайна
и производства PDPM, Джабалпур, Индия

Р.П. Кардосо – д-р техн. наук, проф.
Федеральный университет Санта-Катарины,
Бразилия

Е. В. Агеев – д-р техн. наук, проф.,
Юго-Западный государственный университет

В.Б. Деев – д-р техн. наук, проф.
НИТУ МИСиС, Москва, Россия

А.А. Попов – д-р техн. наук, проф.
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

В.М. Салганик – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

О.Ю. Шешуков – д-р техн. наук, проф.
ГУ ИМетРАН, ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Главный редактор:

А.С. Савинов – директор института
металлургии, машиностроения
и материалобработки
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
д-р техн. наук

Научный редактор:

Н.Ш. Тютеряков – канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Технический редактор:

Ю.А. Извеков – проф., канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»;

К.И. Рудь

Дизайнер:

Е.О. Харченко

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2022

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д.38).
16+, в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ от 29.12.10.

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-74213 от 02.11.2018 г. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 315
Тел.: (3519) 29-84-64.
E-mail: TТаPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
участок оперативной полиграфии

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Выход в свет 30.03.2022. Заказ 91. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 1 (40) 2022

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. Information about the journals can be found into databases of the Russian Science Citation Index (RSCI)

Editorial Board Members

Chairman:

V.A. Bigeev – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Honorary Board Members:

S.V. Denisov – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
A.N. Emelyushin – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
I.Y. Illarionov – D.Sc., Professor,
Chuvash State University
A.A. Kazakov – D.Sc., Associate Professor,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
V.M. Kolokoltsev – D. Sc., Professor,
President of Nosov Magnitogorsk State Technical
University
Z. Konopka – D.Sc., Professor,
Czestochowa University of Technology, Poland
O. Ostrowski – D.Sc., Professor,
University of New South Wales, Australia
A.M. Pesin – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
M. Dabala – D.Sc., Professor, University of Padova,
Italy
P. Tandon – D. Sc., Professor & Head of Mechanical
Engineering, PDPM Indian Institute of Information
Technology, Design and Manufacturing, Jabal-
pur, India

R.P. Cardoso – D. Sc., Professor,

Federal University of Santa Catarina, Brazil

E.V. Ageev – D.Sc., Professor, Southwest State University

V.B. Deev – D. Sc., Professor, MISiS, Moscow, Russia

A.A. Popov – D.Sc., Professor,

Institution of Higher Professional Education «Ural Federal
University named after the first President of Russia
B.N.Yeltsin»

V.M. Salganik – D. Sc., Professor,

Nosov Magnitogorsk State Technical University

O. Ju. Sheshukov – D.Sc., Professor,

alloys Federal State Autonomous Educational

Institution of Higher Professional Education

«Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N.Yeltsin»

Editor-in-Chief:

A.S. Savinov – Director of Metallurgy Mechanical
Engineering and Materials Processing Institute D.Sc., Nosov
Magnitogorsk State Technical University

Scientific Editor:

N.S. Tyteriakov – Ph.D., Nosov Magnitogorsk State
Technical University

Technical Editor:

Y.A. Izvekov – Professor, Ph.D., Nosov Magnitogorsk
State Technical University

K.I. Rud

Designer:

E.O. Harchenko

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2022

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

Registration certificate PI # FS 77-74213 dated November 02, 2018 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

Editorship address:

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia

Tel.: +7 (3519) 29-84-64.

E-mail: TTPeOMP@magtu.ru; ttmp@magtu.ru

Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,
455000, Russia

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Editorial office:

45/2 Karla Marksa prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,
455000, Russia

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date 30.03.2022. Order 91. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Хоанг В.В., Немчинова Н.В. ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РАФИНИРОВАНИИ КРЕМНИЯ.....	4
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	12
Ячиков И.М., Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Шафиков Т.И., Михалкина И.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ЩЕЛЕВЫМИ КАНАЛАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ	12
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	19
Румянцев М.И., Завалищин А.Н., Колыбанов А.Н., Ахмадиев К.Р. ОСОБЕННОСТИ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ИХ ОТОБРАЖЕНИЕ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ПРОЦЕССА.....	19
Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	25
Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бондарева А.Р., Чернов В.П. ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА	30
Харитонов В.А., Усанов М.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ КРУГЛОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ В ОВАЛЬНОЙ МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ	37

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS	4
Hoang V.V., Nemchinova N.V. STUDY THE MECHANISM OF CRYSTALLIZATION OF SLAG FORMING SYSTEMS FORMED DURING SILICON REFINING	4
FOUNDRY	12
Yachikov I.M., Feoktistov N.A., Savinov A.S., Shaficov T.I., Mikhalkina I.V. MODELING OF THERMAL FIELDS IN THE MOLD WITH SLOT CHANNELS COOLING	12
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE	19
Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N., Kolybanov A.N., Akhmadiev K.R. STRIP TENSION FEATURES AT DIFFERENT A COLD ROLLING MILL SECTIONS AND DISPLAY IN THE DIGITAL TWIN OF THE PROCESS.....	19
Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pivovarova K.G. PHASE TRANSFORMATIONS IN ALUMINUM ALLOY OF THE Al-Cu-Mg SYSTEM UNDER INTENSE PLASTIC DEFORMATION	25
Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bondareva A.R., Chernov V.P. ON DETERMINING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF OPTIMIZING CONTROL OF TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESSES.....	30
Kharitonov V.A. Usanov M.Yu. RESEARCH OF ROUND HIGH-CARBON WIRE DRAWING IN OVAL ONE-PIECE DRAWING DIE	37

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.782; 669.054.82

Хоанг В.В., Немчинова Н.В.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РАФИНИРОВАНИИ КРЕМНИЯ

Аннотация. *Металлургический кремний, имеющий широкое применение в различных отраслях промышленности (в качестве раскислителя стали, легирующей добавки в сплавах, для производства полупроводникового кремния и др.), получают при плавке кремнеземсодержащего сырья в руднотермических печах. Данный карботермический процесс относится к бесшлаковому. Однако в производстве кремния на АО «Кремний» (г. Шелехов, Иркутская область) образуются рафинировочные шлаки, формирующиеся в процессе окисления примесей кремниевого расплава в ковше продувкой воздухом (при температуре ~1500-1600°C), проводимого с целью удаления из целевого продукта примесей кальция, алюминия, титана. Ввиду высокой вязкости данного шлака в нем запутывается собственно кремний, содержание которого составляет 42,1-65,3 мас. %, что требует его доизвлечения для повышения эффективности производства в целом. Нами проведено изучение механизма формирования примесных включений в выбранном составе шлака (на основе CaO, Al₂O₃, SiO₂) с помощью компьютерного построения тройных диаграмм состояния с помощью программы «Diatris 1.2». Данная программа основана на термодинамическом методе расчета параметров ликвидуса тройной системы в точке с заданными значениями содержания компонентов по модели регулярного раствора. Изучен путь кристаллизации шлака следующего состава, мас. доли: CaO – 0,178, SiO₂ – 0,785, Al₂O₃ – 0,0365. Показано, что кристаллизация выбранного расплава состава смеси заканчивается в эвтектической точке с температурой плавления 1271,83°C и выделением анортита CaO·Al₂O₃·2SiO₂, моносилката кальция CaO·SiO₂ и фазы CaO·7SiO₂·Ж. В дальнейшем планируется изучить двойные и тройные диаграммы состояния других компонентов, входящих в рафинировочный шлак, для подбора оптимального температурного режима для извлечения кремния.*

Ключевые слова: *металлургический кремний, окислительное рафинирование, шлак, диаграмма плавкости, путь кристаллизации.*

Введение

Металлургические шлаки, образующиеся в процессе получения металлов и сплавов, в условиях возрастающего дефицита рудного сырья, необходимости решения экологических проблем и повышения эффективности производства подвергаются переработке с целью извлечения ценных компонентов и получения товарных продуктов [1-9].

Производство металлургического (технического) кремния относится к бесшлаковым процессам. Однако в зависимости от мощности руднотермических печей (РТП) при плавке он образуется в количестве от 2 до 5% [10].

Металлургический кремний находит широкое распространение в различных областях: в производстве сплавов, поликристаллического кремния, кремнийорганических материалов и силанов, для раскисления стали и др. [11, 12]. Традиционно кремний получают восстановлением углеродом при плавке кварцсодержащего сырья в РТП при температуре выше 2000°C [10, 11]. Сырьем для получения кремния служат высококачественные кварциты, в качестве восстановителя используют материалы (древесный уголь, каменный уголь разных поставщиков, нефтяной кокс и др.) с различными реакционной способно-

стью и зольностью [11]. По объемам производства металлургического кремния в настоящее время Китай занимает 1-е место в мире [13]. В России крупнейшим предприятием по производству металлургического кремния является АО «Кремний» (г. Шелехов, Иркутская область), входящий в ОК «РУСАЛ». Годовая производительность завода составляет в среднем 33 тыс. т продукции в год, сырьем для получения кремния служит кварцит Черемшанского рудника, входящего в структуру предприятия.

Рафинировочный шлак как объект исследований

В процессе получения кремния образуется два вида шлаков: печной и рафинировочный. Источником образования печного шлака являются процессы недовосстановления кремнезема, примесных оксидов, неполного разложения карбида кремния, формирование сложных оксидов типа анортита [11, 14]. Данные соединения формируют подовую настывль, и при выпуске расплава кремния из РТП печной шлак захватывается и в незначительном количестве переходит в выпускаемый продукт.

Поскольку полученный при плавке продукт содержит незначительное количество примесных элементов (Fe, Ca, Al, Ti, C и др.) [11, 14], для получения кремния более высокого качества на предприятии АО «Кремний» проводится операция окислительного рафинирования путем продувки воздухом расплава в

ковше при введении флюса. В качестве флюса используется песок кварцевый обогащенный, поставляемый по ГОСТ 2138-91 «Пески формовочные. Общие технические условия», марки $2K_2O_3O_3$.

Окислительное рафинирование расплава кремния сопровождается образованием двух продуктов – кремния и рафинировочного шлака. Рафинировочный шлак формируется из оксидов примесных элементов, образующихся при продувке кремниевого расплава воздухом (CaO , Al_2O_3 , SiO_2) [11]. Количество образующегося при рафинировании шлака составляет приблизительно 10% от массы кремния. При этом учитывается и масса вводимого флюса.

Однако данный шлак имеет в своем составе также и включения SiC , свободного углерода, корольки кремния, в которых содержится незначительное количество интерметаллидов, оксидов и др. Ввиду того, что плотность рафинировочного шлака близка к плотности кремния ($2,4-2,6 \text{ г/см}^3$ против $\sim 2,34 \text{ г/см}^3$) [11, 12], отделение фазы кремния от шлака затруднено, что и приводит к потерям кремния при данном процессе. Кроме того, шлаки обладают значительной вязкостью [15], что также способствует запутыванию корольков кремния.

В рафинировочном шлаке содержится, в среднем, мас. %, соответственно: Si – 42,1-65,3; SiC – 3,1-12,1; C – 0-1,1; SiO_2 (кварцит) – 0-2,9; SiO_2 (кристоболит) – 2,2-4,6; $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (анортит) – 0-26; SiO_2 (аморфная фаза) – 21,5-42,3 [16]. Химический состав образцов шлака изучали с помощью рентгеноспектрального и химического методов анализа.

Высокое содержание технического кремния в шлаке имеет чрезвычайно высокую экономическую ценность. Как указывают авторы [15], снизить потери кремния возможно изменением состава шлаков, получением шлаков определенного химического состава, чтобы снизить температуру и вязкость плавления шлаковой системы. В связи с этим целью наших исследований явилась разработка методики термодинамического анализа механизма формирования примесных включений в шлаке, образующемся при окисли-

тельном рафинировании кремния. Также для изучения возможности доизвлечения кремния при выбранных оптимальных температуре и составе шлака необходимо изучить фазовые формы нахождения составляющих и путь кристаллизации различных составов шлаков, что в целом будет способствовать повышению эффективности производства металлургического кремния.

Нами были исследованы образцы рафинировочных шлаков АО «Кремний». Шлак – хрупкий материал темно-зеленого цвета с вкраплениями частиц кремния (рис. 1, а). При изучении химического состава образцов шлака в наших исследованиях использовали метод сканирующей электронной микроскопии (рис. 1, б) с помощью микроскопа JIB-Z4500 (фирма «JEOL», Япония), металлографический метод анализа (рис. 1, в) на микроскопе «Olympus GX-51» («Olympus», Япония).

Как видно на рис. 1, б, рафинировочные шлаки содержат значительное количество элементов кремния в общей структуре оксидной фазы.

Разработка методики анализа формирования эвтектических включений в рафинировочных шлаках кремниевого производства

Изучение механизма кристаллизации шлаковых систем стандартными аналитическими методами затруднено, так как температура жидких продуктов в ковше при рафинировании находится в диапазоне $1500-1600^\circ\text{C}$. Поскольку рафинировочный шлак по своему составу имеет сложную структуру, для ее изучения нами была предложена методика изучения механизма формирования включений при кристаллизации на основе анализа диаграмм плавкости трехкомпонентных систем.

На первоначальном этапе наших исследований были изучены двойные и тройные диаграммы состояния, компонентами которых являются оксиды кальция, алюминия и кремния, поскольку данные оксиды составляют основу рафинировочного шлака и имеют большое практическое значение [17, 18].

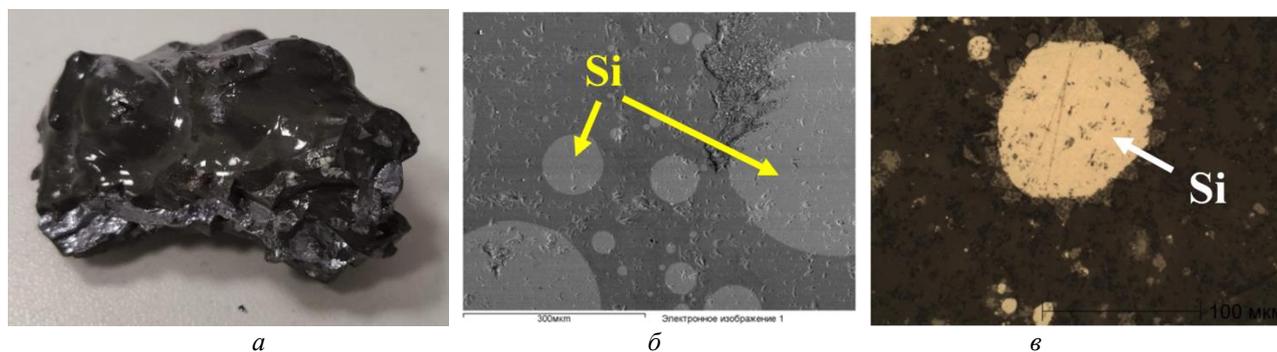


Рис. 1. Образцы рафинировочного шлака АО «Кремний»:

а – общий вид; б – фото поверхности шлифа (сканирующая электронная микроскопия);
в – поверхность микрошлифа (металлографическое исследование, увеличение $\times 50$, темное поле)

Построение и анализ двойных диаграмм плавкости оксидных систем

Анализ двойных диаграмм состояния и формирование базы данных по примесным соединениям нами было выполнено с помощью программы «FactSage 8.1»¹, состоящей из серии модулей информации, вычислений и манипуляций, которые позволяют получить доступ и управлять базами данных соединений и растворов.

Полученные результаты анализа диаграмм состояния показали, что точки эвтектики конгруэнтно и инконгруэнтно плавящихся соединений не только зависят от температуры, но и от соотношения содержания составляющих в шлаке. Твердая и жидкая фаза соединений в рафинировочном шлаке различаются. Граница между соединениями очень четкая, и очевидна область двухфазного перехода. Изучен механизм формирования примесных включений при разных температурах t , давлении p , равном 0,101 МПа (1 атм.). Эти результаты являются теоретической основой для дальнейшей переработки кремниевого шлака и извлечения частиц кремния.

Система «Al₂O₃-SiO₂»

Общий вид диаграммы состояния «Al₂O₃-SiO₂» приведен на рис. 2, построенной при $t = 1400-2200^{\circ}\text{C}$, $p = 0,101$ МПа. В системе существует одно бинарное соединение – муллит (3Al₂O₃·2SiO₂), плавящийся конгруэнтно при температуре 1895°C. Муллит в системе образует различные характерные точки и две эвтекти-

ки: одну с SiO₂ при 1593°C (с содержанием 0,044 моль Al₂O₃) и вторую – с Al₂O₃ (корунд) при 1887°C (с 0,657 моль Al₂O₃).

Система «CaO-SiO₂»

Аналогично с помощью программы «FactSage 8.1» была построена и проанализирована диаграмма состояния системы «CaO-SiO₂». Как известно, в данной системе при плавлении образуется четыре химических соединения: двухкальциевый силикат – 2CaO·SiO₂ (C₂S), трехкальциевый дисиликат – 3CaO·2SiO₂ (C₃S₂), трехкальциевый силикат – 3CaO·SiO₂ (C₃S), однокальциевый силикат (метасиликат кальция) – CaO·SiO₂ (CS).

CS имеет две полиморфные модификации: волластонит (В) – низкотемпературную форму, устойчивую до температуры 1124°C, выше которой она переходит в псевдоволластонит В(s2). Псевдоволластонит – высокотемпературная форма метасиликата кальция, плавящаяся при температуре 1687°C конгруэнтно. C₂S плавится конгруэнтно при температуре 2152°C. Он имеет две температурные области стабильного существования: низкотемпературную C₂S(s2) – бредигит, килхоанит (температурный интервал существования 900–1436°C) и высокотемпературную C₂S(s3) – ларнит (в интервале 1436–2152°C). При переходе C₂S(s2)→ C₂S(s3) уменьшается плотность и увеличивается удельный объем (на ~13%), что приводит к разрушению стойких соединений C₂S.

¹<https://www.factsage.com/>

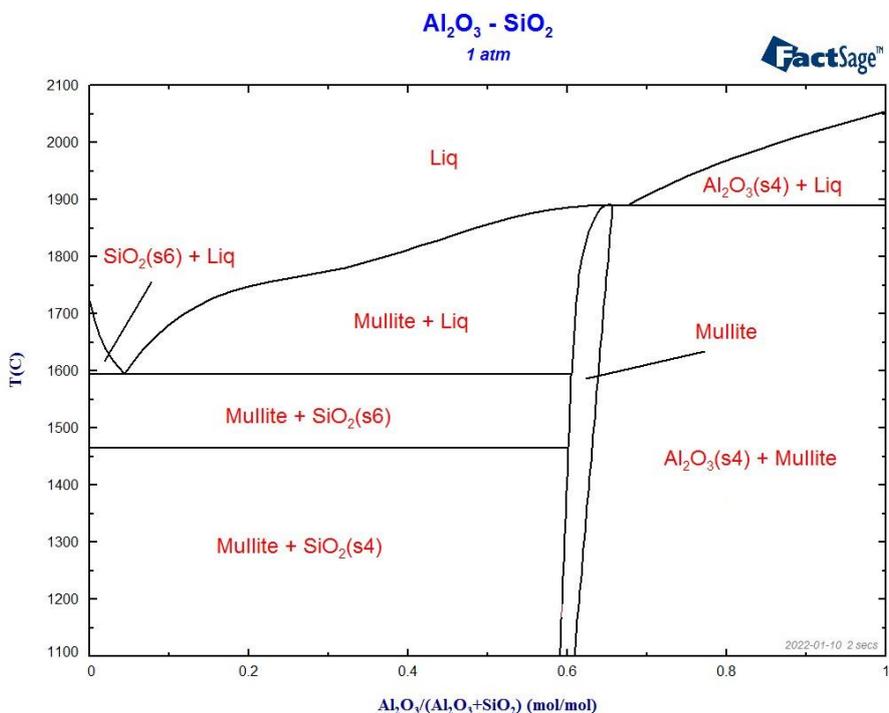


Рис. 2. Диаграмма состояния системы «Al₂O₃-SiO₂»: SiO₂(s4) – тридимит, SiO₂(s6) – кристобалит, Al₂O₃(s4) – корунд (Liq – жидкость)

C_3S стабильно существует в температурном диапазоне от 1300 до 1797°C. Ниже температуры 1300°C данное соединение нестабильно и разлагается в твердом состоянии на $CaO+C_2S(s_2)$, а при 1797°C плавится инконгруэнтно с образованием жидкой фазы следующего состава, моль: 0,333 CaO и 0,667 $C_2S(l)$. Диаграмму характеризуют следующие особенности: в высококремнеземистых составах этой системы наблюдается фазовое разделение однородного расплава на две несмешивающиеся жидкости (ликвация), причем при температуре 1687°C в трехфазном инвариантном равновесии с кристобалитом находится жидкость, содержащая 0,012 моль CaO и 0,956 моль SiO_2 , и жидкость, содержащая 0,28 моль CaO и 0,72 моль SiO_2 ; добавление к кремнезему небольших количеств CaO приводит при нагревании к образованию в системе при температуре эвтектики 1436°C весьма малого количества расплава, и так как от этой эвтектики к области ликвации кривая ликвидуса имеет довольно крутой подъем, то и увеличение температуры не вызывает резкого нарастания количества жидкой фазы.

Система « $CaO-Al_2O_3$ »

В системе « $CaO-Al_2O_3$ » образуется четыре химических соединения: $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A_2), гексаалюминат кальция $CaO \cdot 6Al_2O_3$ (CA_{12}), моноалюминат кальция $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA_2), диалюминат кальция $CaO \cdot 2Al_2O_3$ (CA_4). При температуре CA_{12} выше 1832°C переходит в

фазу $Al_2O_3(s_4)+Liq$. CA_4 плавится конгруэнтно при 1764°C и имеет плотность 3050 кг/м³. CA_2 с плотностью 2940 кг/м³ плавится конгруэнтно при 1603°C. Кроме этого, моноалюминат кальция образуется первым при реакциях взаимодействия CaO и Al_2O_3 в твердом состоянии, а другие алюминаты кальция – уже из него в зависимости от состава смеси.

Соединение C_3A_2 при нормальном давлении имеет плотность 3040 кг/м³, плавится инконгруэнтно при 1540°C на жидкость следующего состава, моль: 0,71 CaO и 0,29 Liq .

Построение и анализ состояния тройных оксидных систем

Для изучения механизма образования и кристаллизации шлака, содержащего оксиды кремния, алюминия и кальция, в наших исследованиях была использована компьютерная программа «Diatris 1.2», предназначенная для расчета и графического изображения диаграмм плавкости тройных систем [19, 20]. Основой программы служит термодинамический метод расчета параметров ликвидуса тройной системы в точке с заданными значениями содержания компонентов по модели регулярного раствора.

На рис. 3 представлена диаграмма состояния тройной системы « $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ ».

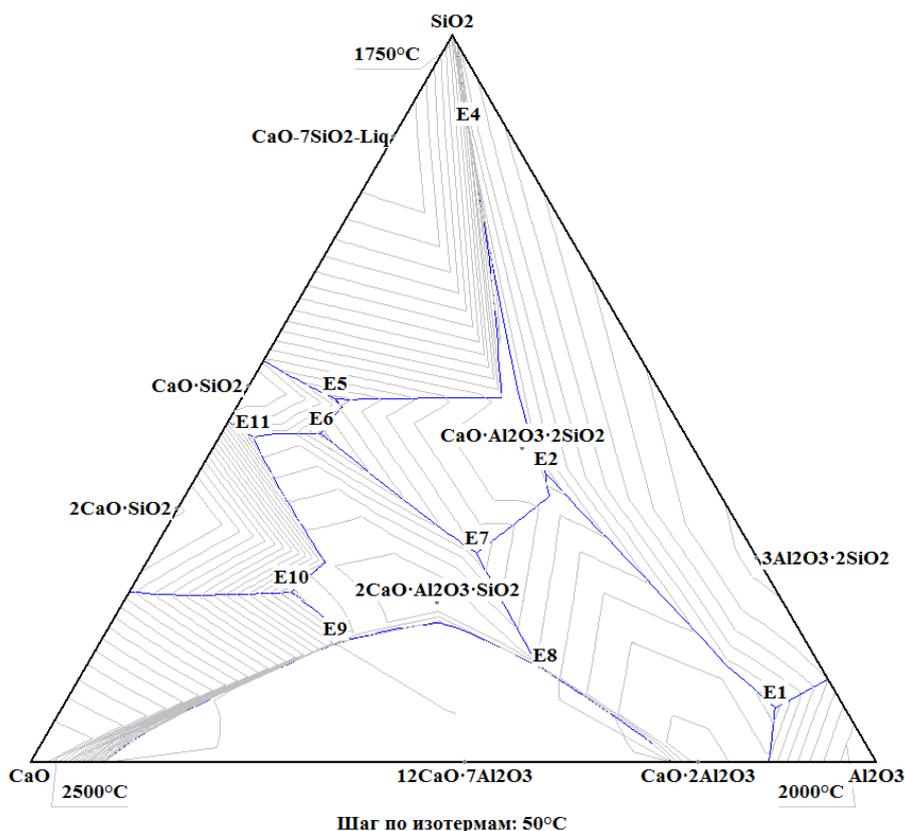


Рис. 3. Тройная диаграмма состояния системы « $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ »

В системе «CaO-Al₂O₃-SiO₂» существуют несколько бинарных и два тройных соединения. На изучаемой диаграмме состояния имеется десять полей кристаллизации. Два тройных соединения – анортит CaO·Al₂O₃·2SiO₂ и геленит 2CaO·Al₂O₃·SiO₂ – плавятся конгруэнтно. Анортит плавится при 1550°C, существует в трех модификациях: гексагональной, триклинной, ромбической. Геленит имеет температуру плавления 1584°C, обладает тетрагональной сингонией и плотностью, равной (2,9-3,1)·10³ кг/м³. Из двойных соединений в изучаемой системе имеются: на стороне «CaO-SiO₂» – соединения CA₂, C₃S₂, C₂S и C₃S. На стороне «CaO-Al₂O₃» имеются все 4 соединения, описанные при анализе двойной диаграммы состояния (C₃A₂, CA₁₂, CA₂, CA₄). На линии, примыкающей к стороне «Al₂O₃-SiO₂», присутствует муллит. Также на диаграмме состояния существуют три области кристаллизации однокомпонентных соединений: SiO₂, CaO и Al₂O₃. Наиболее легкоплавкие эвтектики примыкают к полям кристаллизации анортита и геленита – это эвтектики с температурами плавления 1182,1 и 1297,02°C, соответствующие точкам E6, E11 на диаграмме.

Характеристики тройных эвтектик в системе «CaO-Al₂O₃-SiO₂» представлены в табл. 1.

Для характеристики прироста количества кристаллов при прохождении многокомпонентным сплавом интервала кристаллизации и изучения влияния скорости изменения температуры смеси на формирование соединений в рафинировочном шлаке были

проведены расчеты содержания компонентов при кристаллизации с равным шагом изменения температуры (50°C) в данной трехкомпонентной системе.

Наиболее оптимальный состав шлака для полного его отделения от расплава кремния при рафинировании должен составлять в среднем соответственно, мас. %: SiO₂ – 69,0, Al₂O₃ – 18,0, CaO – 13,0 [16]. Кроме того, ввиду преобладающего количества в шлаке кремнезема, очевидно, что в основе большинства примесных соединений будет находиться именно данное соединение. Поэтому на первоначальном этапе исследований мы рассматривали трехкомпонентную смесь (А) следующего состава, мас. доли: CaO – 0,178; SiO₂ – 0,785; Al₂O₃ – 0,0365.

Данный состав А лежит в поле кристаллизации CaO·7SiO₂-Liq(Ж) и принадлежит фазовому треугольнику «CaO·Al₂O₃·2SiO₂ – CaO·SiO₂ – CaO·7SiO₂-Liq(Ж)» (рис. 4). Выделение первых кристаллов фазы CaO·7SiO₂-Liq(Ж) начинается при 2063,8°C (исходя из данных двухкомпонентной системы «CaO·SiO₂»), и кристаллизация идет вниз к линии ликвидуса – пограничной кривой между анортитом и CaO·7SiO₂-Liq(Ж). По пограничной кривой путь кристаллизации смеси пойдет вдоль к эвтектической точке E5, имеющей температуру плавления 1271,83°C. Кристаллизация расплава А заканчивается в данной эвтектической точке с выделением анортита CaO·Al₂O₃·2SiO₂, моносиликата кальция CaO·SiO₂ и фазы CaO·7SiO₂-Liq(Ж).

Изменение состава смеси А (по отдельным элементам) при кристаллизации можно оценить по рис. 5.

Таблица 1

Точки эвтектики системы тройной диаграммы «CaO-Al₂O₃-SiO₂»

Точка	Система	Содержание компонентов, мол. доли / мас. доли			Температура, °C	V, кДж/моль
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
E1	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ - CaO·2Al ₂ O ₃ - Al ₂ O ₃	0,133 / 0,082	0,112 / 0,074	0,753 / 0,843	1624,89	-377,32
E2	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ - CaO·2Al ₂ O ₃ - CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	0,243 / 0,191	0,470 / 0,397	0,286 / 0,411	1469,1	-297,66
E3	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ - SiO ₂ - CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	0,050 / 0,045	0,898 / 0,870	0,050 / 0,083	1367,34	-127,19
E4	CaO·7SiO ₂ -Liq(Ж) - SiO ₂ - CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	0,050 / 0,046	0,898 / 0,870	0,050 / 0,083	1367,93	-126,91
E5	CaO·7SiO ₂ -Liq(Ж) - CaO·SiO ₂ - CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	0,422 / 0,386	0,510 / 0,501	0,067 / 0,112	1271,83	-254,52
E6	2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ - CaO·SiO ₂ - CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	0,466 / 0,427	0,461 / 0,453	0,071 / 0,118	1182,1	-184,75
E7	2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ - CaO·2Al ₂ O ₃ - CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	0,405 / 0,327	0,332 / 0,287	0,261 / 0,384	1363,43	-514,03
E8	2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ - CaO·2Al ₂ O ₃ - 12CaO·7Al ₂ O ₃	0,439 / 0,327	0,157 / 0,125	0,403 / 0,546	1487,21	288,42
E9	2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ - CaO - 12CaO·7Al ₂ O ₃	0,646 / 0,557	0,176 / 0,163	0,177 / 0,279	1447	-23,99
E10	2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ - CaO - 2CaO·SiO ₂	0,639 / 0,573	0,243 / 0,234	0,117 / 0,192	1440	-205,64
E11	CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ - CaO·SiO ₂ - 2CaO·SiO ₂	0,538 / 0,512	0,437 / 0,446	0,023 / 0,040	1295	-1331,435

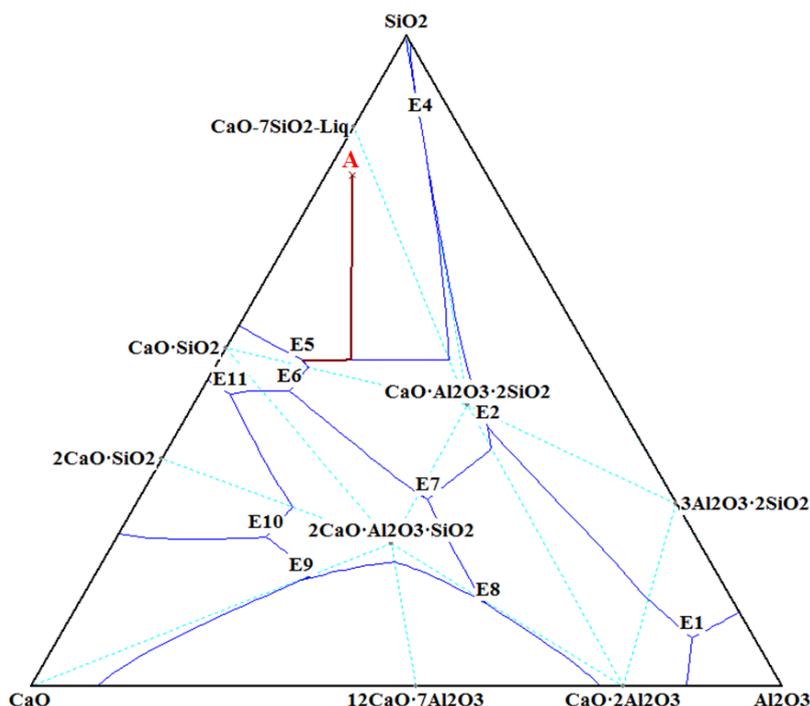


Рис. 4. Путь кристаллизации смеси состава А

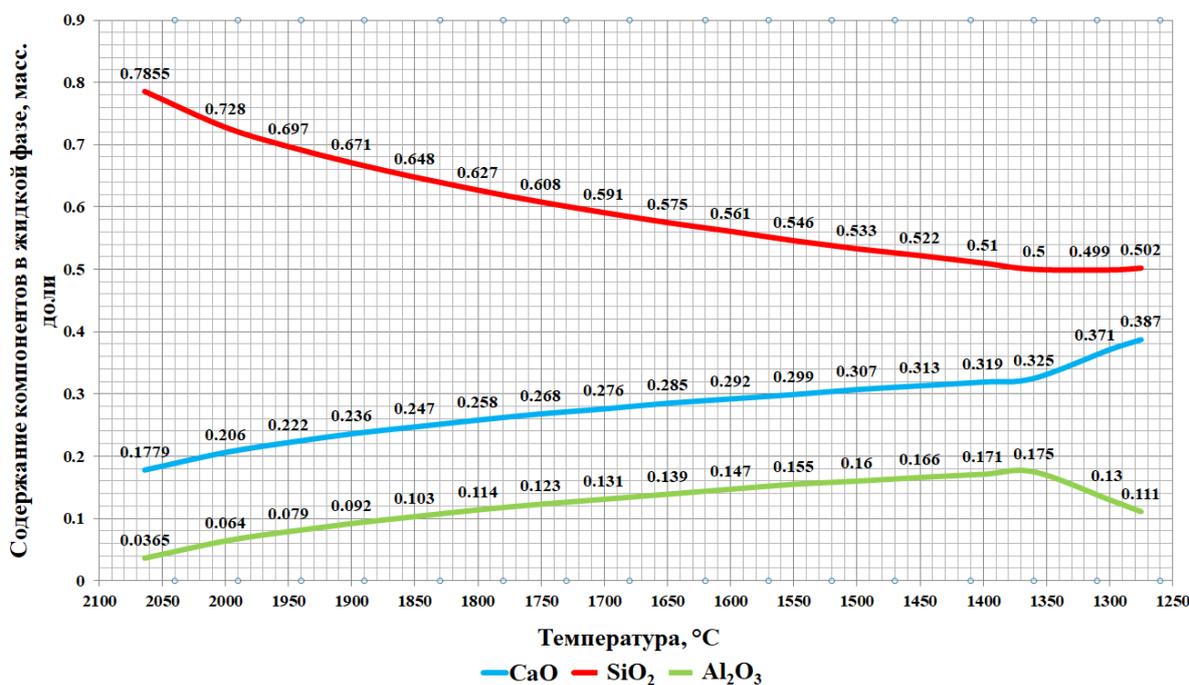


Рис. 5. Изменение содержания компонентов жидкой фазы (состав А) при кристаллизации расплава

Из данных рис. 5 видно, что содержание SiO₂ постепенно уменьшается, что приводит к увеличению содержания CaO и Al₂O₃ по отношению к оксиду кремния. Однако при температуре 1360°C содержание Al₂O₃ резко уменьшается (соответственно, содержание CaO увеличивается), что объясняется началом выделения твердой фазы состава CaO·Al₂O₃+3CaO·Al₂O₃ из общей трехкомпонентной смеси. Выше этой температуры си-

стема представляет собой жидкую фазу. Иными словами, это температура, при которой в равновесных условиях выпадает первый кристалл.

Заключение

Нами были проанализированы образцы рафинировочного шлака АО «Кремний» компании «РУСАЛ». Установлено, что основными соединения-

ми в шлаке являются оксиды кальция, алюминия, кремния, а также карборунд и корольки кремния. Поскольку содержание Si в шлаках достаточно высоко (42,1-65,3%), возникает необходимость доизвлечения кремния из данного отхода с целью повышения эффективности кремниевого производства.

На основе данных о составе и свойствах диаграмм плавкости двойных систем («Al₂O₃-SiO₂», «CaO-SiO₂», «CaO-Al₂O₃») была предложена методика термодинамического анализа механизма формирования примесных включений при кристаллизации трехкомпонентного шлакового расплава. На первоначальном этапе исследований изучен путь кристаллизации смеси следующего состава, мас. доли: CaO – 0,178, SiO₂ – 0,785, Al₂O₃ – 0,0365. Показано, что кристаллизация выбранного расплава состава А заканчивается в эвтектической точке, имеющей температуру плавления 1271,83°C, с выделением анортита CaO·Al₂O₃·2SiO₂, моносилката кальция CaO·SiO₂ и фазы CaO·7SiO₂-Ж.

В дальнейшем планируется изучить двойные и тройные диаграммы состояния других компонентов, входящих в рафинировочный шлак кремниевого производства, для подбора оптимального температурного режима для извлечения кремния.

Список литературы

- Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes // *Metallurgist*. 2017. Т. 61. No. 7-8. P. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
- Технологические особенности комплексной переработки шлаков сталеплавильной отрасли в товарные продукты / Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Некрасов И.В., Егизарьян Д.К., Лобанов Д.А., Овчинникова Л.А. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 75-й международной науч.-практ. конф. Т. 1. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. С. 87–90.
- Утилизация отходов металлургического производства: монография / Н.В. Панишев, В.А. Бигеев, М.В. Потапова, И.В. Макарова, Т.О. Гаврилова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 69 с.
- Sheshukov O.Y., Mikheenkoy M.A., Nekrasov I.V., Egizaryan D.K., Lobanov D.A. Stabilization of Refining Slag by Adjusting Its Phase Composition and Giving It the Properties of Mineral Binders // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2017. Vol. 58. No. 3. P. 324–330. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0104-1>.
- Разработка технологии переработки шлаков медеплавильного производства методом флотации / Лесникова Л.С., Никитина О.А., Тозик В.М., Волянский И.В., Сосновский В.В. // *Цветные металлы*. 2013. № 6 (846). С. 23–26.
- Шешуков О.Ю., Егизарьян Д.К., Лобанов Д.А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 3. С. 192–199. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199>.
- Глубокая переработка сталеплавильных шлаков / Чижевский В.Б., Шавакулева О.П., Дегодя Е.Ю., Сединкина Н.А. // *Сталь*. 2014. № 4. С. 124–126.
- Dashevskii V.Y., Aleksandrov A.A., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I. and Kanevskii A.G. Recycling of Waste Slag Upon Production of Manganese Ferroalloys // *KnE Materials Science. Technogen*. 2019. P. 46–50. <https://doi.org/10.18502/kms.v6i1.8042>.
- Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / Бельский С.С., Зайцева А.А., Тютрин А.А., Исмоилов З.З., Баранов А.Н., Сокольников Ю.В. // *iPolytech Journal*. 2021. Т. 25. № 6. С. 782–794. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>.
- Технология выплавки технического кремния / С.В. Архипов, О.М. Катков, Е.А. Руш и др.; под ред. О. М. Каткова. Иркутск: ЗАО «Кремний», 1999. 245 с.
- Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 р.
- Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. Production of High Silicon Alloys. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.
- Ферросплавное производство: состояние и тенденции развития в мире и России / Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Ёлкин К.С., Голодова М.А. // «Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2019»: тр. XXI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новокузнецк, 23-24 ноября 2019 г.). Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2019. Ч. 1. С. 20–32.
- Немчинова Н.В. Поведение примесных элементов при производстве и рафинировании кремния: монография. М.: Академия естествознания, 2008. 237 с.
- Исследование основных характеристик шлаков рафинирования кристаллического кремния / Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Ходосов И.Е., Ёлкин К.С. // «Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2019»: тр. XXI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новокузнецк, 23-24 ноября 2019 г.). Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2019. Ч. 1. С. 66–72.
- Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25, № 2 (157). С. 252–263. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>.
- Бобкова Н.М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. М.: Высшая школа, 2007. 303 с.
- Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск третий. Тройные силикатные си-

- стемы / Торопов Н.А., Барзаковский В.П., Ланин В.В., Курцева Н.Н., Бойкова А.И.; под ред. В.П. Барзаковского. Ленинград: Наука, Ленингр. отд., 1972. 448 с.
19. Удалов Ю.П., Морозов Ю.Г. Программа расчета диаграмм плавкости тройных систем Diatris 1.2 (алгоритм, интерфейс и техническое применение) // Диаграммы состояния в материаловедении: сб. тр. 6-й междунар. школы-конф. Киев, 2001. С. 121–142.
20. Тютрин А.А. Исследование процесса формирования примесей при кристаллизации расплава кремния на основе компьютерного построения тройных диаграмм плавкости // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 110–113.

Сведения об авторах

Хоанг Ван Виен – аспирант кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Немчинова Нина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: ninavn@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY THE MECHANISM OF CRYSTALLIZATION OF SLAG FORMING SYSTEMS FORMED DURING SILICON REFINING

Hoang Vien V. – Postgraduate Student of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk. E-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Nemchinova Nina V. – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: ninavn@yandex.ru

Abstract. Metallurgical-grade silicon, widely used in various industries (as a steel deoxidizer or an alloying additive in alloys, for the semiconductor-grade silicon production, etc.), is obtained by melting silica-containing feeds in ore-thermal furnaces. This carbothermal process is slag-free. However, in the silicon production at Silicon JSC (Shelekhov, Irkutsk region), refinery slags are formed in the course of oxidizing silicon melt impurities in a ladle by blowing air (at ~1500-1600°C), performed to remove calcium, aluminum, and titanium impurities from the product. Due to high viscosity, this slag entraps silicon, the content of which reaches 42.1-65.3 % wt. thus requiring additional extraction to improve the general efficiency of production. The paper studies the mechanism of impurity inclusions generation in the chosen slag composition (based on CaO, Al₂O₃, SiO₂) with ternary diagrams built using the Diatris 1.2 software. This software is based on a thermodynamic technique for calculating the ternary system liquidus parameters at a point with given component contents using a regular solution model. The crystallization way has been studied for the slag of the following composition, wt. fractions: CaO - 0.178, SiO₂ - 0.785, Al₂O₃ - 0.0365. It is shown that the melt of the chosen composition stops crystallizing at the eutectic point with a melting point of 1271.83°C with the release of anorthite CaO·Al₂O₃·2SiO₂, calcium monosilicate CaO·SiO₂, and the CaO·7SiO₂-L phase. It is planned to further study binary and ternary diagrams of other refinery slag components to choose the optimal temperature regime for extracting silicon.

Key words: metallurgical silicon, oxidation refining, slag, fusibility diagram, crystallization path.

Ссылка на статью:

Хоанг В. В., Немчинова Н. В. Изучение механизма кристаллизации шлакообразующих систем, образующихся при рафинировании кремния // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 4-11.

Hoang V.V., Nemchinova N.V. Study the mechanism of crystallization of slag forming systems formed during silicon refining. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 4-11.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746.27:047

Ячиков И.М., Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Шафиков Т.И., Михалкина И.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ЩЕЛЕВЫМИ КАНАЛАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация. На ПАО «ММК» для широких стенок кристаллизаторов машины непрерывного литья заготовок встал вопрос перехода от сверленных к щелевым каналам с целью унификации существующих моделей кристаллизаторов, а также упрощения процедуры изготовления медных стенок и сокращения расхода меди. При этом главным условием реконструкции является сохранение существующей петлевой системы охлаждения при одновременном обеспечении заданного теплового режима работы кристаллизатора. Приведены результаты теплового расчета широких стенок кристаллизатора с щелевыми каналами охлаждения. Для автоматизации и визуализации результатов расчета был разработан модуль моделирования этих процессов в СКМ ЛП «ПолигонСофт». Это позволило прогнозировать тепловое поле на рабочей поверхности широкой стенки кристаллизатора для обеспечения заданного теплового режима его работы, а также предотвращения разупрочнения медного сплава и сохранения заданных прочностных свойств. Проведен тепловой расчет медных стенок с щелевыми каналами, а также полученные данные адаптировали к системе компьютерного моделирования «ПолигонСофт». Представленные результаты математического и компьютерного моделирования носят практический характер и могут быть применены при разработке новых унифицированных конструкций слябовых кристаллизаторов машины непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: кристаллизатор, машина непрерывного литья заготовок, сляб, медная стенка, щелевые каналы охлаждения.

Введение

Одной из важных и актуальных проблем для ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» является снижение стоимости слябов при повышении качества готового проката. Снижение себестоимости слябов и последующей продукции прокатного производства возможно за счет сокращения затрат на ремонт машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), связанных с восстановлением сменного оборудования и кристаллизаторов.

Одним из наиболее дорогостоящих узлов МНЛЗ является кристаллизатор, имеющий крайне низкую стойкость. Это обусловлено тяжелыми условиями его эксплуатации – высокими механическими нагрузками, непосредственным контактом с жидким металлом и шлаком. Основная функция кристаллизатора заключается в отводе тепла от жидкой стали к воде и формировании на поверхности образующейся заготовки твердой корочки определенной толщины, способной выдержать ферростатическое давление жидкого металла после выхода сляба (с жидкой фазой внутри него) из кристаллизатора [1, 2].

Наиболее изнашиваемой и подлежащей быстрой замене частью в кристаллизаторах являются медные стенки. Для их изготовления применяют дорогостоящую медь марки М1р или ее сплав с серебром МСр0,1 (Ag=0,1%). При движении сляба в кристаллизаторе медные стенки подвергаются интенсивному износу, особенно в нижней части.

В существующих сдвоенных кристаллизаторах

МНЛЗ-2,3 ККЦ ПАО «ММК» установлено 4 широких и 8 узких медных стенок общим весом примерно 3390 кг. Вес широких стенок составляет 3008 кг, они имеют сверленную конструкцию каналов охлаждения, из-за чего часть материала медных стенок, которая располагается возле стальной стенки кристаллизатора, практически не участвует в тепловой работе кристаллизатора. Кроме того, применяемая технология изготовления цилиндрических каналов в широких стенках кристаллизатора – это сложная непроизводительная и ресурсоемкая работа. На ПАО «ММК» стенки сверлят на специально изготовленном нестандартном оборудовании: горизонтально-сверлильном станке 1С975. Ружейные сверла длиной 1045 мм под отверстия диаметром 20 мм оборудованы дорогостоящими режущими пластинами ВК-8. Сверла имеют низкую стойкость и часто ломаются в процессе сверления [3]. При этом длительность сверления может достигать двух суток.

Решить проблему можно отказавшись от цилиндрических каналов охлаждения в стенках кристаллизатора, что возможно посредством перехода к его новой конструкции. В настоящее время в мировой и отечественной металлургической практике известен опыт применения кристаллизаторов с щелевыми каналами охлаждения. В Российской Федерации впервые кристаллизатор с радиальными медными стенками с щелевыми каналами охлаждения был применен в конверторном цехе ОАО «Северсталь» в 2003 г. [4]. Отмечено, что стойкость кристаллизатора составила 124 плавки, а во время его эксплуатации претензий к работе не возникало.

© Ячиков И.М., Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Шафиков Т.И., Михалкина И.В., 2022

В работах [5, 6] проведён тепловой расчет кристаллизаторов при использовании щелевых каналов различной формы: полукруглой, прямоугольной и трапецидальной. Установлено, что при прочих равных условиях разливки наименее эффективным являются каналы охлаждения полукруглой формы. Также отмечено, что коэффициент теплопередачи для щелевых каналов зависит от соотношения высоты и ширины канала.

Авторы работ [7, 8] отмечают, что для обеспечения оптимальной тепловой работы кристаллизатора необходимо рационально выбирать не только размеры каналов, но и расстояние между ними и скорость охлаждающей воды.

Кристаллизаторы с щелевыми каналами для узких стенок охлаждения применяются на МНЛЗ ПАО «ММК» [9–12]. В частности, с такой конструкцией кристаллизатора довольно давно работает МНЛЗ-1 конвертерного цеха.

В рамках работы по унификации парка кристаллизаторов ПАО «ММК» была разработана новая конструкция медных стенок с щелевыми прямоугольными каналами для МНЛЗ-2,3, обеспечивающая сохранение существующего гидравлического оборудования и петлевой системы охлаждения. Все это привело к необходимости проведения теплового расчета широкой стенки кристаллизатора при работе для существующих технологических условий.

Целью работы является прогнозирование теплового состояния широкой стенки кристаллизатора новой конструкции с использованием компьютерного моделирования, позволяющего анализировать возможности ее использования в разных технологических условиях.

В процессе проектирования и расчета рассматривалась широкая стенка кристаллизатора с щелевыми каналами охлаждения, показанная на рис. 1. Основные исходные данные приведены в табл. 1.

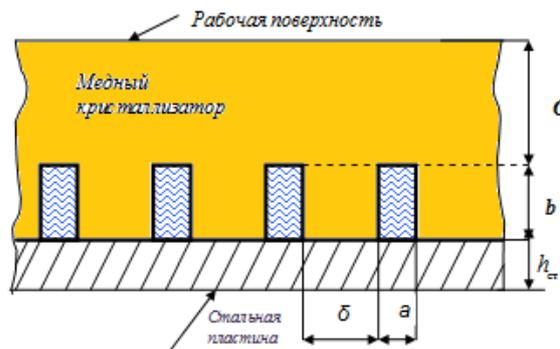


Рис. 1. Расположение щелевых каналов и основные размеры стенки кристаллизатора

Для расчёта теплового потока, Вт/м², использовалась эмпирическая зависимость Л.В. Буланова [2, 4]:

$$q(h, v) = v^{0,46668} \exp\{14,689 + h \cdot [-4,3376 + h(5,5939 - 3,1608 \cdot h^2)] + 0,007815 / h / v - 5,7084 \cdot 10^{-8} \cdot h^{-5}\}, \quad (1)$$

где h – расстояние от верха мениска в кристаллизаторе, м; v – скорость разливки, м/мин.

Для теплового расчета важным параметром является среднеинтегральная плотность теплового потока, Вт/м², по высоте кристаллизатора, определяемая как

$$\bar{q}(v) = \frac{1}{B - h_{\min}} \int_{h_{\min}}^B q(h, v) \cdot dh, \quad (2)$$

где $h_{\min} \approx 0,08-0,1$ м – расстояние от верха мениска в кристаллизаторе, где наблюдается максимальный тепловой поток. Более подробно расчёты представлены в работе [12].

Таблица 1

Исходные данные для теплового расчета широкой стенки кристаллизатора МНЛЗ

Наименование	Значение
Количество слитков в кристаллизаторе, шт.	2
Диапазон скорости разливки v ; средняя (рабочая) скорость, \bar{v} , м/мин	0,1–1; 0,74
Скорость протока воды в каналах W_b , м/с	5–8
Давление воды на входе в панели кристаллизатора, МПа	0,75–0,85
Температура воды на входе $t_{в}$, °С, не более	35–40
Толщина медных стенок $H=C+b$, мм	50
Высота медных стенок кристаллизатора B , мм	930
Расход воды общий и на каждую стенку V_b , м ³ /ч, не менее,	225/112,5
Расстояние от канала до рабочей поверхности C , мм	30
Минимальная толщина стенок (последний ремонт) H_{\min} , мм	33
Число каналов в одной стенке n	48
Длина стенки кристаллизатора L , мм	1480
Длина щелевых каналов l , мм	830
Ширина щелевых каналов a , мм	5
Высота щелевых каналов b , мм	20

Зависимости среднего и максимального тепловых потоков от скорости разливки, рассчитанные по выражениям (1), (2), представлены графически на рис. 2. Отношение максимального теплового потока к его среднему значению при разной скорости разливки составляет $\mu=1,8-2,0$.

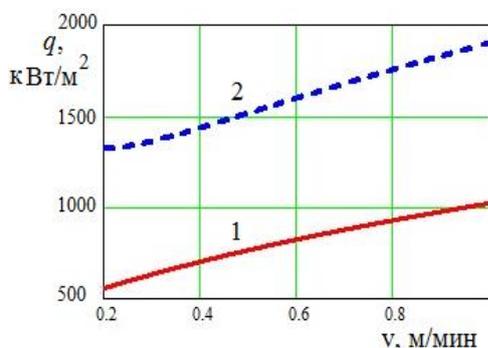


Рис. 2. Зависимости среднего теплового потока по высоте кристаллизатора (1) и максимального теплового потока (2) от скорости разливки

Важными тепловыми параметрами процесса эксплуатации кристаллизатора являются изменение температуры воды, проходящей через широкую стенку кристаллизатора, а также изменение средней температуры поверхности щелевых каналов. По этим параметрам можно оценивать теплосъем с поверхности медной стенки, а также эффективность работы системы охлаждения в целом.

По методике, представленной в литературных источниках [2, 14], рассчитали тепловой баланс работы кристаллизатора, а именно зависимость изменения температуры воды и средней температуры поверхности щелевых каналов от скорости разливки (рис. 3). Начальная температура воды на входе в кристаллизатор была принята 35°C.

Увеличение перепада температур воды с повышением скорости разливки связано с повышением объема жидкой стали, поступающей в кристаллизатор в единицу времени. При этом, согласно полученным зависимостям, средняя и максимальная температуры медной стенки кристаллизатора не поднимаются выше $\bar{t}_k > 70^\circ\text{C}$, $t_{k \max} < \mu \cdot \bar{t}_k = 140^\circ\text{C}$. Для предотвращения вскипания воды в каналах избыточное давление в них не должно быть менее чем 3,5 атм.

Представленная методика расчёта теплового профиля кристаллизатора была адаптирована к системе компьютерного моделирования литейных процессов СКМ ЛП «ПолигонСофт». Программный продукт и адаптированная под него методика расчёта теплового профиля позволяет производить расчёт формирования сляба в кристаллизаторе МНЛЗ при меньших временных затратах. Кроме того, применение «ПолигонСофт» позволит моделировать процесс кристаллизации сляба при изменении условий процесса литья: скорости разливки, температуры воды на входе в кристаллизатор, температуры разливаемого металла.

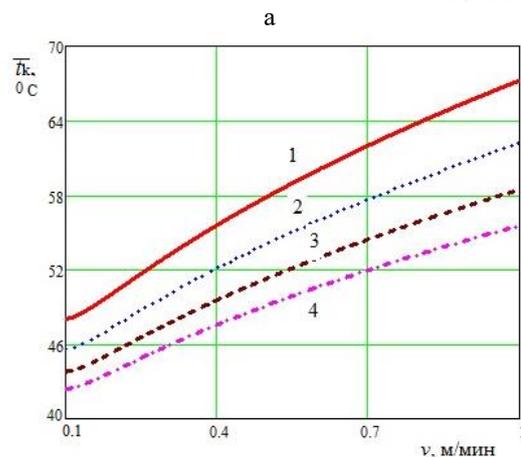
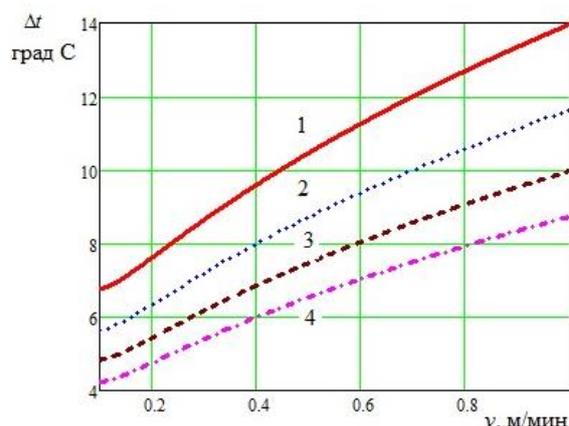


Рис. 3. Перепад температуры охлаждающей воды в широкой стенке кристаллизатора (а) и средней температуры поверхности охлаждающих каналов (б) при разной скорости разливки и скорости течения воды:

- 1 – $W_b = 5 \text{ м/с}$ ($V_b = 86 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- 2 – $W_b = 6 \text{ м/с}$ ($V_b = 104 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- 3 – $W_b = 7 \text{ м/с}$ ($V_b = 121 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- 4 – $W_b = 8 \text{ м/с}$ ($V_b = 138 \text{ м}^3/\text{ч}$)

Для оценки эффективности работы программного обеспечения и адекватности получаемых результатов была проведена серия моделирования процессов литья. Исходные данные для моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для процесса моделирования

Наименование	Значение
Скорость разливки металла, м/мин	0,4, 0,6
Скорость протока воды в каналах W_b , м/с	5–8
Температура воды на входе t_b , °С, не более	35
Коэффициент теплопередачи через медную стенку, Вт/м ² ·К	600

Геометрические параметры кристаллизатора принимались из технической документации и сборочных чертежей, разработанных специалистами ФГБОУ

ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Перед началом моделирования была построена трёхмерная и сеточная модели кристаллизатора и слитка (рис. 4).

На первом этапе моделирования оценивалось распределение температур в кристаллизующемся слябе. Первый срез по времени был сделан спустя 88 секунд с момента окончания заполнения кристаллизатора, второй – через 138 секунд с момента начала движения слитка. Распределение температур в кристаллизующемся слитке представлено на рис. 5.

Моделирование процесса формирования сляба позволяет оценивать распределение температур в кристаллизующемся металле как до момента начала вытяжки сляба (рис. 5, а), так и после (рис. 5, б). Нарастание корочки на слябе происходит равномерно с двух сторон, а зная температуру кристаллизации, возможно оценить динамику нарастания твёрдого слоя на поверхности сляба.

Далее было получено тепловое поле в медной стенке кристаллизатора. Визуализированные результаты моделирования представлены на рис. 6.

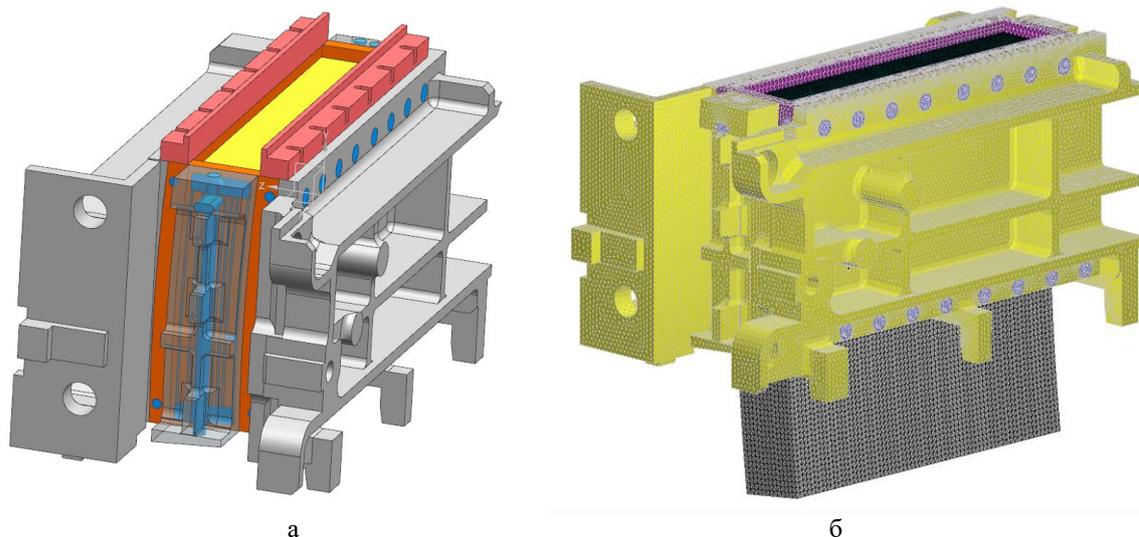


Рис. 4. Трёхмерная (а) и сеточная (б) модели кристаллизатора

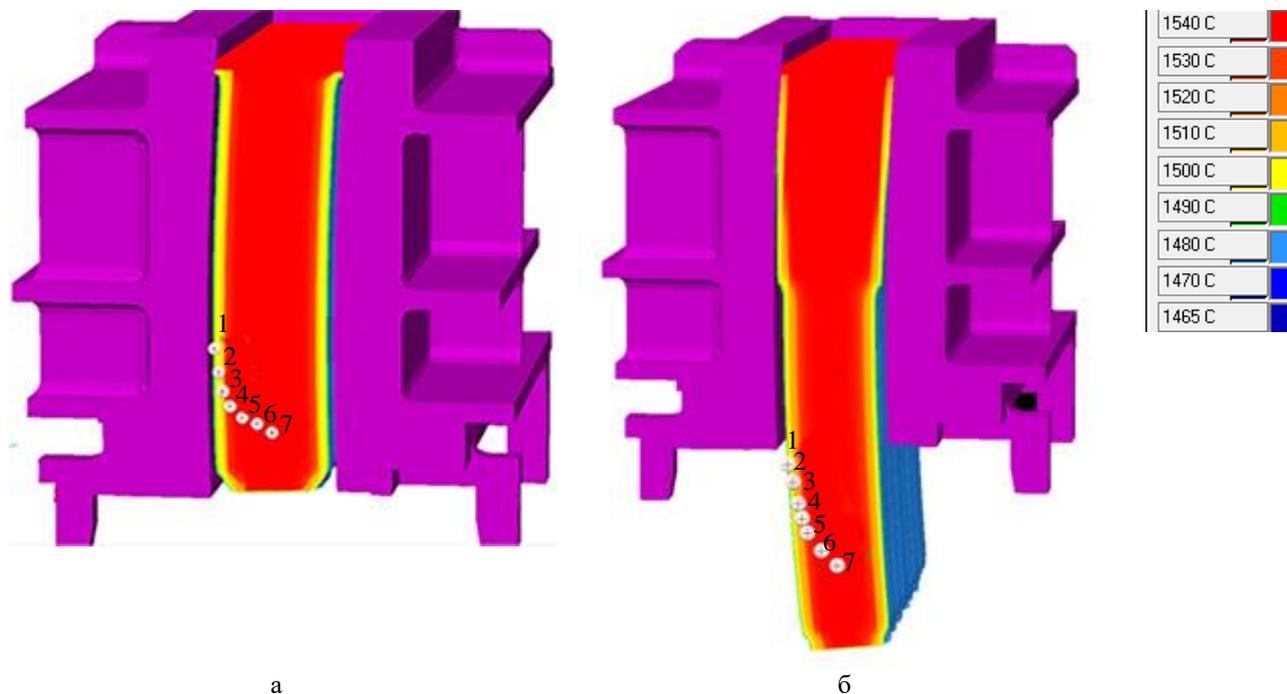


Рис. 5. Распределение температур в кристаллизующемся слябе:
 а – на 88-й секунде с момента заполнения кристаллизатора, распределение температур, °С:
 1 – 1448; 2 – 1511; 3 – 1523; 4 – 1534; 5 – 1539; 6 – 1540; 7 – 1540;
 б – на 138-й секунде с момента начала движения сляба, распределение температур, °С:
 1 – 1448; 2 – 1494; 3 – 1519; 4 – 1522; 5 – 1531; 6 – 1534; 7 – 1538

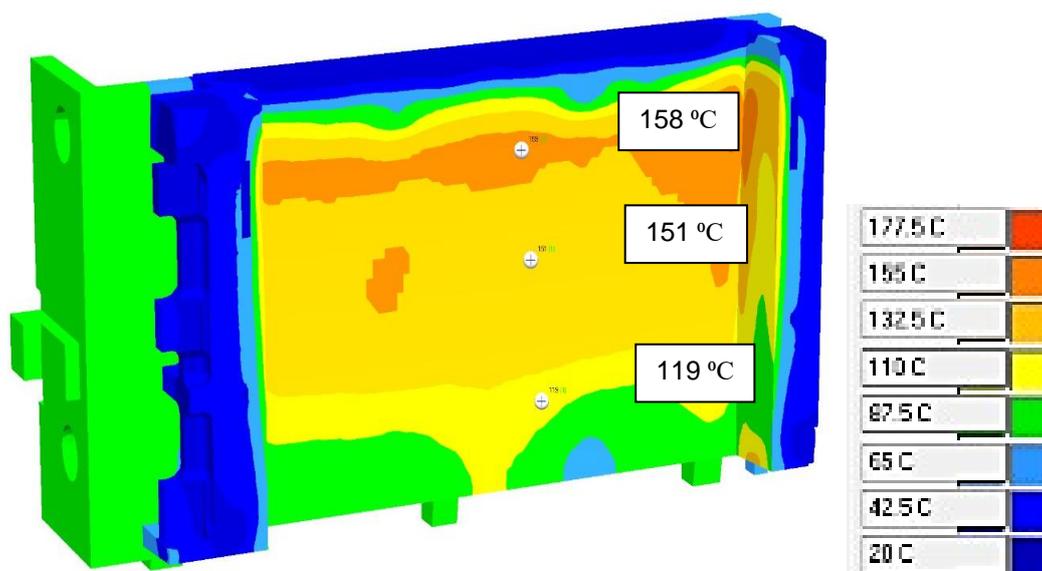


Рис. 6. Тепловое поле в кристаллизаторе при скорости разливки со скоростью 0,6 м/мин

Видно, что температура на рабочей поверхности широкой медной стенки находится в пределах 158–119 °С при скорости движения слитка 0,6 м/мин и 122–84 °С при скорости – 0,4 м/мин. Изменение температуры на рабочей поверхности медной стенки кристаллизатора при различных скоростях разливки связано с увеличением объема стали, проходящей через кристаллизатор в единицу времени. Данные температуры рабочей стенки предотвращают ее разупрочнение под действием снимаемых тепловых потоков и связанные с этим аварийные ситуации.

Выводы по работе

1. С помощью компьютерного моделирования установлено, что разработанная конструкция широкой стенки кристаллизатора с щелевыми каналами охлаждения при заданных технологических условиях охлаждения обеспечивает требуемый теплосъем от слитка. При этом предотвращается разупрочнение медной стенки под действием снимаемых тепловых потоков и связанные с этим аварийные ситуации.

2. Расчетным путем определены технологические параметры работы кристаллизатора в машине непрерывного литья заготовок при различных условиях: скорость разливки, скорость течения воды в охлаждающих каналах и т.д. Построена зависимость перепада температуры охлаждающей воды в широкой стенке кристаллизатора и средней температуры поверхности охлаждающих каналов при рабочих скоростях разливки и течения воды в каналах.

3. Созданные математические модели были адаптированы к системе компьютерного моделирования «ПолигонСофт», что позволило производить расчеты и визуализировать результаты с минимальными временными затратами.

Список литературы

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: М.: Металлургия, 1988. 53 с.
2. Расчетно-аналитическое исследование тепловых процессов в кристаллизаторе / Буланов Л.В., Асанова Р.Ф., Волегова В.Е., Лобанов Е.П. // Сталь. №9. 1999. С. 24–26.
3. Опыт эксплуатации узких медных стенок кристаллизаторов на ММК / Подосян А.А., Завьялов В.И., Каримов М.И., Юсин А.Н. // Межрегиональный сборник научных трудов / под ред. К.Н. Вдовина; МГТУ им. Г.И. Носова, ОАО «ММК». Магнитогорск, 2002. С. 73–78.
4. Радиальный слябовый кристаллизатор с щелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / Макрушин А.А., Куклев А.В., Айзин Ю.М., Зарубин С.В. и др. // Metallurg. № 2. 2005. С. 39–41.
5. Ячиков И.М., Ларина Т.П., Вдовин К.Н. Сравнение тепловой работы кристаллизаторов МНЛЗ с охлаждающими каналами различной формы // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №2. С. 65–70.
6. Yachikov I.M., Larina T.P., Vdovin K.N. Thermal operation of molds in continuous-casting machines with cooling channels of different shape // Steel in Translation. 2007. T. 37. № 11. С. 929-933.
7. К вопросу оптимизации геометрических размеров охлаждающих каналов рабочей стенки щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок / Лукин С.В., Калягин Ю.А., Кибардин А.Н., Славов В.И. // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. № 2. Т. 1. С. 11–14.
8. Larina T. P., Vdovin K. N., Yachikov I. M. Calculation of Hydraulic Parameters of Copper Crystallizers with a Complex Connection of Channels // Russian

- Journal of Non Ferrous Metals, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 648–653. (DOI: 10.3103/S106782121506005X)
9. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка сталей: монография. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 732 с.
 10. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 540 с.
 11. Переход к прямоугольным охлаждающим каналам широких стенок кристаллизаторов МНЛЗ / Вдовин К.Н., Ларина Т.П., Ячиков И.М., Позин А.Е. // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Вып. 10. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 52–57.
 12. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов: монография / Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ларина Т.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 190 с.
 13. Математическое моделирование прочности шпилечного соединения сборных плит кристаллизатора МНЛЗ / Ячиков И.М., Панферов В.И., Феоктистов Н.А., Чернов В.П. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2021. Т. 21. № 2. С. 87–97.
 14. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / под общ. ред. Г.А. Шалаева. Екатеринбург: Уральский центр ИР и рекламы, 2003. 320 с.

Сведения об авторах

Ячиков Игорь Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: iachikovim@susu.ru, ORCID.ORG 0000-0002-1562-7506.

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

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, директор института металлургии, машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Шафиков Тимур Ильдусович – аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: timur_shaficov97@bk.ru.

Михалкина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: miv.mgtu@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODELING OF THERMAL FIELDS IN THE MOLD WITH SLOT CHANNELS COOLING

Yachikov Igor M. – Dr. of Tech. Sciences, Prof., Prof. Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: iachikovim@susu.ru, ORCID.ORG 0000-0002-1562-7506.

Foektistov Nikolay A. – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru, ORCID.ORG 0000-0002-6091-7983

Savinov Alexander S. – Dr. of Tech. Sciences, assistant professor, Director of the Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Shaficov Timur I. – postgraduate student, South Ural State University, Chelyabinsk. Russia. E-mail: timur_shaficov97@bk.ru.

Mikhalkina Irina V. – Candidate of Technical Science, Senior Lecturer Department of Foundry Processes and Material Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: miv.mgtu@mail.ru

Abstract. At PJSC «ММК» for wide walls of CCM molds there was a question of transition from drilled to slotted channels in order to unify existing models of molds, as well as to simplify the procedure of copper walls manufacturing and to reduce copper consumption. The main condition for the reconstruction is to retain the existing loop cooling system while ensuring a given thermal mode of the crystallizer. Results of thermal calculation of wide walls of the crystallizer with slot cooling channels are presented. For automation and visualization of calculation results a module for modeling these processes was developed in SCM FP "PolygonSoft". It makes it possible to predict the thermal field on the working surface of a wide mold wall to ensure a specified thermal mode of its operation, as well as to prevent copper alloy loosening and to maintain the specified strength properties. The thermal calculation of copper walls with slotted channels was carried out, and the obtained data were adapted to the computer modeling system "PolygonSoft". The presented results of mathematical and computer modeling are of practical character and can be used in the development of new unified designs of slab crystallizers of continuous casting machines.

Key words: mold, continuous casting machine, slab, copper wall, slot channels cooling.

Ссылка на статью:

Моделирование тепловых полей в кристаллизаторе с щелевыми каналами охлаждения / И.М. Ячиков, Н.А. Феоктистов, А.С. Савинов, Т.И. Шафиков, И.В. Михалкина // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 12-18.
Yachikov I.M., Feoktistov N.A., Savinov A.S., Shaficov T.I., Mikhalkina I.V. Modeling of thermal fields in the mold with slot channels cooling. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 12-18.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

Румянцев М.И., Завалищин А.Н., Колыбанов А.Н., Ахмадиев К.Р.

ОСОБЕННОСТИ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ИХ ОТОБРАЖЕНИЕ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ПРОЦЕССА

Аннотация. Одна из локальных задач цифрового двойника процесса холодной прокатки состоит в выборе таких натяжений, которые будут способствовать получению полосы заданного качества с необходимой производительностью. Так как влияние натяжения на процесс прокатки не однозначно, задача выбора рационального натяжения представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, что затрудняет применение цифрового двойника в режиме реального времени. Для обоснования величины натяжения при использовании цифрового двойника в режиме реального времени изучены зависимости натяжения от параметров процесса на различных участках станов холодной прокатки – на входе в первую клетку, в межклетевых промежутках, на выходе из последней клетки и при смотке. По результатам исследования построены множественные аппроксимации, достоверные с доверительной вероятностью 95%.

Указанные аппроксимации отображают известный положительный опыт работы различных станов холодной прокатки полос и позволяют разрабатывать энергоэффективные технологии производства холоднокатаного проката различного назначения с повышенным качеством поверхности (в том числе высокопрочного) на станах различных видов прокатки. Разработан алгоритм функции «Первое приближение режима натяжений» цифрового двойника процесса холодной прокатки.

Ключевые слова: процесс холодной прокатки, стан холодной прокатки, цифровой двойник, натяжение полосы, натяжение на входе в первую клетку, натяжение в межклетевых промежутках, натяжение на выходе из последней клетки, натяжение при смотке, уровень натяжения, качество поверхности полосы, энергоэффективность.

Введение

На основании меморандума, опубликованного консорциумом промышленного интернета [1], цифровой двойник (ЦД) можно рассматривать как цифровое отображение характеристик состояния и поведения некоторого объекта с целью достижения целей проектирования, производства эксплуатации или обслуживания. Принципиальной особенностью цифрового двойника является постоянный обмен информацией с отображаемой физической системой [2]. На основании данных о ее текущем состоянии ЦД должен прогнозировать поведение системы, генерировать и передавать ей информацию, необходимую для изменений, которые обеспечат достижение цели функционирования системы в следующие моменты времени.

Процесс холодной прокатки (ХП) осуществляется системой «Стан холодной прокатки – Полоса» (СХП-П), цель функционирования которой – получении продукции заданного качества в необходимом количестве [3]. Для достижения указанной цели важное значение имеет начальная настройка стана (СХП). Соответственно, ЦД системы СХП-П должен обладать функциями синтеза рациональных режимных параметров прокатки и определения на их основе необходимых управляющих воздействий на элементы СХП.

Важной составляющей режима прокатки является натяжение, которое считают стабилизирующим фактором процесса [4, 5]. Однако объективно возник-

ающая неравномерность распределения натяжения по ширине полосы может привести как к неплоскостности, так и к обрыву полосы [4–7]. Переднее натяжение снижает нагрузку на двигатель клетки, но заднее натяжение, создаваемое той же клетью, увеличивает нагрузку двигателя. При рациональном превышении переднего натяжения над задним в клетях непрерывного стана суммарные энергозатраты уменьшаются на 2,5–5,6% [8], а превышение заднего натяжения над передним может вызвать пробуксовку валков по полосе. В то же время при рациональном превышении заднего натяжения над передним повышается качество поверхности полосы за счет улучшения отпечатываемости микрогеометрии валков на ее поверхности и уменьшения остаточной загрязненности [9].

Неоднозначность влияния натяжения на процесс прокатки обуславливает необходимость для его обоснования решать задачу многокритериальной оптимизации с учетом динамических явлений в СХП-П [10–11]. Однако при этом осложняется работа цифрового двойника в режиме реального времени. Поэтому целесообразно применять зависимости, которые, отображая опыт работы различных станов холодной прокатки, позволят выбирать рациональные натяжения в режиме реального времени.

Натяжение в межклетевых промежутках

Исследование режимов прокатки на пятиклетевом стане 2000, совмещенном с травильным агрегатом [12] показало, что в межклетевых промежутках наблюдается небольшое превышение усилия переднего натяжения Q_{i1} над задним Q_{0i} (рис. 1, а). Для них

показатель $\Delta Q_i/b_0 = (Q_{0i} - Q_{1i})/b_0$ (здесь b_0 – ширина полосы на входе в стан) отрицательный и примерно постоянный (в пределах от -0,01 до -0,03 кН/мм). В то же время для клетки 1 превышение переднего натяжения над задним (область 1 на рис. 1, а) более значительное (от -0,05 до -0,12 кН/мм). В клетях 5, из которой полоса выходит на моталку, наоборот, наблюдается превышение заднего натяжения над передним, которое достигает 0,2 кН/мм (область 2 на рис. 1, а).

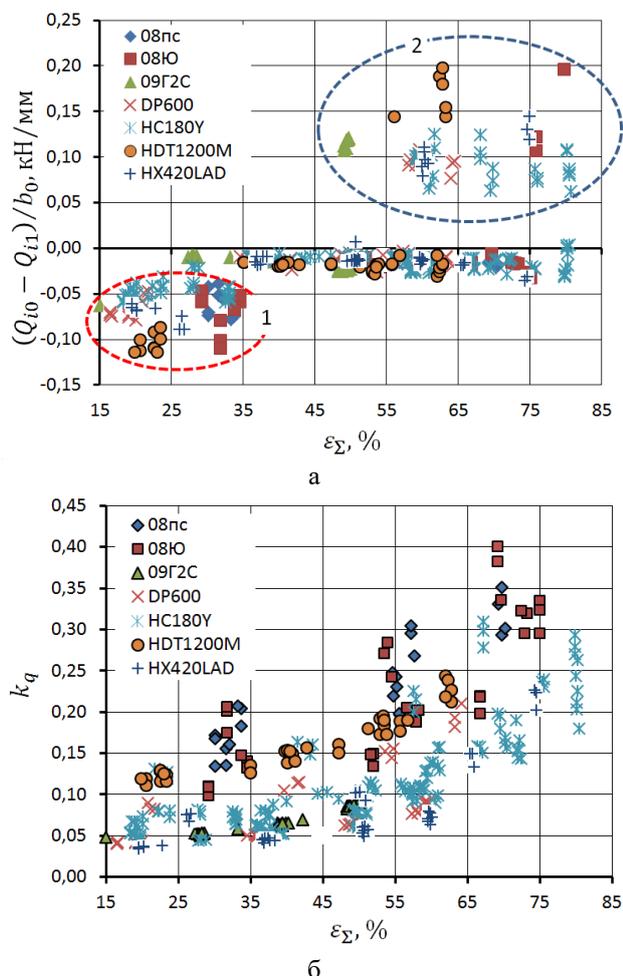


Рис. 1. Особенности соотношения между передним и задним усилиями натяжения на участках стана холодной прокатки (а) и уровень межклетевого натяжения в зависимости от суммарного накопленного обжатия (б)

На рис. 1 величина $\epsilon_{\Sigma i} = 100(H_0 - h_i)/H_0$ представляет собой суммарное накопленное обжатие от толщины подката H_0 до толщины полосы h_i на выходе из i -й клетки. Величина $\epsilon_{\Sigma i}$ не влияет на $\Delta Q_i/b_0$ (см. рис. 1, а), но является значимым фактором уровня межклетевых натяжений (см. рис. 1, б) $k_q = q_1/\sigma_T$ (здесь q_1 – среднее удельное переднее натяжение; σ_T –

предел текучести полосы). В исследовании [13] получена следующая аппроксимация уровня натяжений между клетями стана холодной прокатки:

$$k_{qi} = 0,16 + 8 \cdot 10^{-6} \epsilon_{\Sigma i}^2 + \left(1 - \frac{325}{\sigma_H}\right) \times \left[0,103 - 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{R}{h_i}\right] - 0,4 \cdot \left(1 - \frac{325}{\sigma_H}\right)^2, \quad (1)$$

$$(R^2 = 0,963; F_p = 553,074; F_{95} = 2,406),$$

где σ_H – предел текучести подката, МПа; R – радиус бочки рабочего вала; R^2 – показатель достоверности аппроксимации; F_p – расчетное число Фишера; F_{95} – табличное число Фишера при доверительной вероятности 95%.

Натяжение на выходе из последней клетки

На выходе из последней клетки (номер N) натяжение может создаваться либо моталкой (как на станах 1700, 630 и 2500 ММК), либо натяжными роликами (как на станах 2000 ММК и 2000 НЛМК). При сматывании полосы в рулон для обеспечения необходимой плотности смотки среднее удельное натяжение со стороны моталки q_{cm} должно быть не менее 25-30 МПа, а для предотвращения сваривания витков – не более 100 МПа [14]. Э.А. Гарбер рекомендует [15] использовать при смотке удельное натяжение q_{1N} примерно в 5 раз меньше, чем в последнем межклетевом промежутке $q_{0N} : q_{cm} = q_{1N} = (0,20 - 0,22) q_{0N}$. На практике соотношение q_{1N}/q_{0N} может изменяться от 0,15 до 0,55. При толщине полос более 1,5 мм интервал разброса сужается до 0,15–0,30 (рис. 2, а). Отчетливого влияния толщины на q_{1N}/q_{0N} не проявляется, но достаточно четко наблюдается взаимосвязь между толщиной и удельным натяжением (рис. 2, б).

На величину q_{1N} также влияют способ создания натяжения, а также соотношения b_0/h_k и R/h_k . На станах 2000 ММК и 2000 НЛМК, которые работают в режиме бесконечной прокатки, переднее натяжение в последнем проходе создается специальными тянущими роликами. При толщине полосы менее 1 мм натяжение находится в пределах от 50-100 МПа и снижается до 10-30 МПа в случае прокатки более толстых полос. Отображением указанных закономерностей является аппроксимация

$$q_{1N} = 81,6 + 0,098 R/h_k - h_k (14,71 - 0,034 b_0/h_k), \quad (2)$$

$$(R^2 = 0,869; F_p = 190,163; F_{95} = 2,711).$$

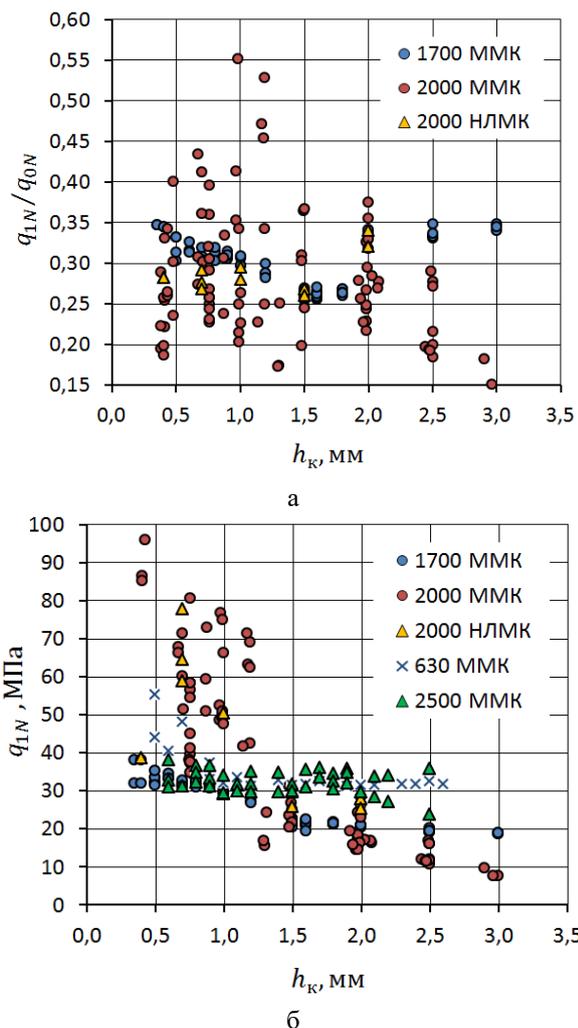


Рис. 2. Зависимость переднего натяжения в последнем проходе при холодной прокатке на различных станах от толщины полосы

На станах 1700, 630 и 2500 ММК натяжение после последнего прохода создается моталками. В таких случаях удельное натяжение находится в пределах 40-60 МПа при толщине полосы до 1,5 мм и снижается до 20-40 МПа при $h_k > 1,5$ мм. Аппроксимация указанных закономерностей имеет вид

$$q_{1N} = 51,1 + 0,033R/h_k - h_k(0,005b/h_k + 0,061R/h_k), \quad (3)$$

($R^2=0,893$; $F_p=239,246$; $F_{95}=2,660$).

Натяжение на входе в первую клеть

Заднее натяжение в первом проходе приложено к горячекатаному подкату. Чем больше усилие Q_{01} , тем выше устойчивость полосы относительно линии прокатки и меньше вероятность трансформации в первой клетке неплоскостности подката в складки на полосе. Однако чрезмерное натяжение подката может стать причиной образования на полосе дефекта «полосы-

линии скольжения», пробуксовок валков и перегрузки их привода [14, 15, 16]. По данным Э.А. Гарбера [15] рациональное заднее среднее удельное натяжение в первом проходе q_{01} составляет 0,2–0,5 от величины переднего натяжения в том же проходе q_1 . Исследования, выполненные нами на станах 1700 и 2000 ММК (рис. 3), показали, что указанное соотношение наблюдается на стане 2000, где натяжение на входе в первую клеть создается специальными натяжными роликами, и при этом с увеличением толщины подката отношение q_{01}/q_1 уменьшается. На стане 1700, где натяжение на входе в первую клеть создается барабанным разматывателем, соотношение q_{01}/q_1 колеблется в пределах от 0,15 до 0,20 и при этом увеличение толщины подката возрастает (рис. 3, а). Наиболее четко особенности влияния толщины подката проявляются в изменчивости среднего удельного натяжения (рис. 3, б).

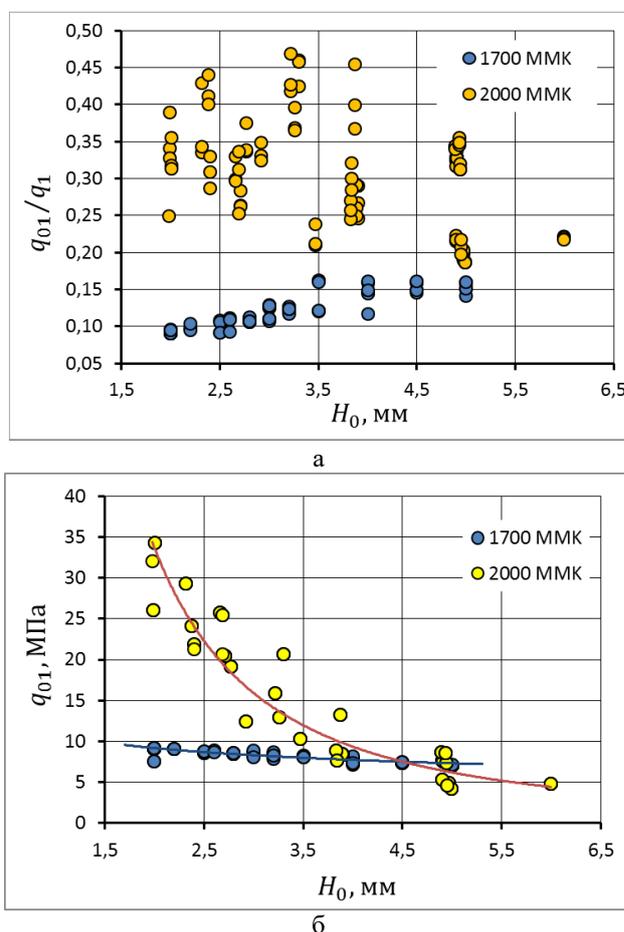


Рис. 3. Зависимость заднего натяжения при холодной прокатке в первом проходе от толщины подката

Таким образом, натяжение подката необходимо характеризовать средним удельным натяжением, а рациональную величину выбирать в зависимости от особенностей оборудования, создающего натяжения.

В случае применения натяжных роликов

$$q_{01} = 1010 \cdot H_0^{-1,918} (b_0/H_0)^{-0,337}, \quad (4)$$

($R^2 = 0,915$; $F_p = 471,354$; $F_{95} = 3,104$).

Если натяжение создается размотателем, то

$$q_{01} = 10,54 \cdot H_0^{-0,255} (b_0/H_0)^{0,007}, \quad (5)$$

($R^2 = 0,8965$; $F_p = 376,79$; $F_{95} = 3,124$).

Алгоритм обоснования первого приближения режима натяжений

С учетом изложенных результатов разработали алгоритм синтеза первого приближения режима рациональных натяжений, блок-схема которого представлена на рис. 4.

Сначала определяется удельное натяжение подката. Если горячекатаная полоса поступает непосредственно с размотателя, используется формула (5). Если применяются натяжные ролики, расчет выполняется по формуле (4). Затем вычисляются усилие и уровень натяжения подката. Далее вычисляются уровень натяжения, а также удельное и полное натяжение в межклетевых промежутках. В последнем проходе при

прокатке на станах, на которых полоса поступает непосредственно на моталку, величина q_{1N} определяется по формуле (3). Если перед моталкой установлены натяжные ролики, переднее натяжение в переднем проходе задается на основании зависимости (2). По найденным значениям удельных натяжений определяются усилие и уровень натяжения.

Заключение

Для обоснования величины натяжения полосы при использовании цифрового двойника процесса холодной прокатки в режиме реального времени изучены особенности натяжения на различных участках станов холодной прокатки. Построены множественные аппроксимации, которые отображают известный положительный опыт работы различных станов с достоверной вероятностью 95 %. На основании указанных зависимостей разработан алгоритм функции «Первое приближение режима натяжений» цифрового двойника процесса холодной прокатки, который позволяет разрабатывать энергоэффективные технологии производства холоднокатаного проката различного назначения с повышенным качеством поверхности (в том числе высокопрочного) на станах различных видов.

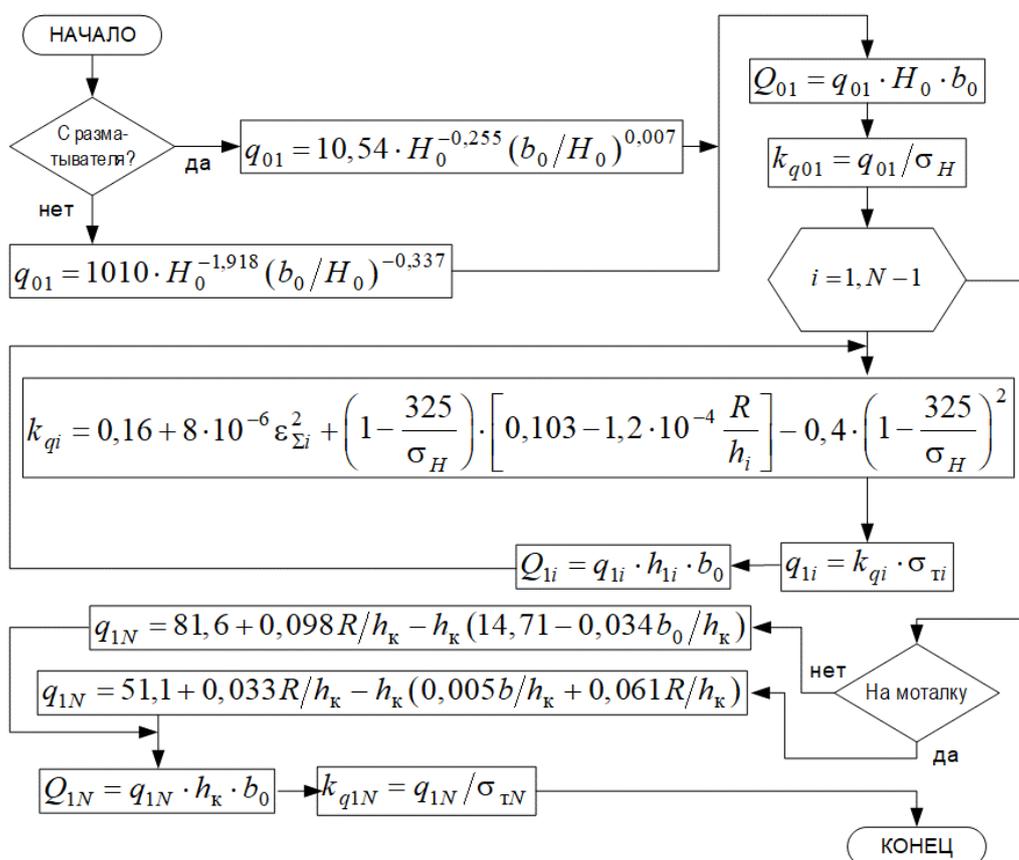


Рис. 4. Алгоритм функции «Обоснование первого приближения режима натяжений» цифрового двойника процесса холодной прокатки

Список литературы

1. Malakuti S., van Schalkwyk P., Boss B., Sastry C.R., Runkana V., Lin S.-W., Rix S., Green G., Beachle K., Nath S.V. Digital Twins for Industrial Applications 2020. Available online: https://www.iiconsortium.org/pdf/ИС_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf (accessed on 27 April 2020).
2. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / Радионов А.А., Карандаев А.С., Логинов Б.М., Гасиярова О.А. // Известия вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 1. С. 54-68. DOI:10.17213/0136-3360-2021-1-54-68.
3. Румянцев М.И. Методы разработки и улучшения технологий производства проката для совершенствования листопрокатных технологических систем // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4 (23). С. 26-36.
4. Железнов Ю.Д., Кузнецов В.Л., Рокотян Г.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. М.: Металлургия, 1975. 376 с.
5. Настич В.П., Божков А.И. Управление качеством холоднокатаных полос. М.: Интернет Инжиниринг, 2006. 216 с.
6. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. М.: Теплотехник, 2008. 336 с.
7. Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке / С.М. Бельский, И.П. Мазур, С.Н. Лежнев, Е.А. Панин. Темиртау: КГИУ, 2016. 161 с.
8. Shalaevskiy D.L., Kozhevnikov A.V. Algorithm and design methodology for energy-efficient sheet products production technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 4. Ser. "4th International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy, SATPIFM 2019" 2020. С. 012015.
9. Влияние режимов холодной прокатки и микрогеометрии валков на шероховатость холоднокатаных полос / Э. А. Гарбер, П. Б. Горелик, Е. В. Делигенский [и др.] // Производство проката. 1999. № 6. С. 7-10.
10. Shafiei B., Ekramian M., Shojaei K. Robust tension control of strip for 5-stand tandem cold mills // *Journal of Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 13.
11. Kozhevnikov A., Kozhevnikova I., Bolobanova N. Development of the model of cold rolling process in dynamic conditions // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 366-372.
12. Анализ особенностей режимов работы травильно-прокатного агрегата 2000 ОАО «ММК» / Б.А. Сарычев, С.В. Денисов, А.В. Горбунов, М.И. Румянцев [и др.] // Труды IX конгресса прокатчиков. 2013. С. 141-146.
13. Обоснование натяжения полосы в цифровом двойнике стана холодной прокатки / М.И. Румянцев, А.Н. Завалищин, А.Н. Колыбанов, О.Н. Есипова // Черные металлы. 2021. № 11. С. 55-60. DOI: 10.17580/chm.2021.11.10.
14. Эффективная технология холодной прокатки тонколистовой стали на непрерывных станах / Ф.И. Зенченко, А.В. Ноговицын, В.Л. Мазур [и др.] // Сталь. 1985. № 1. С. 43-48.
15. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). М.: ОАО «Черметинформация», 2004. 416 с.
16. Tarnopolskaya T., Yuen W. Y. D. Analysis of the Effect of Tension at the Entry of Cold Rolling Mill on the Stability of Strip Tracking // *ISIJ International*, vol. 45 (2005), no. 9, pp. 1316-1321.

Сведения об авторах

Румянцев Михаил Игоревич – профессор кафедры технологий обработки материалов, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru

Завалищин Александр Николаевич – профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zavall313@mail.ru

Колыбанов Алексей Николаевич – аспирант кафедры технологий обработки материалов, группа МТ-19-2, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: aleexeev@gmail.com

Ахмадиев Кирилл Радикович – студент программы бакалавриата, группа ММп-18-2, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kirill.ahmadiev97@gmail.com

STRIP TENSION FEATURES AT DIFFERENT A COLD ROLLING MILL SECTIONS AND DISPLAY IN THE DIGITAL TWIN OF THE PROCESS

Rumyantsev Mikhail I. – Professor of the Department of Material processing, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru

Zavalishchin Aleksandr N. – Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaval1313@mail.ru

Kolybanov Alexey N. – Postgraduate student of the Department of Material processing, group MTa-19-2, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleeexeev@gmail.com

Akhmadiev Kirill R. – Undergraduate student, group ММп-18-2, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kirill.ahmadiev97@gmail.com

Abstract. One of the local tasks of the cold rolling process the digital twin is the tensions selection that will contribute to obtaining a given quality strip with the required productivity. Since the tension influence on the rolling process is not unambiguous, the problem of choosing a rational tension is a multi-criteria optimization problem, which makes it difficult to use the digital twin in real time. To substantiate the tension magnitude when using a digital twin in real time, the tension dependences on the process parameters have been studied at different cold rolling mills sections - at the entrance to the first stand, in the inter-stand gaps, at the exit from the last stand and during coiling. According to the study results, multiple approximations were constructed, reliable with a confidence level of 95%.

These approximations reflect the well-known positive experience of various cold-strip mills and allow the development energy-efficient technologies for the cold-rolled steel production for various purposes with an increased surface quality (including high-strength) on various rolling mills. The function the algorithm "The tension mode first approximation" of the cold rolling process digital twin has been developed.

Keywords: cold rolling process, cold rolling mill, digital twin, strip tension, tension at the entrance to the first stand, tension in the inter-stand gaps, tension at the exit of the last stand, tension during coiling, tension level, strip surface quality, energy efficiency

Ссылка на статью:

Особенности натяжения полосы на различных участках стана холодной прокатки и их отображение в цифровом двойнике процесса / М.И. Румянцев, А.Н. Завалишин, А.Н. Колыбанов, К.Р. Ахмадиев // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 19-24.

Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N., Kolybanov A.N., Akhmadiev K.R. Strip tension features at different a cold rolling mill sections and display in the digital twin of the process. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 19-24.

УДК 621.789

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г.

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация. Исследованы с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) фазовые превращения в образцах промышленного алюминиевого сплава стандартного химического состава Д16, подвергнутых термической обработке (закалке) и асимметричной прокатке, основанной на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования окружных скоростей валков ($V_1=10$ об/мин и $V_2=1,5$ об/мин). На кривой ДСК нагрева зафиксированы эндотермические и экзотермические пики, ответственные за растворение и выделение метастабильных и стабильных упрочняющих фаз. Установлены значения температур начала, пика и конца фазового перехода. Показано, что процесс распада алюминиевого твердого раствора в сплаве после асимметричной прокатки имеет свои значимые отличия от распада сплава Д16 после термической обработки. Для образца сплава Д16 после асимметричной прокатки на кривой ДСК зафиксировано наличие в температурном интервале 562-580 °С эндотермического пика, предположительно соответствующего растворению высоколегированной медью γ_2 -фазы (Cu_3Al_4), и его отсутствие на кривой ДСК образца после термообработки. Полученные результаты исследования информативны и значимы для объяснения механизма упрочнения алюминиевых сплавов при интенсивной пластической деформации, в частности при асимметричной прокатке.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, асимметричная прокатка, алюминиевый сплав, Д16, кривая ДСК, фазовые превращения.

Введение

Алюминиевые сплавы, особенно термически упрочняемые системы Al-Cu-Mg (дуралюмины), относятся к конструкционным материалам, широко используемым в самолетостроении, автомобильной и других отраслях промышленности вследствие их малой плотности и высокой удельной прочности. Наиболее эффективным путем дальнейшего повышения прочности и других эксплуатационных и технологических характеристик алюминиевых сплавов является формирование в их объеме ультрамелкозернистой и/или нанокристаллической структуры на основе применения различных схем интенсивной пластической деформации (ИПД) [1-3].

Отметим, что в последние годы широкое применение приобрели высокоэффективные способы получения ультрамелкозернистых материалов на основе процессов асимметричной прокатки, совмещающих в одной схеме деформирования процессы собственно прокатки (осуществляющиеся в основном за счет трансляционного механизма деформации) и сдвига (за счет реализации ротационного механизма). При такой схеме деформирования происходит включение дополнительного канала размножения дислокаций, что позволяет значительно повысить концентрацию дефектов, которые принимают участие в структурообразовании [4].

В процессе ИПД сплавов аккумуляция внешней энергии системой атомов основы и легирующих элементов вызывает их смещение из равновесных положений (узлов кристаллической решетки). При этом формируются пары: дислоцированные атомы – вакансионные комплексы, являющиеся носителями избыточной энергии и своего рода «стоками» и «транспортом» для перераспределяющихся легирующих атомов.

В результате образуются пересыщенные твердые растворы и неравновесные предвыделения интерметаллидных фаз. Поэтому для достижения высоких прочностных и пластических свойств легированных сплавов необходимо помимо твердорастворного и зернограничного учитывать вклад дисперсионного упрочнения и твердофазные превращения под действием деформации [5].

Изучению связи между структурным состоянием и прочностными свойствами стареющих алюминиевых сплавов посвящено большое количество работ [6-10]. Исследован с помощью методов физико-химического анализа, в частности световой и сканирующей электронной микроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), механизм распада пересыщенных твердых растворов и последовательность выделений зон Гинье-Престона (ГП), метастабильных и стабильных фаз, предложены теории предела текучести и деформационного упрочнения дисперсионно-твердеющих сплавов. Однако исследования, посвященные изучению влияния асимметричной прокатки на процессы, протекающие в матрице алюминиевых сплавов, отсутствуют. Опубликованные работы в этой области посвящены в основном эффективности влияния рассогласования окружных скоростей рабочих валков на энергосиловые и геометрические параметры прокатываемых полос и лент из различных металлов и их сплавов, в том числе из сплавов системы Al-Cu-Mg.

Целью настоящей работы явилось исследование фазовых превращений алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg после асимметричной прокатки методом ДСК.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служил промышленный сплав Д16 стандартного химического состава, леги-

рующие элементы (Cu, Mg, Mn) которого обеспечили повышение прочности по механизму твердорастворного упрочнения (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав (легирующие элементы и примеси) сплава Д16 (ГОСТ 4784-2019)

Марка сплава	Массовая доля элементов, %								
	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Cr	Ti	Al
				Не более					
Д16	3,8-4,9	1,2-1,8	0,30-0,9	0,25	0,5	0,5	0,10	0,15	Остальное

Образцы (20×1000 мм) в виде полос толщиной 6,0 мм (исходное состояние), вырезанные из горячекатаного листа, подвергали термической обработке (закалке) и процессу асимметричной прокатки, основанной на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования окружных скоростей валков [11].

Закалку выполняли при температуре 495°С с последующим охлаждением в воде. Далее проводили естественное старение при комнатной температуре в течение 5 суток. Асимметричную прокатку образцов с толщины 6 до 0,9 мм проводили в лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на опытно-экспериментальном лабораторном стане дуо с индивидуальным приводом рабочих валков при комнатной температуре и окружной скорости валков $V_1=10$ об/мин и $V_2=1,5$ об/мин соответственно. Технические характеристики стана представлены в работе [12].

Экспериментальные исследования выполняли на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы «Netzsch» (Германия), работающем в интервале температур 20–1500°С под управлением программного пакета Proteus, с помощью которого производили все необходимые измерения и обработку полученных результатов. Обработка полученных результатов сводилась к выявлению определенных характеристик термического эффекта, в роли которых выступают

температуры начала, окончания и пика эффекта, а также перегибов в области термического эффекта.

Для экспериментов вырезали образцы, имеющие форму дисков диаметром 3 мм и высотой 1 мм, шлифовали их поверхность с помощью наждачной бумаги, обезжиривали ацетоном. Измерения проводили в корундовых тиглях, закрытых крышкой с отверстием. В качестве эталона использовали пустой корундовый тигель. Перед проведением анализа прибор калибровали по температурам плавления эталонов, в качестве которых были использованы чистые металлы. Ошибка измерения температуры не превышала $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Термические кривые образцов записывали со скоростью 10°С/мин в потоке аргона (газ защитный – 10 см³/мин, рабочий – 30 см³/мин) в диапазоне температур 30–750°С.

Результаты исследования и обсуждение

На кривой ДСК (рис. 1) для образца сплава Д16 после термической обработки и естественного старения можно отметить два интервала температур, в которых фиксируются термические эффекты: от 100 до 300°С и от 500 до 700°С. В первом интервале эндотермические эффекты с максимумами пика при 109 и 199°С соответствуют растворению зон ГП, богатых медью и магнием, и метастабильной θ' -фазы, имеющей кристаллическую решетку, отличную от твердого раствора и от стабильной θ -фазы (Al_2Cu). При дальнейшем повышении температуры выше 200°С на кривой ДСК фиксируются процессы, идущие с незначительным выделением теплоты (перегиб при температуре 238°С), соответствующий превращению θ' -фазы в стабильную θ -фазу и формированию S-фазы (Al_2CuMg). Незначительный эндотермический эффект в диапазоне температур 500–517°С соответствует растворению интерметаллидных θ и S-фаз. Эндотермический эффект, наблюдаемый в диапазоне температур 618–657°С, объясняется плавлением α -твердого раствора сплава Д16. Пик этой реакции приходится на 644°С.

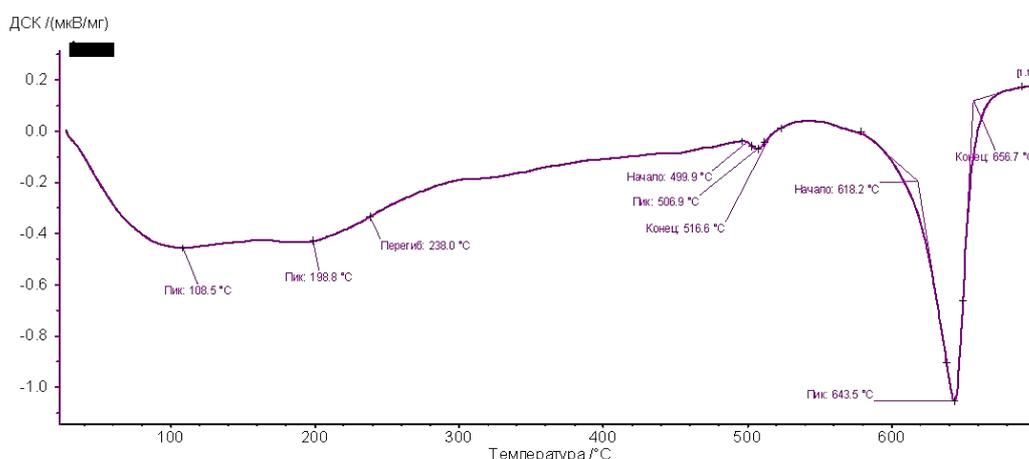


Рис. 1. Кривая ДСК нагрева алюминиевого сплава Д16 после термической обработки и естественного старения

Таким образом, после закалки при температуре 495°C и последующего естественного старения в сплаве Д16 основной структурной составляющей является α -твердый раствор и интерметаллидные фазы $S(Al_2CuMg)$ и $\theta(Al_2Cu)$, что согласуется с результатами исследований, представленными в работе [13].

Необходимо отметить, что в сплавах системы Al-Mg-Cu возможно образование других фаз, влияние которых на механические свойства описывается в литературе [14]. С одной стороны, такие фазы не дают абсолютного вклада в прочность, с другой – они связывают собой элементы, которые могли бы стать частью упрочняющих фаз. Например, T-фаза состава $Al_{12}Mn_2Cu$ повышает температуру рекристаллизации и незначительно механические свойства. Фазы составов $(Mn,Fe)Al_6$ и Al_2Cu_2Fe при образовании приводят к снижению прочности и пластичности, как и прочие железистые соединения. Существуют также фаза Mg_2Si и W-фаза состава $Al_xMg_3Cu_6Si_4$. Эти фазы и им подобные дают некоторое упрочнение, но относительное разупрочнение от обеднения материала растворенными компонентами гораздо больше, поэтому данные фазы считаются вредными и определить их методами термического анализа не представляется возможным из-за их незначительного содержания. Для их определения используют металлографические методы.

На кривой ДСК, снятой на деформированных образцах после асимметричной прокатки (рис. 2), видно, что на термограмме отсутствует пик при 109°C. Это может быть связано с тем, что ИПД, увеличивая плотность несовершенств кристаллической решетки, ускоряет все диффузионные процессы и за время асимметричной прокатки в сплаве полностью протекает стадия выделения зон ГП. Кроме того, четко прослеживается смещение второго пика в сторону более низких температур (186°C).

Очевидно, что более высокая степень деформации делает сплав термодинамически менее стабиль-

ным и увеличивает скорость распада пересыщенного твердого раствора и, как следствие, старение сплава в таких условиях идет более интенсивно. В интервале температур 200–300°C наблюдается очень слабое проявление экзотермического эффекта, связанного с процессом синтеза интерметаллических фаз типа $AlCu$, $AlCu_3$, Al_2Cu , Al_4Cu_9 и др. [15]. Надо отметить, что на кривой ДСК фиксируется еще дополнительный пик в диапазоне температур 562–580°C, который может соответствовать высоколегированной медью γ_2 -фазе (Cu_9Al_4), которая ранее была обнаружена в сплаве Д16 после интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) [16]. Как было показано в работе [17], в равновесных условиях γ_2 -фаза (Cu_9Al_4), согласно диаграмме Cu-Al, формируется в результате высокотемпературного (при 565°C) распада фазы Cu_3Al на эвтектоидную смесь ($\alpha + \gamma_2$) фаз.

Заключение

В результате асимметричной прокатки с рассогласованием окружных скоростей рабочих валков в алюминиевом сплаве Д16 происходит формирование зон α -твердого раствора на основе Al, пересыщенных атомами Cu. В таких зонах происходит твердофазное превращение (перемешивание, механическое легирование), способствующее повышению твердости и прочности сплава Д16 за счет выделения высоколегированных медью (84,2%) частиц γ_2 -фазы (Cu_9Al_4). Полученные результаты исследования однозначно свидетельствуют в пользу того, что процесс распада алюминиевого твердого раствора в асимметрично прокатанном сплаве имеет свои значимые отличия от распада сплава Д16 после термической обработки. Это выражается в разнице выделившихся интерметаллических фаз, способствующих повышению твердости и прочности сплава Д16, прежде всего за счет дисперсионного (межфазного) вклада в упрочнение.

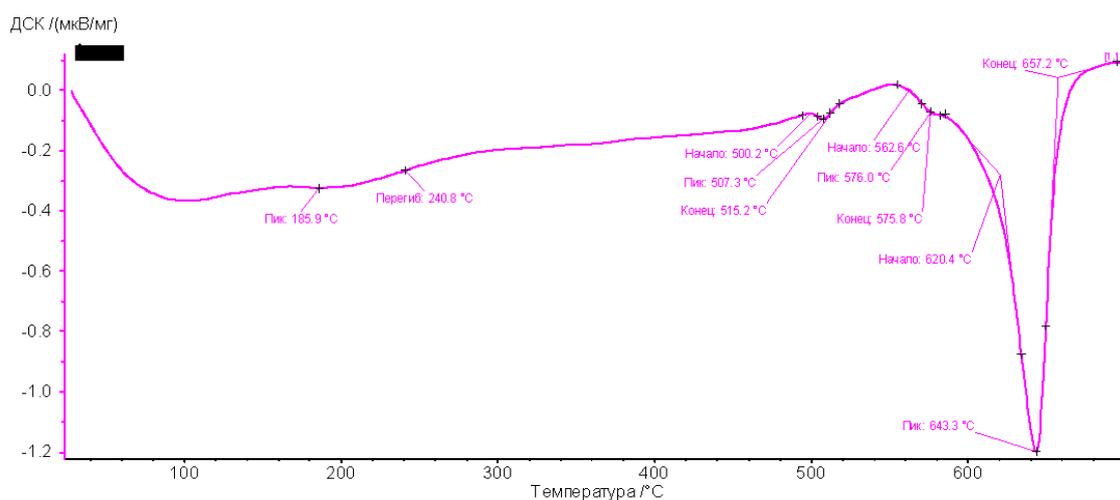


Рис. 2. Кривая ДСК нагрева алюминиевого сплава Д16 после асимметричной прокатки и естественного старения

Список литературы

1. Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Свердлик М.К. Математическое моделирование эволюции зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия и сплава 7075 // Вестник Магнитогорского государственного университета им. Г.И. Носова. 2015. № 4. С.81-87.
2. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // Materials Science and Engineering A: Structural Materials Properties Microstructure and Processing. 2009. Vol. 499. Iss. 1-2. P.14-17.
3. Рааб Г.И. Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объемных ультрамелкозернистых материалов // Вестник УГАТУ. 2004. № 3(11). С. 67-75.
4. Получение высокопрочных титановых лент путем консолидации порошка с использованием технологии асимметричной прокатки / К.А. Гогаев, В.С. Воропаев, Ю.Н. Подрезов, Я.И. Евич, В.И. Даниленко // Физика и техника высоких давлений. 2016. Т. 26. № 3-4. С. 5-19.
5. Skotnikova M. A., Martynov M. A. Practical Electron Microscopy in Mechanical Engineering. Monograph. St. Petersburg: St. Petersburg Institute of mechanical engineering, 2005. 92 p.
6. Особенности структуры алюминиевого сплава Д16, интенсивно деформированного при температуре жидкого азота / Е.В. Автократова, С.В. Крымский, М.В. Маркушев, О.Ш. Ситдиков // Письма о материалах. 2011. Т. 1. С. 92-95.
7. Вальтер А.И., Шамордин М.В. Влияние параметров охлаждения при кристаллизации на структуру и свойства алюминиевых сплавов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 1. С.166-170.
8. Маркушев М.В. О природе разрушения и трещиностойкости интенсивно пластически деформированных алюминиевых сплавов // Деформация и разрушение металлов. 2007. № 12. С. 26-32.
9. Исследование покрытий на алюминиевом сплаве Д16, полученных методом микродугового оксидирования / Р.Р. Гринь, Ф.Ф. Кутусова, Н.Ю. Дударева, И.В. Александров, Ф.Ф. Мусин // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 8 (61). С. 143-148.
10. Panigrahi S.K., Jayaganthan R. Development of ultrafine-grained Al 6063 alloy by cryorolling with the optimized initial heat treatment conditions // Materials & Design. 2011. Vol. 32. Iss. 4. P. 2172-2180.
11. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 622-623. P. 929-935.
12. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 3. С. 81-96.
13. Воробьев Р.А., Сорокина С.А., Евстифеева В.В. Фазовый состав деформируемых алюминиевых сплавов Д16 и В95 с количественной оценкой пережога разных стадий развития // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. № 1. С. 68-78.
14. Елисеев А.А. Закономерности структурно-фазовых превращений в термоупрочняемых алюминиевых сплавах при сварке трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием: автореф. дис. ... канд. техн. наук (01.04.07) / Елисеев Александр Андреевич; ИФПМ СО РАН. Томск, 2018. 18 с.
15. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и свойства алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg / О.В. Паитова, Е.В. Бобрук, С.А. Шашерина, М.А. Скотникова // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 6. С. 569-576.
16. Влияние условий деформации сдвигом под давлением на твердофазные превращения в системе Al-Cu / А.К. Муртазина, М.Р. Лукманов, Л.У. Киеккужина, В.Н. Даниленко // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы – 2018: сб. трудов. Уфа: БашГУ, 2018. С. 129.
17. Burnyshev I.N., Valiakhmetova O. M., Lys V.F. Multicomponent diffusion saturation of cuprous alloys // Chemical physics and mesoscopy. 2010. Vol. 12. No. 4. P. 519-525.

Сведения об авторах

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pesin@bk.ru

Пустовойтов Денис Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru

Пивоварова Ксения Григорьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

PHASE TRANSFORMATIONS IN ALUMINUM ALLOY OF THE Al-Cu-Mg SYSTEM UNDER INTENSE PLASTIC DEFORMATION

Pesin Alexander M. – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pesin@bk.ru

Pustovoytov Denis O. – Ph. D (Eng.), associate Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru

Pivovarova Ksenia G. – Ph. D (Eng.), associate Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

Abstract. Phase transformations in samples of industrial aluminum alloy of standard chemical composition D16 subjected to heat treatment and asymmetric rolling based on purposefully created asymmetry due to mismatch of the circumferential speeds of the rolls ($V_1=10$ rpm and $V_2=1.5$ rpm) were investigated using differential scanning calorimetry (DSC). Endothermic and exothermic peaks responsible for the dissolution and release of metastable and stable hardening phases are recorded on the DSC heating curve. The values of the temperatures of the beginning, peak and end of the phase transition are established. It is shown that the process of decomposition of aluminum solid solution in the alloy after asymmetric rolling has its significant differences from the decay of alloy D16 after heat treatment. For the D16 alloy sample after asymmetric rolling on the DSC curve, the presence of an endothermic peak in the temperature range 562-580°C, presumably corresponding to the dissolution of the high-alloyed copper γ_2 -phase (Cu₉Al₄), and its absence on the DSC curve of the sample after heat treatment, was recorded. The obtained research results are informative and significant for explaining the mechanism of hardening of aluminum alloys under intense plastic deformation, in particular, during asymmetric rolling.

Keywords: intensive plastic deformation, asymmetric rolling, aluminum alloy, D16, DSC curve, phase transformations.

Ссылка на статью:

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г. Фазовые превращения в алюминиевом сплаве системы Al-Cu-Mg при интенсивной пластической деформации // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 25-29.

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Pivovarova K.G. Phase transformations in aluminum alloy of the Al-Cu-Mg system under intense plastic deformation *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 25-29.

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бондарева А.Р., Чернов В.П.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. Реализация мероприятий по оптимизации энергоэффективности любого технологического процесса требует проведения анализа достигнутых результатов на уровне этого процесса. В работе приведены результаты оценки эффективности энергосберегающего управления процессом нагрева непрерывнолитых заготовок в нагревательной печи толкательного типа перед прокаткой. В результате анализа различных вариантов энергосберегающих режимов нагрева определено, что существует два принципиальных подхода к повышению энергоэффективности процесса нагрева заготовок перед прокаткой: достижение максимальной производительности прокатного стана при улучшении качества нагрева и достижение минимальной себестоимости горячекатаной полосы при сохранении существующей производительности технологического процесса прокатки. Реализация энергосберегающего управления процессом нагрева проводилась для нестационарных условий работы нагревательной печи и действия внешних возмущений. Результаты оценки эффективности реализованного энергосберегающего управления определены по оценке величины удельного расхода топлива на нагрев заготовок перед прокаткой, их конечного температурного состояния и затрат электрической энергии при прокатке заготовки в прокатных клетях стана. Установлено, что использование энергосберегающего управления нагревом металла в нагревательных печах прокатных станов при снижении удельных затрат топлива на нагрев на 2% обеспечило увеличение средней температуры раската на 4-5°C и снижение потребляемой электрической мощности на 0,027 МВт при суточной производительности прокатного стана 9-10 тыс. т/сут.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, нагрев заготовок перед прокаткой, нагревательная печь, энергосберегающий режим нагрева, нагрев металла перед прокаткой, стан горячей прокатки, оптимизация управления нагревом

Введение

Анализ эффективности работы оптимизирующих систем управления технологическим процессом часто сводится только к оценке общих производственных показателей предприятия в целом [1, 2]. Такая ориентация на итоговые показатели работы предприятия без учета влияния оптимизирующего управления на участок технологического процесса, к которому оно применяется, и ориентированная только на снижение материальных, энергетических и экономических затрат, губительна для управляемого производства. Это просто неизбежно, если не учитывается и не обеспечивается сохранение или даже увеличение объема производства и безусловное сохранение или даже улучшение качества конечного продукта.

Методика оценки экономической эффективности при реализации системы оптимизирующего управления реальным технологическим производственным процессом с учетом экономических показателей должна использоваться на том же уровне технологического процесса, на котором реализовывается система оптимального управления. Рассмотрим в качестве конкретного примера анализ результатов использования энергосберегающего процесса нагрева крупногабаритных и непрерывнолитых заготовок в нагревательных печах высокопроизводительного широкополосного стана горячей прокатки (ШСП).

Прокатный стан оборудован шестью нагревательными печами. Система оптимального управления нагревом реализована на одной нагревательной печи (печь №2 – опытная нагревательная печь). Остальные нагревательные печи реализовывали регламентированный нагрев заготовок. Заготовки выгружаются из

нагревательных печей последовательно и поступают в линию прокатного стана (рис. 1).

Таким образом, каждая шестая прокатываемая заготовка нагревалась по энергосберегающей технологии нагрева. Производилось сравнение параметров раската в прокатной клетке №4 для заготовок, которые нагревались с использованием регламентированной технологии нагрева, и заготовок, нагреваемых с использованием энергосберегающей технологии.

Отличительной особенностью рассматриваемого технологического процесса является наличие интенсивных технологических и производственных возмущений, оказывающих значительное влияние на итоговые параметры оценки эффективности управления процессом нагрева металла [3, 4]. К таким параметрам относятся [4]:

- величина удельного количества природного газа, затраченного на нагрев одной тонны; $\text{м}^3/\text{т}$;
- температурное состояние нагретого металла по температуре раската после черновой группы стана, °С;
- затраты электроэнергии при прокатке металла в черновой группе валков стана, МВт.

При реализации системы оптимизирующего управления процессом нагрева, кроме извлечения максимальной прибыли, необходимо формирование воздействий по повышению качества нагрева металла.

В условиях нестационарного режима работы широкополосного стана горячей прокатки (ШСП), когда часовая производительность непредсказуемо изменяется от 100 до 1000 т/ч, а суточная доля посада неостывших непрерывнолитых заготовок со средней температурой более 500°C изменяется от 48 до 87% от общего количества, обеспечение своевременного и качественного нагрева металла представляет достаточно сложную задачу [5].

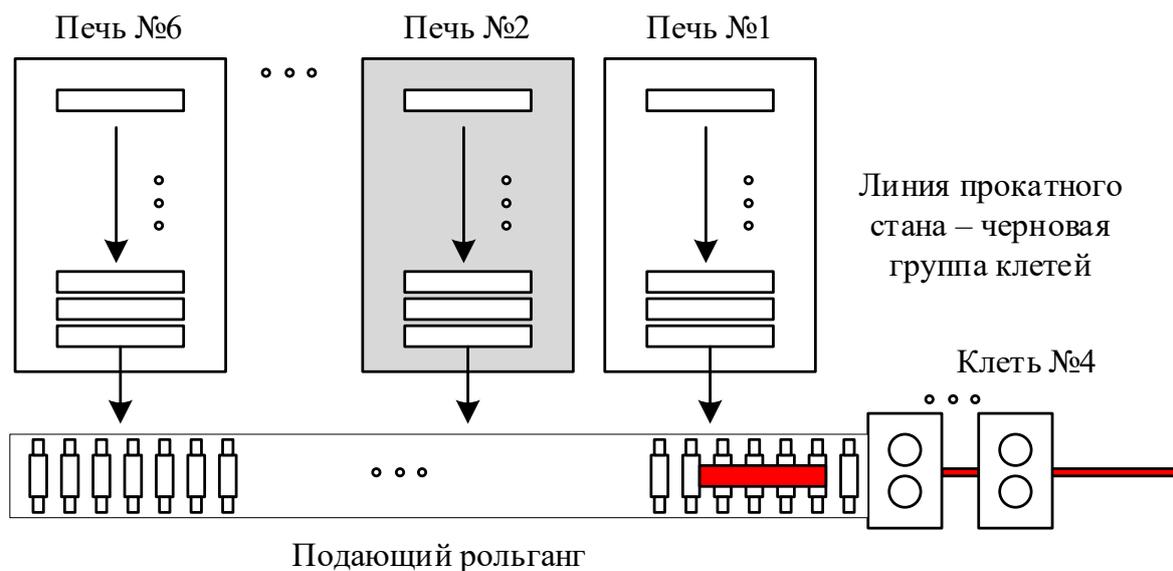


Рис. 1. Подача нагретых заготовок с участка нагрева на участок прокатного стана по подающему рольгангу

Поскольку экономические потери от простоя стана по причине отсутствия нагретого металла значительно превышают экономию природного газа при нагреве металла, то общепринятой концепцией стратегии распределения топлива по зонам нагрева методических печей и сама конструкция печей ориентированы на достижение максимальной производительности печи, то есть на стратегию максимального быстрого действия нагрева.

Это требует интенсификации нагрева, то есть увеличения подачи топлива сразу при входе металла в отапливаемые зоны печи, что увеличивает непроизводительные потери тепловой энергии с отходящими продуктами горения и потери металла с окислением, составляющие значительную (до 50%) долю в себестоимости нагрева [6].

При наличии резерва времени на нагрев, по сравнению с минимальным, в режиме работы печи с максимальной производительностью целесообразен оперативный переход на стратегию энергосберегающего режима управления нагревом при минимизации потерь металла с окислением [4, 7].

Эффективный оптимизирующий энергосберегающий режим управления нагревом, обеспечивающий минимизацию удельного количества топлива и потерь металла с окислением, реализуется при интенсификации режима нагрева на заключительном интервале общего времени нагрева или на конечном участке рабочего пространства нагревательной печи проходного типа [4, 5].

При существующей общепринятой конструкции рабочего пространства нагревательных печей проходного типа, благодаря наличию на выходе рабочего пространства зон выдержки (томильных) с пониженной тепловой нагрузкой, использование энергосберегающего режима управления нагревом проблематич-

но [8].

В условиях нестационарной работы прокатного стана переход на энергосберегающий режим управления нагревом на различных временных интервалах объективно увеличивает вероятность возникновения аварийной ситуации от поломки прокатных валков при прокатке недогретой заготовки [9].

Это справедливое, вполне очевидное и обоснованное обстоятельство необходимо было преодолеть при гарантированной реализации оптимизирующего энергосберегающего управления нагревом в реальных производственных условиях.

Техническое решение проблемы энергосберегающего оптимизирующего управления нагревом металла в условиях нестационарного режима работы ШСГП основано на совершенствовании информационного обеспечения, например при использовании интегрированных систем управления [10].

Совершенствование информационного обеспечения включает решение следующих информационных задач [11]:

1. Создание и реализация системы объективного и достоверного прогноза общего времени нагрева каждой подаваемой на нагрев в печь заготовки на момент её подачи в нагревательную печь с учётом текущей производительности ШСГП, размеров заготовок и скрытых, прогнозируемых и аварийных текущих простоев стана. Достигнутая точность прогноза $\pm 2-3\%$ при изменении общей продолжительности нагрева от 140 до 195 мин.

2. Создание и программная реализация системы оперативного и достоверного определения текущего температурного состояния каждой второй в очереди на выдачу из печи на стан заготовки для объективного контроля ожидаемой температуры раската этой заготовки после черновой группы ШСГП. Достигнута ре-

альная точность прогноза температуры раската в диапазоне $\pm 10^{\circ}\text{C}$ для 75,3%, а с точностью $\pm 20^{\circ}\text{C}$ – 97,4% выданных заготовок.

3. Разработка и реализация системы для повышения оперативности и объективности управления тепловым режимом, перевод системы управления тепловым режимом по температуре рабочего пространства в зонах нагрева, измеряемой термомпарами в защитных карборундовых стаканах, в систему управления по температуре поверхности нагреваемого металла, измеряемой оптическими пирометрами, свизированными на поверхность металла. Достигнуто увеличение оперативности информационного сигнала со 120 до 17–20 с, то есть более чем в 6 раз.

4. Теоретически обоснована и практически реализована система автоматической оптимизации управления процессом сжигания топлива в зонах интенсивного нагрева с использованием систем экстремального адаптивно-поискового управления путем обеспечения максимально возможной температуры рабочего пространства при сжигании поданного в зону топлива.

5. Уменьшение окалинообразования и минимизация тепловых потерь с подсосами и выбиваниями обеспечивается за счёт управления газодинамическим режимом рабочего пространства путём минимизации текущих величин разности коэффициентов расхода воздуха на входе и выходе рабочего пространства. Использование малоокислительного нагрева, как показал полученный опыт, нецелесообразно, поскольку увеличиваются закаты окалины при производстве броневого листового производства.

6. Главным и определяющим условием практической реализации прогрессивно развивающегося экономически оптимизирующего управления рассматриваемым процессом нагрева является теоретическое обоснование возможности практической реализации энергосберегающего управления путем эффективного распределения подачи топлива по зонам нагрева в зависимости от текущих производственных условий. Эта важнейшая проблема решена с использованием метода оптимизации управления в соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина [7].

Многолетний опыт совершенствования вышеназванного информационного обеспечения позволил чётко и однозначно определить и реализовать стратегическую цель оптимизирующего энергосберегающего развивающегося управления: «Обеспечить за заданное время своевременный нагрев металла до заданного температурного состояния при минимальных затратах топлива на нагрев».

При практической реализации энергосберегающего режима управления возникает актуальная проблема оперативной и объективной оценки эффективности используемого метода с целью оперативного обоснованного приема решения о целесообразности дальнейшего использования этого метода.

Оперативный метод оценки экономической эффективности энергосберегающего управления технологическими процессами

Типовая общепринятая методика определения эффективности проводимых мероприятий требует значительных затрат времени (от 3 до 6 месяцев). Проведение одновременно нескольких энергосберегающих мероприятий усложняет определение эффективности каждого из них. Также при определении эффективности каждого из проводимых мероприятий требуется учитывать влияние технологических возмущений.

Для устранения отмеченных недостатков типовой методики и оперативного получения информации использована рассмотренная в работе [12] активная методика, основанная на использовании уникальных компенсирующих свойств ортогональных функций Уолша при переключении режимов работы двух противопоставляемых способов управления технологическим процессом. Доказано, что при равенстве объемов производства и количестве посада «горячего металла» [11] использование централизованной микропроцессорной системы энергосберегающего управления обеспечивает снижение удельного количества газа на $16 \text{ м}^3/\text{т}$ или более чем на 2% от общих удельных затрат [11].

Полученное снижение удельных затрат топлива при реализации стратегии энергосберегающего управления нагревом, при интенсификации нагрева за заключительным интервалом общего времени нагрева и наличии в нагревательной печи зоны выдержки с пониженной тепловой нагрузкой на выходе рабочего пространства типовой печи проходного типа, использование энергосберегающего режима не должно быть причиной вероятности выдачи на стан недогретой заготовки.

Для оценки влияния энергосберегающего режима на качество нагрева металла определялась величина температуры полосы после черновой группы клетей прокатного стана и затраты энергии при прокатке [13–15].

Определяемое значением температуры раската полосы после черновой группы ШСГП и энергетическими параметрами проката этой полосы в последней черновой клетки ШСГП было произведено определение ранее названных параметров для более чем 600 заготовок при различных режимах непрерывного управления нагревом.

Определение качества нагрева металла при различных методах управления нагревом

Учитывая важность получения объективной информации и тот факт, что первоначальное опытное использование энергосберегающего метода управления нагревом реализовано только на одной печи ШСГП, определение качества нагрева осуществлено в два этапа.

На первом этапе определено влияние текущего физического состояния опытной печи на качество нагрева относительно общего среднего качества нагрева всех печей ШСГП при существующем методе управления нагревом.

При существующем методе управления прокатано 12062 т (606 заготовок) за 9 часов работы стана при удельном количестве затраченного природного газа 61,96 м³/т. Средняя температура раската всех заготовок $t_{ст} = 1095^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_{ст} = 14,53^{\circ}\text{C}$. Средняя температура раската заготовок, нагретых в опытной печи, составила $t_{п} = 1097,92^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении 13,92[°]C. Значит, опытная печь по лучшему физическому состоянию обеспечивает температуру раската на 2,92[°]C больше, чем средняя температура раската по стану при существующей системе управления нагревом.

Распределение температур раската заготовок, нагретых во всех (в том числе и опытной) печах стана, и температур раската заготовок, выданных только из опытной печи, при функционировании энергосберегающего метода управления нагревом представлено на рис. 2.

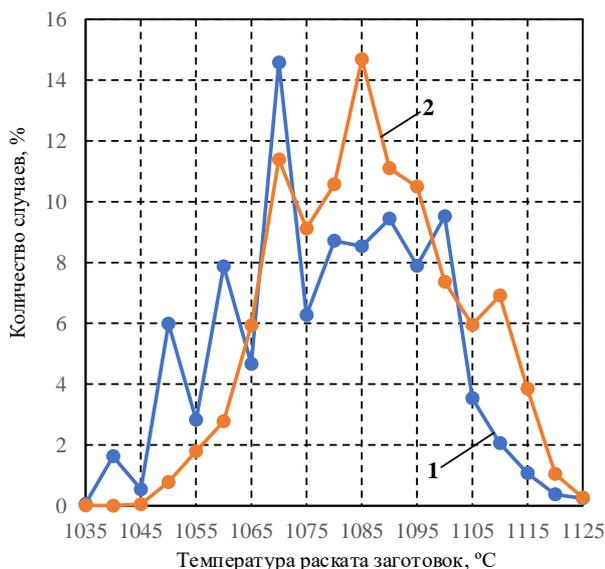


Рис. 2. Распределение температур раската заготовок, выданных из всех печей стана (линия 1) и из опытной печи (линия 2) при работе системы энергосберегающего управления режимом нагрева

Следует отметить, что при реализации энергосберегающего режима управления в опытной печи прокатано 10945 т металла за 13 часов при удельном количестве затраченного топлива 67,66 м³/т.

Поскольку случайно условия работы ШСГП при использовании энергосберегающего управления нагревом в опытной печи были значительно худшими, то этот факт убедительно подтверждает эффективность оптимизирующего управления нагревом в лю-

бых производственных условиях.

Средняя температура раската всех выданных на стан заготовок $t_{ст} = 1078,36^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_{ст} = 18,76^{\circ}\text{C}$. Средняя температура раската заготовок, нагретых в опытной печи при $t_{п} = 1085,38^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_{ст} = 15,95^{\circ}\text{C}$. Значит, средняя температура раската заготовок, нагретых в опытной печи, при меньшем на 2% удельном количестве затраченного топлива на 4–5[°]C больше, чем при существующем методе управления тепловым режимом.

Оценка влияния режима управления нагревом на величину затрат электроэнергии при прокатке осуществлена при определении средней мощности, потребляемой электроэнергией в последней черновой клетки ШСГП электроприводом этой клетки.

Средняя величина потребляемой электроприводом электроэнергии при прокатке всех нагретых заготовок при существующей системе управления нагревом составляет 6776 МВт, а нагретых только в опытной печи составляет 6497 МВт. Нагрузка электропривода при прокатке заготовок, нагретых в опытной печи, при существующем методе управления нагревом на 0,279 МВт меньше. Это определяется лучшим физическим состоянием опытной печи в текущий момент времени.

Распределение потребляемой электрической мощности при прокатке заготовок в последней черновой клетки ШСГП при энергосберегающем режиме нагрева опытной печи и всех печей стана представлено на рис. 3.

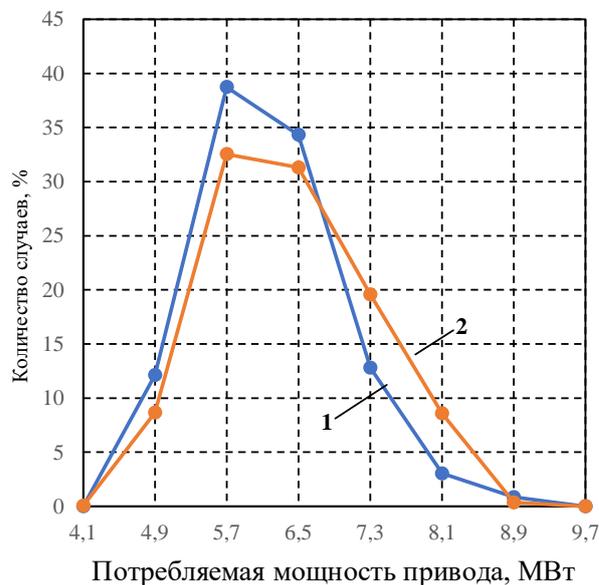


Рис. 3. Распределение потребляемой электрической мощности при прокатке в последней черновой клетки ШСГП при прокатке всех заготовок (линия 1) и заготовок, нагретых только в опытной печи при использовании в ней энергосберегающего метода управления нагревом (линия 2)

Средняя величина нагрузки электропривода при прокатке всех заготовок (включая и опытную печь), нагретых в печах, составляет 6228 МВт, а при нагреве в опытной печи при энергосберегающем режиме управления составляет 5971 МВт.

Снижение среднего значения затраченной электрической мощности при прокатке одной заготовки составляет 0,022 МВт, или 22 кВт.

Практическая реализация оптимизирующего энергосберегающего автоматического управления тепловым режимом при нагреве металла в печах проходного типа даже в условиях нестационарных режимов работы ШСП не приводит к возможной вероятности выдачи на стан недогретых заготовок.

При снижении на 2% общих затрат удельного количества топлива обеспечено среднее увеличение температуры раската на 4-5°C и снижение затрат электрической энергии на 0,027 МВт при прокатке каждой заготовки при суточном объеме производства от 9000 до 10000 т.

Заключение

Для обеспечения перспективного развития промышленного производства необходимо, в зависимости от текущей реальной производственной ситуации, обоснованный выбор критерия или цели управления. Возможна реализация экстремального оптимизирующего поискового динамического способа управления процессом путем определения одного из двух главных критериев оптимизации управления [4]:

- достижение максимальной производительности процессами при улучшении качества производимого конечного продукта;
- достижение минимальной себестоимости производимого продукта при сохранении или увеличении объема и улучшение качества конечного продукта.

Только при реализации такой стратегии оптимизации управления возможно значительное повышение перспективности и эффективности развития промышленного производства.

Список литературы

1. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Энергосберегающее управление как фактор интенсификации производства горячекатаных стальных полос // Материалы 1-й Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в чёрной металлургии» (Череповец, 2013). Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2013. С. 388-394.
2. Генкин А.Л. Энергосберегающее управление листопрокатным комплексом «печи – стан» // Сталь. 2011. № 3. С. 34–40.

3. Расчетные исследования тепловой работы и совершенствование конструкции кольцевой печи ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» для улучшения теплотехнических показателей ее работы / Н. В. Щукина, Н. А. Черемискина, Н. Б. Лошкарёв, В. В. Лавров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 6. С. 431-437.
4. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
5. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets / B. N. Parsunkin, S. M. Andreev, O. S. Logunova, T. U. Akhmetov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 79. No. 9-12. P. 1797-1803. DOI: 10.1007/s00170-015-6934-4.
6. Малый С.А. Некоторые оптимальные режимы нагрева металла // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1966. № 9. С. 175.
7. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1981.
8. О реализации энергосберегающих режимов нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Д.Ю. Жадинский [и др.] // Сталь. 2005. № 12. С. 44-46.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Прогнозирование продолжительности нагрева непрерывнолитой заготовки в методической печи с шагающими балками // Сталь. 2003. № 1. С. 71-74.
10. Интеграционный комплекс автоматизации стана 5000 ОАО «ММК» / В.Н. Урцев, Ф.В. Капцан, А.В. Фомичев и др. // Сталь. 2009. №7. С.46-50
11. Оперативное определение эффективности работы микропроцессорных систем управления технологическими процессами / А.В. Леднов, Б.Н. Парсункин, В.М. Рябков, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. 1987. №9. С.101-104.
12. Parsunkin B.N., Lednov A.V., Sukhonosova T.G. Testing signals formation for identification of heat power objects and control systems comparison // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. № 9–12 (93). С. 3429–3436.
13. Непрерывный контроль температуры жидкой стали в технологических агрегатах металлургического производства / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.Р. Бондарева, У.Б. Ахметов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2018. Т. 18. № 3. С. 33-41.
14. Самарина И.Г., Толстова Ю.С., Газизова В.А. Система экстремального регулирования с запоминанием максимума скорости изменения выходного параметра // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №2. С. 14-18.
15. Прасолов А.С., Самарина И.Г., Бондарева А.Р. Моделирование системы экстремального регулирования на языке LAD // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №1(21). С. 22-26

Сведения об авторах

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: b.parsunkin@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Бондарева Альбина Робертовна – старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: a.bondareva@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1091-0107>

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

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON DETERMINING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF OPTIMIZING CONTROL OF TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESSES

Parsunkin Boris N. – D.Sc. (Eng.), Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: b.parsunkin@magtu.ru

Andreev Sergey M. – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Automated Control System Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andreev.asc@gmail.com

Bondareva Albina R. – Assistant Professor (Eng.), Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.bondareva@magtu.ru

Chernov Victor P. – D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Foundry Processes and Materials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov@magtu.ru.

Abstract. The implementation of measures to optimize the energy efficiency of any technological process requires an analysis of the results achieved at the level of the process. The paper presents the results of evaluating the effectiveness of energy-saving control of the heating process of continuously cast billets in a pusher-type heating furnace before rolling. As a result of the analysis of various options for energy-saving modes of heating, it was determined that there are two fundamental approaches to improving the energy efficiency of the billets heating process before rolling: achieving maximum productivity of the rolling mill while improving the quality of heating and achieving the minimum cost of hot rolled strip while maintaining the existing productivity of the technological process of rolling. The implementation of energy-saving control of the heating process was carried out for non-stationary operating conditions of the heating furnace and the action of external disturbances. The results of assessing the effectiveness of the implemented energy-saving control are determined by evaluating the value of specific fuel consumption for billets heating before rolling, their final temperature state and electric energy consumption during rolling of billets in the rolling stands of the mill. It was found that the use of energy-saving control of metal heating in the heating furnaces of rolling mills with a 2% reduction in specific fuel costs for heating ensured an increase in the average temperature of the rolled metal by 4-5°C and a reduction in power consumption by 0.027 MW at a daily rolling mill productivity of 9-10 thousand tons/day.

Keywords: continuous casting, billet heating before rolling, heating furnace, energy-saving heating mode, heating of metal before rolling, hot-rolling mill, heating control optimization.

Ссылка на статью:

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бондарева А.Р., Чернов В.П. Об определении экономической эффективности оптимизирующего управления технологическими процессами прокатного производства // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 30-36.
Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bondareva A.R., Chernov V.P. On determining the economic efficiency of optimizing control of technological production processes. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 30-36.

УДК 621.778

Харитонов В.А., Усанов М.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ КРУГЛОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ В ОВАЛЬНОЙ МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ

Аннотация. Волочение в монолитных волокнах является основным и часто безальтернативным способом обработки металла давлением (ОМД), применяемым при изготовлении проволоки различного назначения как у нас в стране, так и за рубежом. Одним из недостатков этого способа является сложность и часто невозможность получения равномерной деформации по сечению проволоки. Одним из вариантов решения этого вопроса является применение овальных монолитных волокон. Однако этот вопрос является малоизученным. С применением математического моделирования проведен сравнительный анализ деформированного состояния и усилия волочения проволоки в круглых и овальных монолитных волокнах. Для этого было смоделировано два маршрута волочения. В первом заготовка круглого сечения диаметром 16,00 мм была протянута через традиционные круглые монолитные волокна. Во втором маршруте волочения круглая заготовка диаметром 16,0 мм протягивалась в овальной монолитной волоке, а затем в круглой. Равенство вытяжек в рассматриваемых маршрутах было обеспечено через равные площади по проходам. Конечный диаметр в обоих маршрутах составил 12,80 мм. Показано, что при волочении круглой проволоки в овальной волоке по сравнению с традиционной круглой происходит интенсивная проработка центральных слоев проволоки, что снижает неравномерность деформации по сечению проволоки. Усилие волочения при этом растет.

Ключевые слова: проволока, волочение, монолитная волока, моделирование, накопленная степень деформации, овальная и круглая монолитная волока, усилие волочения, сравнение.

Введение

Высокоуглеродистая проволока массово применяется в промышленности при изготовлении металлокорда, канатов, пружин, арматуры для предварительнонапряженного железобетона и т.д.

Качество проволоки характеризуют следующие основные показатели: геометрические размеры и предельно допустимые отклонения от номинальных значений; механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость, твердость, изменение механических характеристик по сечению и длине); структура металла (форма и величина (балл) зерна, однородность структуры); учитываемыми особенностями работы проволоки в изделии (число гибов, число скручиваний, релаксационная стойкость, сцепление с бетоном); определяемыми особыми условиями эксплуатации (усталостная прочность, коррозионная стойкость, порог хладноломкости) [1].

Основной операцией при производстве проволоки является волочение проволоки в монолитной волоке, характеризующееся значительной неравномерностью деформации по сечению и склонностью проволоки к разрушению, особенно в ее центральной части [2, 3]. Из практики хорошо известно, что с увеличением диаметра холоднотянутой проволоки комплекс ее механических свойств заметно понижается. Возникает так называемый масштабный эффект [4, 5], проявляющийся в уменьшении ее прочностных свойств и снижении технологичности с увеличением характерного размера, подразумеваемая под технологичностью уровень пластических свойств металла и стабильность деформирования при высоких суммарных обжатиях [6].

Увеличение единичного обжатия и уменьшение значения рабочего угла волоки снижает вероятность разрушения. Но при этом повышаются энергозатраты и снижается устойчивость процесса волочения. Кроме того, неравномерность деформации растет с увеличением скорости волочения и контактного трения. Таким образом, этот вопрос является актуальным для теории и практики производства проволоки волочением.

Одним из вариантов решения этого вопроса является оригинальный способ последовательной протяжки круглой проволоки в монолитных волокнах с овальным поперечным сечением и традиционных круглых [7]. На основе оценки структуры и механических свойств проволоки было показано, что данная технология может быть полезна при производстве проволоки с высокой пластичностью (на кручение) и с большей прочностью без дополнительного легирования и термообработки по сравнению с обычным волочением.

Однако при этом не были исследованы особенности деформированного состояния и усилия волочения проволоки, полученной новым способом, что затрудняет оценку его эффективности.

Целью данной работы является сравнительная оценка деформированного состояния и усилия волочения проволоки в круглых и овальных монолитных волокнах на основе математического моделирования.

Моделирование

Моделирование проводилось в программном комплексе Deform-3d. Исходная заготовка из стали марки 80 (упругопластическая модель) диаметром 16,00 мм и длиной 50 мм протягивалась с обжатиями, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы обжатий

Сечение, мм		
Исходная заготовка	1-я протяжка (обжатие 20%)	2-я протяжка (обжатие 20%)
Круг 16,00	Круг 14,31	Круг 12,80
Круг 16,00	Овал 16,50×12,40	Круг 12,80

При волочении по схеме «круг-овал-круг» отношение главных осей овала принято равным 1,33. Исходная заготовка разбивалась на 72340 конечных элемента. Скорость волочения 1 м/с, коэффициент трения принят по закону Кулона равным 0,08. Рабочий угол монолитных волок составляет 12 град.

Модель процесса волочения в овальной монолитной волоке показана рис. 1.

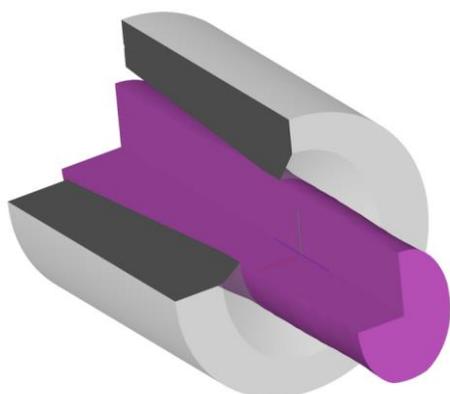
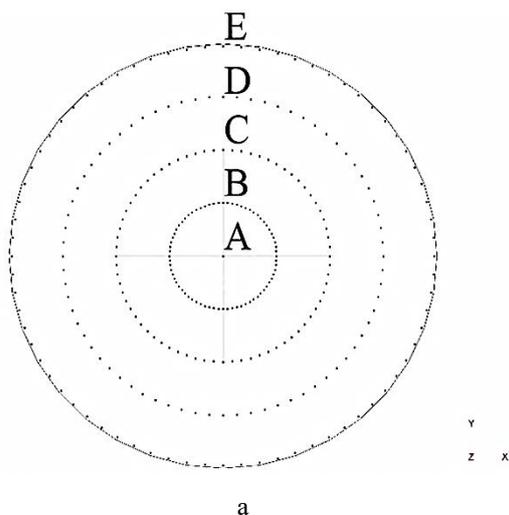


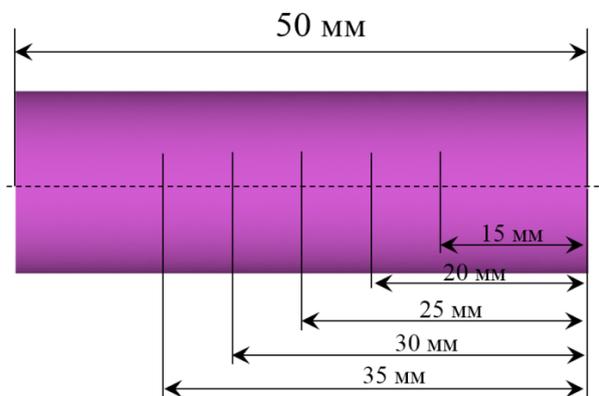
Рис. 1. Модель процесса волочения в овальной монолитной волоке

Анализ результатов

В результате моделирования было исследовано изменение накопленной степени деформации по сечению проволоки.



а



б

Рис. 2. Схема нанесения точек в поперечном сечении (а) и по длине заготовки (б)

Для этого на исходную заготовку в поперечном сечении на радиусах 0, 2, 4, 6 и 7,9 мм наносилось 360 точек, что соответствовало 1 град (рис. 2, а). Для большей точности данные точки были нанесены в пяти разных сечениях по длине заготовки (рис. 2, б).

Затем определялась величина значения накопленной степени деформации для каждой точки как среднее из пяти значений и были построены графики (рис. 3). Графики представляют из себя развертки с шагом в 1 град.

На графиках значение 0 и 180 град соответствуют малой оси овала, а 90 и 270 град – большой оси овала.

Видно, что при волочении в классической монолитной волоке накопленная степень деформации распределяется по концентрическим окружностям с минимальным значением на оси и максимальным на поверхности.

При волочении в овальной монолитной волоке также наблюдается неравномерное распределение накопленной степени деформации. Но в отличие от круглой монолитной волоки, в овальной идет более интенсивная проработка металла на оси проволоки, о чем говорит высокое значение накопленной деформации. На радиусе 2 мм также наблюдается равномерное распределение. С радиуса 4 мм и до поверхности проявляется явно выраженная неравномерность. Так, по малой оси овала (90 и 127 град) наблюдается максимальное значение накопленной степени деформации, а на большой оси (0 и 180 град) – минимальное.

Затем моделировали волочение данной заготовки в круглой монолитной волоке на диаметр 12,80 мм. Распределение накопленной степени деформации по сечению приведено на рис. 4.

Из рис. 4, а видно, что при волочении в монолитной волоке характер распределения накопленной степени деформации сохраняется, при этом увеличиваются значения ее величины.

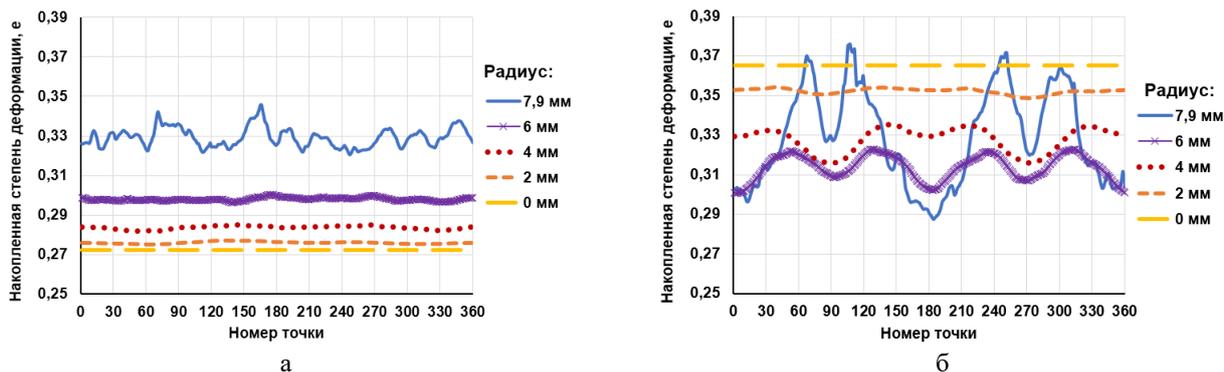


Рис. 3. Развертки графиков накопленной степени деформации после 1-й протяжки:
а – круглая монолитная волокна; б – овальная монолитная волокна

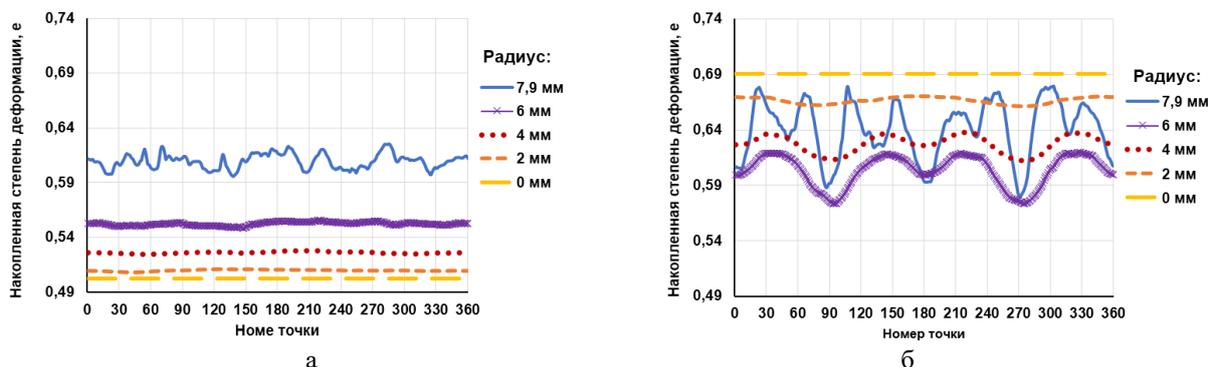


Рис. 4. Развертки графиков накопленной степени деформации после 2-й протяжки в монолитной волоке:
а – круглая монолитная волока; б – овальная монолитная волока

После обжатия овала в круглой монолитной волоке максимальное значение накопленной степени деформации сохраняется на оси заготовки. На радиусах 2, 4 и 6 мм отчетливо проявляется неравномерность, определяемая овальным сечением волоки, с минимумом в точках 0 и 180. В отличие от волочения в круглой монолитной волоке значение накопленной деформации в поверхности имеет меньшую величину, чем на оси заготовки.

Результаты оценки изменения усилия волочения в рассмотренных способах приведены на рис. 5.

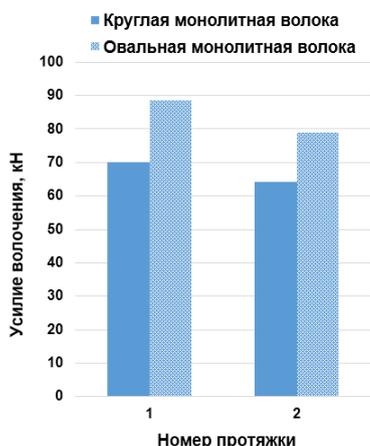


Рис. 5. Изменение усилия волочения

Как видно из рис. 5, при волочении в круглой монолитной волоке, усилие волочения ниже, чем при волочении в овальной монолитной волоке, а затем овальной заготовки в круглой волоке.

Заключение

Волочение круглой проволоки в овальной монолитной волоке приводит к изменению распределения накопленной степени деформации по сечению проволоки. Максимальное ее значение наблюдается на оси проволоки, в отличие от волочения в монолитной волоке, где оно имеет минимальное значение. На малой оси овала (90 и 270 град) наблюдается максимальное значение накопленной степени деформации, а на большой оси (0 и 180 град) – минимальное.

Волочение овальной проволоки в круглой монолитной волоке сохраняет максимальное значение накопленной деформации на оси и при этом снижает неравномерность, вызванную овальным сечением.

Волочение овальной проволоки приводит к повышению усилия волочения, по сравнению с круглой.

Таким образом, применение в маршруте волочения круглых монолитных волок и овальных монолитных волок дает возможность управлять характером распределения накопленной степени деформации проволоки, повышая тем самым ее качество.

Список литературы

1. Паршин В.С. Основы системного совершенствования процессов и станов холодного волочения. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1986. 192 с.
2. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Оценка эффективности способов волочения круглой проволоки больших диаметров // Черные металлы. 2021. № 3. С. 28–33.
3. Усанов М.Ю. Совершенствование технологии изготовления углеродистой проволоки на основе повышения эффективности деформационных режимов волочения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Ю. Усанов. Магнитогорск, 2018. 16 с.
4. Зубов В.Я., Мальцева Л.А. О масштабном факторе при разрушении стальной проволоки // Термическая обработка и физика металлов. Свердловск: УПИ, 1976. Вып. 2. С. 15–19.
5. Семавина А.Н., Гаврилюк В.Г., Терских С.А. О природе масштабного эффекта в холоднотянутой стальной проволоке // Физико-химическая механика материалов. 1979. № 2. С. 24–28.
6. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / под общ. ред. М.В. Чукина. М.: Металлургиздат, 2014. 276 с.
7. Hyun M.B., Sun K.H., Ho S.J., Yong-Taek I., Il-Heon S., Chul M.B. The effect of a non-circular drawing sequence on delamination characteristics of pearlitic steel wire // Materials and Design. October 2014. Vol. 62. P. 137–148.

Сведения об авторах

Харитонов Вениамин Александрович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры технологической обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: hva-46@yandex.ru

Усанов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и стандартизации, Филиал ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Белорецк, Россия. E-mail: barracuda_m@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH OF ROUND HIGH-CARBON WIRE DRAWING IN OVAL ONE-PIECE DRAWING DIE

Kharitonov Veniamin A. – Ph.D. (Eng.), Professor, Department of material processing technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hva-46@yandex.ru

Usanov Mikhail Yu. – Cand. Eng., Associate Professor, Department of metallurgy and standardization, Nosov Magnitogorsk State Technical University - Branch in Beloretsk, Russia. E-mail: barracuda_m@mail.ru

Abstract. Drawing in one-piece drawing dies is the primary and usually single-option method of pressure metal treatment used in manufacturing of various wires both in Russia and abroad. One of the drawbacks of this method is complexity and almost no capability of achieving regular deformation across the wire cross-section. One of the options to solve this issue is using oval one-piece drawing dies. However, this issue is understudied. Mathematical modeling was used for comparative analysis of the deformed state and wire drawing forces in round and oval one-piece drawing dies. Two drawing routes were modeled for this purpose. In the first route, a round workpiece 16.00 mm in diameter was drawn through conventional round one-piece dies. In the second route, a round workpiece 16.00 mm in diameter was first drawn through an oval one-piece die and then through a round one-piece die. The equality of drawings in these routes were ensured over equal areas by passes. The final diameter in both routes was 12.80 mm. It has been shown that as compared to the conventional round die, drawing in a round die results in intensive treatment of central wire layers, which reduces deformation irregularity across the wire cross-section, and in this case the drawing force rises.

Keywords: wire, drawing, one-piece drawing die, modeling, accumulated deformation degree, oval and round one-piece drawing die, drawing force, comparison

Ссылка на статью:

Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Исследование процесса волочения круглой высокоуглеродистой проволоки в овальной монолитной волоке // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 37-40.
Kharitonov V.A. Usanov M.Yu. Research of round high-carbon wire drawing in oval one-piece drawing die. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 37-40.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в издании научного журнала «Теория и технология металлургического производства» («*Teoriã i tehnologiã metallurgiçeskogo proizvodstva*») (Аббревиатура: **Teor. tehnol. metall. proizv.**) Периодичность издания – 4 раза в год.

Журнал зарегистрирован в Научной электронной библиотеке, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). ISSN 2311-5378. Не забывайте в библиографических ссылках статей указывать свои труды и труды Ваших коллег для повышения индекса научного цитирования и изданий в целом.

Журнал включает в себя следующие разделы:

1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.
2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.
3. Литейное производство.
4. Обработка металлов давлением.

Для публикации статьи в журнале необходимо представить **следующие материалы:**

- электронную версию статьи выслать по электронной почте;
- экспертные заключения о возможности опубликования от всех организаций, сотрудниками которых являются авторы статьи;
- контактный E-mail: , контактный телефон, почтовый адрес для получения экземпляра журнала;
- адрес редакции Ленина пр., д. 38, г. Магнитогорск, 455000. Тел. (3519) 29-85-18, E-mail: TТаPEoMP@mail.ru; ttmp@magtu.ru.
- лицензионный договор на передачу прав
- авторская справка

Авторам, представившим статьи для публикации, будет выслан один экземпляр журнала. Материалы, переданные в журнал, редакционной коллегией не возвращаются.

Статьи должны быть выполнены в текстовом редакторе MS Office Word 2007 и оформлены в соответствии со следующими требованиями:

- формат страницы – А4 (210x297мм), отступы: слева, справа и сверху по 18 мм, снизу – 20 мм; нумерация страниц снизу по центру;
- шрифт основного текста – Times New Roman размера 12 пунктов;
- межстрочный интервал – одинарный;
- отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 5 знаков (примерно 10 мм);
- формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается; размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов;
- горизонтальные страницы допускается оформить отдельно от вертикальных страниц статьи, они должны быть также формата А4;
- рисунки должны быть вставлены в текст;
- не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу;
- статья должна включать: УДК, авторов, название, аннотацию, ключевые слова, текст, список литературы, сведения об авторах.
- структура основной части статьи: введение, теория, результаты исследования, заключение. Пример оформления статьи приведен в **(Приложении 1)**.
- аннотация (*Abstracts*) (150-250слов), выполняется курсивом (аннотация должна быть логически выстроена);
- ключевые слова (*Keywords*) (5-15 основных терминов), выполняется курсивом;
- список литературы выполняется в соответствии с требованиями (пример оформления литературы приведен в **(Приложении 2)**);
- сведения об авторах (*Information about authors*) должны включать: Ф.И.О. полностью, должность, место работы, ученая степень, ученое звание, контактный телефон, электронный и почтовый адреса;
- в конце статьи дается английская версия фамилий, инициалов авторов, названия статьи, авторского резюме, ключевых слов, сведений об авторах. **За качество перевода несут ответственность авторы статьи. Использование электронного переводчика не допустимо.**

Редакционная коллегия оставляет за собой право исправлять орфографические ошибки без согласования с авторами.

Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА УЗКИХ ГРАНЕЙ СЛЯБОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ*Аннотация. 150-250 слов**Ключевые слова: 5-15 основных терминов*

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

IMPROVING THE QUALITY OF NARROW FACES CONTINUOUS SLAB BILLET*Abstract. 150-250 words**Keywords: 5-15 basic terms**References:**Information about authors**Пример оформления литературы***Список литературы**

1. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1 (41). С. 27 – 30.
2. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Влияние температуры разливаемого металла на качество непрерывнолитого сляба и листового проката // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2012. Вып.12. С. 68–74.
3. Пат. 2061756 РФ, МПК С 21 В 7/00. Доменная печь / Курбацкий М.Н., Манаенко И.П., Монастырков В.П. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Товарищество с ограниченной ответственностью «Техника и технология» (RU). № 9305232/02; заявл. 18.11.93; опубл. 10.06.96, Бюл. № 16. 4 с.: ил.
4. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Севернюк В.В. Работа воздушных фурм доменных печей. Днепропетровск: Пороги, 1997. 120 с.
5. Лукашов Г.Г., Савелов Н.И., Плискановский С.Т. Опыт работы доменных печей на воздушных фурмах различного диаметра // Сталь. 1972. № 7. С. 587-589.
6. Максимов Е.В., Альжанов М.К., Ержанов У.К. Влияние параметров фурмы на перепад газа в доменной печи. // Тез. докл. III Международного конгресса доменщиков. Новокузнецк, 1995. С.120.

На английском языке: Авторы (транслитерация). Название статьи на английском языке. Название журнала курсивом (транслитерация) [Название журнала на английском языке (если есть)]. Выходные данные на английском языке, либо цифровые.

1. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Determination of the length to point of solidification in strands of Peritectic Low Alloyed steels for pipes with using “Mini whale” effect. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 1(37), pp. 24-26.

Ответственный по изданию журнала: канд. техн. наук. Тютеряков Н.Ш.

По всем вопросам обращаться по тел.: +7 (3519)29-85-18, 89049410710, либо по E-mail: ttmp@magtu.ru