

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 2 (53) 2025

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 Metallurgy 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. Емелинин – 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.,
Ченстоховский технологический
университет, 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 материалообработки, д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

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», 2025

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: TTaPEoMP@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 30.06.2025. Заказ 217. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 2 (53) 2025

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. Ostrovski – 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”, 2025

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 30.06.2025. Order 217. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ	4
Фролов В.Ф., Беляев С.В., Деев В.Б., Прусов Е.С., Арапов С.Л., Лесив Е.М. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	4
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	10
Саубанов М.Н. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ЛИТЕЙНЫЕ ФОРМЫ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК	10
Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Бойко А.Б., Троянов А.В., Сулицин А.В., Эпова И.А. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ГРАФИТОВУЮ ФАЗУ И ТВЕРДОСТЬ ВАЛКОВОГО ЧУГУНА	19
Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДИФИКАТОРА НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СЛИТКА В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ	25
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	30
Румянцев М.И., Завалишин А.Н. ИНЖИНИРИНГ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА ДВУХКЛЕТОВОМ РЕВЕРСИВНОМ СТАНЕ.....	30
Куницина Н.Г., Шаповалов А.Н. О РАЦИОНАЛЬНОЙ ГЛУБИНЕ УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА ИЗ СТАЛИ	37
Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Столяров А.Ю., Язвенко А.М., Савельева И.А. МУЛЬТИМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ С УЧЕТОМ МИКРОМЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЛИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ	43
ЭКОНОМИКА В МЕТАЛЛУРГИИ.....	51
Валяева Г.Г., Гафурова В.М., Коптякова С.В., Лазарев А.С. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОРПОРАТИВНОЙ КУЛЬТУРЫ КАК ИНСТРУМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ	51
ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	58
Конев С.В., Кенарь Е.В., Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Козлов Р.А. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО КУЛАЧКА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	58

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS.....	4
Frolov V.F., Belyaev S.V., Deev V.B., Prusov E.S., Arapov S.L., Lesiv E.M. DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR THE USE OF SILICON PRODUCTION WASTE IN FERROUS METALLURGY	4
FOUNDRY	10
Saubanov M.N. PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF COATING PROCESS IN ELECTROSTATIC FIELD FOR THE CORONA DISCHARGE ON MOLDS OF COMPLEX CONFIGURATION FOR PRODUCTION OF TITANIUM CASTINGS	10
Shchennikova V.A., Feoktistov N.A., Boyko A.B., Troyanov A.V., Sulitsin A.V., Epova I.A. STUDY OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE GRAPHITE PHASE AND HARDNESS OF ROLLER CAST IRON	19
Boyakova T.A., Snitko I.S., Avdulov A.A. ISSUE OF INFLUENCE ON A PILOT MODEL OF AN ELECTROMAGNETIC MODIFIER ON THE STRUCTURE OF AN ALUMINUM INGOT DURING CRYSTALLIZATION IN A ROTARY CASTING MACHINE	25
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE	30
Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N. PROCESS ENGINEERING COMPETITIVE PRODUCTS USING COLD ROLLING AT TWO STAND REVERSING MILL	30
Kunicina N.G., Shapovalov A.N. ON RATIONAL DEPTH OF PHOSPHORUS REMOVAL FROM STEEL.....	37
Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Stolyarov A.Yu., Yazvenko A.M., Savelieva I.A. MULTISCALE MODELING OF HIGH-STRENGTH WIRE DRAWING PROCESS WITH MICROMECHANICS REPRESENTATION OF PEARLITE MICROSTRUCTURE DEFORMATION	43
ECONOMICS IN METALLURGY	51
Valyaeva G.G., Gafurova V.M., Koptyakova S.V., Lazarev A.S. IMPROVING CORPORATE CULTURE AS A TOOL FOR MANAGING THE EFFECTIVENESS OF BUSINESS PROCESSES IN METALLURGICAL ENTERPRISES.....	51
METALLURGICAL PRODUCTION EQUIPMENT	58
Konev S.V., Kenar E.V., Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Kozlov R.A. INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ECCENTRIC CAM BY FINITE ELEMENT METHOD	58

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.11

Фролов В.Ф., Беляев С.В., Деев В.Б., Прусов Е.М., Арапов С.Л., Лесив Е.М.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация. Представлены результаты исследований возможности применения отходов производства кремния в виде кремниевого шлака вместо ферросилиция при выплавке стали и чугуна. В ходе лабораторных исследований установлен химический и фазовый состав кремниевого шлака, содержащего около 80 % кремния по химическому составу и входящего в состав таких основных фаз, как карбид кремния, кварц и кристобалит, аморфный кремнезем, оксиды кальция, алюминия, включения углерода и элементного кремния. В ходе опытных плавов установлена возможность применения отходов кремниевого производства при выплавке чугуна и стали, при этом коэффициент усвоения кремния в виде кремниевого шлака получился меньше, чем при применении ферросилиция ФС75 на 15 %.

Ключевые слова: переработка отходов кремниевого производства, кремниевый шлак, химический и фазовый состав, выплавка стали и чугуна, коэффициент усвоения кремния в виде кремниевого шлака в расплаве чугуна и стали

Введение

В настоящее время для приготовления силуминов [1] на кремниевых заводах ОК РУСАЛ (АО «Кремний» и ООО «РУСАЛ Кремний Урал») производится 50 тыс. т/год рафинированного кремния, при этом в процессе производства кремния образуется до 6000 т/год отвального шлака. При производстве кремния применяется кварцит с низким содержанием титана (содержание Ti в шлаке менее 0,05 мас. %), который является ограничивающей примесью для производства ферросилиция. Следует отметить, что при производстве ферросилиция также применяется кварцит, но с более высоким содержанием титана (содержание Ti в ферросилиции 0,3 мас. %). Расплавы при производстве кремния из рудоплавильной электропечи переливают в ковш, где производится процесс рафинирования. Основным методом рафинирования является продувка техническим кислородом или сжатым воздухом, которые с заданным расходом вдувают в расплав через систему форсунок в ковше. Окисленные элементы-примеси образуют слой кремниевого шлака на поверхности [2].

При рафинировании расплава в ковше образуется около 13% отвального кремниевого шлака и 5–6% кремния в шлаке. Отвальный кремниевый шлак является побочным продуктом промышленного производства кремния, который в основном образуется при рафинировании кремния в ковшах. Шлаки кремниевого производства значительно отличаются от обычных металлургических шлаков большей плотностью – 2,85–2,9 г/см³, против 2,33 г/см³ у кремния. Шлаки являются тугоплавкими, обладают значительной вязкостью 3–5 Па·с и по степени кислотности равны среднему значению 2,8. Поэтому данный шлак относится к «длинным шлакам», которые являются особо

вязкими. Указанные выше свойства приводят к попаданию кремния как в печной, так и в рафинировочный шлак, и в результате этого значительное количество кремния задерживается в шлаке [3].

В настоящее время разработаны следующие промышленные способы переработки отходов производства кремния [3–6]:

- использование микрокремнезема с высоким содержанием диоксида кремния для возврата в карботермический процесс получения кремния;
- переработка отходов производства кремния для получения строительных материалов: жидкого стекла, силикагеля, модификатора бетона;
- использование техногенного микрокремнезема в качестве сырьевого компонента для получения изделий в огнеупорной промышленности для дальнейшего использования в качестве футеровки в металлургических печах;
- сжигание порошкообразных кремнийсодержащих отходов в азотсодержащей атмосфере, где большая часть кремния превращается в нитрид, оксинитрид и/или карбид, а исходная шихта — в спеченный материал.

Однако данные технологии не получили широкого применения, поэтому кремниевый шлак накапливается на заводском шламохранилище. В то же время кремний является хорошим раскислителем при выплавке стали, который вводится в виде ферросилиция как с низким (10–20 мас. %), так и с высоким (65–75 мас. %) содержанием кремния [7, 8].

Кроме того, при выплавке чугуна кремний влияет на структуру чугуна, усиливая графитизацию последнего. Содержание кремния в чугунах колеблется в широких пределах: от 0,03–0,5 до 5,0 мас. %. Изменяя содержание кремния, так же как и содержание углерода, можно получать чугуны с различными свойствами и структурой: от белого до ферритного (серого) с пластинчатым графитом или высокопрочного с ша-

ровидным графитом). В чугунах с относительно низким содержанием углерода (2,75–3,0 мас. %) по мере увеличения содержания кремния механические свойства повышаются, но с более высоким содержанием углерода (3,3–3,5 мас. %) увеличение содержания кремния ухудшает механические свойства. Для графитизации, модифицирования и получения нужной структуры и механических свойств чугуна необходимый кремний также вводится в виде ферросилиция [9–11].

Поэтому на предприятиях черной металлургии перспективу представляет разработка технологии производства стали и чугуна с применением отвального кремниевых шлака вместо ферросилиция [12].

Материалы и методы проведения исследований

На рис. 1–3 представлены соответственно рафинированный кремний, отвальный кремниевый шлак и дробленый кремниевый шлак.



Рис. 1. Рафинированный кремний



Рис. 2. Отвальный кремниевый шлак



Рис. 3. Дробленый кремниевый шлак

На первом этапе проводили исследования десяти проб для определения химического и фазового состава кремниевых шлаков. Химический анализ кремниевых шлаков проводили с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра марки Zetium (PANalytical). Результаты химического анализа кремниевых шлаков приведены в табл. 1.

Фазовый состав кремниевых шлаков определялся с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker марки D8. Результаты фазового состава кремниевых шлаков представлены в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав кремниевых шлаков, мас. %

Химические элементы	Пробы										Средний состав
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Si	77,60	79,20	80,16	80,14	75,93	74,98	73,88	77,11	78,63	79,85	77,74
Ca	14,81	13,18	12,60	12,84	15,83	17,44	18,44	15,93	14,54	13,31	14,89
Al	6,57	6,45	5,71	5,76	6,59	6,46	6,47	5,87	5,68	5,67	6,12
Ba	0,25	0,20	0,20	0,20	0,21	0,28	0,26	0,27	0,24	0,26	0,24
Fe	0,27	0,36	0,53	0,32	0,28	0,25	0,23	0,27	0,30	0,29	0,30
K	0,07	0,06	0,09	0,05	0,08	0,07	0,04	0,04	0,06	0,09	0,06
Mg	0,06	0,11	0,16	0,11	0,09	0,11	0,05	0,1	0,13	0,13	0,10
Na	0,04	0,02	0,03	0,03	0,08	0,02	0,03	0,05	0,02	0,02	0,03
S	0,02	0,03	0,06	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Sr	0,17	0,15	0,14	0,14	0,17	0,19	0,18	0,18	0,16	0,17	0,16
Ti	0,10	0,12	0,14	0,08	0,10	0,06	0,06	0,05	0,06	0,1	0,09
W	0,05	0,10	0,09	0,1	0,27	0,11	0,14	0,1	0,11	0,08	0,12
Y	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Фазовый состав кремниевого шлака, мас. %

Фаза		Пробы										Сред- ний состав
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Silicon	Si	46,66	54,74	43,77	49,89	49,34	42,77	35,18	51,18	45,37	34,19	48,31
Quartz low	SiO ₂	2,07	3,72	6,12	2,75	2,92	0,88	0,63	1,32	0,73	1,33	2,25
Anorthite*	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	23,62	16,44	17,14	11,29	16,57	6,73	4,12	7,72	8,83	2,04	11,45
Cristobalite low	SiO ₂	5,30	5,06	6,37	4,47	4,38	7,48	3,33	2,83	3,30	5,02	4,75
Moissanite 3C	SiC	3,29	3,48	3,20	3,08	5,42	3,79	3,41	4,33	3,10	2,73	3,58
Pseudowollastonite	CaSiO ₃	0,84	1,47	0,49	0,80	0,81	0,80	0,81	0,75	1,30	0,84	0,89
Corundum	Al ₂ O ₃	0,81	0,75	1,57	0,45	0,45	0,49	0,49	0,49	0,81	0,75	0,71
Amorphouse	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +CaO	18,22	15,08	21,35	27,28	20,12	38,36	53,32	31,87	37,37	54,71	31,77

Следует отметить, что полученные результаты исследований химического и фазового состава хорошо согласуются с результатами исследований, проведенных под руководством профессора Н.В. Немчиновой [13, 14]. Отвальный кремниевый шлак имеет высокую вязкость и низкую подвижность в процессе получения и рафинирования кремния. Значительное количество металлического кремния смешивается со шлаком (оксидами), как показано на рис. 4, а. Фаза металлического кремния (светлая область) сплавлена с фазой кремниевого шлака (темная область). Определены основные фазы в области кремния и области шлака (рис. 4, б, в).

Большое количество Si, Fe, Al, Ca и незначительное количество Ti распределены в кремниевом шлаке и представлены в фазах интерметаллических соединений Si-Fe, Si-Fe-Ti, Si-Fe-Al-Ca и O-Al-Si-Ca. Установлено, что основные фазы существуют в виде FeSi₂, TiFeSi₂ и FeAl₃Si₂. Углерод находится в шлаковой области в виде SiC и определено, что данная фаза сосредотачивается в кремниевом шлаке при вторичном рафинировании кремния. Часть Si, Al и Ca окисляется и отделяется от расплава кремния.

Основными фазами в шлаковой области являются Si, SiC, а также сложные оксиды Ca(Al₂Si₂O₈), это согласуется с результатами и показано на рис. 4. SiC является основной формой существования несгоревшего углерода при производстве кремния при карботермическом восстановлении кремнезема. Al₂O₃ и

CaO являются основными оксидами кремниевого шлака, которые объединяются в Ca(Al₂Si₂O₈) и SiO₂.

Получение результатов и их обсуждение

Во время проведения исследований проводили выплавку чугуна марки ЧХЗ согласно ГОСТ 7769-82 на стальном ломе с использованием науглероживателя (синтетический чугун) в индукционной печи марки GW 0,25–250–1 (Китай) емкостью 250 кг по стали. В качестве шихтовых материалов использовали: стальной лом (марка стали Ст3) – 48,3%; возврат чугуна марки ЧХЗ – 44,2%; феррохром – 2,5%; науглероживатель (электродный бой) – 1,6%; шлак кремния, дробленный крупностью 25-30 – 3,4%, химический состав которого представлен в табл. 1. Плавки проводили как с применением ферросилиция, так и со шлаком кремния при прочих одинаковых условиях.

Расход ферросилиция и шлака кремния, кг/т, рассчитывали следующим образом [11]:

$$m_{\text{Si}} = \frac{10(K_{\text{СТ}} - K_0)}{K_{\text{ФС}} \cdot \eta_{\text{У}}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{СТ}}$ – содержание кремния в получаемой стали (чугуне), масс. %;

K_0 – среднее содержание кремния в шихте, масс. %;

$K_{\text{ФС}}$ – массовая доля кремния в кремниевом шлаке;

$\eta_{\text{У}}$ – коэффициент усвоения кремния в расплаве.

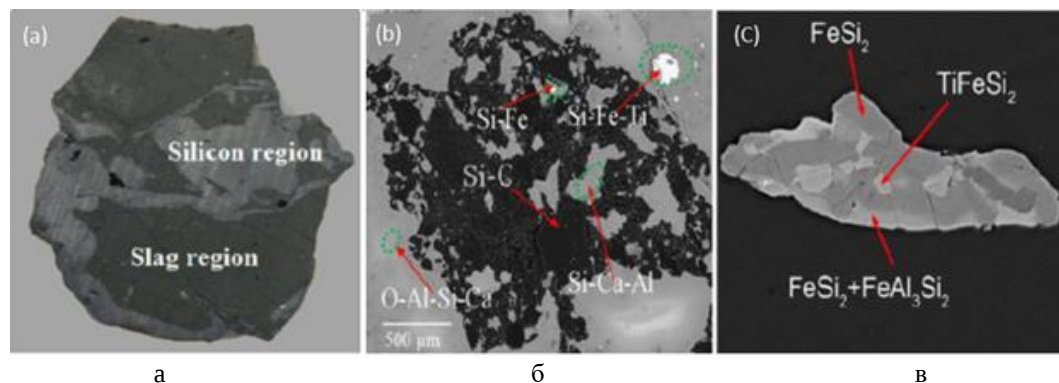


Рис. 4. Морфология шлака:

а – распределение кремния в шлаке; б – фазы в шлаковой области; в – фазы в кремниевой области

Среднее значение коэффициента усвоения кремния в кремниевом шлаке расплавом чугуна было установлено в ходе проведения опытных плавов и принято равным 0,6, что меньше коэффициента усвоения кремния в ферросилиции ФС75 фракции 2–12 мм согласно ГОСТ 1415-9, равного 0,7. С учетом вышеизложенного расход шлака кремния для 250 кг шихты составил 14 кг, а ферросилиция ФС75 – 16 кг.

По окончании плавки проводили отбор проб (рис. 5) для анализа химического состава чугуна с помощью эмиссионного спектрометра «СПАС-05».



Рис. 5 Проба чугуна ЧХЗ

Химический состав отлитого чугуна соответствовал марке ЧХЗ согласно ГОСТ 7769–82, а содержание таких основных элементов, как углерод и кремний, составило для плавки с кремниевым шлаком 3,62 и 3,57%, с ферросилицием – 3,52 и 3,68% соответственно.

Выплавка стали марки Ст3 производилась в индукционной печи УПВ-16/5, где применялся тигель из огнеупорного корундо-оксид-цирконий-силикатного материала (марка КЦС, производство АО «ПОЛИКОР»). В качестве шихтовых материалов на плавку использовали: прутки из стали марки Ст3 согласно ГОСТ 380-2005 (табл. 5) в количестве 20 кг, кремниевый шлак химического состава согласно табл. 1 и ферросплав ФС75. При этом расход шлака кремния для 20 кг шихты, определенный по формуле (1), составил 61 г, а ферросплав ФС75 – 53 г.

Раскисление стали кремниевым шлаком проводили при температуре 1625-1630°C. Полученный расплав заливали в изложницу (рис. 6) и проводили отбор проб (рис. 7) для определения химического состава стали на содержание кремния.



Рис. 6. Заливка раскисленной стали в изложницу

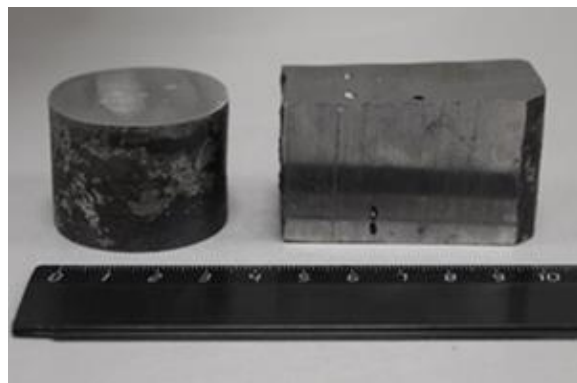


Рис. 7. Проба и вырезка из отливки на анализ

Содержание кремния в расплаве Ст3 до раскисления составило 0,018%, а после раскисления при применении: кремния в кремниевом шлаке – 0,140% и ферросилиция ФС75 – 0,148%. Среднее соотношение сталь/шлак соответствует 200 при раскислении и является близким коэффициентом при раскислении ферросилицием ФС75. Увеличение содержания кремния в экспериментальной плавке составило 0,122%. При этом для снижения риска получения содержания кремния на низкой границе при применении кремниевых шлаков для производства стали и чугуна на металлургических заводах в расчетах расхода кремниевых шлаков необходимо принимать коэффициент усвоения кремния равным 0,6.

Заключение

В ходе проведенных исследований было установлено, что применение кремниевых шлаков позволяет получить такие же по химическому составу чугуны марки ЧХЗ и стали марки Ст3, как и при использовании ферросилиция ФС75, что подтверждает принципиальную возможность применения отходов кремниевых производств при выплавке чугуна и стали вместо ферросилиция. Поэтому поисковые исследования по данному вопросу следует продолжить и установить эффективность применения отходов кремниевых производств от их подготовки, режимов плавки для различных марок чугуна и стали.

Список источников

1. Плавение и литье алюминиевых сплавов: монография / В.И. Напалков, В.Ф. Фролов, В.Н. Баранов [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 716 с.
2. Технологический процесс выплавки технического кремния/ Н.В. Немчинова, Н.Н. Зобнин, А.А. Тютрин [и др.] // Молодежный вестник ИрГТУ. 2024. Т. 14. № 2. С. 364-372.
3. Новые технологические решения по переработке отходов кремниевых и алюминиевых производств / В.В. Кондратьев, Н.В. Немчинова, Н.А. Иванов [и др.] // Металлург. 2013. № 5. С. 92-95.

4. Математическая обработка результатов эксперимента по переработке рафинировочного шлака кремниевое производство / А.А. Тютрин, Н.В. Немчинова, В.В. Хоанг [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 4 (43). С. 15-22.
5. Определение оптимальных параметров окомкования шихты для выплавки кремния на основе техногенного сырья / Н.В. Немчинова, М.С. Леонова, А.А. Тютрин [и др.] // Металлург. 2019. № 2. С. 6-11.
6. Евсеев Н.В., Тютрин А.А., Пастухов М.П. Гранулирование пылевых отходов кремниевое производство для возврата в технологический процесс // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. 23(4). С. 805–815.
7. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. М.: Металлургия, 1988. 657 с.
8. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М.: Металлургия, 1985. 346 с.
9. Производство стальных отливок: учебник для вузов / Л.Я. Козлов, В.М. Колокольников, К.Н. Вдовин [и др.]. М.: МИСиС, 2005. 351 с.
10. Производство чугуновых отливок: учебник / В.М. Колокольников, В.Д. Белов, К.Н. Вдовин [и др.]. Магнитогорск: МГТУ, 2011. 405 с.
11. Производство отливок из стали и чугуна: учебное пособие / А.И. Батышев, Э.Б. Тэн, К.А. Батышев [и др.]. М.: МГОУ, 2012. 354 с.
12. Романенко А.Г. Металлургические шлаки. М.: Металлургия, 1997. 197 с.
13. Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевое производство для поиска путей их рациональной переработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 2 (157). С. 252-263.
14. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевое производство // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 31-39.

Сведения об авторах

Фролов Виктор Федорович – кандидат технических наук, руководитель проекта, ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», Красноярск, Россия. E-mail: Viktor.Frolov2@rusal.com.

Беляев Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: 244812@mail.ru.

Деев Владислав Борисович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Управления проектными командами, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия; профессор кафедры ОМД, ФГАОУ ВО НИТУ МИСиС, г. Москва, Россия. E-mail: deev.vb@mail.ru.

Прусов Евгений Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология функциональных и конструкционных материалов», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия. E-mail: eprusov@mail.ru.

Арапов Станислав Леонтьевич – кандидат технических наук, главный металлург «Ремонтно-механическая база» филиала ООО «ИСО», Ачинск, Россия. E-mail: arapovsl@yandex.ru.

Лесив Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR THE USE OF SILICON PRODUCTION WASTE IN FERROUS METALLURGY

Frolov Victor F. – Candidate of Technical Sciences, Project Manager, RUSAL Engineering and Technology Center LLC, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: Viktor.Frolov2@rusal.com.

Belyaev Sergey V. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Foundry Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: 244812@mail.ru.

Deev Vladislav B. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Project Team Management, Vladimir State University named Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletovs, Vladimir, Russia;

Professor of the Department of Metal Forming, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia. E-mail: deev.vb@mail.ru.

Prusov Evgeniy S. – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Technology of functional and structural materials"; Vladimir State University named Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletovs, Vladimir, Russia. E-mail: eprusov@mail.ru.

Arapov Stanislav L. – Candidate of Technical Sciences, Chief Metallurgist; "Repair and mechanical base" of the ISO LLC branch, Achinsk, Russia arapovsl@yandex.ru.

Lesiv Elena M. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Foundry Production; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Annotation. The results of research on the possibility of using silicon production waste in the form of silicon slag instead of ferrosilicon in the smelting of steel and cast iron are presented. Laboratory studies have established the chemical and phase composition of silicon slag, which contains about 80% silicon by chemical composition and is part of such basic phases as silicon carbide, quartz and cristobalite, amorphous silica, calcium oxides, aluminum, carbon inclusions and elemental silicon. During experimental smelting, the possibility of using silicon production waste in the smelting of cast iron and steel was established, while the absorption coefficient of silicon in the form of silicon slag was 15% lower than when using ferrosilicon FS75.

Keywords: recycling of silicon production waste, silicon slag, chemical and phase composition, steel and cast iron smelting, silicon absorption coefficient in the form of silicon slag in molten cast iron and steel

Ссылка на статью:

Развитие технологий применения отходов производства кремния в черной металлургии / Фролов В.Ф., Беляев С.В., Деев В.Б., Прусов Е.С., Арапов С.Л., Лесив Е.М. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 4-9.
Frolov V.F., Belyaev S.V., Deev V.B., Prusov E.S., Arapov S.L., Lesiv E.M. Development of technologies for the use of silicon production waste in ferrous metallurgy. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 4-9.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Саубанов М.Н.

ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ЛИТЕЙНЫЕ ФОРМЫ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК

Аннотация. Проведены исследования возможности плазменного напыления на периклазовые (магнетитовые) формы карбидов и окислов различных материалов. Для получения плазменного покрытия, содержащего фазы Ti – Al, способные блокировать миграцию кислорода и активных металлов на поверхность литейных форм, производилось плазменно-дуговое напыление смеси порошков TiO_2 и Al_2O_3 с проведением математического моделирования процесса. Проведено численное моделирование динамики плазменной струи плазмотрона «Термоплазма 50-01». Представлен расчет распределения температуры в плазменной струе для различных моментов времени работы плазмотрона. Результаты моделирования значительно улучшают прогнозирующую способность плазменных процессов нанесения функциональных покрытий с помощью плазмотрона постоянного тока «Термоплазма 50-01» и позволит повысить экономический эффект от внедрения плазменных технологий в промышленное производство. На основе выполненных работ разработаны рекомендации по уменьшению слоя повышенной твердости на титановых отливках.

Ключевые слова: газотермическое покрытие, электромагнитные уравнения, плазмообразующий газ, межэлектродное пространство, газозвесь, электростатическое поле

При использовании в процессах литья титановых сплавов периклазовых литейных форм, состоящих из окислов MgO (92,3 мас. %), CaO (3,2 мас. %), SiO_2 (2,2 мас. %) и жидкого стекла $Na_2O(SiO_2)_n$ в количестве 12 мас. % по отношению к основному составу формы, происходит образование слоя повышенной твердости СПТ (альфированного слоя) на поверхности отливки. Основной примесью, повышающей твердость металла на глубине до 3 мм, является кислород, содержание которого увеличивается по направлению от центра к поверхности отливки и достигает 3% по массе. Источником кислорода является периклазовая форма, изготовленная по « CO_2 -процессу» и содержащая после обжига до 700-1000°C остаточные карбонаты натрия, магния и кальция. Другие примеси – кремний и железо проникают в отливку на глубину до 0,4 мм и их количество не превышает 0,2-0,3 % вследствие возникающего градиента температуры при контакте расплава с формой. Оксидная основа формы – MgO также может быть источником кислорода. В случае контакта титана с гидратированной формой СПТ также обогащается водородом по реакции: $Mg(OH)_2 + 2Ti \rightarrow MgO + TiO \quad TiH_2$. Количество водорода в СПТ может достигать 0,02-0,05% по массе [1,17,18].

Слой повышенной твердости является прочным и хрупким, что приводит к снижению пластичности и образованию трещин в отливках. В связи с этим применяют другой способ – электродуговая металлизация на магнетитовой литейной форме. Но это недостаточно эффективно и СПТ остается.

Для устранения или уменьшения толщины слоя повышенной твердости на поверхности титановых отливок проведены исследования возможности плаз-

менного напыления на периклазовые (магнетитовые) формы карбидов и окислов различных материалов.

С целью получения плазменного покрытия, содержащего фазы Ti – Al, способные блокировать миграцию кислорода и активных металлов на поверхность литейных форм, производилось плазменно-дуговое напыление смеси порошков TiO_2 и Al_2O_3 с проведением математического моделирования процесса.

Математическое моделирование находит широкое применение в различных областях науки и техники.

В настоящее время газоразрядная плазма нашла широкое применение в таком технологическом процессе, как нанесение газотермических покрытий (ГТП), что позволяет уменьшить износ деталей машин, эксплуатирующихся в различных условиях до пяти раз.

В настоящее время существенного прогресса в получении изделия с высококачественными ГТП удалось достичь при их нанесении плазменным способом в динамическом вакууме [2, 3]. Однако сложность и высокая стоимость вакуумного оборудования в значительной степени ограничивают ее применение. Поэтому в настоящее время ведутся работы по усовершенствованию методов плазменного нанесения ГТП при атмосферных давлениях.

Основной проблемой при получении покрытий данным способом является возникновение остаточных напряжений, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные свойства покрытий. Поэтому нового прогресса здесь стоит ожидать, по видимому, с развитием методов управления параметрами газоразрядной плазмы. Здесь, в первую очередь, стоит отметить гидродинамические способы управления плазмой, в частности организацию звуковых волн большой амплитуды или применение шести (и более) плазмотронов одновременно, с целью центрирования

плазменной струи и увеличения теплонапряженности в ней [4-6].

Современными разработками является плазмотрон «Термоплазма 50-01», разработанный в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН [6].

Одним из важных инструментов для понимания физических процессов в плазмотронах является численное моделирование.

Целью данной работы является численное моделирование динамики плазменной струи плазмотрона «Термоплазма 50-01».

Предположение о неразрывной среде справедливо, и плазма рассматривается как сжимаемый, совершенный газ в локальном термодинамическом равновесии, поэтому характеризуется единой температурой T для всех его видов (атомов, ионов, электронов, молекул); выполняется условие квазинейтральности; плазма оптически тонкая; Токи Холла, гравитационные эффекты и вязкое рассеяние считаются незначительными.

Поскольку плазма является проводящей, ее описание требует решения системы уравнений сохранения массы импульса и энергии, а также электромагнитных уравнений, определяющихся как

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = \vec{j} \times \vec{B} - \nabla \left[P + \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{V}) \right] + 2 \nabla \cdot (\mu \mathbf{S}), \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) - \frac{dP}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + \vec{j} \times \vec{E} + \frac{5k_B}{2e} \vec{j} \cdot \nabla T, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \varphi) = 0, \quad \vec{E} = -\nabla \varphi, \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (4)$$

В случае если поток плазмы, формируемый плазмотроном, истекает во внешнюю газовую среду иного, нежели используемый плазмообразующий газ, химического состава, чаще всего в воздух, необходимо учитывать процессы конвективной диффузии, имеющие место при смешении плазмообразующего газа с внешней газовой средой, и соответствующего изменения состава, теплофизических свойств и коэффициентов переноса плазмы. Для этого применяется уравнение конвективной диффузии плазмообразующего газа во внешней газовой среде. Однако плазмотрон марки «Термоплазма-50-01» работает на плазмообразующем газе – воздух.

Расчетная область состояла из двух частей: плазменного канала внутри плазмотрона и плазменной струи на выходе плазмотрона. В табл. 1 приведены граничные условия, использованные при моделировании, где представлено давление на выходе, равное 760 Торр, h_w – коэффициент конвективного теплообмена на стенке анода, равный 3000 Вт/(м²·К), T_0 – эталонная температура охлаждающей воды 300 К – температура катода и анода. Ток дуги $I = 100$ А и массовый расход воздуха 1,6 г/с.

Граничные условия

Область	Граничные условия
На входе	$T = T_0, - \int_{\partial \Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) d_{bc} dS = m,$ $\vec{j} \cdot \vec{n} = 0, \vec{A} \times \vec{n} = 0;$
Катод	$T = T_2, \vec{v} = 0, \vec{j} \cdot \vec{n} = I / (\pi R_c^2)$ $\vec{A} \times \vec{n} = 0;$
Анод	$T = T_3, \vec{v} = 0, \varphi = 0, \vec{A} \times \vec{n} = 0;$
На выходе	$\nabla T = 0, p_{out} = p_0, \vec{j} \cdot \vec{n} = 0,$ $\vec{A} \times \vec{n} = 0;$
Межэлектродное пространство	$-\vec{n} \cdot \lambda \vec{\nabla} T = h(T_0 - T), \vec{v} = 0,$ $\vec{j} \cdot \vec{n} = 0, \vec{A} \times \vec{n} = 0.$

Несмотря на полезность предположения о локальном термодинамическом равновесии, следует понимать, что отклонение от локального термодинамического равновесия является в большей степени правилом, чем исключением в процессах на основе плазмы [7-9]. Например, отклонения от локального термодинамического равновесия происходят вблизи электродов электрической дуги или в пограничном слое, электрически изолирующем столбик дуги от стенки анода плазменной горелки. Отклонение от локального термодинамического равновесия также происходит, когда жидкие или твердые прекурсоры вводят внутри плазменной струи для обработки порошков или покрытий. В этом случае функция распределения энергии каждого вида частиц остается максвелловской, но средняя кинетическая энергия может быть разной для электронов и тяжелых частиц. Температура T_e электронов, таким образом, выше, чем температура T_h тяжелых частиц, и отклонение от теплового равновесия может быть охарактеризовано параметром θ , определенным как $\theta = T_e/T_h$.

Как и в предположениях локального термодинамического равновесия, расчет термодинамических и транспортных свойств требует предварительного расчета двухтемпературного состава плазмы.

Определение давления как условия притока или оттока при моделировании плазмотрона является довольно громоздким, особенно если область моделирования охватывает только внутреннюю часть горелки. Для несжимаемых внутренних потоков давление часто вводится как условие истечения, тогда как заданная скорость – как условие притока. Для сжимаемых потоков давление может использоваться в качестве условия притока или оттока в зависимости от того, является ли поток дозвуковым или сверхзвуковым. Приток плазмотрон постоянного тока часто является несжимаемым (очень низкое число Маха), тогда как поток, который выходит из горелки, безусловно, сжимаемый, либо дозвуковой, либо сверхзвуковой. Моделирование потоков плазменной го-

релки с постоянным током часто требует экспериментов с различными наборами условий притока/оттока, чтобы найти наиболее подходящие и физически надежные условия.

Граничные условия на входе часто включают описание процесса закачки газа. Газ может впрыскиваться прямо (в направлении, параллельном оси плазматрона), радиально, тангенциально (то есть с вихрем) и часто с использованием комбинации вышеупомянутого. Различные формы впрыска газа стремятся наложить различные характеристики на поток плазмы, например увеличить сужение дуги или увеличить смешивание газа. Детальное моделирование процесса впрыска газа очень желательно, но его часто избегают, чтобы уменьшить вычислительные затраты на моделирование.

Граница истечения при моделировании плазматрона обычно представляет собой выход горелки или некоторую другую область ниже дуги, например область в пределах плазменной струи. Моделирование струи, создаваемой дугой, которая характеризуется сложной динамикой из-за движения дугового разряда и большими градиентами скорости и температуры, это требует особого внимания при наложении условий истечения.

Наиболее часто используемым условием истечения при моделировании плазматрона постоянного тока является наложение нулевого градиента транспортируемой переменной.

При моделировании процессов у стенок граничные условия должны отличаться от электродов, и стенки должны быть непроводящими. Непроводящие стенки моделируются в зависимости от условий скольжения и типа теплопередачи на месте. Для непроводящих стенок основной проблемой является моделирование тепла, передаваемого из плазмы. Этот аспект особенно важен в плазматронах, где сжимающая трубка рассеивает большое количество тепла из плазмы. В плазматронах в области анода, вдали от места прикрепления дуги также могут рассматриваться как непроводящие стенки, так как через них не проходит электрический ток. Наиболее частым подходом, используемым для моделирования теплообмена в непроводящих стенках системы дуговой горелки, является использование общего коэффициента конвективного теплообмена.

Специфика граничных условий для поверхности анода заключается в том, что является условием скольжения, за исключением обработки энергетических и электромагнитных граничных условий.

Катоды являются источником электронов в тепловых плазматронах. Катод в плазматронах постоянного тока, используемых для плазменного напыления, является термоэлектронным; то есть электроны испускаются вследствие высокой температуры катода. Область перед катодом может быть разделена на две отличительные части: область ионизации и оболочка.

Необходимость снижения вычислительных затрат на моделирование областей электродов в промышленных потоках тепловой плазмы мотивировала разработку различных моделей оболочек. Эти модели пытаются в

упрощенной форме описать основные физические эффекты, которые доминируют на границе раздела электрод - плазма. Особенно важным является унифицированный подход, который при применении к моделированию катода не требует указания профиля плотности тока.

В качестве граничных условий для сохранения энергии часто устанавливается определенное равновесное или высокоспецифичное распределение температуры по поверхности катода (где наибольшая температура обычно принимается близко к точке плавления материала катода, тогда как, моделирование катодной области особенно важно при моделировании плазменных резков из-за относительно большой площади кончика катода, относительно небольшого объема потока и больших плотностей тока на катоде).

На рис. 1 представлен расчет распределения температуры в плазменной струе для различных моментов времени (от 5 до 6 мс) работы плазматрона. Время было выбрано по причине того, что установление струи находилось на данном временном отрезке.

Далее после 6 мс можно зафиксировать установившееся состояние плазменной струи, например как показано на рис. 2.

Осевое распределение температуры в плазменной струе показано на рис. 3. Видно, что распределение температуры имеет параболический характер. Температура падает от значения на срезе сопла плазматрона ($T = 7000$ К) до температуры, близкой к температуре окружающей среды на расстоянии 146 мм от сопла плазматрона.

На рис. 4 представлены результаты расчета радиального распределения температуры в сечении, находящемся на расстоянии 60 мм от сопла плазматрона. В данном сечении радиус струи равен 9,8 мм.

Достаточно большой прогресс был достигнут в моделировании плазматронов постоянного тока. Широкое применение находят двумерное и зависящее от времени моделирование промышленных плазматронов. Это моделирование может помочь лучше понять работу плазматронов постоянного тока и привести к улучшению конструкции плазматронов и плазменных процессов. В нашем исследовании показано, что необходимое время для образования установившейся струи 6 мс. Температура падает от значения на срезе сопла плазматрона ($T = 7000$ К) до температуры, близкой к температуре окружающей среды на расстоянии 146 мм от сопла плазматрона. Таким образом, подложку при напылении необходимо устанавливать в диапазоне между температурой плавления и кипения материала порошка. Например, для порошка оксида алюминия (Al_2O_3) подложку необходимо расположить на расстоянии 112-127 мм. Результаты моделирования значительно улучшат прогнозирующую способность плазменных процессов нанесения функциональных покрытий с помощью плазматрона постоянного тока «Термоплазма 50-01», что позволит повысить эффективность и экономический эффект от внедрения плазменных технологий в промышленное производство.

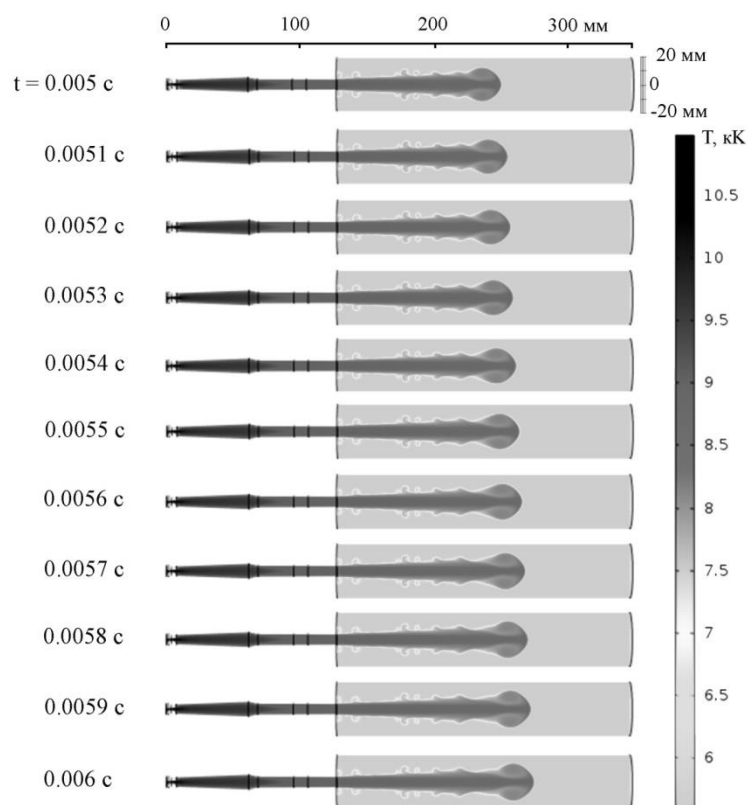


Рис. 1. Расчет распределения температуры в плазменной струе для различных моментов времени

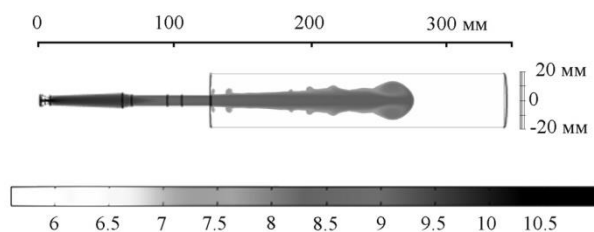


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для времени $t = 12$ мс

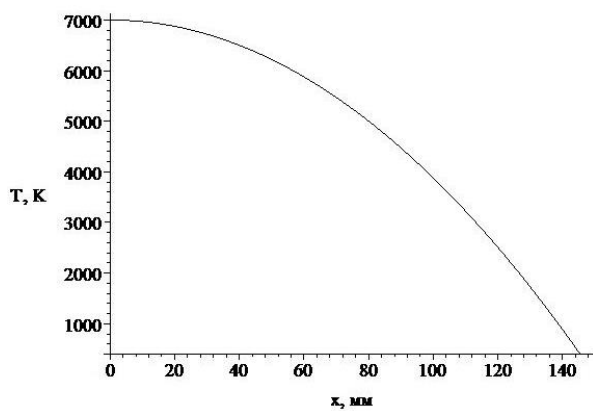


Рис. 3. Осевое распределение температуры в плазменной струе

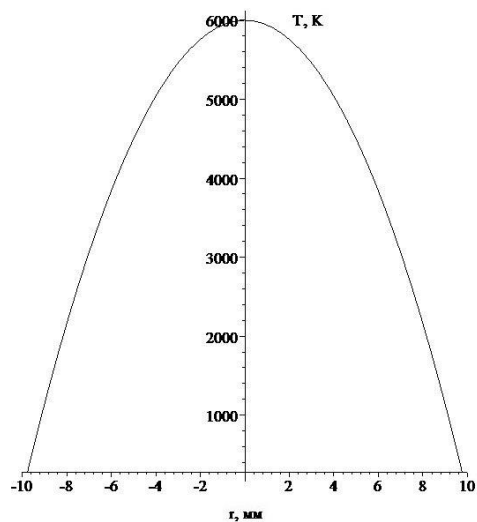


Рис. 4. Радиальное распределение температуры в сечении, находящемся на расстоянии 60 мм от сопла плазматрона

Модель процесса может быть основана на системе уравнений движения многоскоростной многотемпературной среды [9], в которой на частицу, наряду с силами аэродинамической природы, воздействует сила Кулона. Система уравнений (5)-(9) включает в себя уравнения движения несущей среды и фракций дисперсной фазы с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена, а также с учетом взаимодействия заряженной газовой взвеси с электрическим полем, которое создается как неподвижными электродами, так и пространственно распределенным электрическим зарядом, который переносит дисперсная фаза [10,11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv - \tau_{xy}) = \\ = - \sum_{i=2,n} F_{xi} + \sum_{i=2,n} \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p - \tau_{yy}) = \\ = - \sum_{i=2,n} F_{yi} + \sum_{i=2,n} \alpha_i \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}([e + p - \tau_{xx}]u - \tau_{xy}v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \\ + \frac{\partial}{\partial y}([e + p - \tau_{yy}]v - \tau_{xy}u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y}) = \\ = \sum_{i=2,n} Q_i - \sum_{i=2,n} (|F_{xi}|(u - u_i) - |F_{yi}|(v - v_i)) + \\ + \sum_{i=2,n} \alpha_i \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right) \\ \tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right), \\ \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \end{aligned} \quad (8)$$

Движение фракций дисперсной фазы описывается уравнением сохранения средней плотности фракции, уравнениями сохранения составляющих импульса и уравнением сохранения энергии, записанными с учетом теплообмена, обмена импульсом с несущей фазой и с учетом силы Кулона, действующей на частицы i -фракций дисперсной фазы (10)-(21):

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho_i u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i u_i v_i) = F_{xi} + F_{exi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho_i v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i v_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i v_i^2) = F_{yi} + F_{eyi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial(e_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_i u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(e_i v_i) = -Q_i; \quad (13)$$

$$\rho_i = \alpha_i \rho_{i0}, \quad e_i = \rho_i C_{vi} T_i; \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = pq; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_{xi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r)} C_d \rho \sqrt{(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2} (u - u_i) + \\ + \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ + 0.5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} F_{yi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r)} C_d \rho \sqrt{(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2} (v - v_i) + \\ + \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ + 0.5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (17)$$

$$C_{di} = \frac{24}{Re_{i1}} + \frac{4}{Re_{i1}^{0.5}} + 0.4, \quad M_{i0} = |\bar{V} - \bar{V}_i| / c; \quad (18)$$

$$Re_{i1} = \rho_1 |\bar{V} - \bar{V}_i| 2r / \mu, \quad Pr = \gamma C_p \mu / \lambda; \quad (19)$$

$$Q_i = 6 \alpha_i Nu_i \lambda \frac{(T_1 - T_i)}{(2r)^2}, \quad i=2, \dots, n, \quad (20)$$

$$Nu_i = 2 \exp(-M_{i0}) + 0.459 Re_{i0}^{0.55} Pr^{0.33},$$

$$Pr = \frac{\gamma C_p \mu}{\lambda} \quad 0 \leq M_{i0} \leq 2, \quad 0 \leq Re_{i0} < 2 \cdot 10^5. \quad (21)$$

Тепловая энергия взвешенных в газе фракций твердой фазы определяется как $e_i = \rho_i C_{pi} T_i$. Система уравнений дополнялась соответствующими начальными и граничными условиями. На входных и выходных границах расчетной области, кроме входного сечения сопла-распылителя, для всех газодинамических функций, включая составляющие скорости несущей и дисперсной фазы, задавались граничные условия Неймана. Составляющие силы Кулона на единицу объема газовой взвеси определялись через ее удельный заряд, объемную плотность твердой фазы и напряженность электрического поля: $F_{exi} = -q_0 \rho_i \partial \varphi / \partial x$, $F_{eyi} = -q_0 \rho_i \partial \varphi / \partial y$, где q_0 – удельный заряд единицы массы твердой фракции, φ – потенциал электрического поля. Потенциал электрического поля в расчетной области находился из решения уравнения Пуассона (22) с граничными условиями второго рода. В правой части уравнения Пуассона размещалась плотность заряда газовой взвеси, отнесенная к абсолютной диэлектрической проницаемости несущей среды [12, 13]:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho_{\text{эл}}}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad \Delta^2 \varphi = -\frac{\rho_{\text{эл}}}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (22)$$

$$\rho_{\text{эл}} = \rho_{\text{sum}} q, \quad \rho_{\text{sum}} = \sum_i \rho_i, \quad \varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ Ф/м}.$$

Система уравнений записывалась в обобщенных криволинейных координатах: физическая область течения в переменных (x, y, t) отображалась на каноническую расчетную область в переменных (ξ, η, t) [14, 15] и решалась явным методом Мак-Кормака второго порядка с последующим применением схемы нелинейной коррекции решения [11]. Уравнение Пуассона для потенциала электрического поля записывалось в обобщенных координатах и решалось методом конечных разностей с помощью итерационной схемы Зейделя на газодинамической расчетной сетке.

Результаты расчетов

На рис. 5 приведена схема расчетной области DEE_1D_1 , на которой показано положение электрода OO_1 на оси сопла-распылителя, электрода-мишени BB_1 и срез распыляющего сопла CC_1 , которое находится на входной границе расчетной области при $x = 0$. Расчетная область представляет собой квадрат со стороной 1 м. Дисперсная фаза наносится на пластину BB_1 шириной 0,2 м, располагающуюся вертикально в сечении $x = 0,1$ м, симметрично оси $y = 0,5$ м. Газовзвесь состоит из пяти фракций твердых частиц с радиусами $R = 1, 10, 15, 18, 50$ мкм. Плотность материала частиц $\rho_{0i} = 2700 \text{ кг/м}^3$. В начальный момент времени задается малое объемное содержание частиц всех фракций, находящихся в расчетной области во взвешенном состоянии. Объемное содержание каждой фракции в начальный момент времени составляет $\alpha_i = 2 \cdot 10^{-6}$ ($i = 1-5$), что соответствует суммарной средней плотности дисперсной фазы $\rho_{\text{sum}} = \sum \rho_i = 0,027 \text{ кг/м}^3$. Предполагается, что удельный объемный заряд i -й дисперсной фракции газовзвеси пропорционален ее средней плотности и удельному электрическому заряду единицы массы $q_i = \rho_i q_0$. В начальный момент времени температуры фаз одинаковы и составляют $T = 293 \text{ К}$, плотность несущей среды, в качестве которой рассматривается воздух, $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$, удельный электрический заряд единицы массы $q_0 = -0,0002 \text{ Кл/кг}$.

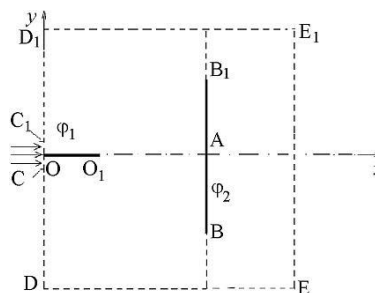


Рис. 5. Расположение сопла-распылителя (CC_1), коронирующего электрода (OO_1) и электрода-мишени (BB_1)

Скорость несущей и дисперсной фазы газовзвеси на срезе сопла-распылителя CC_1 составляет 0,1 м при средней плотности каждой фракции $\rho_{0i} = 0,054 \text{ кг/м}^3$, где M – число Маха потока. Для температуры $T = 293 \text{ К}$ скорость на выходе сопла-распылителя – 34 м/с. Ширина сопла-распылителя $|CC_1| = 0,02 \text{ м}$. Таким образом, суммарная плотность дисперсной фазы на выходе распылителя $\rho_{\text{sum}} = 0,027 \text{ кг/м}^3$, а удельный расход дисперсной фазы – $0,01836 \text{ кг/м}^2\text{с}$. Дисперсная фаза наносится на пластину, располагающуюся вертикально при $x = 0,1 \text{ м}$. На оси распылителя находится электрод, на который подается отрицательный потенциал $\varphi_1 = -30 \text{ кВ}$. На пластину-мишень подается потенциал $\varphi_2 = 10 \text{ кВ}$. Распределение потенциала электрического поля, созданного электродами и распределенным зарядом, показано на рис. 6, а. Распределение силы Кулона, действующей со стороны электрического поля на единичный отрицательный заряд вдоль оси симметрии области ($y = 0,5 \text{ м}$), показано на рис. 6, б.

В области $0 < x < 0,1 \text{ м}$ сила Кулона действует на частицы в направлении пластины. За пластиной с подветренной стороны сила, действующая на частицу, также направлена к поверхности пластины, в результате чего частицы в этой области переносятся в направлении пластины, как электрическим полем, так и вращающимися присоединенными вихрями, что представлено на рис. 7.

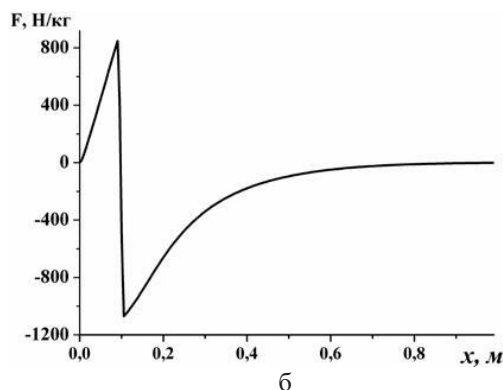
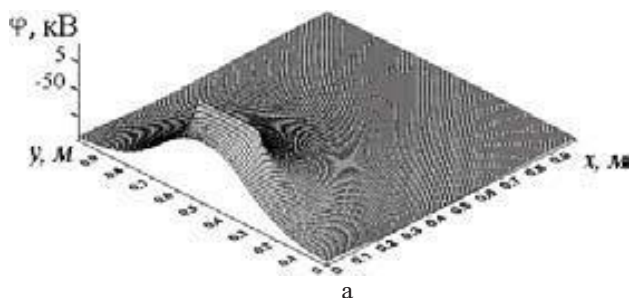


Рис. 6. Распределение потенциала электрического поля, созданного электродами и распределенным зарядом (а) и напряженность электрического поля на оси симметрии ($y = 0$) расчетной области (б)

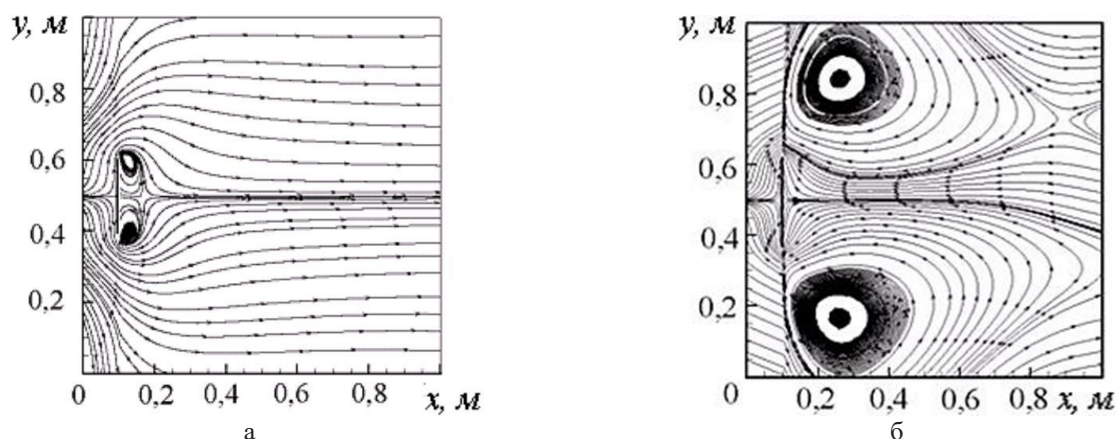


Рис. 7. Поля скоростей несущей среды при обтекании пластины заряженной газозвесью в моменты времени: а – $t = 0,0044$ с; б – $0,121$ с

На рис. 8 показано распределение поверхностной плотности дисперсной фазы на поверхности пластины, обращенной к распылителю, сформировавшееся к моменту времени $t = 0,121$ с. Наибольшая поверхностная плотность, достигнутая к этому моменту времени, наблюдается у фракции с радиусом частиц 50 мкм. Связано это с тем, что на крупные частицы, несущие большой заряд, действует большая сила Кулона, они более инерционны и слабее отклоняются от первоначального направления движения силами аэродинамического сопротивления. Максимум распределения формируется в середине пластины. Затем при удалении от середины поверхностная плотность снижается, достигает минимума и снова возрастает к концам пластины, что связано с краевым эффектом вследствие увеличения в этих областях напряженности электрического поля. Распределения поверхностной плотности остальных фракций (1, 10, 15, 18 мкм) качественно подобны, при том, что по мере уменьшения размера частиц масса осаждевшегося вещества снижается.

Влияние вихрей в донной области пластины, как представлено на рис. 9, и силы со стороны электрического поля на частицы приводит к тому, что и на тыльной стороне пластины происходит осаждение частиц и формирование поверхностного слоя. При этом поверхностная плотность крупной фракции на подветренной стороне пластины значительно ниже, чем наветренной части со стороны распылителя. По мере уменьшения радиуса частиц фракций отношение поверхностных плотностей на наветренной и подветренной сторонах пластины снижается, и напыление становится более однородным, как показано на рис. 10.

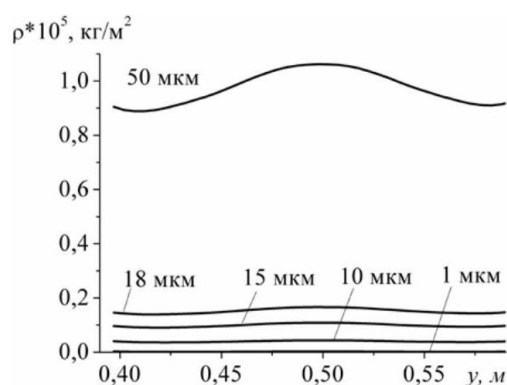


Рис. 8. Распределение средней плотности фракций различных размеров (радиусом от 1 до 50 мкм) на поверхности пластины со стороны сопла-распылителя

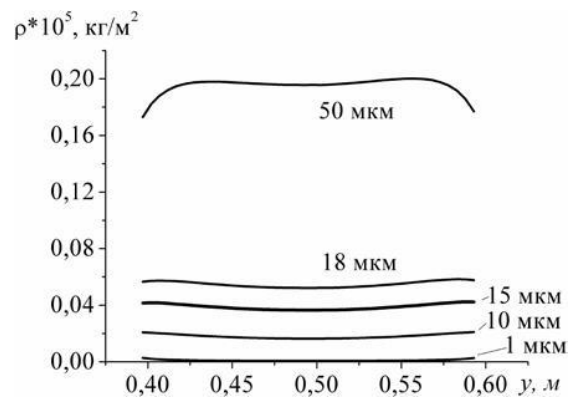


Рис. 9. Распределение средней плотности фракций различных размеров на поверхности пластины с донной стороны сопла-распылителя

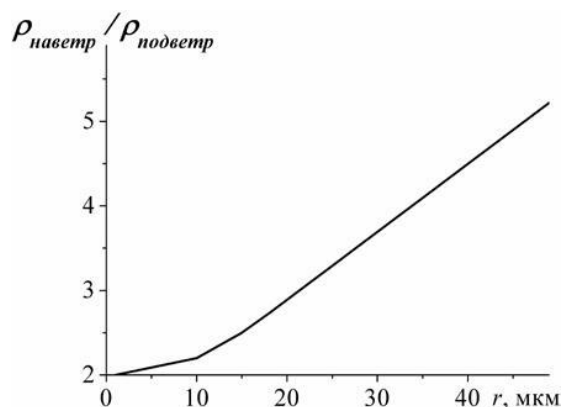


Рис. 10. Отношение поверхностных плотностей дисперсной фазы на наветренной и подветренной сторонах дисперсной фазы в средней точке пластины

Выводы

1. В процессе осаждения мелкодисперсных фракций при напылении на пластину в электрическом поле частицы мелкой фракции сносятся обтекающим пластину потоком, что уменьшает скорость их осаждения по сравнению с частицами газозвесей средней и крупной дисперсности, которые в силу большей инерционности достигают поверхности. Сила аэродинамического сопротивления для мелких частиц преобладает над силой Кулона. В донной области пластины частицы также переносятся к поверхности за счет действия присоединенных вихрей и силы Кулона, и по мере уменьшения радиуса частиц отношение поверхностных плотностей дисперсной фазы, осажденной на наветренной и подветренной сторонах электрода-мишени, снижается, напыление становится более равномерным.

2. На основании математического и физического моделирования процессов плазменного напыления определены способы разработки и изготовление плазматрона для напыления в аргоновой плазме. Исследовано плазменное напыление на литейные формы карбидов и окислов различных материалов. Исследованы параметры полученных плазменных покрытий, а также проведен анализ полученных результатов.

3. Разработана физическая и математическая модель нанесения покрытий в электростатическом поле на литейные формы сложной конфигурации.

4. В результате проведенных исследований был получен опытный образец плазматрона для напыления в аргоновой плазме, а также образцы покрытий из карбидов и окислов различных материалов на литейных формах, полученных плазменным напылением.

5. На основе выполненных работ разработаны рекомендации по уменьшению слоя повышенной твердости на титановых отливках.

Список источников

1. Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е.Л. Бибииков, С.Г.

- Глазунов, А.А. Неуструев, Г.Л. Ходоровский, К.С. Ясинский. М.: Металлургия, 1983. 296 с.
2. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко. Минск: Беларус. наука, 2011. 357 с.
3. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / сост.: Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.А. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
4. Dalir E., Moreau C., Dolatabadi A. Three-Dimensional Modeling of Suspension Plasma Spraying with Arc Voltage Fluctuations // Journal of Thermal Spray Technology. 2018, vol. 27, no. 8, pp. 1465–1490.
5. Karikh F.G., Arslanov I.M. Application of six-jet plasmatron in science and technology // Journal of Physics Conference Series. 2018. V. 1058. No. 1. P. 012019.
6. Интенсификация плазменного напыления при воздействии акустических и электрических колебаний на генераторную струю / Г.П. Лизунков, В.Д. Шиманович, И.С. Буров, А.Ф. Ильющенко // ИФЖ. 1984. Т. 47, № 5. С. 812–816.
7. Numerical Study on Plasma Jet and Particle Behavior in Multi-arc Plasma Spraying / K. Bobzin, M. Ote, J. Schein, S. Zimmermann // Journal of Thermal Spray Technology. 2017. V. 26, N 5. P. 811–830.
8. Arc Plasma Torch Modeling / J. P. Trelles, C. Chazelas, A. Vardelle, J. V. R. Heberlein // Journal of Thermal Spray Technology. 2009. V. 18. No. 5-6. Pp. 728–752.
9. Modeling and simulation of plasma jet by lattice Boltzmann method / H. Zhang, S. Hu, G. Wang, J. Zhu // Applied Mathematical Modelling. 2007. V. 31. P. 1124–1132.
10. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
11. Титан / Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В., Олесов Ю.Г., Сандлер Р.А. М.: Металлургия, 1983. 558 с.
12. Цвиккер У. Титан и его сплавы: пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. 511 с.
13. Титан и его сплавы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metal-archive.ru/osnovy-metallurgii/1625-titan-i-ego-splavy.html> (дата обращения: 9.12.2018)
14. Khatmullina A.I., Petrov E.Yu., Lyakhovich A.M. Research of boundary layers of molds, used in titanium casting. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. (2018) 412 012043.
15. Petrov E.Yu., Khatmullina A.I., Lyakhovich A.M. Surface modification of molds for titanium casting, and its influence on the allocation of chemical elements in boundary layers. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. (2018). 412. 012056.

16. Инновационные подходы к решению проблемы борьбы с образованием альфированного слоя на отливках титана / А.А. Ишпаева, А.М. Ляхович, Н.Ф. Кашапов, М.Н. Саубанов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2022 (МНТК «ИМТОМ-2022»): материалы XI Международной научно-технической конференции. Казань, 2022. С. 214-217.
17. Основные проблемы при изготовлении титановых отливок / М.Н. Саубанов, Е.Н. Жирков, А.Ю. Дозорнов, И.О. Леушин, И.Е. Илларионов // Литейщик России. 2018. № 2. С. 9-13.
18. Саубанов М.Н. Преимущество и роль титановых сплавов в судостроении / В.П. Леонов, М.Н. Саубанов, Е.В. Чудаков, М.В. Иксанов, Н.Ф. Молчанова // Титан. 2023. №2.

Сведения об авторах

Саубанов Марат Нинарович – кандидат технических наук, главный металлург, АО «Зеленодольский завод имени А.М. Горького», Зеленодольск, Россия. E-mail: ogmet@zdship.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF COATING PROCESS IN ELECTROSTATIC FIELD FOR THE CORONA DISCHARGE ON MOLDS OF COMPLEX CONFIGURATION FOR PRODUCTION OF TITANIUM CASTINGS

Saubanov Marat N. – Candidate of Technical Sciences, main metallurgist, JSC «Zelenodolsk plant named after A.M.Gorky», Zelenodolsk, Russia. E-mail: ogmet@zdship.ru

Abstracts. It was examined the possibility of plasma-spraying of carbides and oxides of different materials on periclase (magnesite) molds. It was carried out arc plasma spraying of power mixture TiO_2 и Al_2O_3 with mathematical models of coating process to get plasma coating, containing Ti – Al phases, capable to disable migration of oxygen and active metals to the surface of casting molds. It was carried out numerical modelling of plasma jet dynamics of plasma generator «Termoplasma 50-01». It was provided the calculation of temperature distribution in plasma jet for different working time moments of plasma generator. Model predictions will improve significantly the possibility to expect plasma coating processes of functional coatings by plasma generator of direct current «Termoplasma 50-01» and let to improve economic effect from implementation of plasma technology in industrial production. Based on the completed work, recommendations were developed for reducing the layer of increased hardness on titanium castings.

Keywords: gas-thermal coating, electro-magnetic formula, plasma forming gas, inter electrode space, gas suspension, electrostatic field electrostatic field

Ссылка на статью:

Саубанов М.Н. Физическая и математическая модели нанесения покрытий в электростатическом поле коронного разряда на литейные формы сложной конфигурации для изготовления титановых отливок // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 10-18.

Saubanov M.N. Physical and mathematical models of coating process in electrostatic field for the corona discharge on molds of complex configuration for production of titanium castings. *Teoria i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 10-18.

УДК 621.74

Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Бойко А.Б., Троянов А.В., Сулицин А.В., Эпова И.А.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ГРАФИТОВУЮ ФАЗУ И ТВЕРДОСТЬ ВАЛКОВОГО ЧУГУНА

Аннотация. В статье рассмотрены процессы графитизации валкового чугуна и влияние химического состава на морфологию графитовой фазы и его твердость. Исследовано влияние ванадия и молибдена на выделение графитовой фазы при концентрации ванадия и молибдена. Получены уравнения регрессии влияния химического состава относительно значения твердости. Вместе с тем оценено влияние параметров производства и получены уравнения регрессии твердости и содержания графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала с помощью метода нормального уравнения. Дополнительно проведены расчеты для выявления значимых коэффициентов уравнения регрессии. Полученные результаты имеют практическое значение для металлургической промышленности, так как позволяют целенаправленно управлять свойствами валкового чугуна путем корректировки химического состава и технологических параметров производства.

Ключевые слова: индифинитный чугун, полнофакторный эксперимент, прокатные валки, уравнение регрессии, твердость, графит

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений интенсификации производства является сокращение числа перевалок прокатных валков. При этом имеется некоторый запас по стойкости валков первых чистовых клетей и лимитирующим фактором являются валки финишных клетей из индифинитного чугуна. В направлении повышения их стойкости со стороны прокатных цехов имеется высокая заинтересованность.

Прокатные валки из индифинитного чугуна на сегодняшний день являются самым массовым инструментом прокатного стана. Первым поколением данных валков являлась двухслойная заливка металла в стационарную форму. Данным методом изготавливались прокатные валки начиная с 80-х годов прошлого века, универсальность и простота технологии позволяет и по сей день получать некоторые виды валков методом статического литья. Следующим поколением явилось использование метода центробежного литья, позволившим получить более мелкозернистую структуру и возможность значительно повысить твердость и износостойкость рабочего слоя. На сегодняшний день вследствие высоких требований к качеству поверхности и износостойкости на широкополосных станах горячей прокатки применяются только центробежнолитые валки.

На износостойкость влияет множество факторов, один из них это графит. В настоящее время проведены исследования выделения графита в литейных сплавах, которые позволяют оценить влияние химического состава на его морфологию. При производстве прокатных валков помимо химического состава имеется еще и технологический фактор – изотермическая выдержка рабочего слоя в процессе заливки металла в сердцевину. Поэтому это исследование совокупности химического состава, а также параметров изотермической выдержки на морфологию графитовой

фазы при заливке сердцевины является актуальной задачей.

Цель работы – определение влияния легирующих элементов на характеристики валкового чугуна.

Методы и методика проведения эксперимента

Выплавку опытных сплавов производили в литейной лаборатории кафедры литейных процессов и материаловедения Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова в индукционной плавильной тигельной печи ИЧТ-0002 с шамотной футеровкой ёмкостью 2 кг с извлекаемым тиглем.

В качестве шихтовых материалов при выплавке использовались следующие материалы: Чугун литейный – ГОСТ 4832-95, Лом стальной – ГОСТ 2787-2019, Ферросилиций – ГОСТ 1415-93 (ISO 5445-80), ФС90; Ферромарганец ФМн90(РА) – ГОСТ 4755-91 (ISO 5446-80), Феррохром ФХ001А – ГОСТ 4757-91 (ISO 5448-81), Ферромolibден ФМо60(нк) – ГОСТ 4759-91 (ISO 5452-80), Феррованадий FeV40 – ГОСТ 17293-93 (ISO 5450-80), Никель НЗ – ГОСТ 849-97, Ферровольфрам ФВ72 – ГОСТ 17293-93 (ISO 5450-80), Ферросиликомарганец – ГОСТ 4756-91 (ISO 5447-80), Феррониобий ФН660 – ГОСТ 16773-2003 (ISO 5453-80).

После выплавки опытных сплавов проводили модифицирование расплава в тигле с помощью «колокольчика» и заливку его в форму. Модификатор СФЕРОМАКС 9104 марки FeSiMg910Ba4 ГОСТ2138-91.

Разливка расплава производилась в подготовленные просушенные и подогретые в камерном сушиле песчаные формы. С целью оценки влияния скорости кристаллизации на формирование структуры материала форма отливки выполнена трехступенчатой с толщиной сечения 30, 20 и 10 мм (рис. 1). Каждая отливка разрезана на три пробы различных сечений.

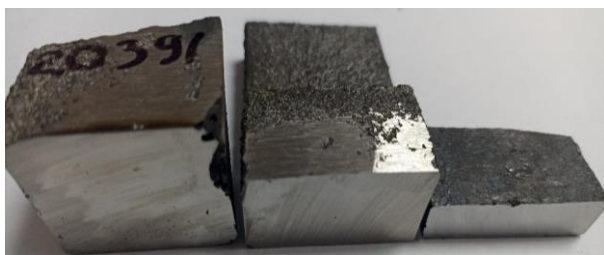


Рис. 1. Пробы от различных сечений трехступенчатой отливки

Определение твердости производилось на стационарном твердомере ERGOTEST COMP 25, метод испытаний согласно ГОСТ 9013-59.

Температуру заливки сплавов определяли при помощи термоизмерителя модели ТЦП-1800В, который предназначен для измерения температуры расплава металлов при помощи термопреобразователя из вольфрам-рениевых сплавов (BP5/20; ГОСТ Р 8.585.2001).

Определение предела прочности на растяжение (временного сопротивления) осуществлялось в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Определение предела прочности на изгиб осуществлялось в соответствии с ГОСТ 14019-2003 «Металлы. Методы испытаний на изгиб». Испытания на механические свойства проводили в лабораториях ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Микроструктура образцов изучалась на микрошлифе с использованием инвертированного металлографического микроскопа GX-71 до и после травления в 4%-м спиртовом растворе HNO_3 при увеличении $100\times$, $500\times$ согласно ГОСТ 3443-87.

Построение математических моделей проводили по стандартным методикам и с использованием стандартных пакетов электронных таблиц программы «EXCEL».

Результаты и обсуждения

Для исследования влияния различных факторов на твердость и параметры структуры прокатных валков в лабораторных условиях были проведены четыре плавки металла рабочего слоя из индефинитного чугуна (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав индефинитного чугуна

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ni и W
ICDP	2,6-3,4	0,7-1,5	0,5-1,2	0,6-2,0	2,5-5,0	0,2-0,8	до 0,2	до 0,3

Для индефинитного чугуна составим матрицу планирования полного факторного эксперимента (табл. 2). В ходе работы оценивается влияние ванадия (x_1) и молибдена (x_2).

Таблица 2

Исходная матрица планирования полного факторного эксперимента

№ п/п	Изучаемые факторы				Результаты опытов		
	x_1	V	x_2	Mo	y_1	y_2	y_3
1	+	0,56	+	0,53	45,7	46,3	48,7
2	-	0,20	+	0,60	45,7	43,7	42,7
3	+	0,60	-	0,20	43,2	46,2	45,8
4	-	0,27	-	0,26	44,4	45,6	45,6
5	0	0,4	0	0,4	44,75	45,45	45,7

Для каждого фактора принимаем основной уровень, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной от натуральной (табл. 3).

Таблица 3

Кодирование факторов

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
z_1	0,2	0,6	0,4	0,2
z_2	0,2	0,6	0,4	0,2

Считаем средние выборочные результатов твердости для каждого эксперимента и строим матрицу планирования (табл. 4) с учетом всех взаимодействий и средних значений отклика.

Таблица 4

Матрица планирования для обработки результатов полного факторного эксперимента

№ п/п	Факторы				Взаимодействия	Результаты опытов			Среднее результатов
	x_1	V	x_2	Mo		y_1	y_2	y_3	
1	+	0,56	+	0,53	+	45,7	46,3	48,7	46,89
2	-	0,20	+	0,60	-	45,7	43,7	42,7	44,00
3	+	0,60	-	0,20	-	43,2	46,2	45,8	45,07
4	-	0,27	-	0,26	+	44,4	45,6	45,6	45,20
5	0	0,4	0	0,4	0	44,75	45,45	45,7	45,30

Вычисляем коэффициенты уравнения регрессии относительно значений твердости и находим дисперсию воспроизводимости (табл. 5).

Таблица 5

Расчет дисперсии

№ п/п	1			2	3	4	5	6
	$y_{тв1}$	$y_{тв2}$	$y_{тв3}$	$y_{твj}$	$(y_{твj1} - \overline{y_{твj}})^2$	$(y_{твj2} - \overline{y_{твj}})^2$	$(y_{твj3} - \overline{y_{твj}})^2$	$S_{твj}^2$
1	45,7	46,3	48,7	46,89	1,49	0,31	3,16	1,65
2	45,7	43,7	42,7	44,00	2,78	0,11	1,78	1,46
3	43,2	46,2	45,8	45,07	3,48	1,28	0,54	1,77
4	44,4	45,6	45,6	45,20	0,64	0,16	0,16	0,32
5	44,75	45,45	45,7	45,30	0,30	0,02	0,16	0,24

Суммируя элементы столбца 6 табл. 5, получаем

$$\sum_{j=1}^4 S_{твj}^2 = 5,2988. \quad (1)$$

Отсюда получаем дисперсию воспроизводимости:

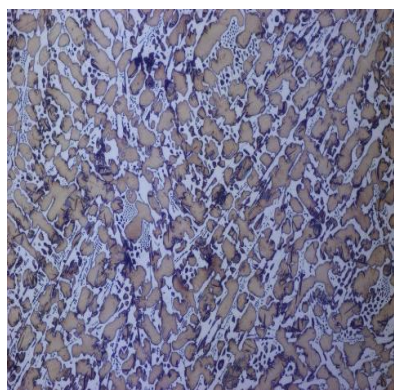
$$S_{\{тву\}}^2 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 S_j^2 = \frac{5,2988}{4} = 1,325. \quad (2)$$

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\{тву\}} = \sqrt{\frac{S_{\{тву\}}^2}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{1,325}{4 \cdot 3}} = 0,332. \quad (3)$$

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(m-1) = 4 \cdot 2 = 8$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{кр} = 2,306$. Следовательно, $t_{кр} \cdot S_{\{y\}} = 2,306 \cdot 0,332 = 0,766$. Сравнивая полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии, видим, что все коэффициенты меньше по абсолютной величине 0,766. Следовательно, все коэффициенты незначимы. На значение твердости содержание ванадия и молибдена в исследованных интервалах значимого влияния не оказывают.

Рассмотрим рис. 2 и табл. 6 и сделаем соответствующие выводы.



×100



×500

Рис. 2. Микроструктура индефинитного чугуна

Таблица 6

Результаты исследования микроструктуры индефинитного чугуна

Номер плавки	Толщина сечения, мм	Определение графита (ГОСТ 3443-87, шкала 3. А, Б, В, Г)	Вид структуры (ГОСТ 3443-87, шкала 5)
1	30	следы (<1 %)	М
1	20	следы (<1 %)	М
1	10	не обнаружен	М
2	30	ПГф1, ПГд45 (1,1%)	М
2	20	следы (<1 %)	М
2	10	не обнаружен	М
3	30	следы ВГ (<1 %)	М
3	20	следы ВГ (<1 %)	М
3	10	не обнаружен	М
4	30	следы ВГ (<1 %)	М
4	20	не обнаружен	М
4	10	не обнаружен	М

Для исследования влияния параметров производства на твердость и содержания графита в структуре рабочего слоя прокатных валков методом нормального уравнения были выбраны следующие качественные характеристики:

1. Процентное содержание графита на глубине 10 мм в исследованной пробе по ГОСТ 3443-87, шкала 3. А, Б, В, Г. Содержание графита оценивалось с помощью анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS.

2. Результаты измерения твердости поверхности бочки прокатного валка динамическим твердомером методом отскока по шкале Шор.

База исходных данных составлена из прокатных валков с рабочим слоем из индефинитного чугуна, изготовленных ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» за 2023 год.

Используя функцию «поиск решения», получено уравнение регрессии твердости в нормированном виде:

$$HSD = 71,32 - 0,54X_1 + 0,04X_2 + 2,5X_3 + 4,78X_4 - 0,19X_5 - 0,53X_6 + 0,96X_7 - 0,37X_8 + 0,81X_9 - 1,39X_{10} + 0,05X_{11}. \quad (4)$$

Для оценки влияния значимых параметров производства выполнен дополнительный расчет и выведено уравнение регрессии для значимых коэффициентов:

$$HSD = 71,24 + 2,74X_3 + 4,14X_4 + 0,74X_7 + 0,66X_9 - 2,0X_{10}. \quad (5)$$

В результате работы установлено, что наибольшее влияние на твердость прокатных валков оказывает содержание марганца, хрома, ванадия и бора в металле рабочего слоя. С увеличением их содержания твердость повышается.

Наибольшее влияние на твердость в исследованных интервалах оказывает содержание хрома. Это объясняется его карбидообразующим действием.

Карбиды хрома в структуре чугуна обладают большей твердостью и износостойкостью в сравнении с карбидами мартенситного типа.

Марганец помимо раскисления металла также является карбидообразующим элементом, увеличивающим твердость рабочего слоя прокатных валков.

Также значительное положительное влияние на твердость оказывает содержание ванадия. В структуре чугуна образует твердые растворы со значительной твердостью 2400-2800 HV. Карбиды ванадия обладают изоморфностью с решеткой аустенита, что обеспечивает их прочное соединение с матрицей.

Меньшее, но также положительное влияние на твердость прокатных валков оказывает содержание бора в металле рабочего слоя вследствие значительного влияния на процессы кристаллизации чугуна как поверхностно-активный элемент, он измельчает зерно и осуществляет дополнительное раскисление металла.

При этом следует учитывать, что высокое содержание карбидообразующих элементов должно компенсироваться увеличением содержания никеля и кремния для обеспечения выделения графита в структуре рабочего слоя и самой возможности эксплуатации прокатных валков из индифинитного чугуна.

Помимо карбидообразующих элементов на твердость прокатных валков значительное влияние оказывает глубина рабочего слоя, характеризующаяся массой заливаемого металла бандажа и степенью смыва высокопрочным чугуном при заливке металла сердцевин. При увеличении толщины бандажа твердость снижается вследствие замедления процесса кристаллизации и снижения доли выделения карбидов.

В результате декодирования входящих параметров получено линейное уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$HSD = 71,24 + 15,63Mn + 8,91Cr + 6,72V + 5,63B - 0,10Pc, \quad (6)$$

где Mn – массовая доля марганца в металле рабочего слоя;

Cr – массовая доля хрома в металле рабочего слоя;

V – массовая доля ванадия в металле рабочего слоя;

B – массовая доля бора в металле рабочего слоя;

Pc – минимальная глубина рабочего слоя.

Уравнение регрессии в нормированном виде для расчета содержания графита представлено в виде

$$\begin{aligned} \%Gr = & 2,32 + 0,21X_1 - 0,03X_2 + 0,13X_3 - 0,96X_4 + \\ & + 0,65X_5 - 0,08X_6 + 0,31X_7 + 0,11X_8 - 0,07X_9 + \\ & + 0,28X_{10} - 0,38X_{11}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для оценки влияния значимых параметров производства выполнен дополнительный расчет и выведено уравнение регрессии для значимых коэффициентов:

$$\begin{aligned} \%Gr = & 2,43 + 0,2X_1 - 0,94X_4 + 0,68X_5 + \\ & + 0,30X_7 + 0,28X_{10} - 0,37X_{11}. \end{aligned} \quad (8)$$

Наиболее значимым коэффициентом является X_4 , характеризующий влияние хрома на выделение графита. Коэффициент отрицательный, что соответствует снижению интенсивности графитизации.

Вторым по значимости коэффициентом является содержание никеля. При увеличении доли никеля в металле рабочего слоя увеличивается содержание графита в структуре рабочего слоя. Никель неограниченно растворяется в железе и снижает растворимость углерода в чугуне, способствуя графитизации чугуна.

Также значительное отрицательное влияние на выделение графита оказывает температура заливки металла. Температура заливки тормозит процесс графитизации чугуна по причине замедления охлаждения отливки и укрупняет их первичную структуру.

С увеличением величины рабочего слоя увеличивается выделение графита, что связано с большим объемом металла в кокиле и, соответственно, снижением скорости кристаллизации.

Углерод и ванадий также способствуют повышению степени графитизации. С увеличением содержания углерода, часть его переходит в метастабильное состояние цементита, при этом благодаря комплексному легированию часть углерода остается в стабильном состоянии и выделяется в структуре металла рабочего слоя в виде графита.

В результате декодирования входящих параметров получено линейное уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$\begin{aligned} \%Gr = & 12,87 + 1,46C - 2,01Cr + 0,78Ni + 2,73V + \\ & + 0,01Pc - 0,01t, \end{aligned} \quad (9)$$

где C – массовая доля углерода в металле рабочего слоя;

Cr – массовая доля хрома в металле рабочего слоя;

Ni – массовая доля марганца в металле рабочего слоя;

V – массовая доля ванадия в металле рабочего слоя;

Pc – минимальная глубина рабочего слоя;

t – температура заливки металла рабочего слоя.

Выводы

1. В результате проведения полнофакторного эксперимента влияния ванадия и молибдена на значение твердости не было выявлено.

2. Определено, что при сечении отливки менее 10 мм формирование графитовой фазы не происходит, так как весь углерод формируется в метастабильной фазе цементита.

3. Установлено, что с увеличением содержания марганца, хрома, ванадия и бора в рабочем слое повышается твердость прокатных валков.

4. Выявлено, что хром и температура заливки металла снижают интенсивность выделения графитовой фазы.

5. Никель неограниченно растворяется в железе и снижает растворимость углерода в чугуне, способ-

ствуя графитизации. Углерод и ванадий также способствуют повышению степени графитизации.

Список источников

1. Исследование процессов формирования структуры и свойств валковых сталей с целью создания их новых составов / В.М. Колокольцев, Н.А. Феоктистов, А.С. Савинов, Е.В. Скрипкин // Черные металлы. 2024. № 3. С. 28-32. DOI: 10.17580/chm.2024.03.05.
2. Исследование влияния легирования валкового чугуна ванадием / К.Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, Д. А. Горленко [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 4(766). С. 9-13.
3. Влияние технологии получения на структуру и свойства рабочего слоя прокатных валков из чугуна ЛПХНД-71 / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, А.Н. Завалишин, Д.В. Куряев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 4(778). С. 7-11.
4. Анализ влияния ванадия на микроструктуру и свойства валкового чугуна / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, О.Н. Алехина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Магнитогорск: Идво Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. Т. 1. С. 106.
5. Влияние ванадия на особенности выделения карбидной фазы в индифинитных чугунах рабочего слоя прокатных валков / К.Н. Вдовин, Н.В. Копцева, Д.С. Горленко [и др.] // Сталь. 2019. № 4. С. 55-59.
6. Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых индифинитных прокатных валков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14, № 3. С. 78-89. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-78-89.
7. Куряев Д.В., Цыбров С.В. Исследование влияния легирующих элементов на основные свойства чугуновых прокатных валков // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2017. № 16. С. 79-84.
8. Цыбров С.В., Вдовин К.Н., Зайцева А.А. Повышение эксплуатационных характеристик индифинитных валков центробежного литья // Литейщик России. 2012. № 3. С. 30.
9. Волчук В.Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 5(194). С. 12-18.
10. Производство прокатных валков в условиях ЗАО «МЗПВ» / Д.В. Куряев, А.В. Авдиенко, Д.М. Иванов, А.Б. Бойко // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 2(21). С. 32-33.

Сведения об авторах

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

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

Бойко Артем Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: boyko.ab@mzpv.mmk.ru.

Троянов Андрей Вадимович – студент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: andrey.trojanov.00@bk.ru.

Сулицин Андрей Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Литейного производства и упрочняющих технологий», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.sulitcin@urfu.ru

Эпова Ирина Александровна – специалист по работе со студентами очной формы обучения, отдел мониторинга образовательного процесса учебно-методического управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE GRAPHITE PHASE AND HARDNESS OF ROLLER CAST IRON

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

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

Boyko Artem B. – PhD (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University E-mail: boyko.ab@mzpv.mmk.ru.

Troyanov Andrey V. – student of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andrey.troyanov.00@bk.ru.

Sulitsin Andrey V. – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Foundry and Hardening Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.sulitsin@urfu.ru.

Epova Irina A. – Specialist in working with full-time students, Department of Educational Process Monitoring of the Educational and Methodological Administration, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article considers the processes of graphitization of roller cast iron and the effect of chemical composition on the morphology of the graphite phase and its hardness. The effect of vanadium and molybdenum on the precipitation of the graphite phase at the concentration of vanadium and molybdenum is studied. A regression equation for the effect of chemical composition relative to the hardness value is obtained. At the same time, the influence of production parameters is estimated and regression equations for hardness and the content of the graphite phase in the working layer of the rolling roll are obtained using the normal equation method. Additionally, calculations are carried out to identify significant coefficients of the regression equation. The obtained results are of practical importance for the metallurgical industry, since they allow targeted control of the properties of roller cast iron by adjusting the chemical composition and technological production parameters.

Keywords: indefinite cast iron, full factorial experiment, rolling rolls, regression equation, hardness, graphite.

Ссылка на статью:

Изучение влияния химического состава на графитовую фазу и твердость валкового чугуна / Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Бойко А.Б., Троянов А.В., Сулицин А.В., Эпова И.А. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 19-24.
Shchennikova V.A., Feoktistov N.A., Boyko A.B., Troyanov A.V., Sulitsin A.V., Epova I.A. Study of the influence of chemical composition on the graphite phase and hardness of roller cast iron. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 19-24.

УДК 621.74.04

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДИФИКАТОРА НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СЛИТКА В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ

Аннотация. В работе приведены исследования влияния опытно-промышленного образца электромагнитного модификатора на структуру алюминиевого слитка. Исследования проводились на роторной литейной машине литейно-прокатного агрегата, предназначенного для изготовления алюминиевой катанки. В рамках НИОКР были проведены испытания опытной установки электромагнитного модификатора на ЛА №3 ЛО №1 филиала ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов. В процессе работы агрегата на номинальной скорости литья были отобраны 6 образцов литой заготовки и 6 образцов катанки, полученные при различных режимах работы опытной установки. При проведении металловедческих исследований образцов установлено влияние электромагнитного воздействия на модифицирование непрерывнолитых заготовок из алюминиевого сплава А5Е. Наибольшая степень модифицирования наблюдалась при $I = 42 \text{ А}$, $f = 40 \text{ Гц}$. Результаты выполнения НИОКР подтвердили возможность измельчения кристаллического строения непрерывнолитой заготовки, отливаемой в роторной машине путем воздействия электромагнитным полем, что существенно улучшает качество алюминиевой катанки и приводит к значительному уменьшению брака изготавливаемых из катанки проводов.

Ключевые слова: алюминиевая катанка, модифицирование, электромагнитное воздействие, магнитная гидродинамика, кристаллизация

Введение

Широкое распространение в электротехнической промышленности нашли провода, изготавливаемые из алюминия, в связи со своей низкой стоимостью и высокой электропроводностью. Из алюминия также изготавливаются жилы кабелей, применяемых для передачи электроэнергии от источников к потребителям. Отечественные предприятия в соответствии с государственными стандартами изготавливают токопроводящие жилы из алюминиевых сплавов марок А5Е, А7Е и АВЕ [1]. Провода изготавливают из алюминиевой катанки путем многократного волочения. Катанка является продуктом совмещенного процесса литья непрерывнолитой заготовки и ее прокатки на многоклетевом стане.

Установки непрерывного литья и прокатки [2] являются основными для производства алюминиевой катанки. Механические свойства катанки напрямую зависят от химического состава и кристаллической структуры алюминиевого сплава. В связи с особенностями процесса прокатки заготовки кристаллическая структура катанки повторяет структуру непрерывно литого слитка, полученного на промышленной роторной литейной машине. Отлитые заготовки в процессе кристаллизации имеют столбчатую неоднородную макроструктуру. Такая макроструктура слитка при прокатке или волочении приводит к повышенному трещинообразованию и, как следствие, браку продукции.

В настоящее время для измельчения зерна (модифицирования структуры) используются следующие средства: добавление в расплав модификаторов системы Al-Ti-B, воздействие на кристаллизующийся расплав ультразвуком [3], воздействие на расплав бегущим или импульсным магнитным полем [4, 5].

Каждый из методов имеет свои недостатки: введение модификаторов ведет к повышению электросопротивления и стоимости сплава [6]; ультразвуковое воздействие требует помещения излучателя в расплав в области кристаллизации, что часто конструктивно невозможно выполнить, а также из-за контакта излучателя с расплавом происходит быстрый выход его из строя [7]. Перемешивание жидкой сердцевины слитка электромагнитным полем в процессе кристаллизации в роторной литейной машине ранее не применялось.

Экспериментальные исследования

Металлургами была поставлена задача разработать устройство, позволяющее изменить макроструктуру слитка со столбчатой на мелкозернистую, что позволило бы улучшить его качество и значительно уменьшить количество брака. Для реализации поставленной задачи был разработан электромагнитный модификатор, который устанавливается непосредственно на литейную машину. Работа электромагнитного модификатора приводит к образованию магнитогидродинамических течений в расплаве, которые влияют на динамику процесса кристаллизации и нарушают рост столбчатых кристаллов [8].

Современные средства математического моделирования не позволяют проводить анализ процесса кристаллизации слитка в роторной литейной машине с электромагнитным воздействием, где результатом моделирования была бы кристаллическая структура слитка с высокой степенью достоверности. Также в металлургической промышленности новые решения внедряются только после их всесторонней апробации и испытаний, в результате которых подтверждается их работоспособность, надежность и технологичность. Исходя из этого, в рамках НИОКР был изготовлен опытно-промышленный образец модификатора и проведены его испытания на промышленной ро-

торной литейной машине агрегата ЛПА-АК конструкции ВНИИМЕТМАШ, расположенного в ЛО №1 Филиала ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (бывший Иркутский алюминиевый завод).

В рамках НИОКР была произведена отработка режимов работы модификатора, исследование и анализ структуры слитков из алюминиевых сплавов.

Электромагнитный модификатор, разработанный для работы на промышленном роторном кристаллизаторе литейно-прокатного агрегата по производству алюминиевой катанки типа ЛПА-АК конструкции ВНИИМЕТМАШ показан на рис. 1.



Рис. 1. Смонтированный на стане индуктор электромагнитного модификатора

Комплекс для электромагнитного модифицирования состоит из следующих основных элементов: индуктора, вентилятора с гибким воздуховодом, силового шкафа и пульта управления. Также в состав комплекса входят система крепления индуктора на кристаллизаторе, силовые кабели и кабели системы контроля и управления.

В рамках НИОКР были проведены холодные и горячие испытания электромагнитного модификатора. В ходе проведения холодных испытаний была осуществлена:

1. Пробная подача питания на индуктор модификатора на холодном кристаллизаторе. Магнитогидродинамический (МГД) модификатор показал стабильную работу.

2. Произведены смены режимов работы модификатора, изменялись частота и величина тока в индукторе. На всех параметрах комплекс показал стабильную работу.

3. С помощью алюминиевой пластины, помещённой в пространство между индуктором и кристаллизатором, было установлено, что направление бегущего электромагнитного поля совпадает с направлением вращения кристаллизатора, что и требуется для правильной работы комплекса.

После выхода агрегата на стабильный процесс литья и производства алюминиевой катанки были начаты испытания МГД-модификатора. Включение комплекса на минимальной мощности с последую-

щим выходом на максимальную мощность в процессе литья, не привело к образованию поверхностных дефектов и не повлияло на стабильность технологического процесса.

Комплекс показал возможность длительной эксплуатации на токе 60 А при существующей системе воздушного охлаждения индуктора. В индукторе был установлен стабильный тепловой режим с максимальной температурой обмотки 94°C.

В процессе работы агрегата на номинальной скорости литья были отобраны 6 образцов литой заготовки и 6 образцов катанки, полученных при следующих параметрах работы МГД-модификатора:

- образец №1 $I = 75$ А, $f = 25$ Гц;
- образец №2 $I = 52$ А, $f = 35$ Гц;
- образец №3 $I = 42$ А, $f = 40$ Гц;
- образец №4 $I = 72$ А, $f = 15$ Гц;
- образец №5 $I = 60$ А, $f = 25$ Гц;
- образец №6 без работы МГД-модификатора.

Была исследована макроструктура образцов от непрерывнолитых заготовок в поперечном и продольном направлениях после травления в реактиве для выявления зерна.

Исследована микроструктура литых заготовок с помощью оптического микроскопа «Neophot 21» с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличении 200 крат.

Исследована микроструктура катанки после нанесения анодной пленки для выявления зерна. Съёмка образцов при увеличении 50 крат производилась в поляризованном свете.

Макроструктура в сечении литой заготовки без МГД-воздействия состоит из полностью столбчатых кристаллов, направленных в разные стороны от центра слитка к стенкам кристаллизатора (рис. 2, образец №6).

По длине слитка макроструктура имеет более сложное строение, где по одну сторону от центра слитка имеет место столбчатая структура, а по другую – непосредственно от стенки кристаллизатора на глубине 15 мм наблюдаются столбчатые кристаллы, а далее к центру слитка достаточно крупные равноосные зерна с перемежающимися, отдельными узорчатыми кристаллами. Все это свидетельствует о том, что макроструктура слитка неоднородная и условия кристаллизации расплава были неодинаковые по разные стороны от центра слитка.

Результаты анализа макроструктуры поперечного и долевого сечения литых заготовок при воздействии магнитогидродинамических сил показали, что она изменяется в зависимости от тока (интенсивности электромагнитного поля) и его частоты (напряженности магнитного поля). С понижением тока от 72 до 42 А и одновременно повышением его частоты от 15 до 40 Гц происходит измельчение макрозерна (рис. 2, образцы №1-5).



Рис. 2. Структуры литых заготовок

Как видно из приведенных макроструктур, эпицентр воздействия электромагнитных сил находится ближе к центру слитка – в этой зоне наблюдается максимальное измельчение макрзерна.

Электромагнитное модифицирование позволяет измельчить размер зерна в заготовке до аналогичного размера в сравнении с классическим способом модифицирования структуры, используя модификатор $AlTiB$ (рис. 3). При этом из-за особенности электромагнитного воздействия зерно имеет более равноосную форму по сравнению с модификатором $AlTiB$. В перспективе электромагнитное модифицирование может, как исключить использование $AlTiB$, так и улучшить его эффект

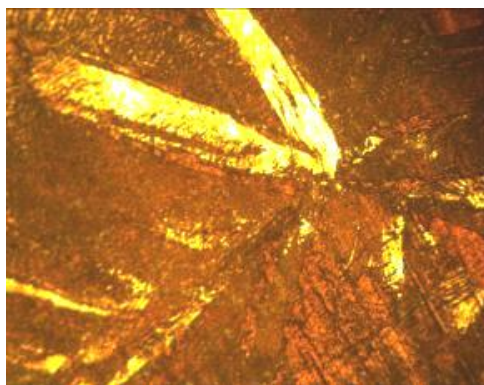
при их совместном использовании.

Проводились исследования микроструктуры катанки без МГД-воздействия и с МГД-воздействием (рис. 4). На микрошлифе зерна различаются из-за повышенной травимости их границ и из-за разницы в их ориентировках. Особенно контрастно различаются по-разному ориентированные зерна при наблюдении в поляризованном свете микрошлифа с прозрачной анодной пленкой. Следует отметить, что даже при таком методе выявление индивидуальных зерен бывает затруднительным, что и следует из результатов исследования микроструктуры катанки после нанесения анодной пленки.

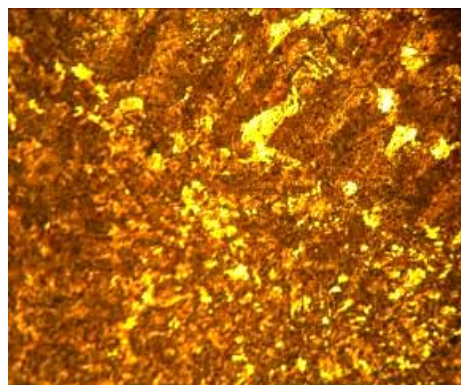


Рис. 3. Макроструктуры литых заготовок:

а – с электромагнитным модифицированием (литейная машина конструкции ВНИИМЕТМАШ);
б– модифицированная $Al-Ti-B$ (литейная машина конструкции Properzi)



а



б

Рис. 4. Микроструктура образцов катанки:
а – без МГД-воздействия; б – с МГД-воздействием при $I = 42$ А, $f = 40$ Гц

Результаты исследования

В результате выполнения металловедческих исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено влияние МГД-воздействия на модифицирование непрерывнолитых заготовок из алюминия А5Е, полученных на агрегате непрерывного литья и прокатки катанки в г. Шелехов. При этом 100% модифицирования заготовок не достигнуто.

2. Параметры МГД-воздействия, при которых имеет место наибольшая степень модифицирования литых заготовок, следующие: $I = 42$ А, $f = 40$ Гц.

3. Результаты микроструктурного анализа слитков, полученных без и с МГД-воздействием, показали отсутствие оксидных включений.

4. Для обеспечения 100%-го модифицирования литых заготовок рекомендуется сместить расположение индуктора электромагнитного модификатора ближе к зоне заливки расплава в кристаллизатор.

5. Для увеличения степени измельчения зерна рекомендуется провести эксперименты по дальнейшему совершенствованию МГД-воздействия на расплав, в частности, в связи с полученными закономерностями увеличить частоту тока свыше 40 Гц и отлить образцы при разных величинах тока в индукторе (от 20 А и выше).

6. Необходимо исследовать влияние измельчения зерна в литой заготовке на технологические параметры и качество проволоки, получаемой в результате волочения катанки.

Заключение

Воздействие электромагнитным полем позволяет измельчить кристаллическое строение непрерывнолитой заготовки в роторной литейной машине. Рекомендуется использовать данную технологию и устройство на роторных литейных машинах, входящих в состав литейно-прокатных агрегатов для производства алюминиевой катанки. Прогнозируется, что использование данной технологии в промышленности поз-

волит повысить технологичность переработки катанки в проволоку путем волочения, а также обеспечит снижение объема брака продукции по структурным дефектам.

Список источников

1. Горбунов Ю.А. Некоторые аспекты развития алюминиевых сплавов для проводников тока и припоев // Цветные металлы-2012: сб. науч. ст. 2012. С. 828-833.
2. Специальные способы литья: справочник / В.А. Ефимов, В.Н. Бабич, Г.А. Анисович и др. М.: Машиностроение, 1991. 436 с.
3. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия: справ. изд-е. М.: Металлургия, 1988. 232 с. 1. CONTINUUS-PROPERZI S.P.A. [Электронный ресурс] / корпоративный сайт, 2016. Режим доступа: <http://www.properzi.com>, свободный.
4. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Металлургия, 1974. 240 с.
5. Самойлович Ю.А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
6. Чеботарев В.А. Разработка и исследование кристаллизатора роторного типа для непрерывного литья полос из цветных металлов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Чеботарев Владимир Абрамович; ВНИИМЕТМАШ. М., 1970. 26 с.
7. Формирование структуры и свойств алюминиевых слитков в условиях магнитогидродинамического воздействия / С.Ю. Хрипченко, И.В. Колесниченко, В.М. Долгих, Л.В. Никулин, С.А. Денисов // Цветные металлы. 2013. №4. С. 70-73.
8. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy / Yu-bo Zuo, Jian-Zhong Cui, Dan Mou, Qing-feng Zhu, Xiang-jie Wang, Lei Li // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 2, 132-134.

Сведения об авторах

Боякова Татьяна Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: boyakova_ta@mail.ru.

Снитко Ирина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: irant-kin@yandex.ru.

Авдулов Антон Андреевич – кандидат технических наук, заместитель директора дирекции развития нефтегазохимических производств АНЦ «Инновационный инжиниринговый центр», Москва, Россия. E-mail: Avdulov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**ISSUE OF INFLUENCE ON A PILOT MODEL OF AN ELECTROMAGNETIC MODIFIER
ON THE STRUCTURE OF AN ALUMINUM INGOT DURING CRYSTALLIZATION IN A ROTARY
CASTING MACHINE**

Boyakova Tatyana A. – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow University, Russia.

Snitko Irina S. – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow University, Russia.

Avdulov Anton A. – PhD (Technical Sciences), Deputy Director of the Directorate of Development of Petrochemical Productions of the ANC "Innovative Engineering Center", Russia.

Annotation. The paper presents studies the influence of a pilot-industrial sample of an electromagnetic modifier on the structure of an aluminum ingot. The researches were carried out on a rotary casting machine, a casting and rolling unit designed for the manufacture of aluminum wire rod. As part of the R&D, tests were carried out on the experimental installation of an electromagnetic modifier at LA No. 3 of LO No. 1 of the RUSAL Bratsk branch in Shelekhov. There were selected 6 samples of cast billet and 6 samples of wire rod during the operation of the unit at the nominal casting speed, obtained under various operating modes of the pilot plant. During the metallographic studies of the samples, the influence of electromagnetic influence on the modification of continuously cast blanks made of aluminum alloy A5E was established. The most degree of modification was observed at $I=42A$, $f=40$ Hz. The results of R&D confirmed the possibility of grinding the crystalline structure of a continuously cast billet cast in a rotary machine by exposure to an electromagnetic field. This significantly improves the quality of the aluminum wire rod and leads to a significant reduction in the scrap of wires made from wire rod.

Keywords: aluminum wire rod, modification, electromagnetic effect, magnetic hydrodynamics, crystallization.

Ссылка на статью:

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А. Исследование влияния опытно-промышленного образца электромагнитного модификатора на структуру алюминиевого слитка в процессе кристаллизации в роторной литейной машине // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 25-29.

Boyakova T.A., Snitko I.S., Avdulov A.A. Issue of influence on a pilot model of an electromagnetic modifier on the structure of an aluminum ingot during crystallization in a rotary casting machine. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 25-29.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.001

Румянцев М.И., Завалищин А.Н.

ИНЖИНИРИНГ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА ДВУХКЛЕТЕВОМ РЕВЕРСИВНОМ СТАНЕ

Аннотация. Представлен пример проектирования ресурсоэффективной технологической стратегии производства с применением двухклетевого реверсивного стана конкурентоспособного холоднокатаного проката – полос толщиной 0,9 мм из высокопрочной IF-стали классов прочности 220 и 260, легированной фосфором. Установлены пределы текучести горячекатаного подката и построены аппроксимации кривых упрочнения металла. С использованием моделей распределения обжатий, натяжений и скорости холодной прокатки, отображающих особенности процесса на двухклетевых реверсивных станах, решена задача выбора максимальной толщины горячекатаного подката при различных заданных ширинах полосы. Автоматизированным проектированием, с учетом комплекса ограничений по нагрузкам клеток и приводов, скорости прокатки, плоскостности и шероховатости полосы установили, что суммарные обжатия, рекомендуемые для обеспечения заданных свойств готовой продукции, могут быть обеспечены при ширине полос до 1250 мм. При этом толщина подката с увеличением ширины уменьшается от 3,4 до 3,0 мм для стали класса качества 220 и от 3,0 до 2,9 мм для стали 260. Скорости и производительность стана для различных классов прочности, но при одинаковых профилируемых практически одинаковые. Результаты опытной прокатки подтвердили значения и характер изменения параметров процесса, найденных в результате автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: высокопрочная IF-сталь, кривая упрочнения, процесс холодной прокатки, двухклетевой реверсивный стан холодной прокатки, максимальная ширина холоднокатаной полосы, максимальная толщина подката, механические свойства холоднокатаной полосы, шероховатость поверхности холоднокатаной полосы

Введение

Современные концепции автомобильного кузова предусматривают широкое использование марок стали, пригодных к изготовлению деталей с применением сложной вытяжки и обладающих при этом повышенным сопротивлением остаточным вмятинам [1]. В указанном контексте эффективны высокопрочные IF-стали, легированные фосфором. Преимущество легирования фосфором (до 0,12%) заключается в том, что не только достигается требуемая прочность, но также улучшается сопротивляемость атмосферной коррозии [2, 3]. Благодаря сочетанию коррозионной стойкости с хорошими характеристиками по ударной и усталостной прочности эти стали часто применяются для конструктивных элементов и внешней обшивки кузова [1-3].

В ПАО «ММК» в период освоения производства высокопрочного проката для автомобилестроения изучали аналоги марок НС220Р и НС260Р высоко-

прочной IF-стали, легированной фосфором, с обозначениями Н220Р и Н260Р [4]. Была поставлена задача определить толщину горячекатаного подката для прокатки опытных партий проката толщиной 0,9 мм, шириной 1000–1400 мм на двухклетевом реверсивном стане.

Двухклетевые реверсивные станы, которые получили специфическое обозначение ССМ (Compact Cold Mill), появились в конце 90-х годов XX века как экономически эффективное решение для производства холоднокатаной листовой стали в количестве до 500-900 тыс. т/год [5-8]. В основном по составу оборудования стан ССМ аналогичен одноклетевому реверсивному. Основные отличия – две рабочие клетки и отводящие транспортеры у каждой реверсивной моталки. Таким образом, на подобном стане могут быть реализованы, по крайней мере, три стратегии прокатки: двукратная (рис. 1, б), четырехкратная (рис. 1, в) и шестикратная (рис. 1, г), что по количеству обжатий

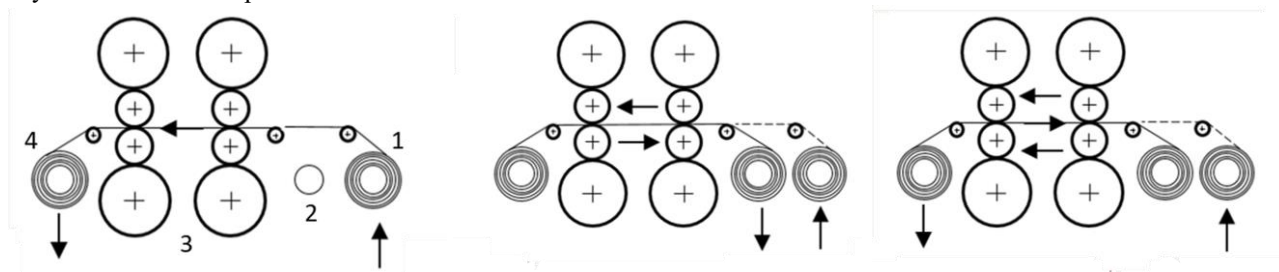


Рис. 1. Стратегии прокатки на стане ССМ:
1 – разматыватель; 2 и 4 – реверсивные моталки № 2 и 1; 3 – рабочие клетки

соответствует случаям прокатки на двухклетевом, четырехклетевом и шестиклетевом непрерывных станах (ТСМ – Tandem Cold Mill).

Для решения задачи были уточнены закономерности прокатки и разработаны модели режимов работы станов различных типов при прокатке листового проката различного назначения [9]. В данной статье представлен пример использования этих моделей при инжиниринге технологии производства высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, с применением четырехкратной стратегии.

Разработка режима холодной прокатки на двухклетевом реверсивном стане

Предварительные испытания горячекатаного подката показали, что предел текучести в ненаклепанном (недеформированном) состоянии стали H220P находится в пределах 260-310 МПа, а стали H260P – от 290 до 345 МПа. С целью определения особенностей упрочнения стали указанных марок на дрессировочном стане прокатывали образцы шириной 50 и длиной 500 мм, стараясь обеспечить обжатия 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 и 70% с не менее чем трехкратными повторениями. За напряжение текучести σ_f наклепанных образцов принимали условное напряжение σ_{02} . Зависимость напряжения от суммарного обжатия представлены на рис. 2.

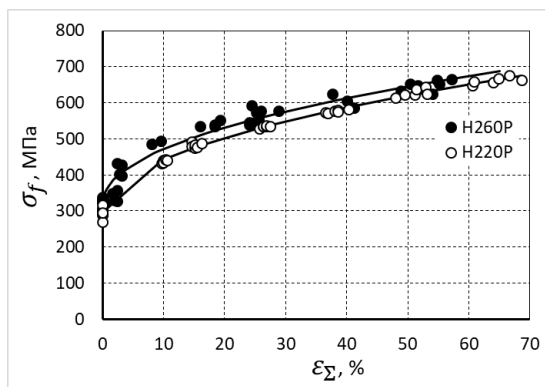


Рис. 2. Кривые упрочнения стали марок H220P и H260P

Кривые упрочнения аппроксимировали уравнением

$$\sigma_f = c_0 + c_1 \cdot \varepsilon_{\Sigma}^2, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\Sigma} = 100(H-h)/H$ – суммарное обжатие полосы от толщины подката H до толщины h . Значения коэффициентов c_0 , c_1 и c_2 (табл. 1) находили с использованием программного комплекса STATISTICA. Оценки достоверности и статистической надежности также приведены в табл. 1.

На основании известных рекомендаций [2] суммарное обжатие при прокатке на толщину 0,9 мм должно быть 70-75%, то есть необходим подкат толщиной 3,0-3,6 мм соответственно. Рассматривали прокатку по-

лос шириной 1000, 1080, 1160, 1240, 1320 и 1400 мм с учетом комплекса ограничений на холодную прокатку тонких полос [10-14]. Для каждой ширины проектирование режима начинали с максимальной толщины подката 3,6 мм и уменьшали ее с шагом 0,1 мм до тех пор, пока в каждом проходе не выполнялся комплекс ограничений по нагрузкам клетей и приводов ($z_p \leq 0,8$; $z_{мдв} \leq 0,8$;

$z_w \leq 0,8$), скорости прокатки ($0,8v_{ном} \leq v_{уст.i} \leq 0,8[v]_{max}$)

и плоскостности [$-80(h_{li}/b)^2 \leq \Delta\lambda/\bar{\lambda} \leq 40(h_{li}/b)^2$].

Таблица 1

Коэффициенты и оценки аппроксимаций кривых упрочнения стали марок H220P и H260P

Марка стали	Коэффициенты			Оценки достоверности и надежности		
	c_0	c_1	c_2	R^2	F_p	F_{95}
H260P	319	52,3	0,47	0,955	335,873	3,294
H220P	291	49,8	0,48	0,996	3988,004	

В ограничениях по нагрузкам клетей и приводов $Z_Y = Y/[Y]$ – отношение фактического значения параметра (силы прокатки P , момента на валу двигателя $M_{дв}$ и мощности W) к их предельным значениям в соответствии с характеристикой стана. Нижний предел скорости установившегося процесса $v_{уст.i}$ был принят на уровне 80% от номинального значения $v_{ном}$, а верхний предел – на уровне 80% от максимальной допустимой $[v]_{max}$ по характеристике привода клетей. В ограничении по плоскостности b и h_{li} – ширина прокатываемой полосы и ее толщина на выходе из клетки в i -м проходе; $\bar{\lambda} = h_{0i}/h_{li}$ – усредненное значение вытяжки.

Первые приближения распределения обжатий, натяжений и уставки скорости прокатки выбирались программой автоматически с учетом особенностей прокатки на двухклетевых реверсивных станах [15] и в дальнейшем, при необходимости, корректировались для обеспечения указанных выше ограничений. Неравномерность профиля валков ΔS от 0,15 до 0,3 мм, а также соотношение между усилием принудительного изгиба валков и усилием прокатки F/P в пределах от -0,014 до +0,022 также выбирались компьютерной программой случайным образом из указанных диапазонов, которые были выявлены И.В. Виейром при выполнении исследований [16, 17]. Так как прокат должен поставляться с микрогеометрией поверхности $Ra = 0,8-1,6$ мкм, моделировали прокатку с шероховатыми валками в первой клетке ($Ra_{в1} = 1,5-2,0$ мкм) и со шлифованными во второй ($Ra_{в2} = 0,6-0,8$ мкм). Конкретные значения параметров Ra_b выбирались из

указанных диапазонов программно с помощью датчиков случайных чисел.

В итоге установили, что рекомендуемые суммарные обжатия (не менее 70%) и достаточно близкие к ним (68,9%) могут быть обеспечены при ширине полос до 1240-1250 мм. При этом толщина подката с

увеличением ширины должна уменьшаться от 3,4 до 3,0 мм для стали Н220Р и от 3,0 до 2,9 мм для стали Н260Р. Ожидаемые скорости прокатки и производительность стана для одинаковых профилирумеров практически одинаковые (табл. 2). Режимы и некоторые параметры прокатки представлены на рис. 3.

Таблица 2

Рекомендуемые толщина подката и прогнозируемые результаты прокатки
полос толщиной 0,9 мм из стали марок Н220Р и Н260Р

b_0 , мм	G_p , т	Прокатка стали Н220Р					Прокатка стали Н260Р				
		H_0 , мм	Скорость, м/с		Ra_n , мкм	Ритм r , с	H_0 , мм	Скорость, м/с		Ra_n , мкм	Ритм r , с
			v_2	v_4				v_2	v_4		
1000	21,8	3,4	11,8	15,5	1,22-1,35	545,3	3,0	13,3	15,6	1,32-1,62	541,5
1080	23,3	3,2	11,9	15,1	1,37-1,44	550,1	3,0	12,4	15,1	1,14-1,71	551,7
1160	25,2	3,0	11,9	15,1	1,29-1,71	554,4	2,9	11,9	15,1	1,35-1,44	557,5
1240	26,9	3,0	11,4	15,1	1,18-1,53	563,3	2,9	11,9	15,1	1,20-1,35	565,4
1320	28,6	2,8	11,4	15,1	1,32-1,53	563,4	2,8	11,4	15,1	1,20-1,44	546,6
1400	30,3	2,8	10,9	15,1	1,31-1,53	572,9	2,7	10,9	15,1	1,29-1,47	582,3

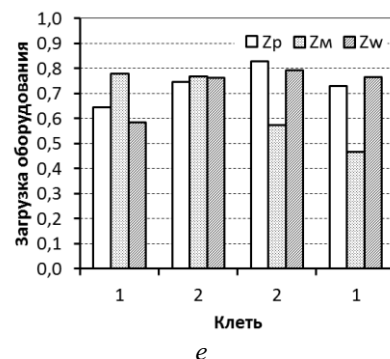
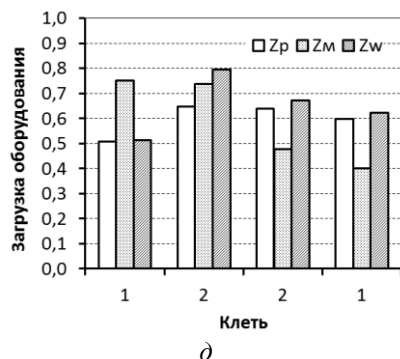
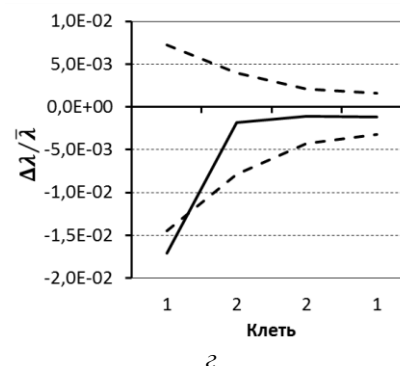
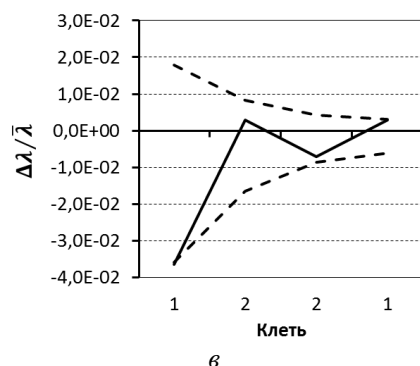
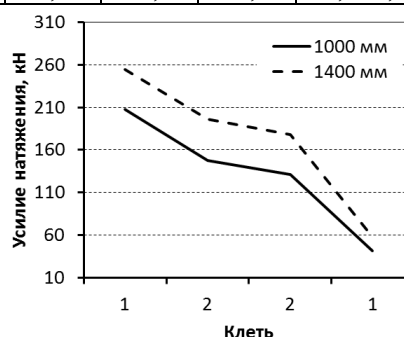
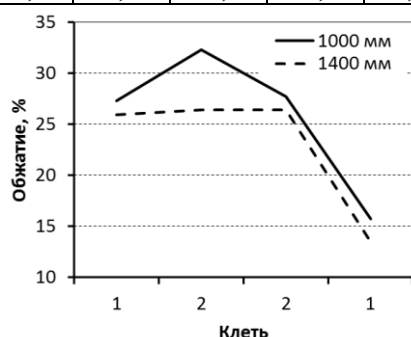


Рис. 3. Рекомендуемые режимы обжатий (а) и натяжений (б), прогноз устойчивости плоской формы при прокатке полос шириной 1000 (в) и 1400 мм (г), ожидаемые загрузки оборудования при прокатке полос шириной 1000 (д) и 1400 мм (е) из стали Н220Р

Опробование технологии производства холодного проката высокопрочной IF-стали

С использованием высказанных рекомендаций были произведены опытные партии продукции [18]. Холодная прокатка на двухклетевом реверсивном стане (суммарное обжатие 66,7%) осуществлялась по стратегии четырехкратного обжатия. Режим и параметры прокатки полос из стали H260P иллюстрируются графиками на рис. 4, которые построены на основании осциллограмм, полученных с помощью датчиков АСУ ТП.

Значения и характер изменения тех же параметров, найденные в результате автоматизированного проектирования, соответствовали наблюдавшимся при опытной прокатке. Прогнозируемый ритм прокатки (541-582 с) (см. табл. 2) находился в пределах фактического ритма (513-689 с). Контроль шероховатости прокатанных полос показал результат $Ra = 1,7$ мкм. Приведенное сравнение фактических и прогнозируемых параметров прокатки свидетельствует о достаточно высокой точности результатов автоматизированного проектирования режимов прокатки.

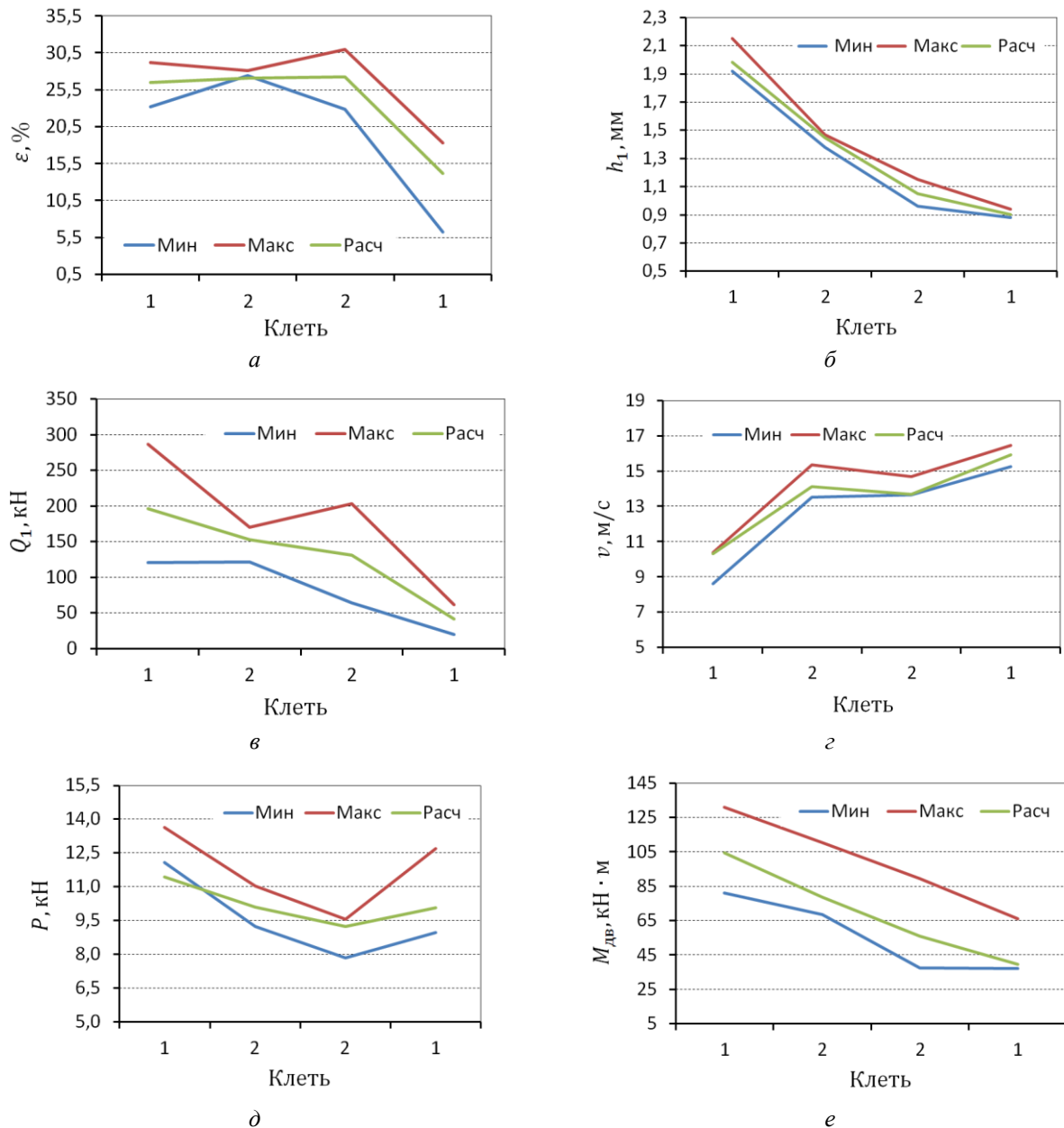


Рис. 4. Расчетные (Расч) и фактические (Мин; Макс) параметры прокатки на двухклетевом реверсивном стане 1700 полос стали H260P 0,9×1000 мм из подката толщиной 2,7 мм:
 а – частные обжатия; б – толщина на выходе из клетки; в – усилие переднего натяжения;
 г – скорость прокатки; д – усилие прокатки; е – момент на валу двигателя

Также исследовали влияния дрессировки на свойства металла, отожженного в водородной защитной атмосфере. С использованием показателей соответствия [19,20] было установлено, что при обжатию около 0,5% металла партии Н220Р (рис. 5, а) приобретает свойства, удовлетворяющие требованиям EN 10130 для проката марки НС220Р. После дрессировки с обжатием более 0,5% металл имеет отрицательные характеристики соответствия требованиям EN 10130 по временному сопротивлению и относительному удлинению. Характеристики соответствия коэффициента нормальной пластической анизотропии и показатель упрочнения положительные, но в основном не превышают единицы. В целом по всему комплексу свойств металл партии Н220Р после дрессировки с обжатием 0,3-0,5% можно признать соответствующим нормам стандарта EN 10130 для проката марки НС220Р.

Свойства металла партии Н260Р являются допустимыми при дрессировке с обжатием до 2,5% (рис. 5, б). Дальнейшее увеличение обжатия приводит к завышенному временному сопротивлению и заниженному относительному удлинению. В целом по всему комплексу свойств обнаруживается достаточно хорошее соответствие нормам стандарта EN 10130 при дрессировке с обжатием 1,5-2,0%.

Результаты выполненного анализа были использованы в дальнейшем для создания промышленной технологии производства конкурентоспособного импортозамещающего холоднокатаного листового проката из высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, классов прочности 220 [21] и 260 [22].

Заключение

Решена задача выбора максимальной толщины горячекатаного подката из высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, для холодной прокатки на двухклетевом реверсивном стане при различных заданных ширинах полосы. Автоматизированным проектированием с учетом комплекса ограничений по загрузкам клеток и приводов, скорости прокатки, плоскостности и шероховатости полосы установили, что суммарные обжатия, рекомендуемые для обеспечения заданных свойств готовой продукции, могут быть обеспечены при ширине полос до 1250 мм. При этом толщина подката с увеличением ширины уменьшается от 3,4 до 3,0 мм для стали класса прочности 220 и от 3,0 до 2,9 мм для стали класса прочности 260. Скорости и производительность стана для различных классов прочности при одинаковых профилируемых размерах практически одинаковые.

Анализом результатов опробования опытной технологии производства высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, с применением оценок соответствия, показано, что холоднокатаные полосы, полученные на двухклетевом реверсивном стане с суммарным обжатием не менее 66,7% и отожженные в копаковых печах с водородной защитной атмосферой, отвечают требованиям стандарта EN 10130 к прокату класса прочности 220 после дрессировки с обжатием 0,3-0,5 % и требованиям к прокату класса прочности 260 после дрессировки с обжатием 1,5-2,0 %.

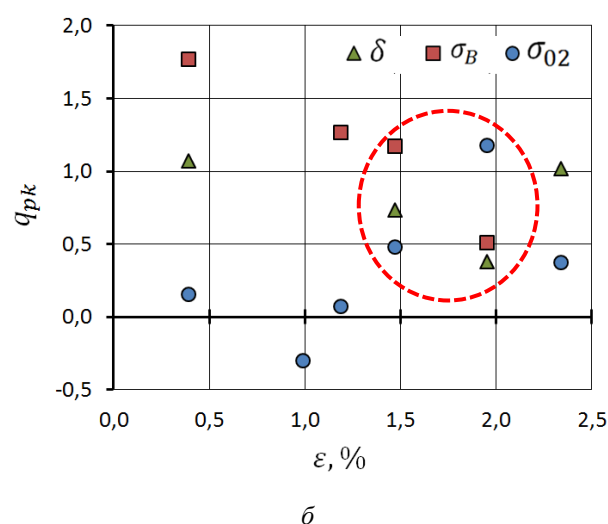
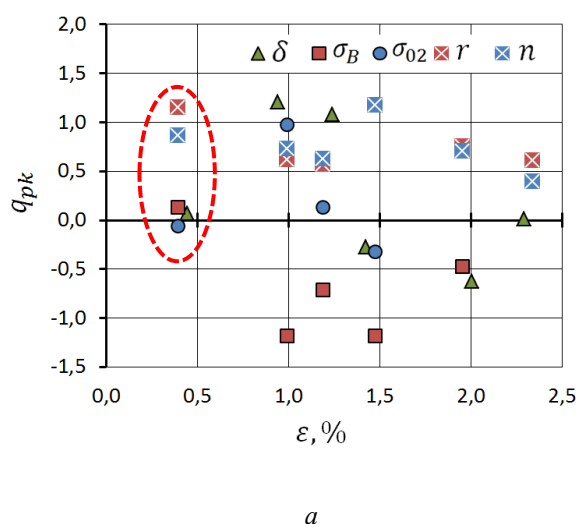


Рис. 5. Влияние обжатия при дрессировке на показатели соответствия механических свойств опытного металла Н220Р и Н260Р требованиям стандарта EN 10130 к высокопрочному холоднокатаному прокату НС220Р и НС260Р [18]

Список источников

1. Юсупов В.С., Адигамов Р.Р. Тенденции мирового развития автомобильных листовых сталей // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2025. Т. 81. №1. С. 30-37. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2025-01-30-37>
2. Беляковский М.А., Масленников В.А. Автомобильная сталь и тонкий лист. Череповец: Издательский дом «Череповец», 2007. 625 с.
3. Родионова И., Филиппов Г. Технологические аспекты производства сталей для автомобилестроения // *Инженер-механик*. 2010. № 4. С. 25-30.
4. Магнитогорский металлургический комбинат. Каталог металлопроката. Автомобильная промышленность. https://mmk.ru/catalogs/metal_products/automotive_industry/files/assets/basic-html/page212.html
5. The compact cold mill (CCM). *Steel Times Int.* 1997. Vol. 21. No. 2, p. 38
6. Создание и освоение двухклетового реверсивного стана холодной прокатки / В.Ф. Рашников, Р.С. Тахтаутдинов, А.И. Антипенко [и др.] // *Сталь*. 2003. № 7. С. 41-45.
7. Chen Q. Concept, design and operational results of the Compact Cold Mill at Jinan Iron Et Steel // *Stahl und Eisen*. 2007/02/15. P. 53-58
8. Liu, Guangming & Li, Yugu & Huang, Qingxue & Yang, Xia & Liu, Aimin. Analysis of Startup Process and Its Optimization for a Two-Stand Reversible Cold Rolling Mill. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8715340>
9. Румянцев М. И. Опыт развития и применения автоматизированного проектирования режимов горячей и холодной прокатки листовой стали различного назначения на станах различных типов // *Труды IX Конгресса прокатчиков, Череповец, 16–18 апреля 2013 года*. Череповец: ОАО «Черметинформация», 2013. Т. 2. С. 43-54.
10. Технологические особенности производства холоднокатаного автомобильного листа из новой коррозионностойкой экономнолегированной стали с ВН-эффектом / В.В. Кузнецов, Э.А. Гарбер, В.С. Юсупов, Д.Л. Шалаевский // *Производство проката*. 2007. № 11. С. 9–12.
11. Ланге Э. Инновационные технологические модели: оптимизация процесса производства плоского стального проката // *Черные металлы*. 2017. № 9. С. 42-46.
12. 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.
13. Решения для производства высокопрочных сталей и тонкой холоднокатаной полосы / К. Кримпельштеттер, И. Маэно, М. Бергман, Г. Кайнтцель // *Черные металлы*. 2020. №4. С. 22-32.
14. Shatalov R.L., Kulikov M.A. Influence of Outer Parts of a Strip on the Deformation and Force Parameters of Thin-Sheet Rolling. *Metallurgist*, 2020, 64 (7-8), pp. 687-698.
15. Развитие валковых систем CVC на основе математического моделирования для повышения качества холоднокатаного проката и стойкости валков / В.М. Салганик, И.В. Виер, П.П. Полецков, М.И. Румянцев // *Труды Пятого конгресса прокатчиков. (Череповец, 21-24 октября 2003 г.)*. М.: Черметинформация, 2004. С. 146-150.
16. Виер И.В. Моделирование профилировки валков клетей кварто для расширения диапазона регулирования плоскостности холоднокатаных полос и повышения стойкости инструмента: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2004. 170 с.
17. Развитие и применение методики разработки и совершенствования технологий производства листового проката / М. И. Румянцев, А.Н. Завалишин, А.В. Горбунов [и др.] // *Труды XI Конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 09–11 октября 2017 года*. Магнитогорск: ОАО «Черметинформация», 2017. Т. 2. С. 427-435.
18. Rumyantsev M. I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 12. P. 32-36. DOI: 10.17580/cisr.2016.02.07. EDN YUZWUD.

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. ORCID: 0000-0003-0608-0446

Завалишин 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: zaval1313@mail.ru

PROCESS ENGINEERING COMPETITIVE PRODUCTS USING COLD ROLLING AT TWO STAND REVERSING MILL

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

Abstract. An example of computer engineering of a resource-efficient technological strategy for the production of cold-rolled steel using a two-stand reversible mill is presented. Strips 0.9 mm thick of high-strength IF steel of quality classes 220 and 260, doped with phosphorus, were obtained. The yield strength of the hot-rolled steels was revealed and approximations of the metal hardening curves were obtained. Using models of distribution of reduce, tension and speed for cold rolling, which take into account the peculiarities of the process at two-stand reversing mills, the problem of determining the maximum thickness of a hot-rolled stock at various required widths of the strip is solved. Using computer-aided design, taking into account a set of restrictions on the loads of stands and drives, rolling speed, flatness and roughness of the strip, it was found that the total reductions recommended to ensure the specified properties of the finished product can be provided with a strip width of up to 1250 mm. At the same time, the thickness of the hot-rolled stock with increasing width decreases from 3.4 to 3.0 mm for steel of quality class 220 and from 3.0 to 2.9 mm for steel of quality class 260. For equivalent section sizes, rolling speeds and mill capacities of different quality classes are practically the same. The test rolling results confirmed the values and the nature of the change in process parameters that were found as a result of computer-aided design.

Keywords: high-strength IF-steel, metal hardening curves, cold rolling process, two-stand reversing cold rolling mill, cold rolled strip of maximum width, hot-rolled strip of maximum thickness, mechanical properties of cold-rolled strip, surface roughness of cold-rolled strip

Ссылка на статью:

Румянцев М.И., Завалишин А.Н. Инжиниринг технологии производства конкурентоспособной продукции с применением холодной прокатки на двухклетевом реверсивном стане // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 30-36.
Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N. Process engineering competitive products using cold rolling at two stand reversing mill. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 30-36.

УДК 669.17

Куницина Н.Г., Шаповалов А.Н.

О РАЦИОНАЛЬНОЙ ГЛУБИНЕ УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА ИЗ СТАЛИ

Аннотация. Принято считать, что фосфор в стали является вредной примесью, повышающей склонность стали к хрупкому разрушению при отрицательных температурах. В данной работе было изучено влияние фосфора на механические свойства листового проката из низкоуглеродистой стали марки 10ХСНД. Для проведения исследования были взяты результаты оценки ударной вязкости (по методу КСУ при температуре -60°C) листового проката разной толщины. Для наиболее точных результатов были взяты наименьшие, средние и наибольшие значения (из полученного интервала) ударной вязкости для листов металла толщиной от 10 до 32 мм. Установлено, что влияние фосфора на ударную вязкость определяется толщиной листового проката. При толщине листового проката до 20 мм наблюдается положительная динамика ударной вязкости с увеличением содержания фосфора до 0,011-0,013%. При производстве проката с толщиной более 20 мм влияние фосфора на ударную вязкость листового проката отрицательно. Даны рекомендации по оптимальному содержанию фосфора в прокате из низкоуглеродистых марок стали, а также выполнен прогноз изменения показателей выплавки стали на примере дуговой сталеплавильной печи (ДСП).

Ключевые слова: листовый прокат, толщина листового проката, содержание фосфора, ударная вязкость

Введение

Известно, что затвердевание стали сопровождается значительной ликвацией фосфора, что вызывает неоднородность структуры и ухудшение свойств стали, особенно ударной вязкости [1-3]. При этом устранить проявления ликвации фосфора в стали практически невозможно, вследствие низкой скорости его диффузии в твердом железе [3-5]. Поэтому, во избежание локального охрупчивания металлопродукции, стремятся максимально возможно снизить содержание фосфора в стали. Минимальный уровень фосфора в стали имеет особое значение для условий непрерывной разливки, что связано с особенностями структуры непрерывнолитых заготовок с характерным дефектом в виде осевой химической неоднородности [6-11]. Поэтому, учитывая широкое распространение непрерывной разливки в технологии массового производства стального проката, содержание фосфора в разливаемой стали снижают до уровня не более 0,015%.

Вместе с тем известно, что удаление фосфора сопряжено с увеличением издержек производства, поскольку требует наличия высокоосновного окислительного шлака [12-17]. Формирование такого шлака возможно только при проведении окислительного рафинирования до содержания углерода менее 0,1 %. Такой режим ведения плавки приводит к увеличению выхода шлака, снижению выхода годного и стойкости футеровки печи, а также увеличению расхода раскислителей вследствие повышения растворимости кислорода в металле [16-20]. Поэтому актуальным остается вопрос рационального уровня содержания фосфора в стали, как с точки зрения издержек производства, так и с точки зрения механических свойств листового проката.

Целью настоящей работы является исследование влияния фосфора на ударную вязкость стального листового проката и разработка рекомендаций по совершенствованию технологии дефосфорации стали.

Методика исследования

В работе было проведено исследование влияния фосфора на ударную вязкость (по методу КСУ при температуре -60°C) листового горячекатаного проката из стали марки 10ХСНД по результатам обработки данных 200 плавов. Анализируемый массив данных относится к листовому прокату, получаемому на стане 2800 горячей прокатки, из слябовой заготовки толщиной 190 мм. Для получения результатов в удобной для анализа форме были построены графики зависимостей ударной вязкости металла от содержания фосфора для разных толщин листового проката. Учитывая разнообразие факторов, влияющих на механические свойства стали, для адекватной оценки влияния фосфора на ударную вязкость металлопроката имеющиеся производственные данные предварительно разбили на три группы по величине ударной вязкости. Таким образом, при проведении анализа оценивали влияние фосфора на минимальные, средние и максимальные значения ударной вязкости (для различных толщин проката – 10-14, 16-20 и 25-32 мм).

Результаты исследования и их обсуждение

Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 10-14 мм и содержания фосфора представлена на рис. 1.

Из представленных на рис. 1 данных следует, что с повышением содержания фосфора (в исследованном диапазоне) наблюдается положительное его влияние на величину ударной вязкости для всех уровней. Причем максимальная степень влияния фосфора наблюдается для минимальных значений ударной вязкости, а максимальная адекватность полученного уравнения регрессии – для максимальных значений ударной вязкости.

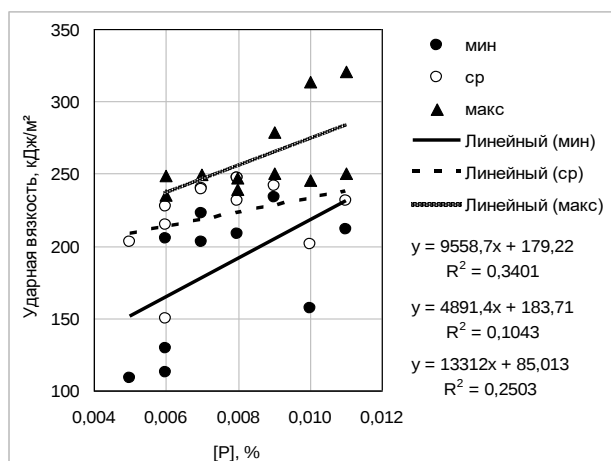


Рис. 1. Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 10-14 мм из стали 10ХСНД и содержания фосфора

Выявленные тренды влияния фосфора можно объяснить особенностями кристаллического строения низкоуглеродистой стали, для которой углерод оказывает слабое влияние на кристаллическую решетку металла. В этих условиях атомы фосфора растворяются в металле с образованием твердого раствора, что способствует повышению ударной вязкости. Дополнительным фактором, предотвращающим вредное влияние фосфора, является умеренная толщина листового проката (10-14 мм), что обеспечивает хорошее прокаливание и получение равномерной структуры металла по толщине, предотвращая возможность образования фосфидов. Таким образом, для рассматриваемых условий производства снижение содержания фосфора менее 0,010%, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости, нецелесообразно.

Для листового проката толщиной 16-20 мм влияние содержания фосфора в интервале от 0,004 до 0,013% на ударную вязкость слабое (рис. 2). Однако и в этом случае наблюдается положительная динамика ударной вязкости с увеличением содержания фосфора в исследованном диапазоне. Причем максимальная степень влияния и адекватность полученной зависимости наблюдается для минимальных значений ударной вязкости, и наоборот.

Причиной такого влияния фосфора, вероятно, является полная его растворимость в низкоуглеродистой стали с образованием твердого раствора, что способствует повышению значений ударной вязкости. Кроме того, при толщине проката до 20 мм обеспечиваются более благоприятные условия для получения равномерной структуры металла по толщине (в сравнении с прокатом толщиной более 20 мм), что снижает вероятность образования фосфидов.

Таким образом, для листового проката из низкоуглеродистых марок стали при толщине проката до 20 мм снижение содержания фосфора менее 0,010%, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости, нецелесообразно.

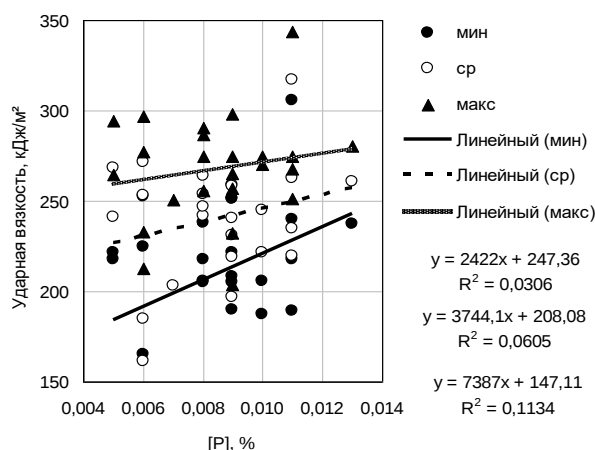


Рис. 2. Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 16-20 мм из стали 10ХСНД и содержания фосфора

Однако с увеличением толщины листового проката условия его прокаливаемости ухудшаются, поэтому повышается вероятность образования фосфидов, способствующих снижению ударной вязкости стали при отрицательной температуре. Данная тенденция была получена при анализе влияния содержания фосфора на ударную вязкость листового проката толщиной 25-32 мм (рис. 3).

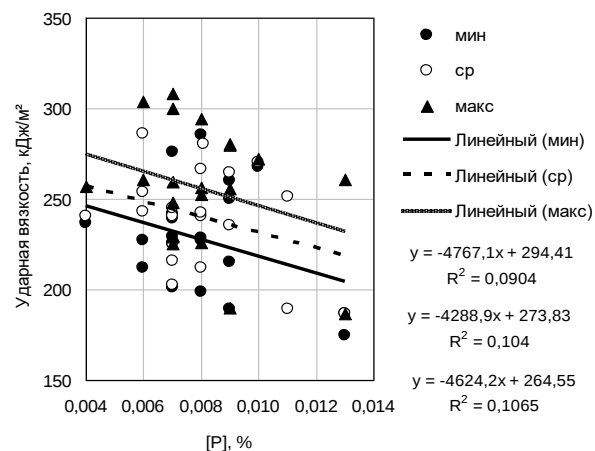


Рис. 3. Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 25-32 мм из стали 10ХСНД и содержания фосфора

Характерной особенностью влияния содержания фосфора на ударную вязкость проката толщиной 25-32 мм является то, что степень этого влияния для различных уровней вязкости практически одинакова. При этом на всех графиках и уравнениях регрессии отчетливо наблюдается обратно пропорциональная динамика ударной вязкости от повышения содержания фосфора. Поэтому при производстве листового проката толщиной более 20 мм проведение глубокой дефосфорации с получением содержания фосфора менее 0,010% должно быть обязательным элементом

технологии, обеспечивающим достижение высоких механических свойств стали.

Таким образом, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости листового проката из низкоуглеродистых сталей целесообразно скорректировать технологию производства с учетом толщины проката:

- при производстве проката толщиной до 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне 0,010–0,015%;
- при производстве проката толщиной более 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне не более 0,010%.

С учетом неизбежного повышения содержания фосфора в стали от момента выплавки до разливки (из ферросплавов и шлака), которое в зависимости от степени легирования может достигать 0,005% [21–23], содержание фосфора в стальном полупродукте, выпускаемом из сталеплавильного агрегата, должно быть несколько меньше. Однако даже при максимальном увеличении содержания фосфора в процессе ковшевой обработки стали, при производстве проката толщиной менее 20 мм можно повысить верхний уровень содержания фосфора в стали до 0,010%.

Такое изменение требований к содержанию фосфора позволит улучшить показатели выплавки полупродукта: снизить основность шлака и расход флюсов, уменьшить потери металла со шлаком и повысить выход годного, а также завершать окислительное рафинирование при более высоком содержании углерода в результате снижения расхода кислорода.

Иллюстрация взаимосвязи указанных показателей выплавки стали с содержанием фосфора в стальном полупродукте на примере работы ДСП емкостью 120 т графически представлена на рис. 4–6.

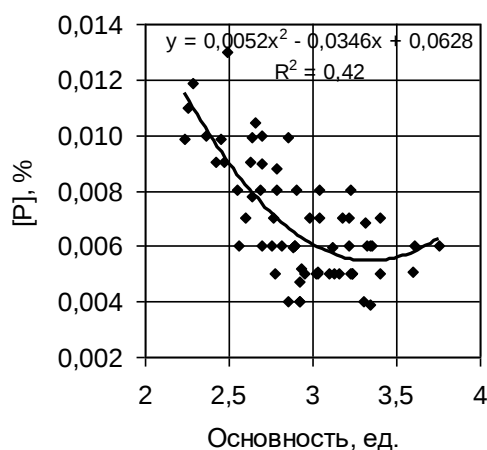


Рис. 4. Влияние основности шлака на содержание фосфора в полупродукте

Рассматривая влияние основности печного шлака на остаточное содержание фосфора (рис. 4), можно сделать вывод о том, что снижение требований к содержанию фосфора на выпуске с текущих 0,004–0,008 до 0,010 % позволяет уменьшить уровень основности

шлака с 2,5–3,5 до 2,4–2,6 ед. Такая корректировка основности шлака позволит как уменьшить расход извести, так и сократить количество шлака, а следовательно, и снизить потери железа с ним, то есть увеличить выход годного.

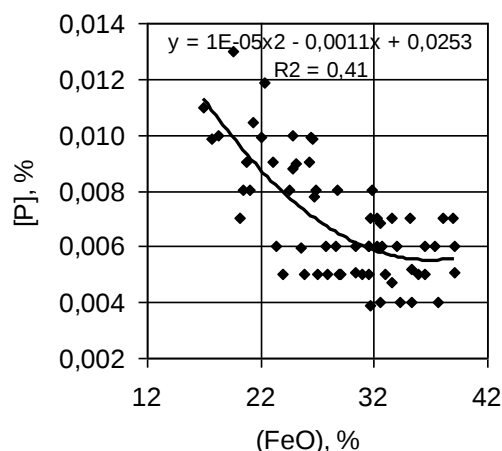


Рис. 5. Влияние окисленности шлака на содержание фосфора в полупродукте

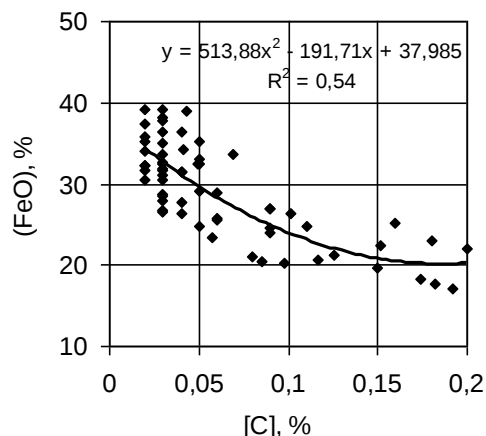


Рис. 6. Влияние остаточного содержания углерода в полупродукте на окисленность шлака

Другим вариантом корректировки технологии выплавки стального полупродукта с содержанием фосфора 0,010 % в ДСП является снижение окисленности шлака, традиционно оцениваемой по содержанию оксидов железа в шлаке. Влияние содержания FeO в шлаке на остаточное содержание фосфора в металле на выпуске из ДСП (см. рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что для получения полупродукта с содержанием фосфора 0,010 % при постоянстве других факторов обеспечивается при окисленности шлака на уровне 15–20 % (по содержанию FeO).

Поскольку окисленность шлака напрямую зависит от остаточного содержания углерода, то для снижения содержания в шлаке оксидов железа с текущих 25–40% до рекомендуемых 15–20% необходимо завершать окислительное рафинирование при остаточном содержании углерода не менее 0,10% (см. рис. 6).

Результатом подобного изменения технологии (помимо содержания фосфора в металле) будет снижение расхода кислорода, количества шлака и потерь железа с ним, увеличение выхода годного и уменьшение расхода раскислителей и науглероживателей.

Возможен и промежуточный вариант корректировки технологии, предусматривающий одновременное снижение основности шлака при увеличении содержания остаточного углерода.

Указанные изменения в технологии позволят сократить издержки производства в результате улучшения показателей выплавки стального полупродукта в ДСП [24-26]: снизить основность шлака и расход флюсов, уменьшить потери металла со шлаком и повысить выход годного, а также завершать окислительное рафинирование при более высоком содержании углерода в результате снижения расхода кислорода.

Заключение

Для листового проката толщиной 10-20 мм из стали марки 10ХСНД с повышением содержания фосфора (в диапазоне 0,004-0,013%) наблюдается положительный тренд в его влиянии на величину ударной вязкости при температуре -60°C .

Выявленные закономерности влияния фосфора можно объяснить особенностями кристаллического строения низкоуглеродистой стали, для которой углерод оказывает слабое влияние на кристаллическую решетку металла. В этих условиях наиболее вероятно полное растворение атомов фосфора в металле с образованием твердого раствора, что способствует повышению значений ударной вязкости. Дополнительным фактором, предотвращающим вредное влияние фосфора, является умеренная толщина проката (10-20 мм), что обеспечивает хорошее прокаливание и получение равномерной структуры металла по толщине, предотвращая возможность образования фосфидов. Таким образом, для рассматриваемых условий производства листового проката из низкоуглеродистой стали марки 10ХСНД при толщине проката до 20 мм снижение содержания фосфора менее 0,010%, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости, нецелесообразно.

Для листового проката из стали 10ХСНД толщиной более 20 мм наблюдается отрицательное влияние содержания фосфора на ударную вязкость при температуре -60°C . Такая особенность влияния фосфора может объясняться тем, что с увеличением толщины листового проката условия его прокаливаемости ухудшаются, поэтому повышается вероятность образования фосфидов, способствующих снижению ударной вязкости стали при отрицательной температуре. Поэтому при производстве листового проката толщиной более 20 мм проведение глубокой дефосфорации с получением содержания фосфора менее 0,010% должно быть обязательным элементом технологии,

обеспечивающим достижение высоких механических свойств стали.

Таким образом, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости листового проката из низкоуглеродистых сталей целесообразно скорректировать технологию производства с учетом толщины проката:

- при производстве проката толщиной до 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне 0,010-0,015%;

- при производстве проката толщиной более 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне не более 0,010%.

Такое изменение требований к содержанию фосфора позволит сократить издержки производства в результате улучшения показателей выплавки полупродукта: снизить основность шлака и расход флюсов, уменьшить потери металла со шлаком и повысить выход годного, а также завершать окислительное рафинирование при более высоком содержании углерода в результате снижения расхода кислорода.

Список источников

1. Гудремон Э.А. Специальные стали. 2-е изд. М.: Металлургия, 1966. 734 с.
2. Гольдштейн Я.Е. Низколегированные стали в машиностроении. М.: Металлургия, 1963. 229 с.
3. Берштейн М.Л., Рахштад А.Г. Металловедение и термическая обработка стали. 3-е изд. М.: Металлургия, 1983. 348 с.
4. Дрозин А.Д., Куркина Е.Ю. Математическая модель ликвации при охлаждении расплава железа с фосфором // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. № 2. С. 5-11.
5. Кинетика сегрегации фосфора на границах зерен в низколегированной малоуглеродистой стали / Бокштейн Б.С., Ходан А.Н., Забусов О.О., Мальцев Д.А., Гурович Б.А. // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 2. С. 156.
6. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. Киев: Техника, 1988. 253 с.
7. Куклев А.В., Соснин В.В., Поздняков В.А. О формировании осевой химической неоднородности в непрерывнолитых слябах // Сталь. 2003. № 8. С. 71-75.
8. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н. Проблемы получения качественной слябовой заготовки на МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2013. Т. 13. № 1. С. 68-73.
9. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Анализ влияния технологических параметров разлива стали на качество непрерывнолитого сляба и листового проката // Теория и технология металлургического производства. 2013. №1(13). С. 21-23.
10. Химическая неоднородность непрерывнолитого сляба из трубной особонизкосернистой стали / Крылова Е.А., Столяров А.М., Мошкунов В.В.,

- Потапова М.В. // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 1 (20). С. 20-22.
11. Глотова И.О., Дождиков В.И., Васютин А.Ю. Особенности распределения степени сегрегации химических элементов в непрерывнолитом слябе // Сталь. 2022. № 2. С. 7-11.
 12. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
 13. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. М.: Теплотехник, 2007. 527 с.
 14. Управление процессом дефосфорации стали при выплавке полупродукта в ДСП / Чичко А.А., Маточкин В.А., Соболев В.Ф., Чичко А.Н. // Электрометаллургия. 2008. № 9. С. 27-32.
 15. Анализ процесса дефосфорации при выплавке стали из металлizedованного сырья с повышенным содержанием фосфора / Хассан А.И., Котельников Г.И., Семин А.Е., Мегахед Г. // Черные металлы. 2015. № 1 (997). С. 12-18.
 16. Совершенствование технологии производства стали с целью обеспечения содержания фосфора менее 0,005 % / Настюшкина А.В., Костин С.В., Шевченко Е.А., Шевченко А.А. // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 4 (23). С. 14-17.
 17. Балакина И.В. Совершенствование технологии дефосфорации стального полупродукта в гибкой модульной печи // Наука и производство Урала. 2024. Т. 20. С. 10-13.
 18. Влияние технологических параметров плавки на стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи в условиях АО «Уральская Сталь» / Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Дёма Р.Р., Колодин А.В. // Новые огнеупоры. 2019. №7. С.3-7.
 19. Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А., Басков С.Н. Совершенствование технологии предварительного раскисления стали в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2019. №8(1052). С.10-16.
 20. Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям / Куницын Г.А., Кузнецов М.С., Шаповалов А.Н., Бакин И.В. // Черные металлы. 2022. №5(1085). С.9-15.
 21. Ибраев И.К., Ибраева О.Т. Проблемы рефосфорации при выплавке стали // Электрометаллургия. 2012. № 12. С. 27-30.
 22. Анализ сквозной технологии производства листового проката статистическими методами / Шаповалов А.Н., Тутарова В.Д., Калитаев А.Н., Нефедов А.В. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2017. Вып. 2 (1406). С.52-58.
 23. Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И. Проблема фосфора при производстве марганцевых ферросплавов // Сталь. 2020. № 10. С. 23-27.
 24. Измайлова А.С., Шаповалов А.Н. Технологические возможности сокращения себестоимости продукции металлургических предприятий на современном этапе // Тренды и управление. 2017. № 2. С.132-147.
 25. Уманский А.А., Думова Л.В. Исследование комплексного влияния параметров выплавки рельсовой электростали на качество рельсовой продукции и технико-экономические показатели ее производства // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 11. С. 876-883.
 26. Коноваленко С.В., Морозов В.О. Оптимизация технологии выплавки стали в электросталеплавильном цехе // Сталь. 2021. № 2. С. 27-29.

Сведения об авторах

Куница Наталья Геннадьевна – старший преподаватель кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС», Новотроицк, Россия. E-mail: n.kunicina@mail.ru.

Шаповалов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС», Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON RATIONAL DEPTH OF PHOSPHORUS REMOVAL FROM STEEL

Kunicina Natalia G. – Senior Lecturer of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: n.kunicina@mail.ru.

Shapovalov Alexey N. – PhD (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Annotation. It is generally believed that phosphorus in steel is a harmful impurity that increases the tendency of steel to brittle fracture at subzero temperatures. In this paper the effect of phosphorus on the mechanical properties of sheet rolled from low-carbon steel grade 10XSND was studied. The results of impact toughness evaluation (by KCU method at -60°C) of sheet rolled products of different thicknesses were taken for the study. For the most accurate results were taken the lowest, average and highest values (from the obtained interval) of impact toughness for metal sheets with thickness from 10 to 32 mm. It was found that the effect of phosphorus on impact toughness is determined by the thickness of sheet metal. At thickness of rolled sheet up to 20 mm positive dynamics of impact toughness is observed with increase of phosphorus content up to 0,011-0,013%. For rolled products with a thickness of more than 20 mm, the effect of phosphorus on the impact strength of sheet metal is negative. Recommendations on optimal phosphorus content in rolled products from low-carbon steel grades are given, as well as the forecast of changes in steelmaking indicators on the example of electric arc furnace (EAF).

Keywords: sheet metal, sheet metal thickness, phosphorus content, impact toughness.

Ссылка на статью:

Куницина Н.Г., Шаповалов А.Н. О рациональной глубине удаления фосфора из стали // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 37-42.

Kunicina N.G., Shapovalov A.N. On rational depth of phosphorus removal from steel. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 37-42.

УДК 621.778

Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Столяров А.Ю., Язвенко А.М., Савельева И.А.

МУЛЬТИМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ С УЧЕТОМ МИКРОМЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЛИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Аннотация. Представлены результаты компьютерного мультимасштабного конечно-элементного моделирования процесса волочения высокопрочной проволоки с перлитной микроструктурой для сердечников сталеалюминиевых проводов. Описана методика и представлены результаты моделирования процесса волочения с использованием комплекса SIMULIA Abaqus с учетом различного характера ориентации цементитных пластин в микроструктуре проволоки относительно оси волочения и межпластинного расстояния. На основе результатов моделирования и прогноза структурообразования проволоки исследованы маршруты волочения с различным распределением единичных обжатий.

Ключевые слова: высокопрочная проволока, волочение, мультимасштабное моделирование, микроструктура, цементитные пластины, ориентация

Введение

В настоящее время основной мировой тренд в мезитизной отрасли заключается в повышении прочности выпускаемой проволоки ответственного назначения. За последние годы верхний предел диапазона прочности сталей, применяемых при производстве проволоки, значительно увеличился. Высокопрочная и сверхвысокопрочная проволока широко используется при производстве канатов, арматуры, металлокорда, швартовых тросов и якорных канатов для морской нефтяной промышленности, тросов подвесных мостов, вантовых конструкций. Появились виды готовой продукции с принципиально новыми требованиями к прочности. Одним из таких видов является высокопрочная и сверхвысокопрочная проволока (временное сопротивление разрыву не менее 2100 МПа) с покрытиями на основе цинка, используемая для производства сердечников неизолированных сталеалюминиевых проводов. Развитие отечественной технологии производства такой проволоки позволит увеличить электропроводность существующих высоковольтных линий, повысить стойкость провода к коррозии, воздействию ветра, обледенению и механическим нагрузкам, увеличить расстояние между опорами при строительстве новых линий, уменьшить общие капиталовложения в строительство и реконструкцию линий.

Для производства высокопрочной проволоки для сердечников сталеалюминиевых проводов используют стали с содержанием углерода до 1,0% С. Технология обработки исходной катанки перед процессом волочения предусматривает формирование в стали перлитной микроструктуры [1–3].

В процессе волочения проволоки к свойствообразующим процессам относятся утонение цементитных пластин, изменение межпластинного расстояния в перлитных колониях и металлографической текстуры, локализация микродеформации [4–6]. Данные параметры микроструктуры динамично изменяются в ходе процесса волочения и определяют техно-

логичность обработки и уровень механических свойств готовой проволоки.

Ряд работ, посвященных мультимасштабному компьютерному моделированию процесса волочения перлитных сталей, наглядно продемонстрировал целесообразность и актуальность исследований микронапряжений и микродеформаций на уровне перлитных колоний [7–11]. Считается, что напряженно-деформированное состояние (НДС) даже на масштабном уровне отдельных перлитных колоний характеризуется высокой степенью неравномерности. Поэтому актуален вопрос учета указанных особенностей эволюции микроструктуры стали для проектирования маршрутов волочения проволоки повышенной прочности для сердечников сталеалюминиевых проводов.

Методика моделирования

При построении макромоделей процесса волочения стали марки 90 использовался подход, описанный в работе [12].

Исходя из анализа качества исходной катанки из микроструктуры, были выделены следующие характерные участки:

- 1) перлитные колонии с цементитными пластинами, параллельными оси волочения;
- 2) перлитные колонии с цементитными пластинами, перпендикулярными оси волочения;
- 3) перлитные колонии с цементитными пластинами, располагающимися под произвольным углом к оси волочения.

Для дальнейшего моделирования были созданы соответствующие репрезентативные объемы указанных перлитных колоний (рис. 1).

Для распределения свойств микроструктурных составляющих были сформированы следующие наборы конечных элементов сетки (раздел Sets модуля Parts): группа элементов цементита (рис. 2, а), группа элементов феррита (рис. 2, б).

Реологические свойства микроструктурных составляющих стали были заданы согласно данным, приведенным в работе [13].

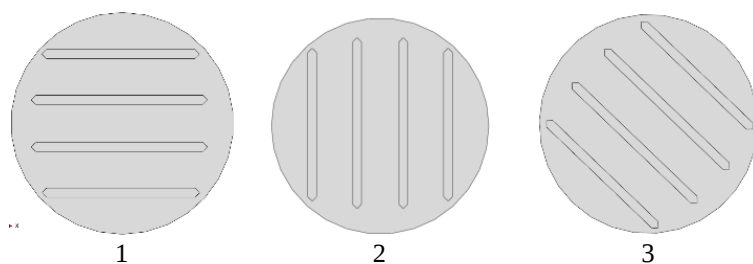


Рис. 1. Общий вид репрезентативных объемов:
1 – цементитные пластины параллельны оси;
2 – цементитные пластины перпендикулярны оси;
3 – цементитные пластины под углом к оси

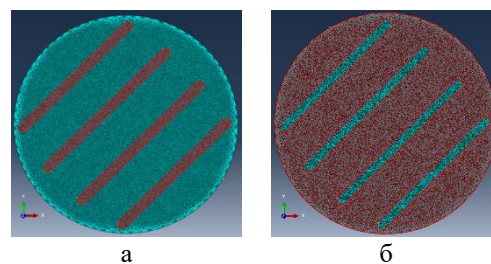


Рис. 2. Группы элементов сетки, соответствующие:
а – цементиту; б – ферриту

Для расчета макромоделей использовались следующие маршруты волочения:

– Маршрут А: маршрут волочения с линейно убывающими единичными обжатиями:

7.00 – 6.08 – 5.30 – 4.65 – 4.10 – 3.62 – 3.22 – 2.88 – 2.58 – 2.32 – 2.1

– Маршрут Б: маршрут волочения с комбинированными единичными обжатиями (малые, средние, уменьшающиеся):

7.00 – 6.31 – 5.62 – 4.97 – 4.37 – 3.83 – 3.36 – 2.96 – 2.62 – 2.33 – 2.1.

В качестве наиболее наглядного сравнительного параметра для репрезентативных объемов перлитных колоний была выбрана эквивалентная деформация (РЕЕQ). На макроуровне анализировались распределения эквивалентных деформаций после каждого прохода.

Сравнение распределений деформаций после каждого прохода в маршруте волочения А (рис. 3) и Б (рис. 4) показало, что при волочении с линейно убывающими единичными обжатиями формируется более равномерный градиент деформаций от поверхности до центра проволоки. Однако при этом в абсолютных значениях максимальных и минимальных деформаций по продольному сечению проволоки разница между маршрутами составляет менее 8%. В связи с более интенсивной на первых стадиях процесса реализацией заложенного в исходной заготовке ресурса пластичности при обработке по маршруту А радиальные и продольные осевые напряжения в деформационной зоне имеют минимальную область околонулевых значений. Такое воздействие напряжений при волочении оказывает серьезное влияние на распределение продольных остаточных напряжений в обоих маршрутах.

Следует отметить, что при волочении по маршруту Б в первых пяти проходах остаточные напряжения и их распределение в сечении практически не от-

личаются от маршрута А, но на последней половине маршрута отличаются на более чем 20% по номинальным значениям и по итоговому распределению в сечении готовой проволоки. Данный параметр может быть потенциально важен для корректной оценки вклада многостадийной холодной деформации волочением в механические свойства готового изделия, так как величина этих напряжений сильно разнится по сечению проволоки и, как показывают результаты компьютерного моделирования, может достигать до 800 МПа в виде растягивающих напряжений, сконцентрированных на поверхности проволоки.

Анализ моделей цементитных пластин в каждом проходе волочения (рис. 5-10) наглядно демонстрирует ключевые особенности микроструктурного поведения перлитной проволоки в процессе волочения, а именно не только уменьшение межпластиночного расстояния с нарастанием суммарной степени деформации по маршруту волочения, но и реориентацию цементитных пластин с формированием ярко выраженной направленной текстуры деформации. При этом в зависимости от начального характера ориентации пластин относительно оси волочения различно ориентированные пластины имеют соответствующие различные тенденции протекания деформации в них. Так, в частности, цементитные пластины, изначально ориентированные параллельно оси волочения, на поверхности и в центре проволоки наиболее активно испытывают утонение и вытягивание в направлении деформации. При этом следует принимать во внимание, что сама пластина в таком случае деформируется неравномерно, что заметно даже на идеализированной «синтетической» модели перлитной колонии. На определенном этапе, ориентировочно в области суммарной деформации волочением 0,6-0,65, на данных пластинах начинает формироваться «шейка» и последующее разрушение.

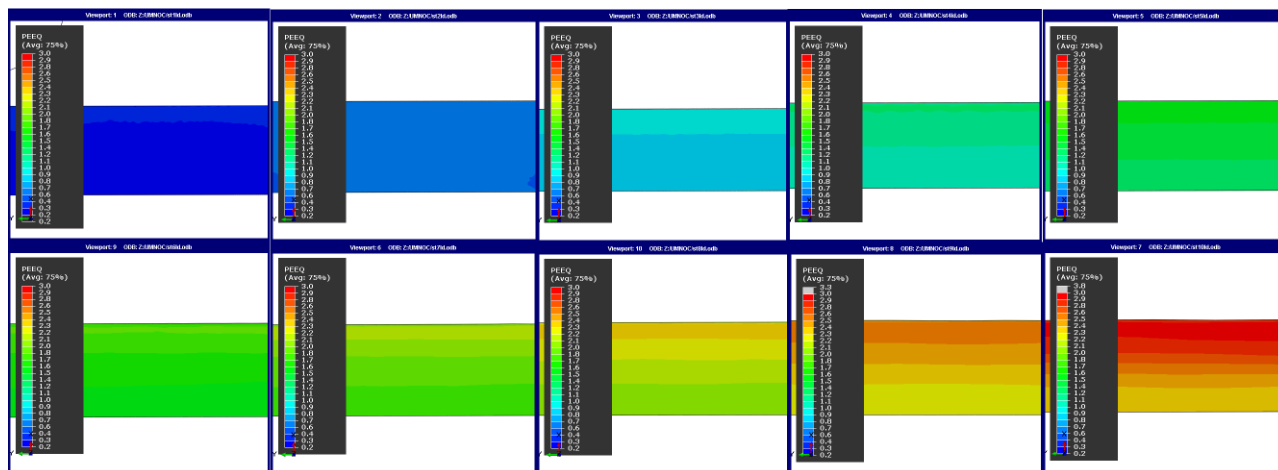


Рис. 3. Распределение деформаций после каждого прохода в маршруте волочения А

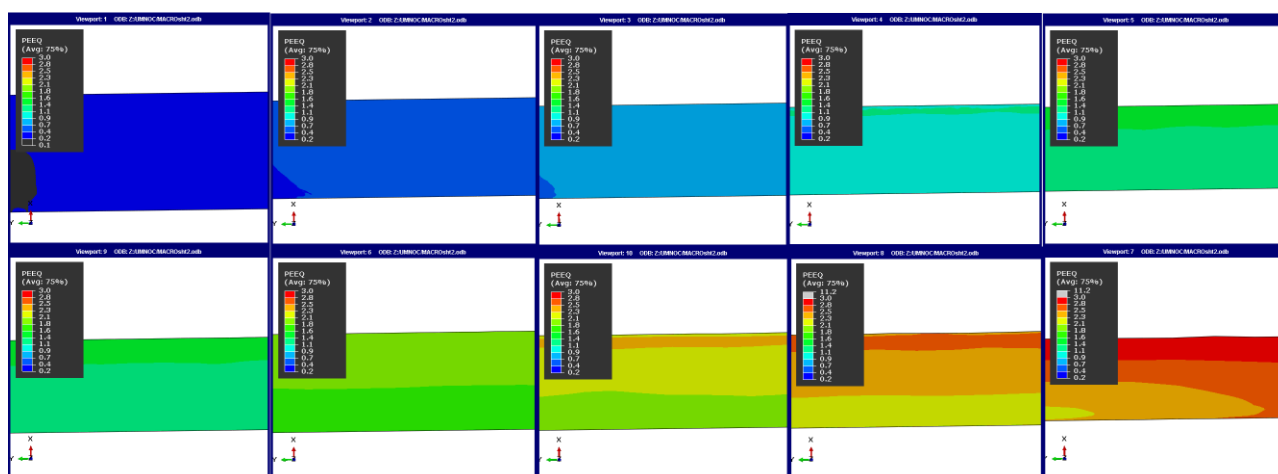


Рис. 4. Распределение деформаций после каждого прохода в маршруте волочения Б

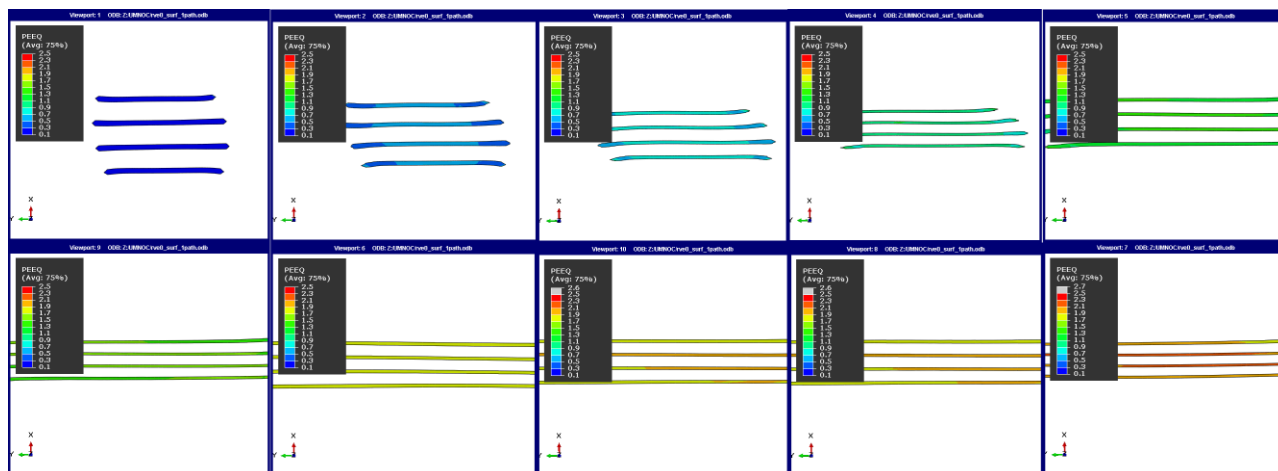


Рис. 5. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности параллельна оси волочения), маршрут А

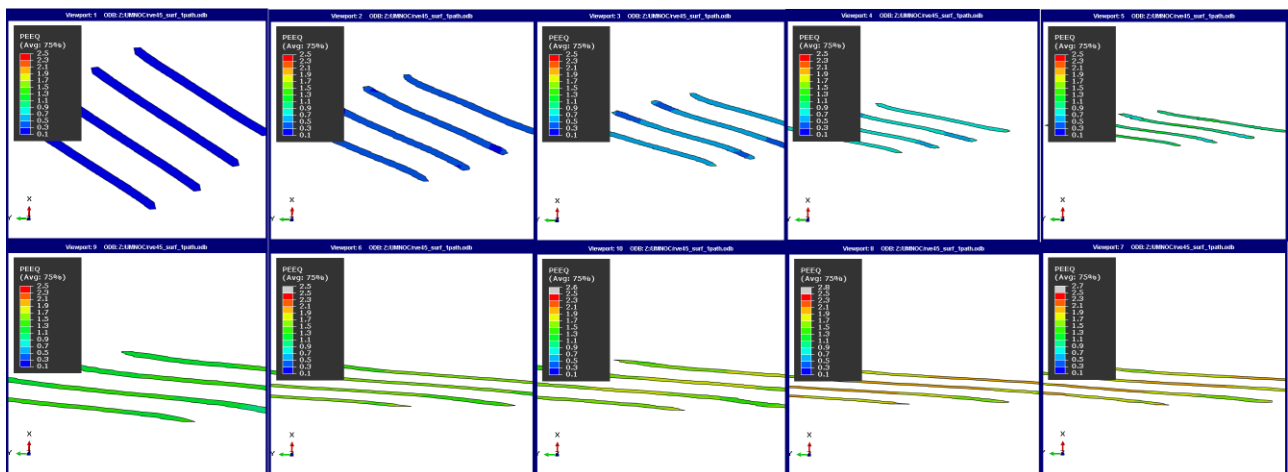


Рис. 6. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 45° оси волочения), маршрут А

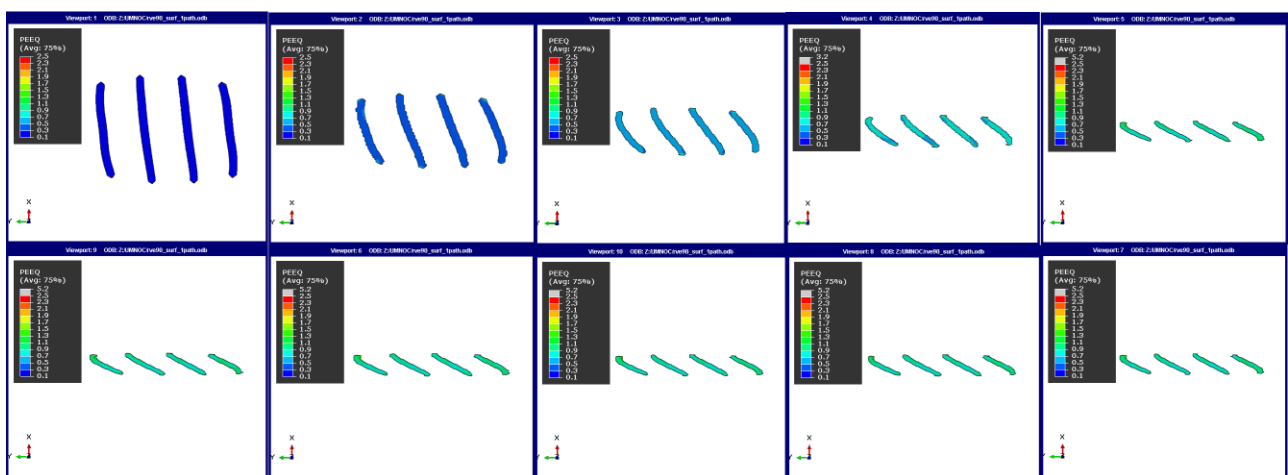


Рис. 7. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 90° оси волочения), маршрут А

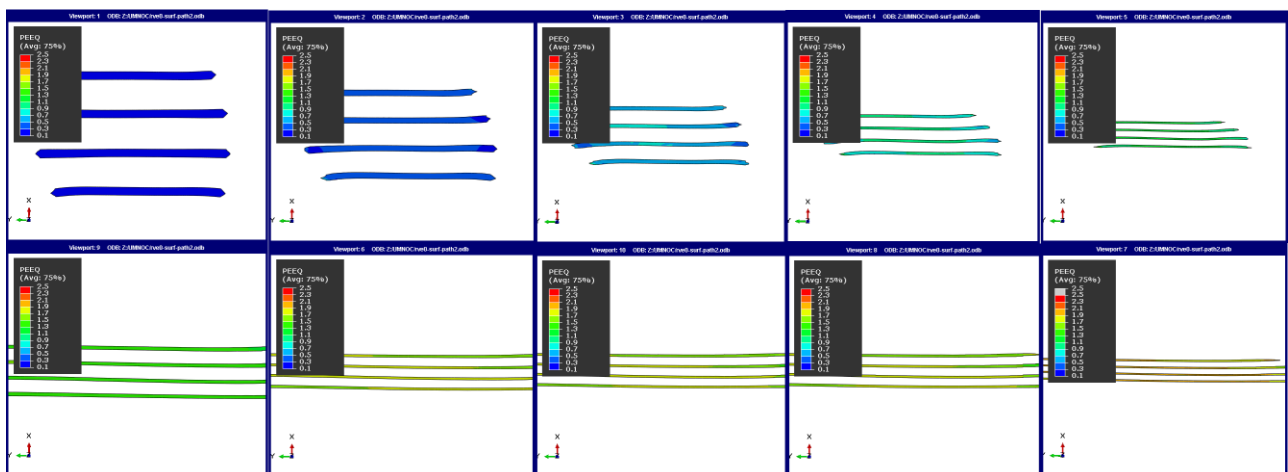


Рис. 8. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности параллельно оси волочения), маршрут Б

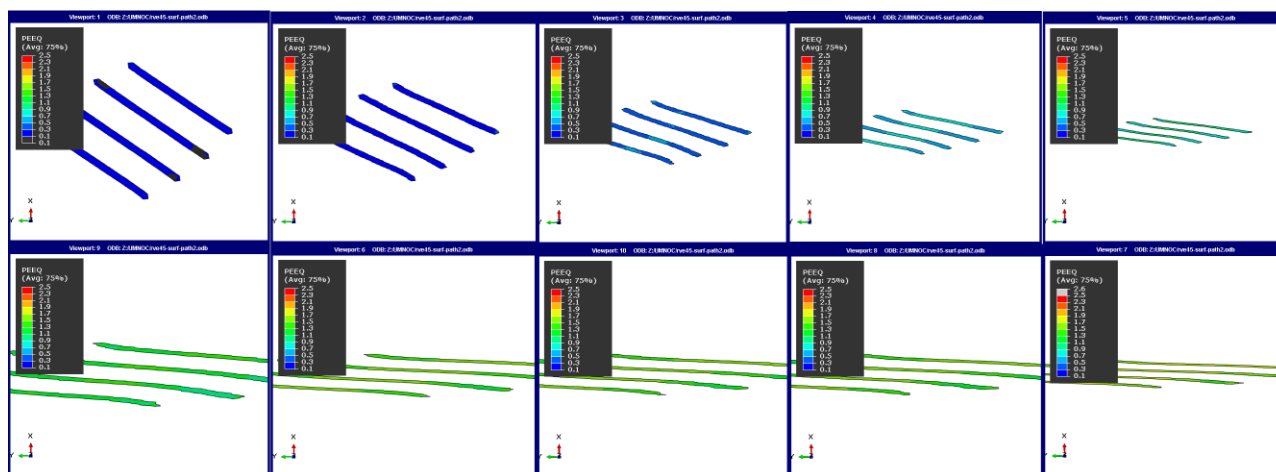


Рис. 9. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 45° к оси волочения), маршрут Б

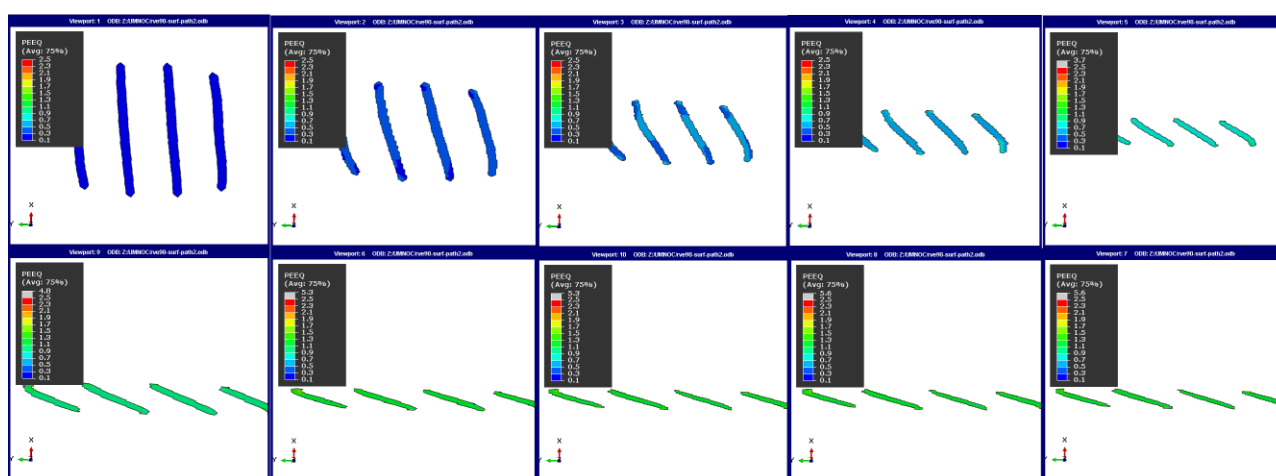


Рис. 10. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 90° к оси волочения), маршрут Б

Поведение цементитных пластин, ориентированных перпендикулярно оси волочения, значительно отличается от характера поведения пластин, ориентированных параллельно оси волочения. Межпластиночное расстояние в них практически не изменялось, сами пластины в силу особенностей приложения «макронагрузки» значительно фрагментировались и имели склонность к разрушению. При этом стоит отметить, что тенденция к реориентации цементитных пластин в поверхностных слоях проволоки всё же сохранялась (см. рис. 10), что может служить потенциальным фактором зарождения микротрещин в данной области проволоки.

Наиболее благоприятные тенденции деформационного поведения проявляет модель перлитной колонии, расположенная под условным углом в 45° к оси волочения. Такие колонии имеют наиболее благоприятное напряженно-деформированное состояние на протяжении всего маршрута волочения. Напряженно-деформированное состояние до определенной стадии

волочения является равномерным, а при достижении деформации $\sim 0,7$ начинает характеризоваться так называемыми «линиями сброса», при которых начинается дробление и изгиб цементитных пластин.

Результаты моделирования показывают, что разница между степенями деформации до начала фрагментации и измельчения между двумя вышеописанными частными случаями расположения цементитных пластин и перлитными колониями с ориентированными под углом 45° относительно оси волочения пластинами составляет 1,8 раз.

Динамика уменьшения межпластиночного расстояния и изменения угла ориентации перлитных колоний относительно оси волочения между маршрутами А и Б отличается, несмотря на соизмеримо близкие значения на выходе из обоих маршрутов. При реализации маршрута А межпластиночное расстояние наиболее интенсивно изменяется в ходе первых четырех проходов, после чего пластины цементита начинают только аккумулировать деформации. При реали-

зации маршрута Б данный момент проявляется в пятом/шестом проходах. Особенно ярко это выражено на примере перлитных колоний в центре проволоки, что находит обоснование также в ранее описанных результатах моделирования на макроуровне.

Следует отметить, что потенциально перспективным вопросом развития исследований с применением подобного подхода к учету микромеханики деформирования в таком случае является изучение поведения различного рода микроструктурных «неоднородностей» (цементитной сетки, пор или неметаллических включений), так как степень их влияния и поведение в целом можно рассмотреть с позиции неоднородности напряженно-деформированного состояния на уровне каждой отдельной колонии, а не перлитной проволоки, как традиционно описываемого в моделях изотропного материала.

Теоретически возможным становится анализ маршрутов волочения с позиции снижения вероятности обрывности или трещинообразования в процессе волочения с поправкой на стохастический характер микроструктурного строения проволоки с позиции распределения размерных параметров.

Основываясь на феноменологических моделях репрезентативных объемов перлитных колоний в микроструктуре стали и подходом, описанным в работе [14], уровень временного сопротивления перлитной стали на любой стадии волочения может быть представлен в виде уравнения Эмбери-Фишера (Embury-Fisher equation), то есть как зависимости от угла разворота цементитных пластин, углеродного коэффициента и исходных значений межпластиночного расстояния и временного сопротивления разрыву. В свою очередь, это позволяет получить еще один вид теоретической оценки и прогноза механических свойств, но при этом учитывающий фундаментальную микромеханику деформирования стали, что особенно важно на последних стадиях маршрута волочения в области практически полного исчерпания ресурса пластичности. Исходя из этого, суммарная степень деформации в результате обработки по представленным маршрутам волочения может теоретически обеспечивать уровень временного сопротивления проволоки из стали марки 90 в диапазоне 2310–2460 МПа.

Заключение

Учет микромеханики деформирования при проектировании маршрутов волочения позволяет наиболее полно оценить картину напряженно-деформированного состояния и зависящие от него параметры структурообразования. При этом становится возможным не просто произвести качественное и количественное сравнения, но и провести своего рода цифровой эксперимент по проектированию новых и совершенствованию действующих маршрутов воло-

чения высокопрочной проволоки с прогнозом уровня механических свойств проволоки. Для проволоки повышенной прочности для сердечников сталей алюминидных проводов на основе анализа результатов моделирования может быть рекомендован маршрут волочения с комбинированными обжатиями.

Список источников

1. Hohenwarter A. Ultra-strong and damage tolerant metallic bulk materials: a lesson from nanostructured pearlitic steel wires // *Scientific Reports*. 2016. 6 (1). doi: 10.1038/srep33228.
2. Influence of the pearlite fineness on the mechanical properties, deformation behavior, and fracture characteristics of carbon steel / Izotov V.I., Pozdnyakov V.A., Luk'yanenko E.V. et al. // *Physic Metal and Metallography*. 2007. 103. P. 519 – 529.
3. Toribio J. Role of the microstructure on the mechanical properties of fully pearlitic eutectoid steels // *Fracture and Structural Integrity related Issues*. 2014. 30. P. 424-430.
4. Brandaleze E. Structural evolution of pearlite in steels with different carbon content under drastic deformation during cold drawing // *Procedia Materials Science*. 2015. 8. P. 1023 – 1030.
5. Microstructural evolution, strengthening mechanisms and strength structure relationship in cold-drawn pearlitic steel wire / Zhang X., Hansen N., Godfrey A., Huang X. // *Risoe International Symposium on Materials Science. Proceedings*. 2012. 33. P. 407-416.
6. Zelin M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing // *Acta Materialia*. 2002. 50. P. 4431-4447.
7. Muskalski Z., Milenin A. Development of finite element model of reorientation of cementite lamellae in pearlite colonies in wire drawing process for wires made from high carbon steel // *Solid State Phenomena*. 2010. 165. P. 136-141.
8. Gerstein G., Nürnberger F. Structural evolution of thin lamellar cementite during cold drawing of eutectoid steels // *Procedia Engineering*. 2014. 81. P. 694-699.
9. Muskalski Z., Milenin A., Kustra P. The multi-scale FEM simulation of wire fracture during drawing of pearlitic steel // *Materials Science Forum*. 2008. 575 – 578. P. 1433-1438.
10. The Multi-Scale FEM Simulation of the Drawing Processes of High Carbon Steel / Milenin A., Muskalski Z., Wiewirowska S., Kustra P. // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007. 23. P. 71-74.
11. Мультимасштабное моделирование структурно-фазовых превращений в стали при волочении / Константинов Д.В., Бзовски К., Корчунов А.Г., Кузьяк Р., Пьетшик М., Ширяев О.П. // *Вестник Магнитогорского государственного технического*

- университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 90–98.
12. Компьютерное моделирование процесса волочения проволоки из перлитной стали с учетом микроструктурного строения / Д.В. Константинов, А.Г. Корчунов, О.П. Ширяев, М.В. Зайцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. Т. 17, № 3. С. 106–114.
 13. Исследование макро- и микромеханики деформирования перлитной стали в многостадийных технологиях производства арматурных канатов / Д.В. Константинов, А.Г. Корчунов, М.В. Зайцева, О.П. Ширяев, Д.Г. Емалеева // СТАЛЬ. № 7. 2018. С. 44-48.
 14. Toribio J., Gonzalez B., Matos J. Microstructure and Mechanical Properties in Progressively Drawn Pearlitic Steel. Materials Transactions, 2014, vol. 55, pp. 93-98.

Сведения об авторах

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, руководитель молодежной лаборатории «Лаборатория инжиниринга передовых метизных технологий», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: const_dimon@mail.ru.

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Столяров Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, начальник технологического центра – главный технолог, ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Язвенко Андрей Михайлович – главный специалист технологического центра ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: yazvenko.am@mmk-metiz.ru

Савельева Ирина Александровна – доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: irinasav17@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MULTISCALE MODELING OF HIGH-STRENGTH WIRE DRAWING PROCESS WITH MICROMECHANICS REPRESENTATION OF PEARLITE MICROSTRUCTURE DEFORMATION

Konstantinov Dmitry V. – Candidate of Technical Sciences, Head of the Youth Laboratory "Laboratory of Engineering Advanced Hardware Technologies", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: const_dimon@mail.ru

Korchunov Alexey G. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: agkorchunov@mail.ru

Stolyarov Alexey Yu. – Candidate of Technical Sciences, Chief Process Engineer – Head of the Technology Center, OJSK «Magnitogorsk hardware and sizing plant “ММК-МЕТИЗ”», Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Yazvenko Andrey M. – Senior Specialist of the Technology Center, OJSK «Magnitogorsk hardware and sizing plant “ММК-МЕТИЗ”», Magnitogorsk, Russia. E-mail: yazvenko.am@mmk-metiz.ru

Savelieva Irina A. – Associate Professor of the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: irinasav17@yandex.ru

Abstract. The paper presents results of computer-based multiscale finite element modeling of the drawing process of high-strength wire with a pearlitic microstructure, intended for use as the core of steel-aluminum conductors. The methodology and results of the drawing process simulation using the SIMULIA Abaqus software suite are described, taking into account different orientations of cementite lamellae in the wire's microstructure relative to the drawing axis, as well as interlamellar spacing. Based on the simulation results and structural evolution predictions, various wire drawing routes with different distributions of individual reductions are analyzed.

Keywords: High-strength wire, wire drawing, multiscale modeling, microstructure, cementite lamellae, orientation

Ссылка на статью:

Мультимасштабное моделирование процесса волочения высокопрочной проволоки с учетом микромеханики деформирования перлитной микроструктуры / Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Столяров А.Ю., Язвенко А.М., Савельева И.А. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 43-50.

Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Stolyarov A.Yu., Yazvenko A.M., Savelieva I.A. Multiscale modeling of high-strength wire drawing process with micromechanics representation of pearlite microstructure deformation. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 43-50.

ЭКОНОМИКА В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 658.31

Валяева Г.Г., Гафурова В.М., Коптякова С.В., Лазарев А.С.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОРПОРАТИВНОЙ КУЛЬТУРЫ КАК ИНСТРУМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. Важность корпоративной культуры для успешного функционирования металлургических компаний широко признана во всем цивилизованном мире. Корпоративная культура – это, с одной стороны, стратегический инструмент, который позволяет мобилизовать инициативу сотрудников для достижения стратегических целей организации. С другой стороны, инструмент управления стоимостью бизнес-процессов организации, поскольку она определяет, как и с какими затратами будут достигнуты экономические показатели и результаты деятельности организации. Объект исследования – влияние корпоративной культуры на экономическую эффективность бизнес-процессов современных металлургических предприятий. Целью исследования является формирование количественной оценки влияния показателей корпоративной культуры на экономическую эффективность бизнес-процессов. В работе проанализированы используемые на практике модели влияния корпоративной культуры на экономическую эффективность бизнес-процессов организации. Авторами разработана и предложена экономико-статистическая модель зависимости метрик корпоративной культуры и показателей экономической эффективности бизнес-процессов. Для оценки количественного влияния метрик корпоративной культуры на показатели эффективности бизнес-процессов предлагается использовать инструментарий классического корреляционного и регрессионного анализа. Предложенный методический инструментарий позволяет существенно повысить качество управления эффективностью бизнес-процессов через совершенствование (развитие) конкретных элементов корпоративной культуры. Важным элементом предлагаемого подхода является переход от качественной оценки корпоративной культуры к вполне конкретным количественным показателям, учитывающим их взаимосвязь с показателями эффективности бизнес-процессов.

Ключевые слова: корпоративная культура, бизнес-процессы, метрики, корреляционный анализ, регрессионный анализ, корреляционная модель, экономическая эффективность, металлургические компании

В современных условиях функционирования рынка повышение эффективности бизнес-процессов является основной задачей любой компании [5]. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность бизнес-процессов, является корпоративная культура – совокупность убеждений, установок, норм поведения и ценностей, общих для всех сотрудников конкретной организации. Она определяет образ действий людей и оказывает существенное влияние на ход их работы [8, 9].

Анализ научной литературы позволяет выделить пять моделей влияния корпоративной культуры на экономическую эффективность бизнес-процессов организации. Характеристики моделей представлены в табл. 1.

Несмотря на высокую значимость корпоративной культуры с точки зрения эффективности бизнес-процессов металлургических предприятий, в настоящее время отсутствуют адекватные модели оценки ее влияния на экономическую эффективность бизнес-процессов [1]. Важно отметить, что существующие подходы к оценке влияния корпоративной культуры на эффективность бизнес-процессов носят преимущественно качественный характер.

Целью исследования является выявление наиболее эффективных инструментов совершенствования корпоративной культуры и оценки их влияния на повышение экономической эффективности бизнес-

процессов металлургических предприятий, то есть формирование количественной оценки влияния показателей корпоративной культуры на эффективность бизнес-процессов.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать экономико-статистическую модель зависимости метрик корпоративной культуры и показателей экономической эффективности бизнес-процессов металлургических предприятий. Для оценки количественного влияния метрик корпоративной культуры на показатели эффективности бизнес-процессов предлагается использовать инструментарий классического корреляционного и регрессионного анализа [7], в рамках которого предлагается построить модель зависимости экономической эффективности бизнес-процессов от метрик корпоративной культуры [4].

Схематично суть предлагаемой модели зависимости экономической эффективности бизнес-процессов от метрик корпоративной культуры представлена на рис. 1.

Важным моментом с точки зрения практического использования предлагаемой корреляционной модели метрик корпоративной культуры и экономической эффективности бизнес-процессов является последовательность этапов ее внедрения. Структурированно состав предлагаемых этапов представлен на рис. 2.

Модели оценки влияния корпоративной культуры на экономическую эффективность бизнес-процессов компании

	модель	Характеристики
1	Процессная модель В. Сате	– корпоративная культура влияет на поведение сотрудников через определенные образцы поведения – выделены процессы влияния: принятие решений, восприятие организационной среды, оправдание своего поведения, контроль, коммуникация, посвящение компании [6]
2	Модель Т. Питерса – Р. Уотермана	– организационная культура влияет на успешность деятельности компании – ценности, способствующие успеху компании: вера в действие, связь с потребителем, поощрение автономии и предприимчивости, люди – как главный источник производительности и эффективности, знание того, чем управляешь, простота структуры и немногочисленность штата управления, одновременное сочетание гибкости и жесткости в управлении [10]
3	Модель Парсонса AGIL	– успех и экономическая эффективность компании рассматриваются через спецификацию определенных функций: адаптация, выполнение поставленных целей, интегрирование своих подразделений в единое целое и признание конкурентами, партнерами, клиентами
4	Модель Р. Квина и Дж. Рорбаха	– эффективность организации определяется в трех группах измерений: интеграция – дифференциация; внутренний фокус – внешний фокус; средства/инструменты – результаты/показатели
5	Модель ситуационной бальной оценки	– каждому критерию корпоративной культуры присваивается определенный бал с целью определения его эффективности

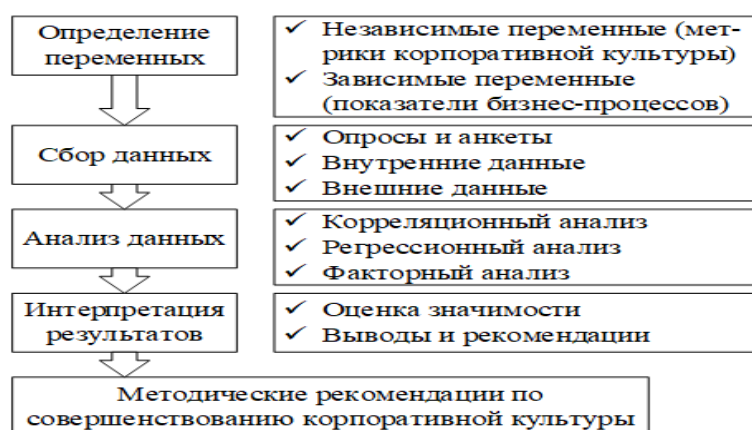


Рис. 1. Схема построения корреляционно-регрессионной модели экономической эффективности бизнес-процессов

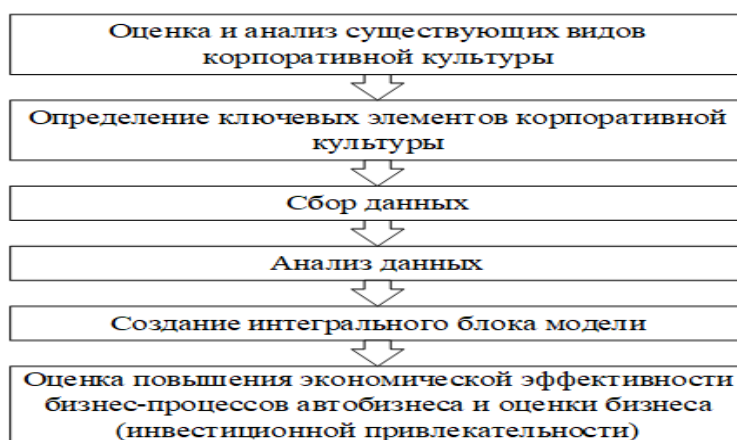


Рис. 2. Предлагаемый состав этапов внедрения авторской корреляционной модели метрик корпоративной культуры и экономической эффективности бизнес-процессов (интеграционный блок)

Процесс построения корреляционной модели включает в себя следующие этапы [2; 3]:

- 1) анализ данных: проведение статистического анализа собранных данных для выявления зависимостей между факторами корпоративной культуры и метриками экономической эффективности;
- 2) создание математической модели, которая описывает влияние факторов корпоративной культуры на показатели экономической эффективности;
- 3) валидация модели: проверка модели на реальных данных для подтверждения ее точности и надежности;
- 4) оптимизация: внесение изменений в модель для повышения ее точности и применимости.

Схематично процесс построения корреляционно-регрессионной модели представлен на рис. 3.

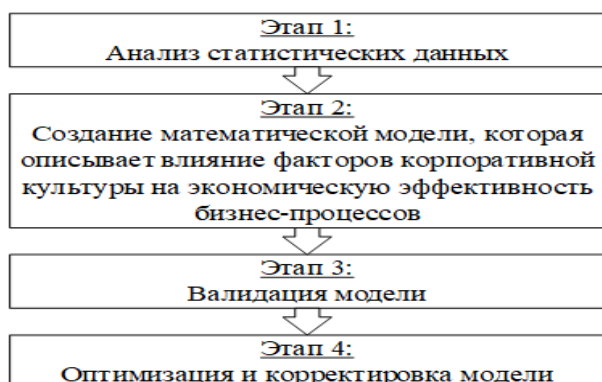


Рис. 3. Предлагаемый подход к организации процесса построения математической модели

Далее определим метрики корпоративной культуры и метрики эффективности бизнес-процессов, взаимосвязь между которыми представлены на рис. 4.

Математическая модель, описывающая влияние факторов корпоративной культуры на экономическую эффективность бизнес-процессов, предлагается разработать на основе регрессионного анализа. Модель должна включать следующие уравнения:

- 1) Скорость бизнес-процесса (оборачиваемость)

$$V = \alpha_1 \cdot CC_1 + \alpha_2 \cdot CC_2 + \alpha_3 \cdot CC_3 + \alpha_4 \cdot CC_4 + \alpha_5 \cdot CC_5 + \alpha_6 \cdot CC_6 + \epsilon, \quad (1)$$

где V – скорость бизнес-процесса;
 CC_1 – показатель психологической безопасности;
 CC_2 – коэффициент удовлетворенности сотрудников;
 CC_3 – коэффициент абстрагирования сотрудников;
 CC_4 – коэффициент текучести кадров;
 CC_5 – коэффициент инвестиций в обучение;
 CC_6 – коэффициент вклада в инновации;
 α_i – коэффициенты регрессии;
 ϵ – ошибка модели.

Зависимая переменная – скорость бизнес-процессов V есть модификация общеизвестного показателя в экономике под названием «оборачиваемость». Критерий эффективности бизнес-процессов по данному показателю: чем выше, тем лучше.

- 2) Стоимость бизнес-процесса (уровень операционных затрат)

$$C = \beta_1 \cdot CC_1 + \beta_2 \cdot CC_2 + \beta_3 \cdot CC_3 + \beta_4 \cdot CC_4 + \beta_5 \cdot CC_5 + \beta_6 \cdot CC_6 + \epsilon, \quad (2)$$

где C – стоимость бизнес-процесса;
 β_i – коэффициенты регрессии.

Указанный показатель оценивает стоимость бизнес-процесса, то есть, по сути, определяет уровень операционных затрат. Целевой установкой в работе менеджера металлургического предприятия должно быть снижение указанного показателя за счет поиска резервов и других вариантов его оптимизации.

- 3) Уровень удовлетворенности потребителей

$$S = \gamma_1 \cdot C + \gamma_2 \cdot L + \gamma_3 \cdot K + \gamma_4 \cdot E + \gamma_5 \cdot I + \epsilon, \quad (3)$$

где S – уровень удовлетворенности заказчиков металлопродукции;
 γ_i – коэффициенты регрессии.



Рис. 4. Взаимосвязь метрик корпоративной культуры и экономической эффективности бизнес-процессов

Таблица 2

Исходные данные для расчёта

№ п/п	V	CC ₁	CC ₂	CC ₃	CC ₄	CC ₅	CC ₆
1	33	0,76	0,54	0,76	0,57	0,96	0,14
2	41	0,82	0,13	0,21	0,93	0,12	0,06
3	29	0,99	0,52	0,51	0,05	0,46	0,10
4	32	0,98	0,14	0,61	0,01	0,70	0,08
5	38	0,13	0,64	0,12	0,89	0,20	0,11
6	35	0,17	0,17	0,69	0,26	0,35	0,09
7	33	0,84	0,30	0,73	0,25	0,77	0,03
8	39	0,62	0,79	0,87	0,60	0,06	0,30
9	29	0,002	0,54	0,59	0,20	0,78	0,09
10	30	0,23	0,77	0,27	0,07	0,62	0,05
11	29	0,46	0,98	0,62	0,19	0,78	0,22
12	33	0,68	0,41	0,24	0,76	0,48	0,04
13	37	0,25	0,48	0,41	0,37	0,28	0,09
14	34	0,39	0,25	0,85	0,02	0,47	0,07
15	25	0,64	0,98	0,04	0,45	0,98	0,26
16	34	0,30	0,90	0,15	0,29	0,22	0,04
17	41	0,25	0,20	0,73	0,47	0,01	0,04
18	29	0,89	0,95	0,003	0,47	0,34	0,12
19	34	0,01	0,74	0,03	0,22	0,31	0,22
20	32	0,34	0,69	0,88	0,45	0,85	0,07

Уровень удовлетворенности заказчиков (S) принципиально важен для металлургических предприятий, работающих как на внутреннем, так и на внешнем рынке. Целевой установкой в работе менеджера должно быть повышение указанного показателя за счет повышения корпоративной культуры, а также регламентов и стандартов обслуживания, разработанных внутри организации.

4) Производительность бизнес-процесса

$$P = \gamma_1 \cdot CC_1 + \gamma_2 \cdot CC_2 + \gamma_3 \cdot CC_3 + \gamma_4 \cdot CC_4 + \gamma_5 \cdot CC_5 + \gamma_6 \cdot CC_6 + \epsilon, \quad (4)$$

где P – производительность бизнес-процесса;
 γ_i – коэффициенты регрессии.

Данный показатель является относительным и позволяет сравнивать эффективность различных (несопоставимых по абсолютным показателям) бизнес-процессов. Целевой установкой в работе менеджера должно быть повышение указанного показателя за счет повышения корпоративной культуры, а также различных инструментов оптимизации, направленных на повышение эффекта или снижение затраченного времени.

5) Эффективность бизнес-процесса

$$E = \gamma_1 \cdot CC_1 + \gamma_2 \cdot CC_2 + \gamma_3 \cdot CC_3 + \gamma_4 \cdot CC_4 + \gamma_5 \cdot CC_5 + \gamma_6 \cdot CC_6 + \epsilon, \quad (5)$$

где E – эффективность бизнес-процессов;
 γ_i – коэффициенты регрессии.

Показатель эффективности E является относительным и позволяет сравнивать эффективность различных (несопоставимых по абсолютным показателям) бизнес-процессов. Данный параметр по праву может быть признан одним из наиболее важных с точки зрения экономики бизнес-процессов и их обоснования. Целевой установкой в работе менеджера должно быть повышение указанного показателя за счет повышения корпоративной культуры, а также различных инструментов оптимизации, направленных на повышение эффекта или снижения затрат.

Проиллюстрируем эффективность предлагаемого подхода на условном примере, в рамках которого проанализируем взаимосвязь метрик корпоративной культуры с одной из ключевых метрик оценки эффективности обслуживающих бизнес-процессов металлургической компании, а именно метрикой «Скорость бизнес-процесса». Исходные данные для расчета представлены в табл. 2.

На основании данных, представленных в табл. 2, и с помощью встроенных функций MS Excel проведем корреляционный анализ и оценим влияние метрик корпоративной культуры CC_i на скорость исследуемого в рамках настоящей статьи бизнес-процесса V.

Поле корреляций зависимости показателя бизнес-процесса V от множества отобранных показателей – CC_i представлено на рис. 5. Визуальный анализ графиков, позволяет заключить, что имеется линейная зависимость между показателями: часть показателей имеет прямую зависимость (коэффициент абстрагирования сотрудников, коэффициент текучести кадров), другая часть – обратную зависимость (показатель психологической безопасности, коэффициент удовлетворенности сотрудников, коэффициент инвестиций в обучение).

Далее с помощью встроенных функций MS Excel был выполнен расчет коэффициентов корреляции. По результатам значимым оказались 4 из 6 метрик. Поэтому для получения рабочей модели было принято решение об исключении показателей «психологической безопасности» и «коэффициента вклада в инновации». Р-значение указанных метрик существенно выше заложенной ошибки вероятности в 0,05, то есть данные метрики незначительно влияют на скорость бизнес-процесса (оборачиваемость).

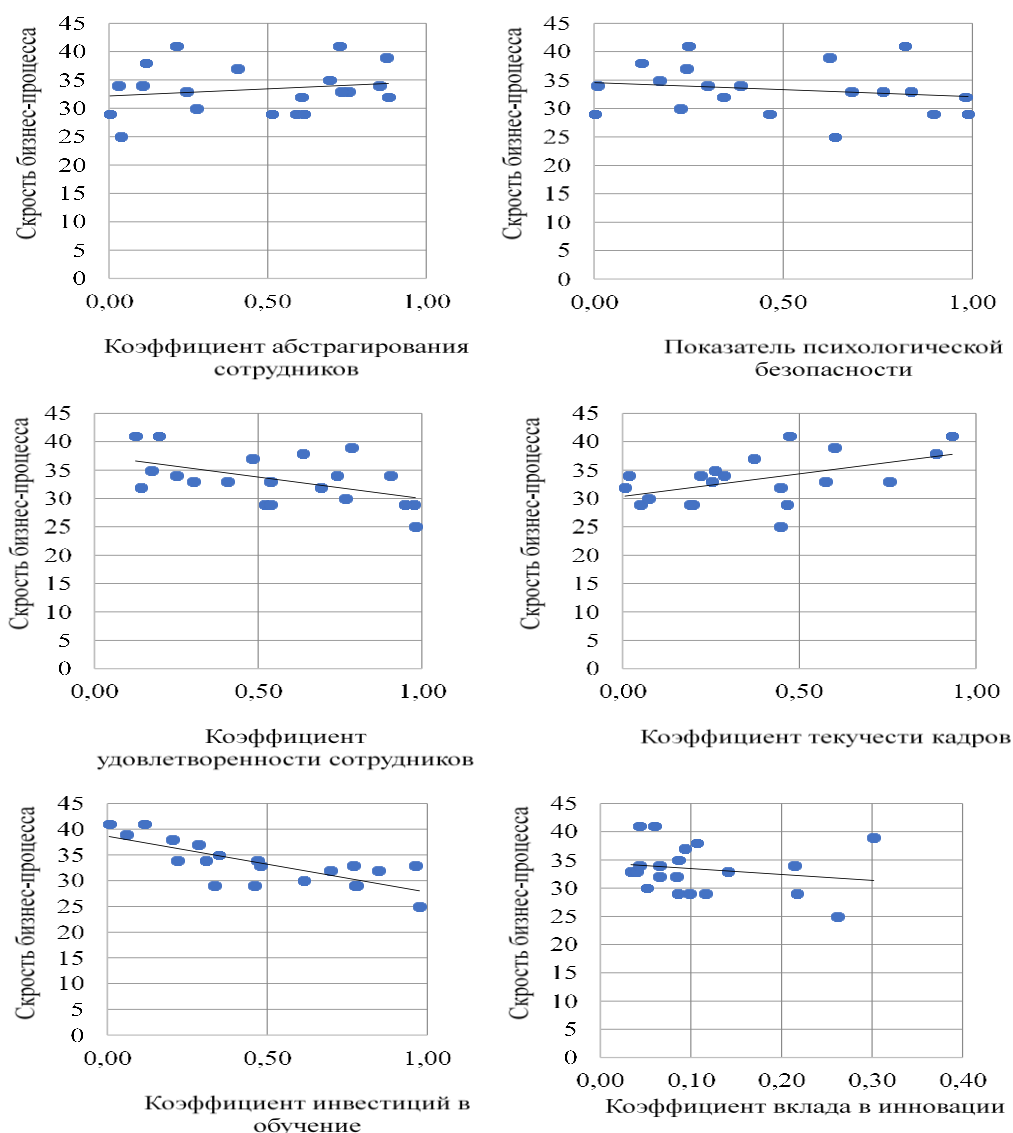


Рис. 5. Корреляционное поле

После исключения двух факторов была построена новая модель, по результатам анализа которой были сделаны следующие выводы:

1) действительно существует связь между метриками корпоративной культуры и скоростью бизнес-процесса (оборачиваемость), которую можно описать с помощью уравнения множественной регрессии:

$$V = -3,69 \cdot CC_2 + 4,234 \cdot CC_3 + 5,742 \cdot CC_4 - 9,293 \cdot CC_5 + 35,79;$$

2) точность подбора уравнения регрессии – высокая, коэффициент детерминации $R_2 = 0,872$, следовательно изменение скорости бизнес-процессов на 87,2% объясняются изменением независимых факторов, входящих в модель;

3) полученное уравнение адекватно по критерию Фишера с вероятностью 0,95:

$$F_{\text{расч}} = 19,34 > F_{\text{кр}} = 2,92,$$

4) более того вероятность ошибки составляет 0,0000015, что меньше заложенной ошибки вероятности в 0,05;

5) основной метрикой корпоративной культуры, которая больше всего влияет на скорость бизнес-процессов является коэффициент инвестиций в обучение (коэффициент эластичности = 0,1354), следовательно, при изменении данного показателя на 1% скорость бизнес-процесса изменится на – 13,54%, что является гарантом высокой отдачи при ограниченном бюджете.

Таким образом, предложенный методический инструментарий позволяет существенно повысить качество управления эффективностью бизнес-процессов металлургических компаний через совершенствование (развитие) конкретных элементов корпоративной культуры. Важным элементом предлагаемого подхо-

да является переход от качественной оценки корпоративной культуры к вполне конкретным количественным показателям, учитывающим их взаимосвязь с показателями эффективности бизнес-процессов. Важно отметить, что кроме такого показателя эффективности бизнес-процесса, как скорость, в рамках предложенной модели могут учитываться и другие показатели, в частности стоимость бизнес-процесса, производительность, уровень удовлетворенности пользователей и т.д.

Список источников

1. Бигиев В. Оценка перспективы вакуумной обработки стали в ЭСПЦ ПАО «ММК» / В. Бигеев, А. О. Кретьева, Т. А. Баландина [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 2(29). С. 23-28.
2. Валяева Г.Г., Пузанкова Е.А. Многомерные статистические методы анализа эффективности и конкурентоспособности продукции в металлургической отрасли // Инновации и инвестиции. 2020. № 4. С. 238-241.
3. Валяева Г.Г., Мельникова А.В. Использование количественных статистических методов для оценки риска экономической эффективности и финансовой состоятельности // Управление организацией, бухгалтерский учет и экономический анализ: вопросы, проблемы и перспективы развития: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Магнитогорск, 17–19 января 2017 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. С. 56-61.
4. Закиров Д.М., Васильев А.Е., Замбрыцкая Е.С. Метрики для мониторинга проектов внедрения КИС промышленных предприятий // Baikal Research Journal. 2024. Т. 15, № 2. С. 557-567.
5. Замбрыцкая Е.С., Рахмангулова Н.Ф. Корпоративная культура и ее роль в период кризиса // Современная модель управления: проблемы и перспективы: материалы VII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Магнитогорск, 27–28 октября 2023 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. С. 45-50.
6. Колесникова А.М., Храповицкая Е.М. Эффективность корпоративной культуры и ее влияние на деятельность организации // Экономический вектор. 2019. №3 (18). С. 24.
7. Корреляционный и регрессионный анализ: Электронное издание / М. Г. Карелина, Г. Г. Валяева, В. Ш. Трофимова [и др.]. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016.
8. Коптякова С.В., Васильев В.С. Организационная культура как эффективный инструмент антикризисного управления предприятием // Управление организацией, бухгалтерский учет и экономический анализ: вопросы, проблемы, перспективы развития : Материалы VIII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Магнитогорск, 27–28 января 2023 года / под общ. ред. Н.В. Кузнецовой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. С. 81-86.
9. Организационная культура: Электронное издание: учебное пособие / Н. Р. Балынская, С. В. Коптякова, В. М. Гафурова [и др.]. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет, 2021.
10. Чоук Р., Армстронг Р. Культура: недостающий аспект развития малых и средних предприятий? // Международный журнал предпринимательского поведения и исследований. 2000. Т. 6. № 4. С. 227-238.

Сведения об авторах

Валяева Галина Геннадьевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики института экономики и управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: valyaevag@list.ru

Гафурова Василия Минсалиховна – кандидат исторических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и государственного управления института экономики и управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: gvm_65@mail.ru

Коптякова Светлана Владимировна – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и государственного управления института экономики и управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: svetlana.cop@yandex.ru

Лазарев Артемий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: pinkmad@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IMPROVING CORPORATE CULTURE AS A TOOL FOR MANAGING THE EFFECTIVENESS OF BUSINESS PROCESSES IN METALLURGICAL ENTERPRISES

Valyaeva Galina G. – candidate of Economic Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department of Economics at the Institute of Economics and Management Federal State Educational Institution of Higher Education Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: valyaevag@list.ru

Gafurova Vasilya M. – candidate of Historical Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department of Management and Public Administration at the Institute of Economics and Management Federal State Educational Institution of Higher Education Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gvm_65@mail.ru

Koptyakova Svetlana V. – candidate of Pedagogical Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department of Management and Public Administration at the Institute of Economics and Management Federal State Educational Institution of Higher Education Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: svetlana.cop@yandex.ru

Lazarev Artemiy S. – master's student Federal State Educational Institution of Higher Education Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pinkmad@yandex.ru

Abstracts. The importance of corporate culture for the successful functioning of metallurgical companies is widely recognized throughout the civilized world. Corporate culture is, on the one hand, a strategic tool that allows you to mobilize the initiative of employees to achieve the strategic goals of the organization. On the other hand, it is a tool for managing the cost of an organization's business processes, since it determines how and at what cost the organization's economic performance and performance results will be achieved. The object of the research is the influence of corporate culture on the economic efficiency of business processes of modern metallurgical enterprises. The purpose of the study is to form a quantitative assessment of the impact of corporate culture indicators on the economic efficiency of business processes. The paper analyzes the models used in practice to influence corporate culture on the economic efficiency of an organization's business processes. The authors have developed and proposed an economic and statistical model of the dependence of metrics of corporate culture and indicators of economic efficiency of business processes. To assess the quantitative impact of corporate culture metrics on business process performance indicators, it is proposed to use the tools of classical correlation and regression analysis. The proposed methodological tools can significantly improve the quality of business process efficiency management through the improvement (development) of specific elements of corporate culture. An important element of the proposed approach is the transition from a qualitative assessment of corporate culture to very specific quantitative indicators that take into account their relationship with business process efficiency indicators.

Keywords: corporate culture, business processes, metrics, correlation analysis, regression analysis, correlation model, economic efficiency, metallurgical companies

Ссылка на статью:

Совершенствование корпоративной культуры как инструмента управления эффективностью бизнес-процессов металлургических предприятий / Валяева Г.Г., Гафурова В.М., Коптякова С.В., Лазарев А.С. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 51-57.
Valyaeva G.G., Gafurova V.M., Koptyakova S.V., Lazarev A.S. Improving corporate culture as a tool for managing the effectiveness of business processes in metallurgical enterprises. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 51-57.

ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 531.781.2: 621.835.2

Конев С.В., Кенарь Е.В., Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Козлов Р.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО КУЛАЧКА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Методом конечных элементов в отечественном программном комплексе WinMachine российской компании «НТЦ АПМ» рассмотрено напряженно-деформированное состояние зажимного устройства – эксцентрикового кулачка. Проверено соответствие решения в указанном программном комплексе теоретическому решению задачи Герца. Показана динамика изменения картин напряжений в пятне контакта цилиндра кулачка с опорной плоскостью в зависимости от размеров пятна контакта: рост максимальных контактных напряжений при уменьшении ширины площадки носит гиперболический характер. В иллюстрациях представлены карты эквивалентных напряжений в цилиндре и рукоятке эксцентрика по теории наибольших касательных напряжений и карты коэффициентов запаса прочности. Получены рекомендации по улучшению геометрии кулачка для снижения контактных напряжений при повышенных усилиях зажима посредством выполнения на торцах цилиндра эксцентрика вблизи его наибольшего диаметра кольцеобразных поясков, упрочняющих цилиндр эксцентрика. Также диаметр оси эксцентрика предложено выполнять увеличенным до 40-50% величины его наружного диаметра. Таким образом, настоящая работа направлена на решение вопроса оптимизации напряженно-деформированного состояния цилиндрических тел, упруго контактирующих с плоскостью. В качестве технического примера рассмотрено напряженно-деформированное состояние эксцентрикового зажимного устройства.

Ключевые слова: кулачок, эксцентрик, метод конечных элементов, задача Герца, карты напряжений и деформаций

В связи с возможностью воспроизведения почти любого заданного закона движения, в том числе и с остановками различной продолжительности, кулачковые механизмы получили широкое распространение в технике. Кулачковые механизмы применяются в двигателях внутреннего сгорания, в текстильных и полиграфических машинах, в машинах-автоматах различного назначения, в разнообразных приборах [1, 2]. Их преимуществом является простота конструкции, благодаря чему кулачковый механизм используют как простейший преобразователь вращательного движения в возвратно-поступательное.

Наряду с этим, кулачковые механизмы имеют недостатки. Помимо дороговизны изготовления профилей, они имеют относительно малую нагрузочную способность вследствие передачи значительных усилий на контактное рабочее звено при их резких перемещениях. Это приводит к износу и выкрашиванию рабочей поверхности кулачка [3, 4]. По этой причине достаточное количество публикаций посвящено распределению внешних нагрузок на кулачок [5, 6]. Вместе с тем, выбор материала кулачка, определяемый, в том числе, распределением напряжений в теле кулачка, производится чаще всего на основе опытных данных. То есть изначально форма кулачка определяется по требуемому закону движения, а затем выбирается материал кулачка. И лишь после изготовления кулачка проверяется его прочность и износостойкость. А при использовании механизма с кулачком-эксцентриком экспериментально определяются прак-

тически все размеры механизма. Чтобы устранить указанную неопределенность, в работах [7-8] для анализа прочности тела кулачка использован метод конечных элементов, однако недостаточно освещена методика и результаты такого анализа.

Целью настоящей работы является получение типовых картин напряжений и упругих перемещений по телу эксцентрикового кулачка методом конечных элементов, для выработки рекомендаций по оптимизации его формы. Данные рекомендации могут быть использованы для оптимизации формы любого цилиндрического тела, упруго контактирующего с плоскостью.

Методика проведения работы заключается в использовании модуля Studio [9] программы САПР «WinMachin» (разработчик – Российская компания «НТЦ АПМ»). Перед выполнением основной части работы, проведена верификация решений, получаемых с использованием указанной программы известным решением. Для этого моделировали классическую задачу об упругом сжатии диска сосредоточенными силами – вариант задачи Герца [10-11]. Диск диаметром $D = 100$ мм и толщиной $s = 10$ мм нагружали встречно-диаметрально приложенными силами $P = 1000$ Н. Карта напряжений σ_y представлена на рис. 1. Выносками показаны напряжения в характерных точках горизонтального диаметра диска: в центре диска и на контуре диска. Расхождение с теоретически полученным значением напряжения в центре диска, полученным по формуле $\sigma_y = 6P/4\pi Ds$ составило 0,3%. Отклонение напряжения на контуре диска от теоретического нулевого значения составило

0,017 МПа. Таким образом, полученные результаты показывают достоверность данных, полученных при использовании указанной программы.

Возможности программы в моделировании задачи Герца показаны на рис. 2. На этом рисунке представлены графики контактных напряжений σ_H в стальных дисках толщиной 10 мм с диаметрами 25, 50 и 100 мм. Диски нагружались диаметрально приложенными силами 5000 Н, сосредоточенными на площадках шириной $b = 2$ мм, 1 мм, 0,5 мм, 0,25 и 0,12 мм. Высота кругового сегмента окружности при такой хорде на диске 50 мм составляет соответственно 0,01, 0,0025, 0,00063, 0,00016 и 0,00004 мм, что подтверждает высокую точность моделирования.

Как следует из формулы максимального давления на контактной поверхности [10] $q_0 = K / b$,

($K = 2 \frac{P'}{\pi}$, P' – нагрузка на единицу длины контакт-

ной поверхности), рост максимальных контактных напряжений σ_H при уменьшении ширины площадки носит гиперболический характер. Что подтверждается графиками на рис. 2.

Проведенная верификация позволяет решить практическую задачу моделирования напряженно-деформированного состояния эксцентрикового кулачка. Для получения правильной карты результатов в поставленной задаче необходимо обеспечить адекватное закрепление модели и приложить нагрузки в полном соответствии с реальными условиями нагружения исследуемой детали. Для отработки методики использован эксцентриковый зажимной кулачковый механизм в геометрии широко применяемой прижимной рукоятки, с круглым кулачком-эксцентриком [12-13]. Модель рукоятки, выполненная в модуле «Studio», представлена на рис. 3.

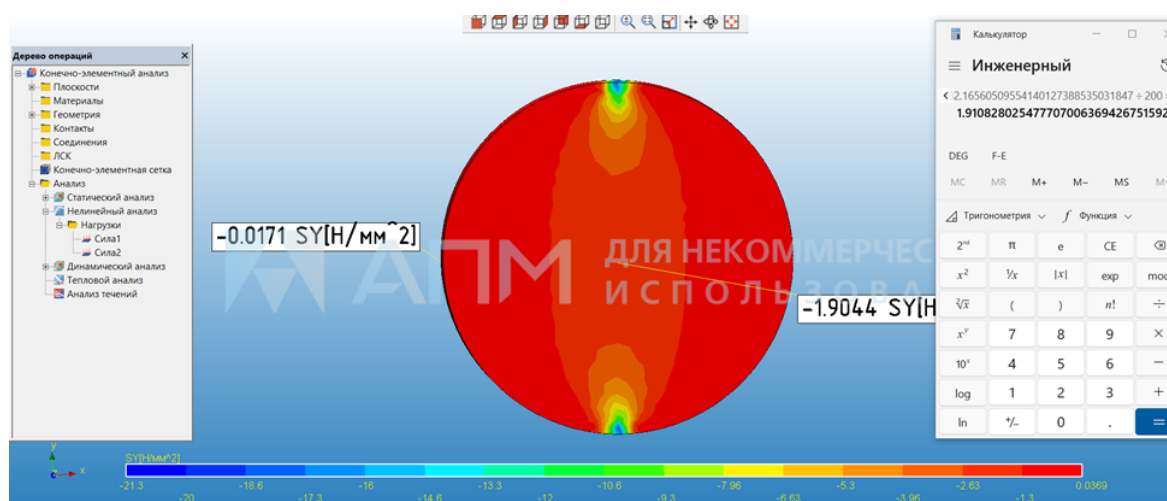


Рис. 1. Карта напряжений σ_H в модели диска

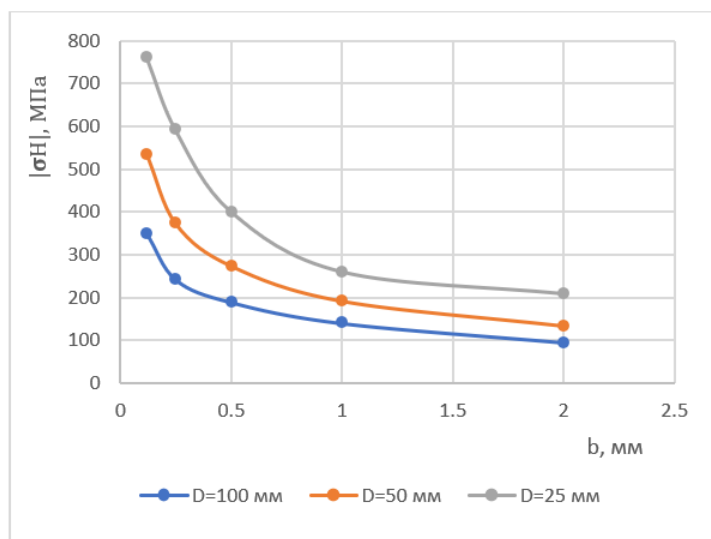


Рис. 2. Изменение модуля максимальных контактных напряжений при распределении сосредоточенной силы P на малых площадках различной ширины b

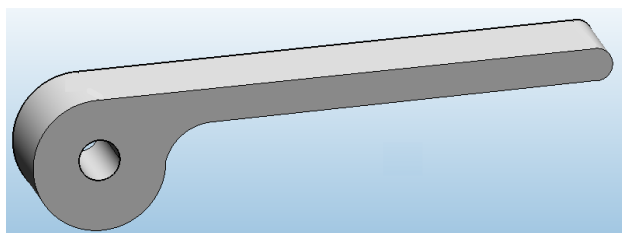
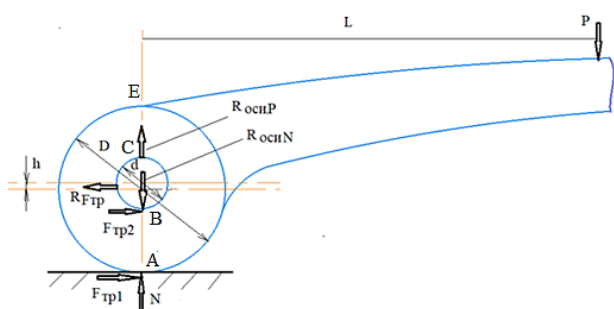


Рис. 3. Модель рукоятки с эксцентриковым кулачком

Для точного выполнения моделирования нагружения эксцентрика необходимо задать силы на площадках контакта эксцентрика с опорной поверхностью и осью, на которой он вращается. Схема сил, действующих на рукоятку во время прижима эксцентрика к опорной поверхности, показана на рис. 4. На этом рисунке помимо реакции опорной поверхности N показаны силы трения $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$, а также реакция оси $R_{осиP}$ на ручное усилие P . Ось эксцентрика считаем абсолютно жесткой, т.е. имеющей нулевую изгибную деформацию. Реакция оси $R_{осиP}$ сжимает верхнюю часть эксцентрика по линии СЕ, снижая упругие деформации нижней части эксцентрика по линии АВ. Поскольку упругая деформация тела эксцентрика по линии АВ намного больше упругой деформации тела эксцентрика по линии СЕ ($P \ll N$), её влиянием на реакцию опорной поверхности и, следовательно, на напряженно-деформированное состояние тела эксцентрика можно пренебречь.


 Рис. 4. Силы, действующие на рукоятку и эксцентрик рукоятки при максимальном ходе эксцентрика h

Величина N , достаточная для самоторможения эксцентрика от сил трения (эксцентрик дополнительно может быть выполнен с уменьшением радиуса цилиндра после прохождения максимально заданного эксцентриситета) определится из уравнения равновесия эксцентрика. Момент от ручного усилия $P \cdot L$ уравновешивается моментами от сил трения $F_{тр1} \cdot \frac{D}{2} = N \cdot f_1 \cdot \frac{D}{2}$ и $F_{тр2} \cdot \frac{d}{2} = N \cdot f_2 \cdot \frac{d}{2}$. Дополнительный уравновешивающий момент возникает от усилия преодоления угла подъема поверхности кулачка при его повороте, определяемого аналогично усилию от преодоления угла наклона витков резьбы резьбового соединения [14]. Для этого используется коэффициент f_α , равный тангенсу угла наклона кон-

тактной поверхности кулачка. Так как высота хода оси эксцентрика равна h , а протяженность условной клиновой поверхности при повороте рукоятки на 90°

$C \approx R\varphi = \frac{D}{2} \cdot \frac{\pi}{2}$, то $f_\alpha \approx \frac{4h}{\pi D}$. Тогда момент от

преодоления угла подъема составляет $\frac{2N \cdot h}{\pi}$. Это

позволяет получить формулу [12]

$$N = \frac{P \cdot L}{f_1 \cdot \frac{D}{2} + f_2 \cdot \frac{d}{2} + \frac{2h}{\pi}}. \quad (1)$$

Поскольку формула (1) усредняет скорость хода эксцентрика, то она содержит лишь конструктивно заданный максимальный ход эксцентрика h . Это затрудняет использование данной формулы для оптимизации геометрии эксцентрика. Но эта формула позволяет предварительно рассчитать размеры пятна контакта и упругую деформацию эксцентрика в зоне контакта с опорной поверхностью. Это необходимо для определения возможности создания 3D-модели прижимной эксцентриковой рукоятки с малыми размерами областей нагружения и деформирования.

Примем к расчету и моделированию геометрию прижимной рукоятки GN 927.7-101-M8-20-A-B [12] с длиной ручки $L = 120$ мм, диаметром эксцентрика $D = 26$ мм, диаметром посадочной оси эксцентрика 8 мм и конструктивно возможной высотой хода оси $h = 1$ мм. Ширина b эксцентрика рукоятки в области контакта с опорной поверхностью детали равна 20 мм. Материал контактирующих поверхностей – латунь ЛЦ40С по ГОСТ 17711-93, $E_1 = 95000$ МПа и сталь, $E_2 = 200000$ МПа, приведенный модуль упругости $E_{12} = 122000$ МПа; коэффициенты трения $f_1 = f_2 = 0,07$ (латунь по стали со смазкой [15]).

Рассчитаем усилие N , упруго деформирующее тело эксцентрика. Это усилие регулируется первоначальным зазором h_0 между опорной поверхностью и эксцентриком, устанавливаемым при помощи опорной резьбовой гайки рассматриваемого прижимного устройства. При установке зазора, позволяющего (с учетом упругой деформации резьбы опорной гайки и упругой деформации опорной поверхности) получить упругую деформацию до $h - h_0 = 0,01$ мм цилиндрической части эксцентрика, из формулы (1) при $P = 50$ Н получим $N \approx 5000$ Н.

Ширину a пятна контакта цилиндрической поверхности эксцентрика (вне зависимости от того, диск это или полудиск) с опорной плоскостью можно вычислить по формуле [10]

$$a = 1,52 \sqrt{\frac{ND}{2bE_{12}}} = 0,25 \text{ мм}. \quad (2)$$

Эскиз модели рукоятки в настоящей работе выполнен в модуле «Studio» последовательным замкнутым соединением дуг, сплайн-линий и отрезков. Отрезки с масштабным разрешением (шагом курсора)

0,01 мм включены в замкнутый наружный контур для последующего образования площадки, необходимой для нагружения модели. Закрепление эксцентрика на оси и контактные деформации при таком закреплении выполнены с использованием опции «цилиндрическая опора». Расчет упругого контакта тела эксцентрика с опорной плоскостью выполнен в опции «Нелинейный анализ».

Картинки («карты») эквивалентных напряжений и вертикальных упругих перемещений в модели эксцентриковой рукоятки с указанными граничными условиями показаны на рис. 5, 6. Как видно по шкале напряжений (мозаика SMAXTAU на рис. 5), максимальное эквивалентное контактное напряжение равно 192 МПа. Выносками, проставленными в ручном режиме, показаны убывающие при удалении от контактной точки по радиусу напряжения 170,61, 77,66 и 41,61 МПа. Также на рис. 5 видны напряжения контакта эксцентрика с осью 41,14 МПа. Как видно из

рис. 6, программа для удобства оценки масштабирует перемещения на фоне недеформированной конструкции (показана точечным фоном).

На рис. 7 показаны коэффициенты запаса прочности при расчете эквивалентных напряжений по теории максимальных касательных напряжений. Как видно из рис. 7, при адекватном ручном усилии эквивалентные напряжения, определенные по энергетической теории Мизеса, в точке контакта эксцентрика с опорной поверхностью не превысят предел текучести. Однако если при затяжке соединения будет выставлен зазор h_0 между опорной поверхностью и эксцентриком, позволяющий получить повышенную радиальную деформацию $\Delta = h - h_0$ цилиндрической части эксцентрика, то это приведет к текучести материала и поломке устройства. Такая затяжка возможна при допускаемом по ГОСТ Р ЕН 1005-3-2010 [16] предельном ручном усилии $P = 75-100$ Н.

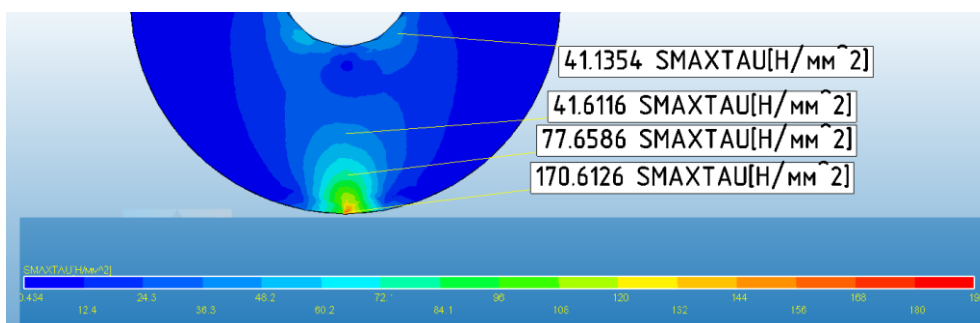


Рис. 5. Эквивалентные напряжения в эксцентрике по теории наибольших касательных напряжений

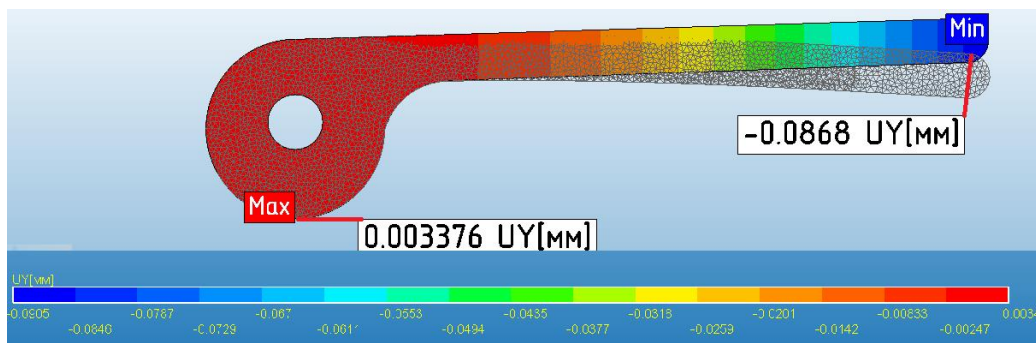


Рис. 6. Вертикальные перемещения в эксцентрике и рукоятке эксцентрика

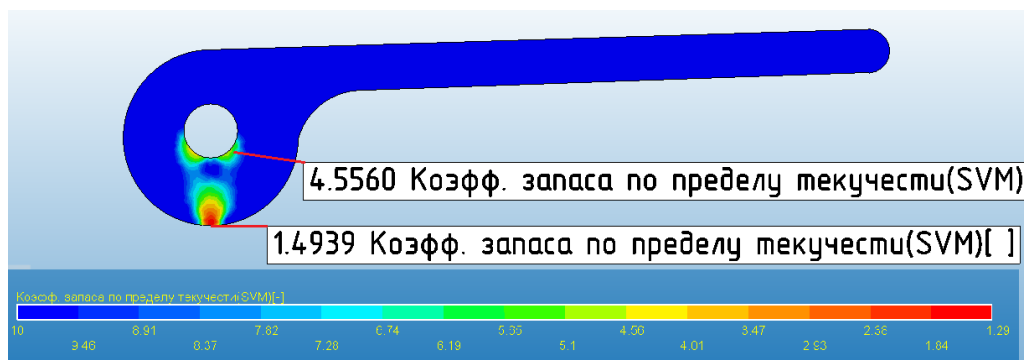


Рис. 7. Коэффициенты запаса по энергетической теории в материале и рукоятке эксцентрика

Картина коэффициентов запаса в эксцентрике и рукоятке при ручном усилии 100 Н показана на рис. 8, где видно, что коэффициент запаса прочности в точках контакта эксцентрика с опорной поверхностью при таких усилиях становится меньше единицы. Кроме того, коэффициент запаса прочности в области наибольших изгибных напряжений снижается вдвое, с 10 до 5,77. Следовательно, во избежание поломки устройства необходимо оптимизировать его конструкцию.

При прочих равных условиях это наиболее технологично сделать увеличением площади пятна контакта за счет уширения тела эксцентрика вблизи его наибольшего диаметра на 5-10%. Для этого в рассматриваемой конструкции по торцам цилиндра рекомендуется выполнить дополнительные кольцеобразные пояски толщиной 1-2 мм. Согласно формуле (2), ширина пятна контакта в рассмотренном эксцентрике увеличится на 5-9% и, соответственно, на эту величину снизятся контактные напряжения.

Кроме того, при прочих равных условиях получить более равномерное распределение напряжений по телу устройства можно за счет увеличения диаметра оси эксцентрика. На рис. 9 показаны коэффициенты запаса прочности при тех же граничных условиях, что и на рис. 3-5, но при диаметре оси, увеличенном до 16 мм. Сравнение карт напряжений показывает, что с увеличением диаметра оси эксцентрика контактные напряжения снижаются. Также заметно, что

при увеличении диаметра эксцентрика до 40-50% от величины наружного диаметра в допустимых пределах возрастают изгибные напряжения. Таким образом, материал устройства нагружен более равномерно.

Заключение

1. Проведена верификация использования метода конечных элементов в отечественном программном комплексе WinMachine на примере анализа напряженно-деформированного состояния диска, упруго сжимаемого сосредоточенными силами по диаметру диска (вариант задачи Герца). Показана возможность моделирования и визуализации контактных напряжений в областях контакта порядка 10^{-4} мм.

2. Показано соответствующее теории гиперболическое изменение величины контактных напряжений при упругом силовом контакте диска с опорной плоскостью при изменении размера пятна контакта.

3. Даны рекомендации по оптимизации формы эксцентрикового зажимного устройства. Предложено на торцах цилиндра эксцентрика вблизи его наибольшего диаметра выполнять кольцеобразные пояски, уширяющие цилиндр эксцентрика на 5-10%, а диаметр оси эксцентрика выполнять увеличенным до 40-50% величины наружного диаметра. Это приведет к снижению контактных напряжений на 5-9% и равномерно перераспределит напряжения по телу зажимного устройства.

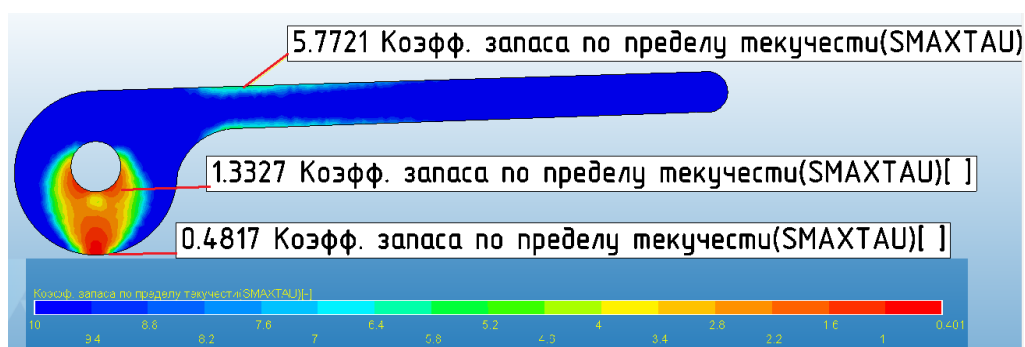


Рис. 8. Коэффициенты запаса при радиальной деформации тела эксцентрика 0,01 мм

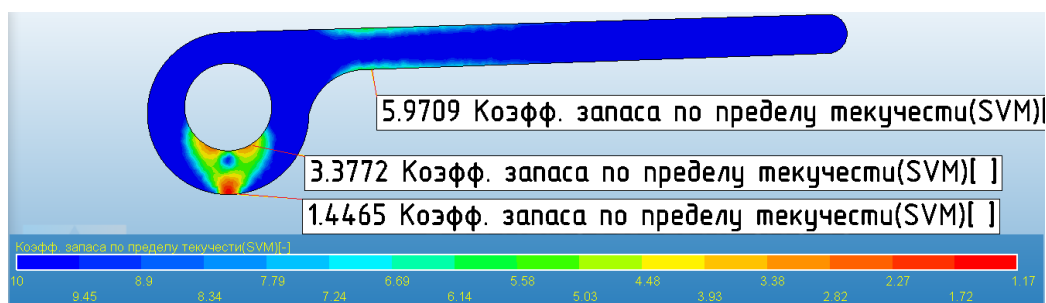


Рис. 9. Коэффициенты запаса при повышенных до 100 Н ручных усилиях и увеличенном до 16 мм диаметре оси эксцентрика

Список источников

1. Игнатъев Н.П. Проектирование механизмов: справочно-методическое пособие. Азов: АзовПечать, 2015. 268 с.
2. Лариков Е.А. Расчет и проектирование кулачковых механизмов приборов. Серия "Библиотека приборостроителя". М.: Машиностроение, 1968, 106 с.
3. Экспериментальное и теоретическое исследование износа кулачков / А.А. Головин, А.С. Лафицкий, А.В. Симушкин, А.В. Степанов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2009. №3. С. 32-35.
4. Иргашев А., Курбанов Б.Б. Оценка интенсивности изнашивания профиля кулачка по углу давления // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2022. 2(95). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13057> (дата обращения: 12.01.2025).
5. Синтез кулачкового механизма с учетом условий передачи сил и контактной прочности / И.А. Халилов, С.Х. Керимов, С.А. Багирова, Ф.Ш. Гаджиева // Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine Science, 2017.
6. Теория машин и механизмов: учебное пособие / сост. С.Г. Петров, И.В. Клюшкин, П.В. Кауров; ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. Ч. 2. 55 с.
7. Прудников А.П., Макаревич Д.М. Исследование методом конечных элементов прочности кулачков передач с промежуточными телами качения // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 24-25 апреля 2014 г. / ред.: И. С. Сазонов [и др.]. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2014. С. 82.
8. Кулачковые соединения для передачи вращающего момента / А.П. Прудников, А.Е. Науменко, Д.М. Макаревич // Вестник Белорусско-Российского университета. 2024. № 2 (83). С. 67–76
9. АПМ Studio. Руководство пользователя. Научно-технический центр АПМ. Режим доступа <https://apm.ru/downloads/188/APM-Studio.pdf?ysclid=m5oxvongvyp489182685> – свободный (дата обращения: 10.01.2025).
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
11. Рамзаев А.П., Сингатулин Р.А. О деформациях тел с плоской и криволинейной поверхностью при упругом контактном взаимодействии // Международный научно-исследовательский журнал. ISSN 2303-9868. №9 (16). Ч. 1. С. 111-114.
12. ГОСТ 59785-2021. Кулачки эксцентриковые. Конструкция. М., 2021. 20 с.
13. Прижимные ручки с эксцентриковым кулачком GN927. Режим доступа: <https://fam-drive.ru/furniture/prizhimnye-ruchki-s-ekscentrikovym-kulachkom-gn-927> - свободный (дата обращения 12.01.2025).
14. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2010. 408 с.
15. Трение и антифрикционные материалы: учебное пособие / М.А. Филиппов, О.Ю. Шешуков; М-во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 204 с.
15. ГОСТ Р ЕН 1005-3-2010. Безопасность машин. Физические возможности человека. Ч. 3. Рекомендуемые пределы усилий при работе на машинах. М.: Стандартинформ, 2019.

Сведения об авторах

Конев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: svk1956@mail.ru

Кенарь Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: redket78@mail.ru

Звягина Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры МиТОДиМ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: zviagina_mmf@mail.ru

Огарков Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры МиТОДиМ, член диссертационного совета, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: ogarkovnikolai@mail.ru

Козлов Роман Алексеевич – кандидат педагогических наук, доцент, декан факультета физической культуры и спортивного мастерства, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: fkism@magtu.ru

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ECCENTRIC CAM BY FINITE ELEMENT METHOD

Konev Sergey V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: svk1956@mail.ru.

Kenar Ekaterina V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: redket78@mail.ru.

Zvyagina Elena Yu. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of MiTODiM, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: zviagina_mmf@mail.ru.

Ogarkov Nikolay N. – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department. By the method, a member of the diss. Council, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: ogarkovnikolai@mail.ru.

Kozlov Roman A. – Ph.D. in Education, Associate Professor, Physical Education and Sportsmanship Faculty, Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fkism@magtu.ru.

Abstract. The stress-strain state of a clamping device, an eccentric cam, is considered by the finite element method in the domestic WinMachine software package of the Russian company NTC APM. The correspondence of the solution in the specified software package to the theoretical solution of the Hertz problem has been verified. The dynamics of changes in stress patterns in the contact spot of the cam cylinder with the reference plane is shown depending on the size of the contact spot: the increase in maximum contact stresses with a decrease in the width of the site is hyperbolic. The illustrations show maps of equivalent stresses in the cylinder and the handle of the eccentric according to the theory of greatest tangential stresses and maps of safety margin coefficients. Recommendations have been obtained for improving cam geometry to reduce contact stresses with increased clamping forces by making annular belts at the ends of the eccentric cylinder near its largest diameter, widening the eccentric cylinder. It is also proposed to increase the diameter of the axis of the eccentric to 40-50% of its outer diameter. Thus, the present work is aimed at solving the problem of optimizing the stress-strain state of cylindrical bodies in elastic contact with a plane. The stress-strain state of an eccentric clamping device is considered as a technical example. Thus, the present work is aimed at solving the problem of optimization of stress-strain state of cylindrical bodies elastically contacting the plane.

Keywords: cam, eccentric, finite element method, Hertz problem, stress and strain maps

Ссылка на статью:

Исследование напряженно-деформированного состояния эксцентрикового кулачка методом конечных элементов / Конев С.В., Кенарь Е.В., Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Козлов Р.А. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 58-64.
Konev S.V., Kenar E.V., Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Kozlov R.A. Investigation of the stress-strain state of the eccentric cam by finite element method. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 58-64.

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.
5. Подготовка сырья к металлургическому производству;
6. Управление качеством в металлургическом производстве;
7. Экономика в металлургии;
8. Оборудование металлургического производства;
9. Материаловедение;
10. Техногенные отходы металлургического производства.

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: TTaPEoMP@mail.ru; <http://tmp@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 (210х297мм), 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., Монастырсков 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 tehnikeskogo 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