

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 3 (54) 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 Metallургия 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. Емелюшин – 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 материалобработки, 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: TТаPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

Адрес типографии:

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

Адрес издателя:

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

Выход в свет 30.09.2025. Заказ 298. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 3 (54) 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. Ostrowski – D.Sc., Professor,
University of New South Wales, Australia
A.M. Pesin – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
M. Dabala – D.Sc., Professor, University of Padova,
Italy
P. Tandon – D. Sc., Professor & Head of Mechanical
Engineering, PDPM Indian Institute of Information
Technology, Design and Manufacturing, Jabal-
pur, India

R.P. Cardoso – D. Sc., Professor,
Federal University of Santa Catarina, Brazil
E.V. Ageev – D.Sc., Professor, Southwest State University
V.B. Deev – D. Sc., Professor, MISiS, Moscow, Russia
A.A. Popov – D.Sc., Professor,
Institution of Higher Professional Education «Ural Federal
University named after the first President of Russia
B.N.Yeltsin»
V.M. Salganik – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
O. Ju. Sheshukov – D.Sc., Professor,
alloys Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Professional Education
«Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N.Yeltsin»

Editor-in-Chief:

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

Scientific Editor:

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

Technical Editor:

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

Designer:

E.O. Harchenko

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 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: TTaPEoMP@ 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 30.09.2025. Order 298. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Бывальцев А.В. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАСХОДА РЕАГЕНТОВ-ПОДАВИТЕЛЕЙ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЦИАНИРОВАНИЯ УГЛИСТОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ	4
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	10
Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Кошелев О.С., Ларин М.А., Рябова Л.И. ПРИБЫЛЬНАЯ НАДСТАВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ..	10
Саубанов М.Н. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СЛОЯ ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК	16
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	21
Полякова М.А., Извеков Ю.А. ОПИСАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МНОГОФАЗНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА.....	21
МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	26
Михневич А.С., Столяров А.М., Юдин Д.В. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОЙ СТАЛИ РАЗНЫХ МАРОК	26
Шекшеев М.А., Язвенко А.М., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г. ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛЬНОЙ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПАРАМЕТРЫ СВАРИВАЕМОСТИ.....	31
ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	37
Шубина М.В., Тайсина С.М. РЕГЕНЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	37

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS	4
Byvaltsev A.V. PROCEDURE FOR OPTIMIZING THE DOSAGE OF BLINDING AGENTS IN CYANIDATION OF PREG-ROBBING CARBONACEOUS GOLD PRODUCTS.....	4
FOUNDRY	10
Leushin I.O., Vahidov U.Sh., Koshelev O.S., Larin M.A., Ryabova L.I. PROFITABLE EXTENSION FOR PRODUCING STEEL INGOTS.....	10
Saubanov M.N. DEVELOPMENT OF METHODS AND MATERIALS FOR PREVENTION OF FORMATION OF COATING OF INCREASED HARDNESS ON THE SURFACE OF TITANIUM ALLOY CASTINGS	16
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....	21
Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. DESCRIPTION OF PLASTIC DEFORMATION OF MULTIPHASE STEELS DURING THERMODEFORMATION TREATMENT TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGE IN PHASE COMPOSITION.....	21
METAL SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS.....	26
Mikhnevich A.S., Stolyarov A.M., Yudin D.V. MECHANICAL PROPERTIES OF CAST STEEL OF DIFFERENT GRADES	26
Shekshееv M.A., Yazvenko A.M., Stolyarov A.Yu., Korchunov A.G. EFFECTS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL WELDING WIRE ON WELDABILITY PARAMETERS	31
MAN-MADE WASTE OF METALLURGICAL PRODUCTION.....	37
Shubina M.V., Taysina S.M. REGENERATION OF WASTE INDUSTRIAL OILS FOR USE IN METALLURGICAL PRODUCTION.....	37

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.213.63:54-414:66.081

Бывальцев А.В.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАСХОДА РЕАГЕНТОВ-ПОДАВИТЕЛЕЙ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЦИАНИРОВАНИЯ УГЛИСТОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Аннотация. Цель – разработка методики подбора оптимального расхода реагентов-подавителей сорбционной активности углистого сырья при цианировании, учитывающей их влияние как на природные углистые компоненты, так и на искусственный сорбент. Проблема заключается в том, что реагенты-подавители, как правило, одновременно ухудшают сорбционную способность сорбента, что требует точного контроля их дозировки. Эксперименты проведены на флотоконцентрате с содержанием золота в цианируемой форме 31,75 г/т при варьировании расхода керосина в пределах 0-2 кг/т и загрузки активного угля, что позволило определить изотермы сорбции золота углем и твёрдой фазой пульпы, а также величину сорбционной активности. Предлагаемая методика позволила установить, что добавка керосина 0,5-2,0 кг/т снижает сорбционную активность флотоконцентрата с 88,4 до 52,2-79,8%, но избыток реагента ухудшает работоспособность активного угля. Ключевой показатель – отношение коэффициентов изотерм Фрейндлиха для активного угля (K_1) и для твёрдой фазы (K_2), достигает максимума на уровне 489 при расходе керосина 1,0 кг/т. Этот показатель отражает средний коэффициент распределения золота между активным углем и твёрдой фазой пульпы. Дальнейшее увеличение дозировки керосина снижает K_1/K_2 из-за «отравления» активного угля. Методика демонстрирует, что оптимальный расход реагента-подавителя соответствует пику K_1/K_2 , где подавление сорбционной активности сырья максимально, а негативное влияние на уголь минимально. Полученные результаты могут быть применены для других реагентов-подавителей, таких как дизельное топливо или поверхностно-активные вещества. Рекомендуется использовать данный подход при подборе расхода реагентов-подавителей как для исследовательских, так и для производственных целей.

Ключевые слова: сорбционная активность, органический углерод, золото, реагенты-подавители, цианирование, сорбент

Введение

Как известно, многие химические вещества находят применение для подавления сорбционной активности (СА) углисто содержащего сырья перед стадией цианирования [1-8]. В качестве реагентов могут применяться: горюче-смазочные материалы, неорганические и органические поверхностно-активные вещества, окислители, биореагенты [9-14]. При использовании искусственных сорбентов в сочетании с вышеуказанными реагентами-подавителями зачастую возникают негативные эффекты снижения их сорбционной способности, при этом отказаться от использования сорбента нельзя, так как для сорбционно-активного сырья обязателен режим сорбционного цианирования [15-22]. Например, ионообменные смолы и активные угли теряют механическую прочность в присутствии сильных окислителей, кроме того, активные угли уязвимы к отравлению органическими веществами, последующее удаление которых возможно лишь за счёт термической реактивации при 600-650°C.

В ряде случаев, в частности для активного угля, достаточно легко провести одновременный учёт влияния реагента-подавителя на СА твёрдой фазы и эффективность работы искусственного сорбента. Предлагается использовать методику, в которой учитывается одновременное положительное действие реаген-

та-подавителя на твёрдую фазу и побочное отрицательное действие на искусственный сорбент. Для этого проводится несколько серий опытов, отличающихся добавкой сорбента и расходом реагента-подавителя. Данная методика подбора расхода реагентов-подавителей характеризуется достоверными и корректными результатами.

Цель исследования – разработка методики подбора расхода реагентов-подавителей сорбционной активности упорного золотосодержащего сырья с учётом их влияния на искусственный сорбент.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на примере одного из флотоконцентратов, изученных в «Иргиредмете». Содержание Au в концентрате – 35,8 г/т, из них в цианируемой форме – 31,75 г/т, твёрдая фаза проявляет высокую СА на уровне 88,4% (по методике «Иргиредмета») из-за присутствия органического углерода в количестве 1,92 %. Предварительные тесты по подбору реагентов-подавителей для подавления СА перед стадией цианирования показали, что флотоконцентрат наиболее восприимчив к действию керосина.

Проводили 5 серий опытов по 6 опытов в каждой серии, всего 30 опытов. Навеска материала в каждом опыте составляла 0,30 кг. Предварительно проводили обработку пульпы эмульсией керосина. Условия цианирования в каждом из проведённых опытов (отношение Ж:Т – 1,2:1; концентрация NaCN – 2 г/л; pH –

11) соответствовали оптимальным условиям цианирования концентрата. Опыты в каждой серии отличались загрузкой свежего активного угля, которая составляла 0; 0,50; 1,00; 2,00; 5,00 и 10,0 г, серии между собой отличались расходом керосина. С целью достижения активным углем эффективного равновесия продолжительность цианирования составляла 72 ч.

После агитации уголь отделяли от пульпы, промывали водой, сушили и сдавали на анализ золота (атомно-абсорбционный анализ растворов после химического разложения угля). Пульпу фильтровали, фильтраты сдавали на атомно-абсорбционный анализ золота. Результаты опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изотермы сорбции золота активным углем и твёрдой фазой пульпы, полученные в условиях цианирования флотоконцентрата

Номер опыта	Экспериментальные данные			Расчётные данные				
	$m_{\text{угля}}, \text{ г}$	$C_{\text{жидк}}, \text{ мг/л}$	$E_{\text{угля}}, \text{ г/т}$	СА, %	$C_{\text{тв. сорб.}}, \text{ г/т}$	K_1 изотермы Фрейндлиха для угля	K_2 изотермы Фрейндлиха для твёрдой фазы	K_1 / K_2
Серия №1 – без предварительной обработки керосином								
1	10,0	0,046	900	88,4	1,70	3315	15,95	208
2	5,00	0,13	1630		4,43			
3	2,00	0,39	2400		15,30			
4	1,00	1,14	3400		19,19			
5	0,50	2,27	4480		21,64			
6	Без угля	3,16	Без угля		28,06			
Серия №2 – с предварительной обработкой керосином 0,5 кг/т								
7	10,0	0,064	930	79,8	0,68	3817	10,59	360
8	5,00	0,14	1600		4,92			
9	2,00	0,50	3040		10,90			
10	1,00	1,38	4,80		15,54			
11	0,50	2,77	5860		18,75			
12	Без угля	5,51	Без угля		25,32			
Серия №3 – с предварительной обработкой керосином 1,0 кг/т								
13	10,0	0,083	920	72,8	0,99	3910	7,99	489
14	5,00	0,16	1620		4,56			
15	2,00	0,74	3380		8,35			
16	1,00	1,85	5640		10,79			
17	0,50	3,19	6900		16,53			
18	Без угля	7,4	Без угля		23,12			
Серия №4 – предварительной обработкой керосином 1,5 кг/т								
19	10,0	0,12	880	61,8	2,28	2626	6,21	423
20	5,00	0,24	1700		3,14			
21	2,00	1,97	3300		7,45			
22	1,00	3,13	4730		12,33			
23	0,50	6,5	5700		14,67			
24	Без угля	10,4	Без угля		19,62			
Серия №5 – с предварительной обработкой керосином 2,0 кг/т								
25	10,0	0,21	890	52,2	1,84	1723	4,75	363
26	5,00	1,00	1450		6,42			
27	2,00	2,86	3020		8,28			
28	1,00	5,7	4260		10,90			
29	0,50	9,8	4700		12,48			
30	Без угля	13,0	Без угля		16,58			

Примечание. Условия опытов: содержание Au в исходном концентрате – 35,80 г/т, из них в цианируемой форме – 31,75 г/т; масса концентрата в каждом опыте – 0,30 кг; объём жидкой фазы – 0,35 л; предварительная обработка питания цианирования эмульсией керосина в течение 16 ч, затем цианирование в течение 72 ч при pH – 11 и концентрации NaCN – 2 г/л.

Результаты и обсуждение

Обработку результатов вели следующим образом. Прямые экспериментальные данные позволяют построить изотермы сорбции золота активным углем, которые приведены на рис. 1, полученные изотермы удовлетворительно описываются степенным уравнением Фрейндлиха вида

$$E_{\text{угля}} = K_1 \cdot C_{\text{жидк}}^n,$$

где $E_{\text{угля}}$ – содержание Au в угле в конце опыта, г/т; K_1 и n – безразмерные коэффициенты; $C_{\text{жидк}}$ – концентрация Au в жидкой фазе пульпы, мг/л.

Коэффициент изотермы K_1 характеризует сорбционную способность угля и составляет обычно 3000-30000. Сорбционная активность твёрдой фазы в каждой серии рассчитывали по методике «Иргиредмета» как отношение количества золота, обнаруживаемого в жидкой фазе пульпы в конце опыта без сорбента, к количеству извлекаемого золота в исходном сырье:

$$CA = \left(1 - \frac{R \cdot C_{\text{ж}}}{C_{\text{извл}}}\right) \cdot 100,$$

где CA – относительная сорбционная активность сырья, %

R – отношение Ж:Т, м³/т;

$C_{\text{ж}}$ – концентрация Au в жидкой фазе пульпы в конце опыта без сорбента, мг/л;

$C_{\text{извл}}$ – содержание Au в цианируемой форме в исходном концентрате, г/т, определяется заранее.

В приведённом примере СА флотоконцентрата без специальной обработки составляет 88,4%, добавка керосина от 0,5 до 2,0 кг/т позволяет снизить СА до уровня 52,2-79,8%, причём увеличение расхода приводит к планомерному снижению СА.

Полученные экспериментальные данные позволяют составить баланс золота и рассчитать количество золота, сорбированного твёрдой фазой пульпы в каждом проведённом опыте:

$$C_{\text{тв. сорб}} = \frac{(m_{\text{тв}} \cdot C_{\text{извл}}) - (m_{\text{угля}} \cdot E_{\text{угля}}) - (V_{\text{жидк}} \cdot C_{\text{жидк}})}{m_{\text{тв}}},$$

где $C_{\text{тв. сорб}}$ – количество сорбированного золота, г/т; $C_{\text{извл}}$ – содержание Au в цианируемой форме в исходном концентрате, г/т, определяется заранее;

$m_{\text{тв}}$ – масса твёрдой фазы, кг;

$m_{\text{угля}}$ – масса угля, кг;

$E_{\text{угля}}$ – содержание Au в угле в конце опыта, г/т;

$V_{\text{жидк}}$ – объём жидкой фазы, л;

$C_{\text{жидк}}$ – концентрация Au в жидкой фазе пульпы в конце опыта, мг/л.

Зависимость количества сорбированного золота от его равновесной концентрации в жидкой фазе представляет собой изотерму сорбции Au твёрдой фазой пульпы, которая зачастую удовлетворительно аппроксимируется степенным уравнением Фрейндлиха с определением соответствующего коэффициента K_2 по аналогии с активным углем. Изотермы сорбции золота твёрдой фазой для рассматриваемого примера приведены на рис. 2.

Соотношение коэффициентов изотерм Фрейндлиха для активного угля (K_1) и для твёрдой фазы (K_2) характеризует комплексную эффективность обезметалливания пульпы и может применяться для оценки эффективности подавления СА твёрдой фазы с одновременным учётом фактора подавления искусственного сорбента, при этом чем выше K_1/K_2 , тем эффективнее протекает сорбция на уголь. Физический смысл величины K_1/K_2 соответствует среднему коэффициенту распределения Au между активным углем и твёрдой фазой в исследованном диапазоне концентрации Au в жидкой фазе пульпы.

На рис. 3 приведена зависимость K_1/K_2 от величины добавки керосина для рассмотренного примера. Максимальное значение K_1/K_2 на уровне 489 наблюдается при расходе керосина 1,0 кг/т, который является оптимальной величиной. При меньшем расходе керосина СА твёрдой фазы подавляется недостаточно, а увеличение расхода приводит к резкому снижению сорбционной способности угля.

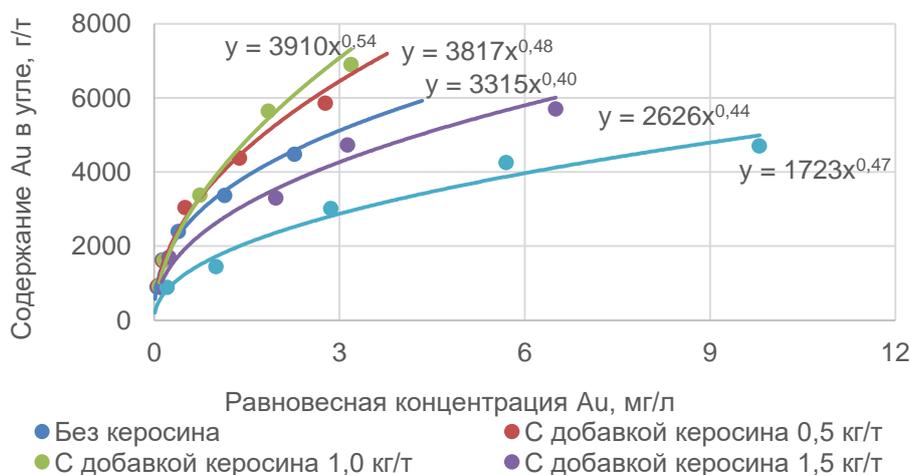


Рис. 1. Изотермы сорбции Au активным углем

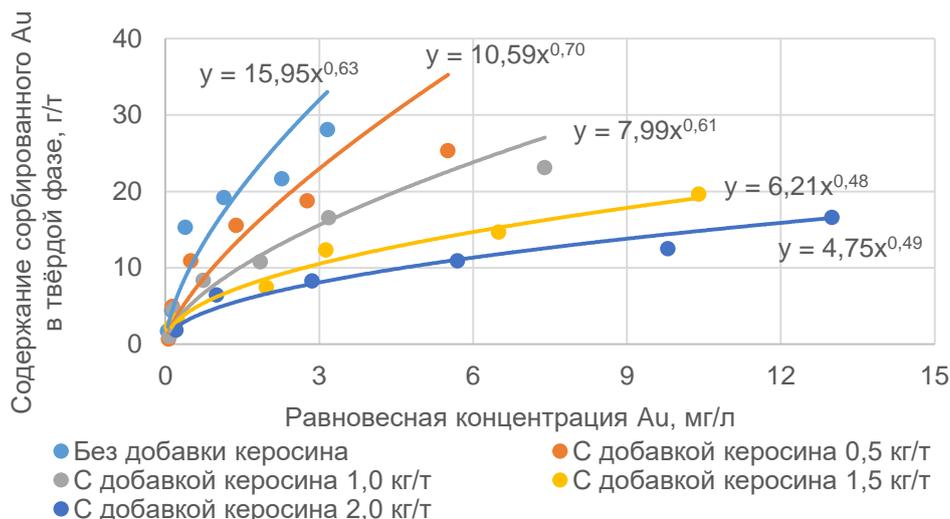


Рис. 2. Изотермы сорбции Au твёрдой фазой пульпы

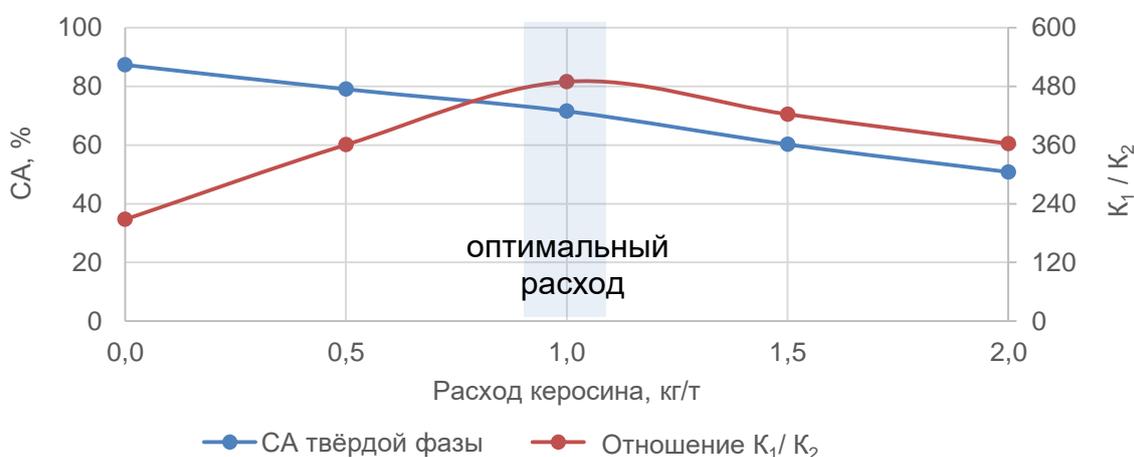


Рис. 3. Зависимость величины СА и соотношения коэффициентов изотерм Фрейндлиха для активного угля (K_1) и для твёрдой фазы (K_2) от величины добавки керосина к питанию цианирования

Следует отметить, что график эффективности использования реагента-подавителя от его расхода, как правило, имеет пик. Физически это связано с тем, что при небольших расходах реагента он практически нацело связывается природным углистым веществом, подавляя его СА. В этом случае эффект подавления природного углистого вещества превалирует над эффектом подавления искусственного сорбента и величина K_1/K_2 увеличивается. При дальнейшем увеличении расхода реагента-подавителя всё большая часть реагента остаётся не прореагировавшей к началу цианирования и избыток реагента связывается искусственным сорбентом, его активность снижается, что вызывает снижение K_1/K_2 .

Заключение

Рекомендуется использовать данную методику для изучения влияния реагентов-подавителей на процесс сорбционного цианирования, так как она позволяет вести одновременный учёт эффекта подавления

СА природного углистого вещества (целевой процесс) и эффекта подавления активного угля (нежелательный побочный процесс). Методика предназначена для проведения исследований при разработке технологий переработки углистого сорбционно-активного золото-содержащего сырья, а также для промышленных предприятий, реализующих CIL- и RIL-процессы цианирования такого сырья.

Список источников

1. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: В 2-х т. Иркутск: ОАО Иргиредмет, 1999. 786 с.
2. Afenya PM (1991) Treatment of carbonaceous refractory gold ores. Miner. Eng. 4:1043–1055. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7)
3. Ahmadiantehrani M., Hendrix J.L., Ramadorai G. 1991. Hypochlorite pre-treatment in heap leaching of a low grade carbonaceous ore. Miner. Metall. Proc. 8, 27-31 p.

4. Santiago R.C.C., Ladeira A.C.Q. (2019) Reduction of preg-robbing activity of carbonaceous gold ores with the utilization of surface blinding additives. *Miner Eng* 131:313–320. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.029>
5. Adams M.D., Burger A.M. 1998. Characterization of carbonaceous preg-robbings and abraded carbon in gold residues/ *Miner.Eng.* 11(10), 919-927.
6. Kulpa C.F., Brierle J.A., 1993. Microbial deactivation of pre-robbing carbon in gold ore. In: Torma A.E., Wey J.E., Lakshmanan V.I. (Eds.) *Biohydrometallurgical Technologies*. The Minerals, Metals and Material Society, Warrendale Pennsylvania, pp. 427-435
7. Miller J., Wan R.Y., Díaz X. (2016) Chapter 49 - Preg-robbing gold ores. In: *Gold ore processing* (second edn), pp 885–907. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9>
8. Ng, W. S., Wang, Q., & Chen, M. (2020). A review of Preg-robbing and the impact of chloride ions in the pressure oxidation of double refractory ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1793142>
9. Salazar-Hernández, M. M., Salazar-Hernández, M. del C., Navarro-Barrera, R., Saucedo, I., & Elorza-Rodríguez, E. (2023). Physicochemical characterization of carbonaceous matter associated with refractory precious metals ores. *Journal of Engineering Research*, 3(11). DOI: 10.22533/at.ed.3173112304045
10. Hammerschmidt J, Güntner J, Kerstiens B, Charitos A (2016) Chapter 24 - roasting of gold ore in the circulating fluidized-bed technology. In: Adams M.D. (ed) *Gold ore processing*, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam, pp. 393–409. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00024-4>
11. Ofori-Sarpong, G., Adjei, D. K., & Amankwah, R. K. (2017). Fungal-Transformation of Surrogate Sulphides and Carbonaceous Matter in Refractory Gold Ores: Revisited. *Ghana Mining Journal*, 17(2), 56–65. <https://dx.doi.org/10.4314/gm.v17i2.8>
12. Ofori-Sarpong, G., & Osseo-Asare, K. (2013). Preg-robbing of gold from cyanide and non-cyanide complexes: Effect of fungi pretreatment of carbonaceous matter. *International Journal of Mineral Processing*, 119, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.007>
13. Equinox Gold Corp. (2020). NI 43-101 Technical Report on the Santa Luz Project, Bahia State, Brazil, 2020, 311 p.
14. Mabwe, N. R. (2020). Potential pre-treatment and processing routes for recovery of gold from complex (refractory) gold ores. A review. *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Harare, Zimbabwe, 1708-1715.
15. Liu, Q., Yang, H.-Y., & Tong, L.-L. (2014). Influence of Phanerochaete chrysosporium on degradation and preg-robbing capacity of activated carbon. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 1905–1911. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63270-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63270-2)
16. Mustapha, A., Asamoah, R. K., Ofori-Sarpong, G., & Amankwah, R. K. (2014). Preg-robbing characteristics of gold ores in Ghana. 3rd UMoT Biennial International Mining and Mineral Conference, 192–196 p.
17. Wallenius, J. M., & Bernardis, F. L. (2023). Exploiting tailored carboxymethyl cellulose depressant for managing carbon recovery in refractory gold ore flotation. *Metallurgical and Materials Data*, 1(2), p. 51-55. <https://doi.org/10.30544/MMD7>
18. Improving gold recovery from artificial preg-robbing ore by pre-treatment using blinding agent and resin-in-Leach. Mohammad Zaki Mubarak, Prasetyo Sandha Irianto // *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 48, no. 3, 2016, pp. 276-287.
19. Valdivieso-Bermeo, P., Peñaloza, I., & Moreno-Chávez, J. (2020). Treatment for gold ores with high content of carbonaceous matter. *DYNA*, 87(215), 180-185. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.84282>
20. Thella J. S. The influence of mineralogy and surface chemistry on flotation of Cortez complex carbonaceous double refractory gold ore: The University of Queensland. 2018. 271 p.
21. Flores D. M. M. Bio-mineral processing of double refractory gold ores using laccase-mediator system, Kyushu University, 2023. 267 p.
22. Rees K. L. The leaching and adsorption behaviour of gold ores : University of Melbourne, Department of Chemical Engineering, 2000. 399 p.

Сведения об авторах

Бывальцев Александр Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия. E-mail: torrot_2008@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROCEDURE FOR OPTIMIZING THE DOSAGE OF BLINDING AGENTS IN CYANIDATION OF PREG-ROBBING CARBONACEOUS GOLD PRODUCTS

Byvaltsev Alexander V. – PhD (Eng.), Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory, Irgiredmet JSC, Irkutsk, Russia. E-mail: torrot_2008@mail.ru

Abstracts. The aim is to develop the procedure for selecting the optimal consumption of blinding agents for cyanidation process of preg-robbing carbonaceous products, taking into account their effects on both natural carbonaceous components and artificial adsorbent. The problem lies in the fact that blinding agents, as a rule, simultaneously worsen the adsorption capacity of the synthetic sorbent, which requires precise control of their dosage. The experiments were carried out on a flotation concentrate with a cyanidable gold content of 31.75 g/t with varying kerosene consumption from 0 to 2 kg/t and activated carbon loading, which made it possible to determine the isotherms of gold sorption by coal and the solid phase of the pulp, as well as the amount of sorption activity. The proposed method allowed us to establish that the addition of kerosene 0.5-2.0 kg/t reduces the preg-robbing index of flotation concentrate from 88.4% to 52.2-79.8%, but an excess of the reagent impairs the efficiency of activated carbon. The key indicator is the ratio of the Freundlich isotherm constants for activated carbon (K_1) and for the solid phase (K_2), which reaches a maximum of 489 with a kerosene consumption of 1.0 kg/t. This indicator reflects the average gold distribution coefficient between the activated carbon and the solid phase. A further increase in the dosage of kerosene reduces K_1/K_2 due to the "poisoning" of activated carbon. The technique demonstrates that the optimal flow of the blinding agents corresponds to the peak of K_1/K_2 , where the decline of preg-robbing index of solid phase is maximal, and the negative effect on activated carbon is minimal. The obtained results can be applied to other blinding agents, such as diesel fuel or surfactants. It is recommended to use this approach when selecting the consumption of blinding agents for both research and production purposes.

Keywords: preg-robbing, carbonaceous matter, gold, blinding agents, cyanidation, adsorbent

Ссылка на статью:

Бывальцев А.В. Методика оптимизации расхода реагентов-подавителей сорбционной активности в процессе цианирования углистого золотосодержащего сырья // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 4-9.
Byvaltsev A.V. Procedure for optimizing the dosage of blinding agents in cyanidation of preg-robbing carbonaceous gold products. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 4-9.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746.34

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Кошелев О.С., Ларин М.А., Рябова Л.И.

ПРИБЫЛЬНАЯ НАДСТАВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ

Аннотация. При производстве металлических слитков прибыльная надставка играет важнейшую роль, поскольку она используется для теплоизоляции головной части слитка (прибыли). Воспринимая тепловую нагрузку, прибыльная надставка должна обладать высоким эксплуатационным ресурсом работы, который в условиях производства чаще всего оценивается числом наливов – заливок металлическим расплавом изложницы с прибыльной надставкой до появления таких браковочных признаков, как коробление и трещины в местах сопряжения корпуса надставки с нижней полкой, сетка разгара на поверхности, контактирующей с расплавом, просечки на поверхности головной части слитка. В центре внимания авторов статьи находится прибыльная надставка к литой чугунной изложнице, применяемой для производства слитков массой 5,3 т из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Цель работы – повышение эффективности тепловой работы и эксплуатационной стойкости прибыльной надставки посредством выбора ее оптимальной конструкции. Для этого проведено совершенствование надставки известной конструкции, содержащей металлический корпус с верхней и нижней полками, расположенными с наружной стороны корпуса, и теплоизоляцию. В ходе опытно-промышленного опробования разработки в условиях действующего производства достигнуты уменьшение области головной части слитка (прибыли), пораженной усадочными дефектами, отсутствие коробления и трещин в теле надставки за счет увеличения жесткости конструкции и повышение числа наливов до вывода надставки из эксплуатации.

Ключевые слова: стальной слиток, изложница, прибыльная надставка, тепловая работа, эксплуатационная стойкость

Введение

В литейно-металлургическом производстве ряда предприятий, в частности Объединенной металлургической компании, АО «Северсталь» и группы компаний «РУСПОЛИМЕТ», при получении металлических слитков различных геометрии и развеса по-прежнему широко используются изложницы с прибыльной надставкой. Прежде всего, речь идет о выпуске изделий ответственного назначения из специальных сталей и сплавов, где номенклатура достаточно широка, а объемы относительно малы и, как следствие, применение непрерывной разливки не всегда является экономически целесообразным.

При производстве слитков прибыльная надставка играет важнейшую роль, поскольку она используется для теплоизоляции головной части слитка (прибыли). Эффективность работы прибыльной надставки определяется уменьшением отвода тепла, длительностью нахождения металла в расплавленном состоянии и, как следствие, величиной области с усадочными дефектами, оцениваемой, например, отношением глубины усадочной раковины к высоте головной части слитка [1, 2].

В условиях циклических нагрузок при повышенных температурах материал прибыльной надставки, как и материал изложницы, испытывает деградацию, по мере эксплуатации снижая механические, теплофизические и эксплуатационные свойства. Это ухудшение исследователи связывают с развивающимися с течением времени структурными и фазовыми превращениями [3-5].

Очевидно, воспринимая тепловую нагрузку, прибыльная надставка должна обладать высоким эксплуатационным ресурсом работы, который в условиях производства чаще всего оценивается числом наливов – заливок металлическим расплавом изложницы с прибыльной надставкой до появления браковочных признаков (коробление и трещины в местах сопряжения корпуса надставки с нижней полкой; сетка разгара на поверхности, контактирующей с расплавом; просечки на поверхности головной части слитка).

В этой связи внимание разработчиков уже достаточно давно фокусируется на поиске путей регулирования тепловой работы прибыльной надставки и увеличения ее эксплуатационной стойкости, причем актуальность исследований, проводимых в этом направлении, не снижается. В большинстве случаев делают попытки оптимизировать конструкцию надставки.

Так, например, известна прибыльная надставка, содержащая металлический корпус и теплоизоляционный экран, отличающаяся тем, что по периметру корпуса в верхней и нижней его частях выполнены ребра-приливы с направляющими пазами, а теплоизоляционный экран выполнен в виде пластин, установленных в направляющих пазах параллельно граням надставки [6]. Ее недостатками являются высокая трудоемкость изготовления экранов из материалов с различной степенью черноты для обеспечения требуемого уровня теплоотражающих свойств, а также необходимость их частой замены в ходе эксплуатации.

Прибыльная надставка, защищенная техническим решением [7], отличается тем, что с целью увеличения ее стойкости она снабжена армирующим каркасом, залитым в середине нижнего фланца по его периметру. Ее недостатками являются вынужденная массивность нижнего фланца для надежного размещения в ней ар-

мирующего каркаса, увеличивающая разностенность прибыльной надставки, концентрацию напряжений в местах сопряжения стенок и, как следствие, вызывающая коробление, высокую вероятность незалива каркаса металлическим расплавом по причине несвариваемости из-за различия их температур и наличия конденсата на поверхности арматуры, а также сложность фиксации каркаса в середине фланца.

Другой вариант конструктивного решения прибыльной надставки предусматривает наличие вакуумируемого корпуса с расположенными в нем экранами, причем экраны установлены с образованием отдельных вакуумируемых полостей между собой и корпусом [8]. Очевидным минусом его является необходимость применения дорогостоящего и сложного в обслуживании оборудования для вакуумирования с обязательным контролем герметичности вакуумируемых полостей.

Наибольший интерес у авторов данной статьи вызвала прибыльная надставка, содержащая металлический корпус, полки с пазами, расположенными с наружной стороны корпуса, и теплоизоляция, отличающаяся тем, что она снабжена распорками в виде штырей, установленных в пазах полки, причем нижняя полка имеет толщину, равную 1,1-1,6 толщины корпуса, а толщина корпуса равна 0,02-0,06 приведенного диаметра корпуса в средней по высоте части, при этом теплоизоляция состоит из пористого материала, размещенного между полками, и теплоизоляционного экрана из листовой стали [9]. Этот вариант конструкторского решения тоже оказался не свободным от недостатков. В первую очередь к ним была отнесена разностенность конструкции надставки в части нижней, верхней полки и корпуса, в условиях термомеханических нагрузок ведущая к накоплению напряжений в зоне сопряжения полки с корпусом, особенно нижней полки с корпусом, вплоть до коробления, образования, развития трещин и разрушения. В дополнение к этому установка штырей в качестве распорок параллельно стенке корпуса трудно реализуема на практике, не препятствует механическим воздействиям на надставку при термоциклировании в направлении, ортогональном ее вертикальной оси симметрии, и, как следствие, в должной степени не способствует обеспечению жесткости конструкции. В свою очередь, использование листовой стали в качестве теплоизоляционного экрана, как показывает опыт, требует тщательной и трудоемкой подготовки для обеспечения требуемого уровня их теплоотражающих свойств и не гарантирует минимизации тепловых потерь по причине неизбежных зазоров между соседними листами.

Цель работы – повышение эффективности работы и эксплуатационной стойкости прибыльной надставки посредством выбора ее оптимальной конструкции. Ожидаемый технический результат – уменьшение области головной части слитка (прибыли), пораженной усадочными дефектами, отсутствие коробления и трещин в теле надставки за счет увели-

чения жесткости конструкции и повышение числа наливов до вывода надставки из эксплуатации.

В работе представлены результаты соответствующих исследований, выполненных группой ученых Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ).

Материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

В центре внимания авторов данной статьи в качестве объекта исследования находилась литая чугуновая (на базе СЧ15) прибыльная надставка к изложнице, применяемая в электрометаллургическом цехе АО «РУСПОЛИМЕТ» для сифонной заливки стальных четырехгранных кузнечных слитков массой 5,3 т из стали 12Х18Н10Т. Исследования проводились в условиях действующего производства.

В качестве ориентира – прототипа для разработки – была выбрана прибыльная надставка, содержащая металлический корпус с верхней и нижней полками, расположенными с наружной стороны корпуса, и теплоизоляцию, описанная выше в [9]. Позитивные ожидания полного или частичного устранения недостатков авторы данной статьи связывали с конструктивными изменениями прототипа и поиском доступного и технологичного материала теплоизоляции.

Предлагаемый вариант имеет следующие отличия от прототипа:

- нижняя полка прибыльной надставки имеет толщину, равную 1,1-1,2 толщины корпуса, радиус сопряжения стенки корпуса с его нижней полкой равен полусумме толщин их стенок;

- по периметру корпуса у его основания, прилегающего к нижней полке, располагается не менее трех ребер жесткости толщиной, равной 0,6-0,7 толщины нижней полки;

- пространство между верхней, нижней полками и корпусом, в котором размещена теплоизоляция, по всему периметру снаружи закрыто герметичным кожухом;

- в качестве теплоизоляции используется воздух.

Была сформулирована рабочая гипотеза о положительном влиянии перечисленных отличий на эффективность работы и эксплуатационную стойкость прибыльной надставки.

Конструкция предлагаемой прибыльной надставки представлена на рис. 1.

Прибыльная надставка состоит из металлического корпуса 1 с верхней 2 и нижней 3 полками, герметичного кожуха 4 и теплоизоляции 5. Герметичный кожух 4 служит для защиты теплоизоляции 5 и обеспечения эффекта термостатирования. Теплоизоляция 5 не расходуется, а затвердевающий слиток не контактирует с теплоизоляцией и не загрязняется ею. В качестве теплоизоляции используется любой неметаллический пористый материал (шлаковата, каолиновая вата, волокнистый огнеупор или воздух), цапфы 6 служат для установки и снятия прибыльной надставки на верхний торец изложницы.

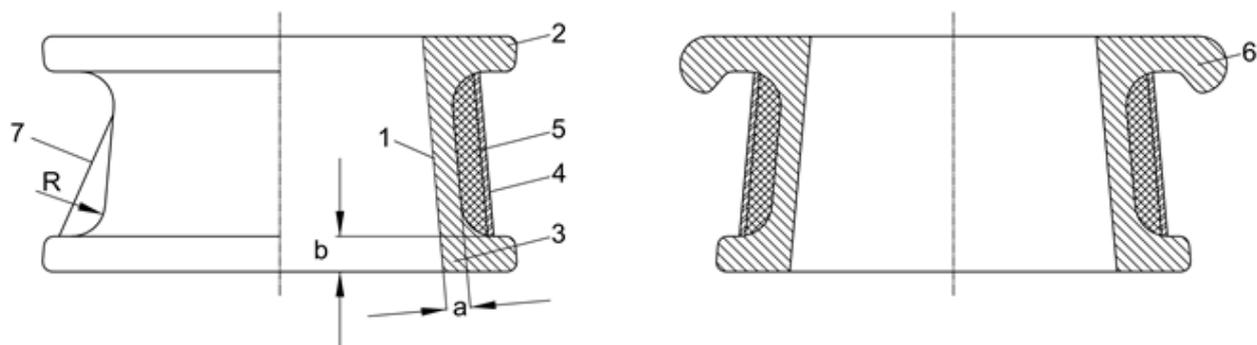


Рис. 1. Предлагаемая прибыльная надставка:
1 – металлический корпус; 2 – верхняя полка; 3 – нижняя полка; 4 – герметичный кожух;
5 – теплоизоляция; 6 – цапфа

Перед заливкой металлическим расплавом прибыльная надставка устанавливается нижней полкой на верхний торец изложницы и фиксируется с помощью прижимных скоб, закрепляемых на нижней полке надставки. За счет того, что внутренняя поверхность корпуса прибыльной надставки ровная, слиток не застревает и не «подвисает» в прибыльной части. На нее при необходимости наносится смазка из того же материала, что и на рабочую поверхность изложницы.

При работе прибыльной надставки после ее наполнения металлическим расплавом участок сопряжения стенки корпуса 1 с нижней полкой 3 по всему его периметру испытывает наибольшие термомеханические нагрузки. В этой связи для повышения жесткости конструкции и снижения рисков коробления, образования и развития трещин радиус сопряжения стенки корпуса с его нижней полкой R выполняется равным полусумме толщин их стенок ($R = (a + b) / 2$), а по всему периметру корпуса у его основания, прилегающего к нижней полке, располагается не менее трех ребер жесткости 7, имеющих толщину, равную 0,6-0,7 толщины нижней полки (рекомендации [10]). Это, в свою очередь, дает возможность уменьшить тепловой узел и снизить толщину нижней полки до уровня 1,1-1,2

толщины корпуса, что уменьшает вероятность образования «мостов» затвердевающего металла в нижней части прибыльной надставки («подвисание» слитка в прибыльной части). На рис. 2 представлены примеры расположения ребер жесткости в соответствии с заявленным решением.

Оценку эксплуатационной стойкости изложниц выполняли по числу наливов расплава до вывода изложниц из эксплуатации на площадке АО «РУСПОЛИМЕТ» (г. Кулебаки, Нижегородская обл.).

Отношение глубины усадочной раковины к высоте головной части слитка рассчитывали по результатам измерений на продольно-осевом разрезе после отделения головной части слитка от основного тела.

Состояние рабочей поверхности прибыльных надставок на предмет выявления браковочных признаков для вывода из эксплуатации (коробление и трещины в местах сопряжения корпуса надставки с нижней полкой; сетка разгара на поверхности, контактирующей с расплавом; недопустимые просечки на поверхности головной части слитка) после каждого цикла «налив-раздевание слитка» оценивали визуальное с привлечением экспертов предприятия.

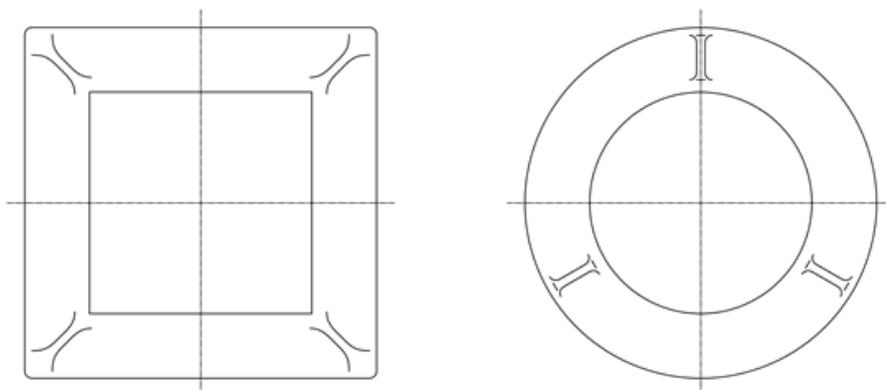


Рис. 2. Примеры расположения ребер жесткости

Результаты исследования и их обсуждение

В условиях действующего производства проводили опытно-промышленные испытания прибыльной надставки предлагаемой конструкции для сравнения с прототипом.

Для получения сифонной заливкой стальных четырехгранных кузнечных слитков массой 5,3 т из стали 12Х18Н10Т изготовили две литые чугунные прибыльные надставки с приведенным внутренним диаметром в средней по высоте части, равным 880 мм, по предлагаемому решению и по прототипу. Толщина стенки корпуса была одинаковой у предлагаемого решения и прототипа и равной 52,0 мм, а толщина нижней полки – соответственно 83,2 мм у прототипа и 62,4 мм у прибыльной надставки по предлагаемому решению. Радиус сопряжения нижней полки и корпуса для прибыльной надставки по предлагаемому решению составил 72,8 мм. У предлагаемой надставки в углах корпуса у его основания, прилегающего к нижней полке, симметрично оси надставки предусмотрели четыре ребра жесткости, имеющих толщину, равную 50,0 мм.

У обеих надставок пространство между корпусом, верхней и нижней полками снаружи закрыли герметичным кожухом из тонкого стального листа, предварительно заполнив пространство материалом теплоизоляционного мата производства группы компаний «Волокнистые огнеупоры» (Россия). Защитные покрытия рабочих поверхностей изложниц и прибыльных надставок не применяли.

Металлом одной плавки заливали по две изложницы с установленными на них прибыльными надставками по предлагаемому решению и прототипу. Перед началом разливки на литник устанавливали устройство защиты струи металла аргоном типа ВУК 380/250. Для защиты металла от вторичного окисления в изложницах применяли теплоизолирующую шлакообразующую смесь Scorialit VN 203-74 (Германия), а для уменьшения усадочной раковины в прибыльной части слитков – экзотермическую смесь Ferrux 1188А (Германия), которая последовательно засыпается на слой теплоизолирующей смеси по прошествии некоторого временного интервала. Разделение (стрипперирование) слитков после их формирования проводили с помощью крана.

Оценивали эксплуатационную стойкость, отношение глубины усадочной раковины к высоте головной части слитка, а также состояние рабочей поверхности прибыльных надставок.

По итогам проведенных испытаний эксплуатационная стойкость прибыльной надставки по предлагаемому решению составила 45 наливов против 28 наливов у прототипа. При этом средняя величина отношения глубины усадочной раковины к высоте головной

части слитка у предлагаемой прибыльной надставки оказалась равной 62% при 95% у прототипа.

По результатам аналогичных испытаний, в которых в качестве теплоизолятора использовали воздух, эксплуатационная стойкость прибыльной надставки по предлагаемому решению составила 40 наливов против 22 наливов у прототипа; средняя величина отношения глубины усадочной раковины к высоте головной части слитка у предлагаемой прибыльной надставки оказалась равной 74% при 97% у прототипа.

Таким образом, были доказаны преимущества предлагаемого решения перед прототипом как по эффективности работы, так и по эксплуатационной стойкости.

Заключение

Результаты проведенной работы свидетельствуют об улучшении тепловой работы и повышении эксплуатационной стойкости прибыльной надставки предлагаемой конструкции. В ходе опытно-промышленного опробования разработки в условиях действующего производства достигнуты: уменьшение области головной части слитка (прибыли), пораженной усадочными дефектами, отсутствие коробления и трещин в теле надставки за счет увеличения жесткости конструкции и повышение числа наливов до вывода надставки из эксплуатации.

Разработка ученых НГТУ рекомендована к промышленному внедрению и в настоящее время проходит процедуру патентования.

Список источников

23. Большая Российская Энциклопедия: информационный портал [Электронный ресурс]. URL: <https://old.bigenc.ru/?ysclid> (дата обращения: 14.06.2025).
24. Зальцман Э.С. Изложницы для легированных сталей. Электросталь: ЭПИ МИСиС, 2004. 208 с.
25. Исследование деградации структуры чугуна при эксплуатации изложниц по изменению его акустических характеристик / Андреев В.В., Воронкова Л.В., Нуралиев Ф.А., Качанов В.К. // Литейное производство. 2015. №1. С. 14-16.
26. Фомихина И.В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. Минск, 2018. 46 с.
27. О деградации структуры, свойств и разрушении материала изложницы в процессе эксплуатации / Леушин И.О., Коровин В.А., Гарченко А.А., Рябова Л.И. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С.40-48.
28. А.с. 1025483 СССР, МПК В22D 7/10. Прибыльная надставка / Скворцов А.А., Китаев Е.М., Гуцин В.Н., Шевченко В.И.; патентообладатели Скворцов А.А., Китаев Е.М., Гуцин В.Н., Шевченко

- В.И. № 3409948; заявл. 24.03.1982; опубл. 30.06.1983.
29. А.с. 313608 СССР, МПК В22D 7/10. Прибыльная надставка / Игнатков Б.А., Мосиашвили В.В.; патентообладатель Коммунарский металлургический завод. №1465592/22-26; заявл. 27.07.1970; опубл. 07.09.1971.
30. Пат. 2067909 Российская Федерация, МПК В22D 7/10. Прибыльная надставка Зорина Олега Даниловича / Зорин О.Д.; патентообладатель Зорин О.Д. №4946739/02; заявл. 21.06.1991; опубл. 20.10.1996.
31. А.с. 1560369 СССР, МПК В22D 7/00. Прибыльная надставка / Паляничка В.А., Пан А.В., Гордиенко М.С., Митенев А.А., Белоусов А.И., Касьянова К.С.; патентообладатели Украинский научно-исследовательский институт металлов, Нижнетагильский металлургический комбинат, Ленинградский институт по проектированию металлургических заводов. №4394857; заявл. 21.03.1988; опубл. 30.04.1990.
32. Орлов П.И. Основы конструирования: справ.-метод. пособие. В 2-х кн. Кн.1. М.: Машиностроение, 1988. 560 с.

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: igoleu@yandex.ru.

Вахидов Умар Шахидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: mto@nntu.ru.

Кошелев Олег Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроительные технологические комплексы», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: kos7shef3@yandex.ru.

Ларин Михаил Африканович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: mto@nntu.ru.

Рябова Любовь Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: kafmto@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROFITABLE EXTENSION FOR PRODUCING STEEL INGOTS

Leushin Igor O. – DrSc (Eng.), Prof., Head of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Vahidov Umar Sh. – DrSc (Eng.), Prof., Head of the Department of Construction and Road Machines, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Koshelev Oleg S. – DrSc (Eng.), Prof., Professor of the Department of Machine-building technological complexes, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Larin Mikhail A. – PhD (Eng.), Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Ryabova Liubov I. – PhD (Eng.), Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Abstracts. In the production of metal ingots, the riser extension plays a key role, since it is used for thermal insulation of the ingot head (rise). Perceiving the thermal load, the riser extension must have a high operational life, which in production conditions is most often estimated by the number of pourings – pouring molten metal into a mold with a riser extension before the appearance of such rejection signs as warping and cracks at the junction of the riser body with the lower shelf; a mesh of fumes on the surface in contact with the melt; punches on the surface of the ingot head. The authors of the article focus on the riser extension to a cast iron mold used to produce ingots weighing 5.3 tons from

stainless steel grade 12X18H10T. The objective of the work is to improve the efficiency of thermal work and operational durability of the riser extension by selecting its optimal design. For this purpose, an extension of a known design was improved, containing a metal body with upper and lower shelves located on the outside of the body, and thermal insulation. During the pilot testing of the development under the conditions of the current production, the following was achieved: a reduction in the area of the ingot head (rise) affected by shrinkage defects, the absence of warping and cracks in the extension body due to an increase in the rigidity of the structure and an increase in the number of pours before the extension is taken out of operation.

Keywords: steel ingot, mold, profit extension, thermal work, operational durability

Ссылка на статью:

Прибыльная надставка для изготовления стальных слитков / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Кошелев О.С., Ларин М.А., Рябова Л.И.// Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 10-15.

Leushin I.O., Vahidov U.Sh., Koshelev O.S., Larin M.A., Ryabova L.I. Profitable extension for producing steel ingots. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 10-15.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СЛОЯ ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК

Аннотация. Приведены разработанные рецептуры смеси для нанесения на периклазовые формы слоев на основе силикатного связующего на водной основе – «Лейксил». Для исследования использовали спеченную исходную форму, на поверхность которой наносилась смесь на основе «Лейксил» с добавлением порошков Ti и Al_2O_3 . Образцы с нанесенным покрытием были исследованы методами структурно-фазового анализа и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Разработан комплекс оборудования для автоматизированного нанесения композиционных покрытий, включая разработку системы управления комплексом. Исследование поверхностных слоев форм методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и структурно-фазового анализа показало, что, по крайней мере, два варианта защитных слоев из рассмотренных обеспечивают образование соединения Ti_3Al в поверхностных слоях формы и снижение слоя повышенной твердости на поверхности титановых отливок. Получение высококачественных титановых отливок без слоя повышенной твердости позволило расширить изготовление фасонных отливок из титановых сплавов для авиационной промышленности, медицины.

Ключевые слова: слой повышенной твердости, кремнийорганический гель, наночастицы, порошки титана и окиси алюминия

Слой повышенной твердости (СПТ), или альфи-рованный слой, образуется на поверхности титановых отливок в результате взаимодействия периклазовой (магнезитовой), корундовой формы с расплавом титановых сплавов (ОСТ 5Р.9071-88). СПТ приводит к снижению эксплуатационных свойств титановых изделий в условиях динамических нагрузок. Величина слоя повышенной твердости может достигать 500 мкм, а также может наблюдаться внедрение элементов формы в отливку. При изготовлении инертных к жидкому титану графитовых форм требуются операции по их механической обработке, что приводит к необходимости осуществления большого комплекса мероприятий по охране труда [1].

Для установления влияния толщины отливки на формирование слоя повышенной твердости была использована ступенчатая отливка и соответствующие образцы форм из этих ступеней (рис. 1).

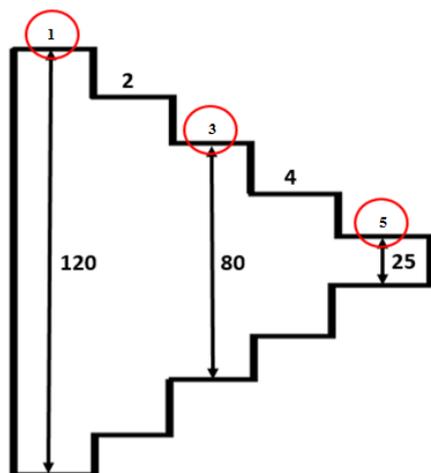


Рис. 1. Размеры титановых отливок для проведения экспериментов

Ступенчатая отливка использована для получения пятой ступени как основного объекта исследований. Такой подход позволил получать небольшие по размеру образцы без изготовления литниковых систем и специальных форм небольшого размера. Одним из решений проблемы уменьшения влияния СПТ является создание на поверхности, контактирующей с расплавом, барьерных покрытий [2-4].

Исследование барьерных покрытий

В работе [5] рассмотрено получение барьерных покрытий на оболочковых формах, применяемых в литье по выплавляемым моделям, путем нанесения силикатного связующего Remasol на водной основе (производство Великобритания). Было установлено, что покрытие, образованное при нанесении связующего Remasol на поверхность формы с последующей обсыпкой его электрокорундом, приводит к уменьшению образования и даже отсутствию слоя повышенной твердости. В работе [6] было предложено для предотвращения образования слоя повышенной твердости наносить на оболочковую форму из алюминия смесь из коллоидной двуокиси кремния с добавлением порошков титана и окиси алюминия. Сделано предположение, что слой повышенной твердости не образуется только в случае формирования в граничных слоях формы фазы Ti_3Al .

На основе приведенных данных была разработана рецептура смеси для нанесения на периклазовые формы слоев на основе силикатного связующего на водной основе – «Лейксил» (производство Россия, г. Казань). Связующее кремнезоль «Лейксил» представляет собой гидрогель диоксида кремния. Для исследований использовалась спеченная исходная форма, на поверхность которой наносилась смесь на основе «Лейксил» с добавлением порошков Ti и Al_2O_3 . Были рассмотрены шесть вариантов смесей (табл. 1).

Полученные после термообработки образцы с нанесенным покрытием были исследованы методами структурно-фазового анализа и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Данные представлены в табл. 1. Глубина анализа метода РФА составляет 3-5 мкм, что на несколько порядков больше глубины исследования методом РФЭС. Сочетание этих методов, дополняющих друг друга, позволило выбрать рецептуру и режимы термообработки покрытий, создающих в поверхностных слоях фазу Ti_3Al . РФА-анализ проводился с использованием рентгеновского дифрактометра MiniFlex (Rigaku) в $CoK\alpha$ -излучении в интервале углов от 20 до 90°. Качественный анализ структурно-фазового состояния проводился с помощью программы XPowder V. 2010.01.03 PRO. Так как поверхность образцов не идеально гладкая, линии в спектре РФА могут несколько смещаться.

Справочные данные РФА углов для фазы Ti_3Al (36, 38, 41, 54, 63, 71, 79, 89) [7-9] и для фазы TiO_2 (40, 42, 57, 62, 64, 70, 77) [8, 9]. Как следует из обработки дифрактограмм, имеется наложение линий, соответствующих фазам Ti_3Al и TiO_2 , как это видно из рис. 2.

Наиболее интенсивные линии, соответствующие фазе Ti_3Al , присутствуют в дифрактограмме образца G21 (см. рис.2).

Применение метода РФЭС позволило идентифицировать фазы, так как положение линий в РФЭС-спектрах, соответствующих структурам Ti_3Al и TiO_2 разнесены на большую величину. Так линии от структур Ti_3Al и TiO_2 в спектре $Ti2p_{3/2}$ разнесены на величину ~ на 5 эВ ($E_{св}$ 453,8 эВ и 458,8 эВ соответственно), а в спектре $Al2p$ ~ на 3 эВ ($E_{св}$ 71,4 эВ и 74,6 эВ) [27].

Таблица 1

Рецептура смеси, нанесенной на форму, и режимы термообработки формы с покрытием

№ п/п	Обозначение образца и соотношение компонентов (массовые доли)	Предварительная обработка	Температурный режим, °С
1	T15 $Al_2O_3:Ti$ (2:1) + Лейксил (1:0,78)	1 и 2 слой – выдержка на воздухе 90 мин, 3 слой – выдержка на воздухе 60 мин. Нагрев до 950°С, выдержка 2 ч, охлаждение. Нагрев до 1500°С, выдержка 2 ч, охлаждение	950 + 1500
2	X21 $Al_2O_3:Ti$ (2:1) + Лейксил (1: 0,78)	1 и 2 слой – выдержка на воздухе 90 мин, 3 слой – выдержка на воздухе 60 мин. Нагрев до 1050°С, выдержка 2 ч, охлаждение	1050
3	G21 $Al_2O_3 : Ti = 2:1$ + Лейксил (1: 0,78)	Нагрев до 1000°С, охлаждение до 150°С. Затем наносим покрытие в 3 слоя. Нагрев до 1050°С, выдержка 2 ч, охлаждение	1000 – 150 + 1050
4	X11 $Al_2O_3 : Ti$ (1:1) + Лейксил (1: 0,63)	1 и 2 слой – выдержка на воздухе 90 мин, 3 слой – выдержка на воздухе 60 мин. Нагрев до 1050°С, выдержка 2 ч, охлаждение	1050
5	G11 $Al_2O_3:Ti = 1:1$ + Лейксил (1:0,63)	Нагрев до 1000°С, охлаждение до 150°С. Нанесение покрытие в 1,2,3 слоя – выдержка на воздухе в течении 5 мин. Нагрев до 1050°С, выдержка 2 ч, охлаждение	1000 – 150 + 1050
6	TL Ti + Лейксил (1:2,37)	Нагрев до 110°С. Нанесение покрытия в 3 слоя. Нагрев до 1050°С, выдержка 2 ч, охлаждение	1050

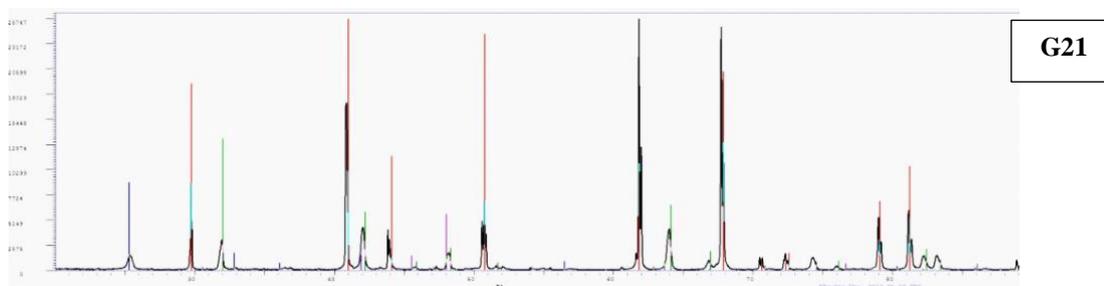


Рис. 2. Данные РФА образцов формы с покрытием на основе Лейксила (Прямоугольниками обозначены полосы, характерные для фазы Ti_3Al)

Анализ РФЭ-данных показал, что содержание элементов в поверхностных слоях образцов неодинаково, что очевидно связано с различием в рецептурах и режимов термообработки. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание элементов в поверхностном слое покрытия, ат.%

Образец	Элементы				
	C	O	Ti	Si	Al
T15	41,0	39,0	5,3	3,1	11,6
G21	54,2	31,0	1,14	10,4	3,2
X21	48,1	33,2	1,3	9,8	7,4
G11	49,0	36,0	1,3	11	2,7
T1	61,0	23,0	4,0	3,4	5,5

Наличие большого количества углерода связано с загрязнениями от инструментов, использованных при отборе проб. Травление в камере с удалением поверхностного слоя ~ 20 нм не привело к существенному уменьшению содержания углерода. Возможно, загрязнения находятся в углублениях шероховатой поверхности формы. Разложение РФЭ-спектров образца G21, который подвергался термообработке (1000°C, с последующим охлаждением до 150°C) перед нанесением смеси, показало, что в спектре $Ti2p_{3/2}$ имеются четыре линии с $E_{св}$ 453,8 эВ, 456,0 эВ, 458,8 эВ и 459,3 эВ, они показаны на рис. 3, которые можно отнести, соответственно, к соединениям Ti_3Al , TiO , TiO_2 (или к соединениям $(TiO_2)_{82}(SiO_2)_{18}$) и $(TiO_2)_{24}(SiO_2)_{76}$. Образование фазы Ti_3Al подтверждает линия в $Al2p$ -спектре с $E_{св}$ =71,4 эВ.

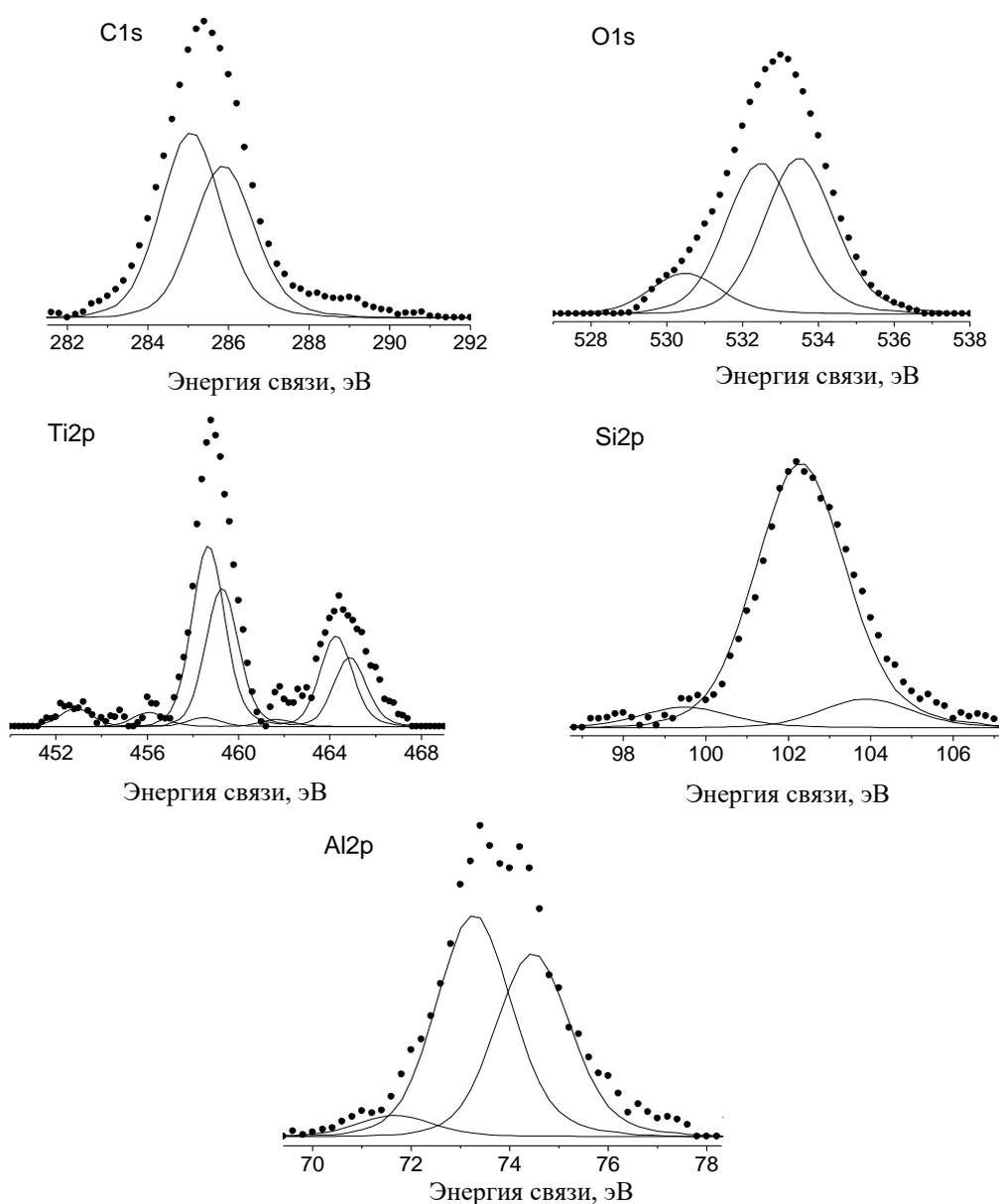


Рис. 3. РФЭ-спектры поверхности формы с покрытием G21

Исследование образца G11, подвергнутого той же самой термообработке, выявило, что в спектрах Ti2p3/2 и Al2p присутствуют линии, аналогичные линиям спектра образца G21, из чего можно заключить, что в образце G11 также имеется фаза Ti₃Al.

Однако РФА-анализ обнаружил присутствие фазы Ti₃Al в образце T15, что может быть связано с более высокой температурой нагрева образца, что позволило образовываться фазе Ti₃Al в более глубоких слоях покрытия.

Исследование форм в случае нанесения смеси Лейксил + титан не показало образования соединения Ti₃Al.

Выводы

1. Предлагается нанесение барьерных слоев на «магнетитовую» форму, используемую для литья изделий из титана. Барьерные слои представляют собой композиции на основе связующего «Лейксил» (Россия, г. Казань), состоящего из кремнийорганического геля и наночастиц окиси алюминия с введением в него порошков титана и окиси алюминия.

2. К использованию рекомендуются рецептуры композиций и режимы термообработки:



Нагрев до 1000°C, охлаждение до 150°C. Затем наносим покрытие в 3 слоя. Затем нагрев до 1050°C, выдержка 2 ч, охлаждение.



Нагрев до 1000°C, охлаждение до 150°C. Нанесение покрытие в 1,2,3 слоя – выдержка на воздухе в течении 5 мин. Затем нагрев до 1050°C, выдержка 2 ч, охлаждение.

Температурный режим, °C: 1000 – 150 + 1050.

3. Необходимо проведение дополнительных исследований для выявления влияния толщины покрытий и процентного содержания компонент на слои повышенной твердости на титановых отливках небольших размеров.

Список источников

1. Саубанов М.Н., Леушин И.О., Илларионов И.Е. Особенности изготовления титановых отливок в графитовых формах // Литейщик России. 2023. №9. С. 8-13.

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

2. Оценка работоспособности отливок из литейного титанового сплава по результатам испытаний моделей / М.Н. Саубанов, И.О. Леушин, М.В. Иксанов, Н.Ф. Молчанова // Литейщик России. 2024. №1. С.
3. Саубанов М.Н., Леушин И.О. Теоретические и технологические основы изготовления литейных форм для титановых фасонных отливок // Литейщик России. 2024. №2. С.
4. Саубанов М.Н., Леушин И.О., Илларионов И.Е. Анализ формовочных материалов и смесей для производства титановых отливок // Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Самара: ООО Полиграфия, ФГБОУ СамГТУ, 2023. С. 344-350.
5. Si-Young Sung, Beom-Suck Han and Young-Jig Kim. Formation of Alpha Case Mechanism on Titanium Investment. Cast Parts. Chapter from the book Titanium Alloys - Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications. Downloaded from: <http://www.intechopen.com/books/titanium-alloys-towards-achieving-enhanced-properties-for-diversified-applications>
6. Инновационные подходы к решению проблемы борьбы с образованием альфирированного 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.
7. Электронная спектроскопия / К. Зигбан, К. Нордлинг, А. Кальман и др. М.: Мир, 1971. 494 с.
8. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха. М.: Мир, 1987. 600 с.
9. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений: справочник. М.: Химия, 1984. 256 с.
10. Wagner C.D. Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy / Ed. Muilenberg G.E. Eden Prairie / C.D. Wagner, W.M. Riggs, L.E. Davis, J.F. Moulder. Minnesota, USA: Perkin-Elmer Corporation, 1978. P. 58.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF METHODS AND MATERIALS FOR PREVENTION OF FORMATION OF COATING OF INCREASED HARDNESS ON THE SURFACE OF TITANIUM ALLOY CASTINGS

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

Abstracts. There are mentioned developed mix formulation for coating the periclase mold with the coat made on the basis of silicate binder on water basis «Leiksil» in the article. For research is was used sintered mold, covered with mixture on the basis of «Leiksil» with addition of Ti и Al₂O₃ powders. Specimens with coating were examined by methods of structure phase analysis and X-ray fluorescence analysis (XFA) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). It was developed an equipment package for automated process of composite coatings, including control system development. Research of facial layers of molds by methods of X-ray photoelectron spectroscopy and structure phase analysis showed, that, at least, two methods of protective layers from researched, provide junction formation Ti₃Al in facial layers of mold and reducing of the layer of increased hardness on the surface of titanium castings. Getting of titanium castings of high quality without layer of increased hardness let to widen output of shaped casting of titanium alloys for air industry, medicine.

Keywords: layer of increased hardness, full factorial experiment, organic-silicon helium, nanoparticles, powders of titanium and aluminium oxide

Ссылка на статью:

Саубанов М.Н. Разработка методов и материалов для предотвращения образования слоя повышенной твердости на поверхности титановых отливок // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 16-20.

Saubanov M.N. Development of methods and materials for prevention of formation of coating of increased hardness on the surface of titanium alloy castings. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 16-20.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771: 669.13.017:620.18; 669.13.017:620.17

Полякова М.А., Извеков Ю.А.

ОПИСАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МНОГОФАЗНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА

***Аннотация.** В настоящее время использование многофазных сталей для изделий автомобилестроения является одним из перспектив развития данной отрасли промышленности. Особенностью микроструктуры, определяющей свойства конечной металлопродукции из многофазных сталей, является ее формирование или изменение при внешнем термомеханическом воздействии. В статье рассматривается возможность использования основных положений теории совместной пластической деформации разных металлов применительно к процессам термомеханической обработки многофазных сталей. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является учет вида и количественного соотношения фаз, составляющих структуру стали. Для учета доли той или иной фазы в общем объеме материала предлагается использовать понятие «фазовый коэффициент заполнения». Разработанный подход базируется на том, что многофазные стали можно представить как многокомпонентную структуру, состоящую из мягких и твердых компонент, которыми являются формирующие фазы. При этом каждая фаза имеет свои характерные свойства, которые и определяют ее способность пластически деформироваться. Получены аналитические уравнения, которые позволяют учитывать и изменение количества фаз в процессе термомеханической обработки многофазной стали, и их свойства. Разработанный подход может быть использован для проектирования технологических процессов производства металлоизделий из многофазных сталей с использованием различных методов пластической деформации.*

***Ключевые слова:** теория совместной пластической деформации разных металлов, многофазная сталь, микроструктура, фазовый состав, свойства, термомеханическая обработка*

Введение

Пластическая деформация используется не только как средство формирования формы изделия, но и как процесс управления внутренней структурой обрабатываемого металла. При правильно подобранных режимах обработки можно обеспечить выравнивание структуры, формирование благоприятной текстуры, измельчение зерна, что в конечном итоге обеспечивает необходимое сочетание прочностных и пластических свойств конечной металлопродукции [1]. Классическая теория пластической деформации основана на рассмотрении металла как однофазной однородной системы, несмотря на то, что структура стали состоит из различных фаз, например феррита и цементита [2]. Такой подход к представлению структуры стали в значительной степени упрощает описание происходящих в стали изменений при термомеханической обработке, а также широко используется в большинстве компьютерных программных продуктов, используемых для моделирования существующих процессов обработки давлением.

С начала 2000-х годов основной акцент исследований сместился в сторону обработки многофазных сталей, например DP TRIP-, Q&P-сталей и др., в которых в одной матрице присутствуют различные фазы с присущими им механическими свойствами (феррит, мартенсит, остаточный аустенит и др.) [3-5]. Такие стали можно рассматривать как естественные многокомпонентные системы, в которых внутри зерен и между фазами происходит взаимное перераспределе-

ние напряжений. Поэтому востребованные в настоящее время многофазные стали, структура которых, с одной стороны, определяется достаточно сложным химическим составом, а с другой – формируется в результате одновременного воздействия температуры и давления при обработке давлением, требуют разработки и использования принципиально новых теоретических подходов для описания и объяснения специфики их свойствообразования [6-8]. Например, в сталях типа TRIP часть аустенита превращается в мартенсит при деформации, а в сталях типа DP мягкая ферритная матрица деформируется совместно с более твердыми мартенситными включениями. Работы Bouaziz и соавт. [9], а также Sun и др. [10] показали, что при деформации многофазных сталей мартенситные включения могут «усилить» деформацию окружающей ферритной матрицы, а остаточный аустенит способен трансформироваться в мартенсит под действием напряжения, обеспечивая эффект TRIP. В таких материалах пластическая деформация протекает неравномерно, что требует более сложных теоретических расчетов и применения специальных подходов при проектировании технологических процессов их производства.

Современные модели включают учет фазовых превращений, текстур и микроструктурных механизмов упрочнения. В последние годы всё больше внимания уделяется физически обоснованным моделям, которые строятся на основе базовой структуры деформации: дислокационного упрочнения, взаимодействия фаз, трансформаций, рекристаллизации и т.д. Такие модели обеспечивают точность, особенно при описании сложных процессов термомеханической об-

работки. Однако они требуют большого объема входных данных, для проведения расчетов необходимо большое количество машинного времени.

Целью настоящего теоретического исследования является разработка подхода, позволяющего адекватно описывать процессы пластической обработки многофазных сталей при учете происходящих в них структурно-фазовых превращений.

Методы исследования

Процессы пластической обработки разных металлов описываются теорией совместной пластической деформации, основоположником которой является Г.Э. Аркулис [11, 12]. Совместная пластическая деформация разных металлов (СПДРМ) представляет собой процесс, при котором два или более материала, обладающие различными механическими свойствами, деформируются одновременно в условиях общего напряжённого состояния. Эта теория является развитием классических положений механики сплошной среды и используется для описания поведения композитов, слоистых материалов, многослойных заготовок.

Теория СПДРМ базируется на следующих аспектах: все компоненты деформируются одновременно в условиях совместности; между компонентами существует прочная связь (например, отсутствие макроскопического скольжения между слоями); распределение напряжений и деформаций зависит от упруго-пластических свойств каждого компонента; внутренние напряжения возникают в результате различий в сопротивлении деформации.

В простейшем случае можно рассмотреть совместную деформацию двух металлов А и В, связанных между собой. Если один из компонентов (например, металл А) имеет более высокое сопротивление пластической деформации, то второй (металл В) будет деформироваться в большей степени. Это приведёт к возникновению внутренних напряжений, которые компенсируют разницу в механическом поведении при приложении внешней нагрузки. В результате формируется общее напряжённо-деформированное состояние, обеспечивающее совместную работу деформируемых металлов.

Для описания происходящих процессов в СПДРМ используются уравнения равновесия, совместности деформаций и условия текучести каждого компонента. Классический подход базируется на допущении равенства деформаций в контактной зоне (условие совместности), раздельном учёте законов упрочнения для каждого металла и общем законе сохранения энергии (или внешней работы деформации).

Определение возможности использования основных положений СПДРМ для описания процессов пластической деформации многофазных сталей обусловлена сложностью их фазового состава [13]. Так, многофазные стали, такие как DP (двухфазные), TRIP (с трансформационно-индуцированным упрочнением), CP (комплексно-легированные), содержат фазы с резко

различающимися прочностными и пластическими характеристиками. Во время пластической обработки эти фазы испытывают разные уровни напряжения и деформации, но деформируются совместно, подчиняясь граничным условиям непрерывности формы и напряжений. Например, при прокатке ферритно-мартенситной стали феррит начинает деформироваться при более низких напряжениях, в то время как мартенсит уже начинает подвергаться деформации. Это приводит к напряжённо-деформированному несоответствию на границах фаз, что может вызвать локализацию пластической деформации, межфазовое растрескивание и, как результат, появление трещин в прокатываемом металле.

С этой точки зрения главной задачей обработки давлением многофазных сталей является обеспечение деформационных условий, при которых происходит пластическая совместимость фаз. Под этим понимается способность разных слоёв (или участков) материала деформироваться согласованно, без разрывов, трещин или расслоений. Кроме того, необходимо учитывать изменение фазового состава таких сталей в процессе пластической деформации, которое количественно можно оценить в виде соотношения фаз, обладающих различными свойствами.

Результаты и их обсуждение

Для подтверждения возможности применения теории СПДРМ для процессов пластической обработки многофазных сталей рассмотрим, каким образом изменяется фазовый состав при различных режимах деформационной обработки. На рис. 1 представлена микроструктура TRIP-стали (C 0,3-0,5%, Mn 2,5-4,0%, до 4,0% Si %, Al до 1%), полученной металлургическим способом.

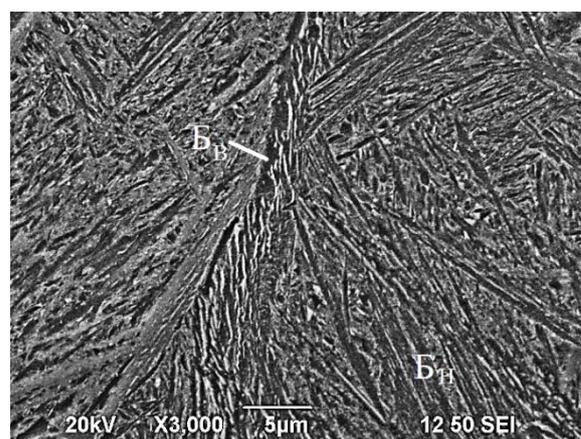


Рис. 1. Микроструктура образца TRIP-стали в недеформированном состоянии, полученной традиционной технологией металлургического производства

Микроструктура представляет собой смесь бейнита верхнего и бейнита нижнего. Иглы расположены преимущественно под углом 120° друг к другу.

После термической обработки (закалка + последующая изотермическая выдержка) происходит преобразование бейнита в мартенсит с объемной долей остаточного аустенита около 10% (рис. 2).

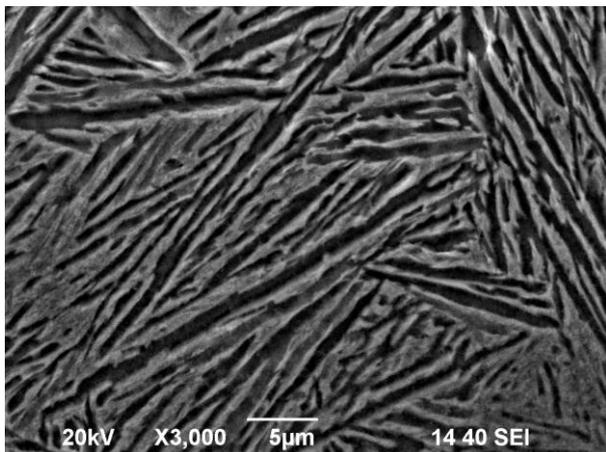


Рис. 2. Микроструктура образца TRIP-стали после закалки от температуры 760°C и последующей изотермической выдержки при температуре 400°C в течение 20 мин

В результате пластической деформации происходит изменение количественного соотношения фаз в зависимости от прикладываемой нагрузки (рис. 3).

Микроструктура представляет мартенсит, однако объемная доля остаточного аустенита уменьшается с 6,44 % (см. рис. 3, а) до 5,3% (см. рис. 3, б).

Вполне очевидно, что происходящие изменения микроструктуры будут оказывать влияние на деформационное поведение данной многофазной стали при пластической деформации.

Рассмотрим деформацию многофазной стали, микроструктура которой состоит из мягкой (М) и твердой (Т) фаз [14]. Предположим, что внешняя нагрузка распределяется между фазами пропорцио-

нально их несущей способности. Назовем долю той или иной фазы по отношению к общему объему материала фазовым коэффициентом заполнения, который обозначим через A . Тогда после деформации многофазного тела удельный объем i -й фазы металла A_i можно рассчитать по формуле

$$A_i = \frac{V_{0i} - \varepsilon_i V_{0i}}{V_0 - \varepsilon V_0}, \quad (1)$$

где V_0 и V_{0i} – изменение объема фазы до и после i -го воздействия пластической деформацией; ε и ε_i – суммарная степень деформации и степень деформации в ходе i -го воздействия пластической деформацией.

Разделив знаменатель и числитель на V_0 , получаем

$$A_i = A_{0i} \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{1 - \varepsilon} \right), \quad (2)$$

где A_{0i} – количество фазы до начала деформации.

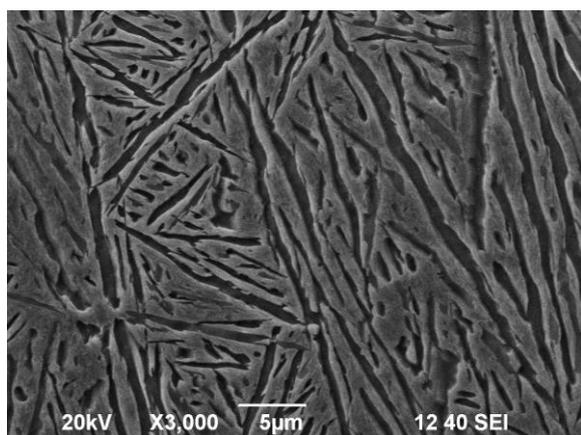
Из первого условия статики следует соотношение

$$\sigma_1 F_1 + \sigma_2 F_2 + \dots + \sigma_m F_m = \sigma_z F, \quad (3)$$

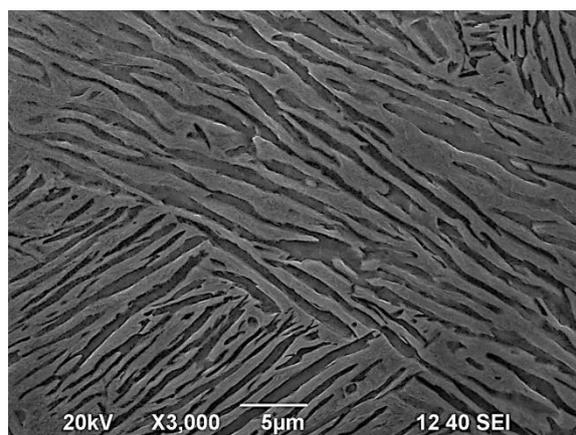
где σ_z – среднее продольное внешнее напряжение, МПа; σ_i – фазовые продольные напряжения каждой из фаз, МПа; F , F_i – площадь поперечного сечения деформируемой полосы и i -й фазы стали.

Учитывая, что при больших пластических деформациях и линейном напряженном состоянии значения σ_i равны текущему пределу текучести σ_{si} каждой фазы, получаем

$$\sigma_z = \sigma_s = A_1 \sigma_{s1} + A_2 \sigma_{s2} + \dots + A_i \sigma_{si}, \quad (4)$$



а



б

Рис. 3. Микроструктура образца TRIP-стали после термической обработки и последующей деформационной обработки с прикладываемым усилием 25 кН (а) и 53 кН (б)

Поскольку внешняя нагрузка распределяется между фазами пропорционально их несущей способности, то произведение $A_i\sigma_i$ можно представить как приведенный предел текучести, аналогично физическому пределу текучести фазы для однофазной стали [40]. Из этого следует, что для многофазной стали текучий предел текучести можно записать в следующем виде:

$$\sigma_i = \eta_i D_i, \quad (5)$$

где η_i , D_i – продольная деформация и модуль пластичности i -й фазы.

Используя условие совместной деформации, связь между внешними деформирующими напряжениями σ_z и деформацией η многофазного тела выражается так:

$$\sigma_z = \eta(A_1 D_1 + A_2 D_2 + \dots + A_m D_m) = \eta D, \quad (6)$$

где D – модуль пластичности многофазной стали, равный сумме приведенных модулей пластичности ее фаз $A_i D_i$.

Условие совместной пластической деформации многофазной стали с учетом ее фазового состава можно сформулировать следующим образом:

$$\sigma_{z1} - \sigma_{x1} = \sigma_{s1}; \sigma_{z2} - \sigma_{x2} = \sigma_{s2}; \dots; \sigma_{zm} - \sigma_{xm} = \sigma_{sm}, \quad (7)$$

где m – количество фаз в стали.

В результате преобразований получим формулу, которая описывает взаимосвязь деформирующего напряжения с изменением количественного соотношения фаз в процессе пластической деформации:

$$\sigma_z = \sum_1^m A_i \sigma_{0i} + \eta \sum_1^m A_i \theta_i = \sigma_{0z} + \eta \theta_0, \quad (8)$$

где σ_{0i} – начальный предел текучести i -й фазы; θ_i – модуль упрочнения i -й фазы; σ_{0z} – деформирующее напряжение в начальный момент равномерной деформации, равно сумме приведенных начальных пределов текучести фаз; θ_0 – общий модуль упрочнения многофазной стали.

Выводы

Традиционное теоретическое описание процессов пластической деформации базируется на представлении обрабатываемого металла как гомогенной среды. Использование теории совместной пластической деформации разных металлов позволяет адекватно описать процессы пластической деформации многофазных сталей. В данном случае каждая фаза рассматривается как отдельная структурная составляющая с присущими ей физическими свойствами.

Адаптируя основные положения теории СПДРМ для процессов термомеханической обработки многофазных сталей, появляется возможность учитывать происходящие в таких сталях фазовые превращения, результатом которых является изменение количественного соотношения фаз. Это, в свою очередь, позволяет определять уровень получаемых свойств готовой металлопродукции. Особую важность приобретают вопросы прогнозирования свойства образования многофазных сталей на этапе проектирования технологических процессов производства металлопродукции, основанных на различных видах пластической деформации, а также при отсутствии достаточного объема статистической информации.

Список источников

1. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1970. 492 с.
3. Малышевский В.А., Турчанинов И.А. Современные многофазные стали. Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 234 с.
4. Тихонов А.С., Амосов А.П. Многофазные стали нового поколения для автомобилестроения. Самара: СамГТУ, 2016. 178 с.
5. Alvarez-Armas I. Duplex stainless steels: brief history and some recent alloys // Recent Patents on Mechanical Engineering. 2008, vol. 1, pp. 51-57.
6. Grassel O., Kruger L., Frommeyer G., Meyer L.W. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development - properties - application // International Journal of Plasticity. 2000, vol. 16, pp. 1391-1409.
7. Cabrera J.M., Mateo A., Llanes L., Prado J.M., Anglada M. Hot deformation of duplex stainless steels // Journal of Materials Processing Technologies. 2003, vol. 143-144, pp. 321-325.
8. Структура стали с метастабильным аустенитом после термомеханической обработки по различным режимам / Шляхова Г.В., Орлова Д.В., Данилов В.И., Данилова Л.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2021. Т. 64. № 6 (763). С. 106-110.
9. Bouaziz O., Allain S., Scott C. et al. High strength and ductility of dual-phase steels: an overview // Materials Science and Engineering: A. 2011, vol. 528, pp. 2738-2744.
10. Sun X., Choi K.S., Liu W.N., Khaleel M.A. Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization // International Journal of Plasticity. 2009, vol. 25, pp. 1888-1909.
11. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. М.: Металлургия, 1964. 268 с.
12. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 351 с.

13. Особенности построения модели деформации многофазных сталей с учетом изменения фазового состава в процессе прокатки / Трубников Н.А., Лопатина Е.В., Полякова М.А., Голубчик Э.М. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2025. Т.1. С. 136.
14. Развитие положений теории совместной пластической деформации разных металлов при прокатке полосовой стали / Полякова М.А., Голубчик Э.М., Лопатина Е.В., Трубников Н.А. // Черные металлы. 2024. № 6 (1110). 06.2024. С. 8-13.

Сведения об авторах

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обработки материалов давлением им. М.И. Бояршинова, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Извеков Юрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pmi@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DESCRIPTION OF PLASTIC DEFORMATION OF MULTIPHASE STEELS DURING THERMODEFORMATION TREATMENT TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGE IN PHASE COMPOSITION

Polyakova Marina A. – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Materials Forming named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Izvekov Yurii A. – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Informatics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pmi@magtu.ru

Abstract. Currently, application of multiphase steels for automotive products is one of the prospects for the development of this area of industry. The peculiarity of the microstructure that determines the properties of the final metal products from multiphase steels is its formation or change under affect of external thermal deformation. The article describes the possibility of using the basic principles of the theory of Joint plastic deformation of dissimilar bodies in relation to the processes of thermal and deformation treatment of multiphase steels. A distinctive feature of the proposed approach is the consideration of the type and quantitative ratio of phases that steel structure consists of. To take into account the share of a particular phase in the total volume of material, it is proposed to use the concept of “phase filling factor”. The developed approach is based on the fact that multiphase steels can be represented as a multicomponent structure consisting of soft and hard components, which are the forming phases. Moreover, every phase has its own characteristic properties, which determine its ability to undergo plastic deformation. Analytical equations have been obtained which make it possible to take into consideration both the change in the number of phases during the process of thermal and deformation treatment of multiphase steel and their properties. The developed approach can be used to design technological processes for the manufacturing the metal products from multiphase steels using various methods of plastic deformation.

Keywords: theory of Joint plastic deformation of dissimilar bodies, multiphase steel, microstructure, phase composition, properties, thermal and deformation treatment

Ссылка на статью:

Полякова М.А., Извеков Ю.А. Описание пластической деформации многофазных сталей в процессе термомодеформационной обработки с учетом изменения фазового состава // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 21-25.
Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Description of plastic deformation of multiphase steels during thermodeformation treatment taking into account the change in phase composition. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 21-25.

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 669.018.28

Михневич А.С., Столяров А.М., Юдин Д.В.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОЙ СТАЛИ РАЗНЫХ МАРОК

Аннотация. Литейная сталь выплавлялась в дуговой сталеплавильной печи вместимостью 25 т. В работе определены механические свойства литейной стали 60 плавок стали марок 20Л, 25Л, 30Л и 35Л. Химический состав литейной стали в основном различался по содержанию в металле углерода, а отличие в содержании других элементов было незначительным. В лаборатории механических испытаний определены следующие параметры механических свойств стали: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и твердость по Бринеллю. С использованием корреляционного анализа установлена тесная взаимосвязь между параметрами свойств. Временное сопротивление оказывает наиболее сильное влияние на все остальные параметры механических свойств. Корреляционно-регрессионный анализ влияния на механические свойства стали каждого из химических элементов позволил выявить статистически значимые линейные зависимости всех параметров свойств от содержания углерода в металле. Рассчитаны значения содержания углерода, необходимые для выполнения требований стандарта по механическим свойствам. Рекомендован суженный интервал содержания углерода в выплавляемом металле: от минимального до среднего значений, рекомендуемых стандартом. Это позволит снизить расход углеродосодержащих материалов и сократить продолжительность плавки стали в ДСП.

Ключевые слова: литейная сталь, химический состав, содержание углерода, механические свойства

Литейная сталь выплавлялась в дуговой сталеплавильной печи вместимостью 25 т, оборудованной трансформатором мощностью 18 МВА. Из полученных отливок вырезались пробы для определения механических свойств металла. В работе определены механические свойства литейной стали 60 плавок: 18 (или 30% от общего количества), 10 (17%), 13 (22%) и 19 (31%) плавок стали марок 20Л, 25Л, 30Л и 35Л соответственно. Область применения стали данных марок [1-8]:

20Л – арматура, детали сварно-литых конструкций и другие детали, работающие при температуре от –40 до 450°C;

25Л – станины прокатных станов, траверсы, поршни, крышки цилиндров, плиты настольные, корпуса подшипников, детали сварно-литых конструкций и другие детали, работающие при температуре от –40 до 450°C под давлением;

30Л – фасонные отливки деталей общего машиностроения, изготавливаемые методом выплавляемых моделей;

35Л – детали с требованиями повышенной прочности и высокого сопротивления износу, работающие под действием статических и динамических нагрузок.

Усредненный химический состав литейной стали разных марок представлен в табл. 1.

Из этих данных видно, что химический состав литейной стали в основном различался по содержанию в металле углерода, а отличие в содержании других элементов было незначительным.

Таблица 1

Среднее содержание химических элементов в стали
(% по массе)

Марка стали	Химический элемент									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	
20Л	0,215	0,328	0,603	0,012	0,019	0,234	0,129	0,113	0,06	
25Л	0,265	0,357	0,650	0,011	0,021	0,231	0,135	0,108	0,05	
30Л	0,306	0,330	0,690	0,012	0,019	0,269	0,146	0,122	0,05	
35Л	0,346	0,360	0,640	0,011	0,019	0,220	0,092	0,095	0,06	

В лаборатории механических испытаний определялись следующие механические свойства стали: предел текучести (σ_T , МПа), временное сопротивление (σ_B , МПа), относительное удлинение (δ , %), относительное сужение (ψ , %), ударная вязкость (КСУ, Дж/см²), твердость по Бринеллю (НВ). Для определения этих свойств использовалось следующее оборудование: универсальная испытательная машина (рис. 1, а), прибор полуавтоматический ТБ 5004 для измерения твердости металлов по методу Бринелля (рис. 1, б), маятниковый копер РН300 (рис. 1, в).

В табл. 2 приведены средние значения механических свойств литейной стали разных марок.

В результате корреляционного анализа всех значений механических свойств была получена матрица коэффициентов парной корреляции, показанная в табл. 3.



а



б



в

Рис. 1. Вид приборов для определения механических свойств стали:

а – универсальная испытательная машина; б – прибор полуавтоматический ТБ 5004 для измерения твердости металлов по методу Бринелля; в – маятниковый копер РН300

Таблица 2

Усредненные значения механических свойств литейной стали разных марок

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
20Л	265	474	29	48	107	135
25Л	298	526	26	43	98	146
30Л	319	562	24	40	68	159
35Л	333	583	21	34	64	162

Таблица 3

Значения коэффициентов парной корреляции

Параметр	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ	σ_B , МПа
σ_T , МПа	1					
δ , %	-0,702	1				
ψ , %	-0,571	0,766	1			
КСУ, Дж/см ²	-0,596	0,647	0,597	1		
НВ	0,898	-0,703	-0,592	-0,695	1	
σ_B , МПа	0,924	-0,731	-0,644	-0,707	0,947	1

Все значения коэффициентов парной корреляции по модулю превышают критическое значение, равное 0,415 для количества данных 60 (число степени свободы равно 58) и уровня значимости ошибки 0,1%. При этом следует выделить временное сопротивление σ_B , оказывающее наиболее сильное влияние на все остальные параметры механических свойств.

Данное влияние характеризуется следующими линейными уравнениями:

$$\sigma_T = 0,643 \cdot \sigma_B - 41,37; \quad (1)$$

$$\delta = 53,71 - 0,054 \cdot \sigma_B; \quad (2)$$

$$\psi = 92,34 - 0,096 \cdot \sigma_B; \quad (3)$$

$$KCU = 273,01 - 0,353 \cdot \sigma_B; \quad (4)$$

$$HB = 0,253 \cdot \sigma_B + 15,55. \quad (5)$$

На рис. 2 показано графическое изображение зависимости (5) с наибольшим значением коэффициента парной корреляции.

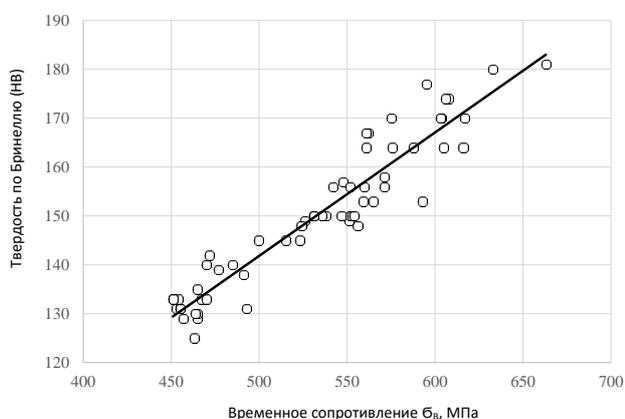


Рис. 2. Зависимость твердости по Бринеллю от временного сопротивления литейной стали

Корреляционно-регрессионный анализ влияния на механические свойства стали каждого из химических элементов позволил выявить статистически значимые линейные зависимости всех параметров свойств только от содержания углерода в металле:

$$\sigma_T = 471,44 \cdot [C] + 167,87; \quad r = 0,723; \quad (6)$$

$$\sigma_B = 729,93 \cdot [C] + 325,99; \quad r = 0,779; \quad (7)$$

$$\delta = 38,43 - 46,96 \cdot [C]; \quad r = -0,683; \quad (8)$$

$$\psi = 65,45 - 85,17 \cdot [C]; \quad r = -0,611; \quad (9)$$

$$KCU = 171,34 - 304,88 \cdot [C]; \quad r = -0,652; \quad (10)$$

$$HB = 172,65 \cdot [C] + 101,2; \quad r = 0,691. \quad (11)$$

На рис. 3 и 4 приведены графические изображения выявленных зависимостей (6)–(11).

В табл. 4 представлены требования к параметрам механических свойств литейной стали в соответствии с ГОСТ 977-88.

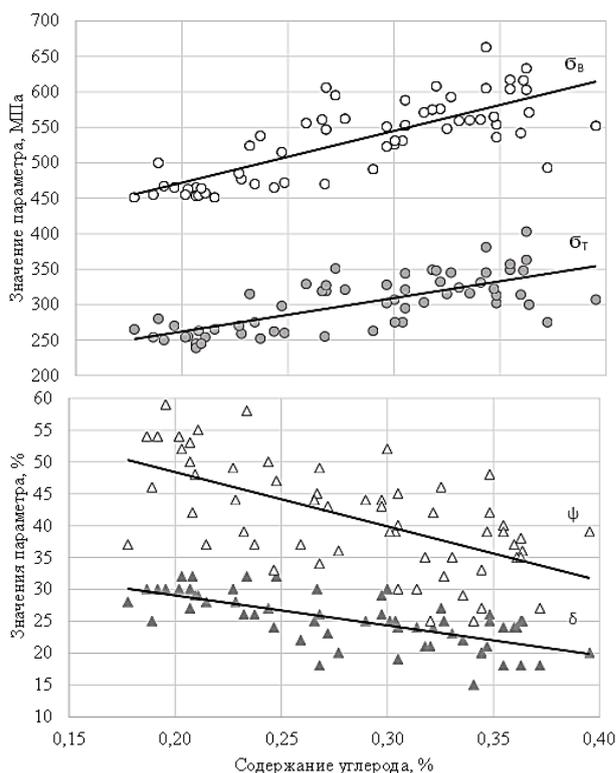


Рис. 3. Возрастающие зависимости временного сопротивления (σ_B), предела текучести (σ_T) и убывающие зависимости относительного сужения (ψ), относительного удлинения (δ) от содержания углерода в стали

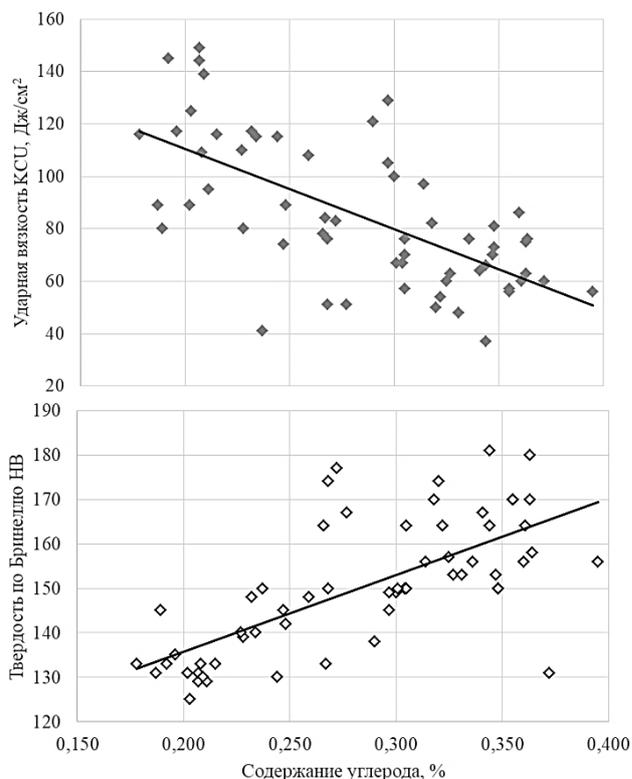


Рис. 4. Зависимости ударной вязкости и твердости по Бринеллю от содержания углерода

Таблица 4

Механические свойства литейной стали
по ГОСТ 977-88

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	НВ
20Л	≥ 216	≥ 412	≥ 22	≥ 35	≥ 49	116–144
25Л	≥ 235	≥ 441	≥ 19	≥ 30	≥ 39	121–151
30Л	≥ 255	≥ 471	≥ 17	≥ 30	≥ 34	131–157
35Л	≥ 275	≥ 491	≥ 15	≥ 25	≥ 34	137–166

Предельные значения каждого параметра механических свойств из табл. 4 были подставлены в соответствующие уравнения (6)–(11) и вычислены значения содержания углерода, необходимые для выполнения требований стандарта. Данные значения приведены в табл. 5.

Данные табл. 5 свидетельствуют о том, что для выполнения требуемого уровня механических свойств литейной стали содержание углерода в металле достаточно иметь на минимальном уровне по требованию ГОСТ 977-88. Поэтому рекомендуется получать содержание углерода в выплавляемом металле в суженном интервале: от минимального до среднего значений, рекомендуемых стандартом. Это позволит снизить расход углеродсодержащих материалов и сократить продолжительность плавки стали в ДСП.

Заключение

В работе определены механические свойства литейной стали 60 плавки стали марок 20Л, 25Л, 30Л и 35Л. Химический состав литейной стали в основном различался по содержанию в металле углерода, а отличие в содержании других элементов было незначительным. В лаборатории механических испытаний определены следующие параметры механических свойств стали: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и твердость по Бринеллю. Установлена тесная взаимосвязь между параметрами. Временное сопротивление оказывает наиболее сильное влияние на все остальные параметры механических свойств. Корреляционно-регрессионный анализ

влияния на механические свойства стали каждого из химических элементов позволил выявить статистически значимые линейные зависимости всех параметров свойств от содержания углерода в металле. Рассчитаны значения содержания углерода, необходимые для выполнения требований стандарта по механическим свойствам. Рекомендован суженный интервал содержания углерода в выплавляемом металле: от минимального до среднего значений, рекомендуемых стандартом. Это позволит снизить расход углеродсодержащих материалов и сократить продолжительность плавки стали в ДСП.

Список источников

1. Еланский Г.Н., Линчевский Б.В., Кальменев А.А. Основы производства и обработки металлов. М.: МГВМИ, 2005. 416 с.
2. Вальтер А.И., Протопопов А.А. Основы литейного производства. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 333 с.
3. Связь свойств металлов в жидком и твердом состоянии / Гельд П.В., Баум Б.А., Тягунов Г.В. и др. // Свойства расплавленных металлов. М.: Наука, 1974. С. 7-10.
4. Кондратюк С.Е. Наследственность структуры и свойств литой стали. М.: Литейное производство, 2008. №9. С. 6-10.
5. Ковшевая обработка стали с вдуванием флюидизированной извести / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, В.В. Мошкунов // Теория и технология металлургического производства. 2016. №2 (19). С. 26 – 29.
6. Ушаков С.Н. Десульфурация стали на агрегате «ковш-печь» // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2 (33). С. 4–10.
7. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / Сомнат Басу, А.М. Столяров, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 24 – 27.
8. Федоров В.Б., Шоршоров М.Х., Хакимова Д.К. Углерод и его взаимодействие с металлами. М.: Металлургия, 1978. 208 с.

Таблица 5

Расчетные значения содержания углерода (%) в литейной стали для выполнения ее механических свойств

Марка стали	σ_T	σ_B	δ	ψ	KCU	НВ	ГОСТ 977-88
20Л	$\geq 0,102$	$\geq 0,118$	$\leq 0,350$	$\leq 0,360$	$\leq 0,40$	0,086–0,248	0,17–0,25
25Л	$\geq 0,142$	$\geq 0,158$	$\leq 0,414$	$\leq 0,416$	$\leq 0,43$	0,114–0,288	0,22–0,30
30Л	$\geq 0,185$	$\geq 0,199$	$\leq 0,456$	$\leq 0,416$	$\leq 0,45$	0,173–0,323	0,27–0,35
35Л	$\geq 0,227$	$\geq 0,226$	$\leq 0,499$	$\leq 0,475$	$\leq 0,45$	0,207–0,375	0,32–0,40

Сведения об авторах

Михневич Александра Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Столяров Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий Института металлургии, машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: sam52.52@mail.ru

Юдин Данил Владиславович – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MECHANICAL PROPERTIES OF CAST STEEL OF DIFFERENT GRADES

Mikhnevich Alexandra S. – Master's student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Stolyarov Alexander M. – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metallurgy and Chemical Technology, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru

Yudin Danil V. – Master's student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstracts. Cast steel was smelted in an electric arc furnace with a capacity of 25 tons. In the work, the mechanical properties of cast steel of 60 heats of steel grades 20L, 25L, 30L and 35L are determined. The chemical composition of the cast steel differed mainly in the content of carbon in the metal, and the difference in the content of other elements was insignificant. The following parameters of mechanical properties of steel were determined in the mechanical testing laboratory: yield strength, tensile strength, relative elongation, relative contraction, impact toughness and Brinell hardness. Using correlation analysis, a close relationship was established between the property parameters. Temporal strength has the strongest effect on all other parameters of mechanical properties. Correlation and regression analysis of the influence of each chemical element on the mechanical properties of steel allowed us to identify statistically significant linear dependencies of all the parameters of the properties on the carbon content in the metal. The carbon content values necessary to meet the requirements of the standard for mechanical properties were calculated. A narrowed range of carbon content in the smelted metal is recommended: from the minimum to the average values recommended by the standard. This will reduce the consumption of carbon-containing materials and shorten the duration of steel melting in an EAF.

Keywords: cast steel, chemical composition, carbon content, mechanical properties

Ссылка на статью:

Михневич А.С., Столяров А.М., Юдин Д.В. Механические свойства литейной стали разных марок // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 26-30.

Mikhnevich A.S., Stolyarov A.M., Yudin D.V. Mechanical properties of cast steel of different grades. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 26-30.

УДК 621.791.04

Шекшеев М.А., Язвенко А.М., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г.

ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛЬНОЙ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПАРАМЕТРЫ СВАРИВАЕМОСТИ

Аннотация. В статье приведены результаты аналитических исследований влияния химического состава некоторых марок стальных проволок на параметры свариваемости и механические свойства наплавленного металла. Показано, что проволоки для сварки низкоуглеродистых, низколегированных высокопрочных сталей выполняют преимущественно из сталей на кремний-марганцевой основе с добавлением никеля, молибдена и хрома. Для улучшения характеристик металла проволок и сварных швов к базовым составам сталей добавляют микролегующие компоненты, такие как титан и ванадий. Установлено, что стали для проволок по параметрам $UCS < 30$ и $HCS < 4$ не склонны к образованию горячих трещин при сварке. Оценка трещиностойкости по параметрам углеродного эквивалента $C_{экв} > 0,45$ и показателю $P_{см} > 0,23$ показала склонность рассматриваемых сталей к холодным трещинам при сварке. Это, прежде всего, связано со сложной химической композицией сталей, которая обеспечивает необходимый комплекс механических свойств сварных соединений. Оценка прочностных свойств наплавленного металла, полученного с помощью перспективной проволоки, показала, что значение временного сопротивления достигает 1079 МПа, а предел текучести находится на уровне 788 МПа. Прогнозируемый уровень прочностных свойств превышает регламентируемый стандартами AWS A5.18 и EN ISO 14171-A примерно в 1,6–2 раза.

Ключевые слова: сварка, наплавка, сварочная проволока, сварной шов, свариваемость, трещиностойкость, углеродный эквивалент, механические свойства

Введение

В условиях политики импортозамещения возросла потребность в сварочной проволоке с эксплуатационными характеристиками на уровне требований ведущих международных стандартов (табл. 1), которая применяется для сварки высокопрочных сталей, используемых при производстве труб большого диаметра нефтегазового сортамента, в ответственных сварных конструкциях в строительстве мостов и высотных зданий, кранов, судостроении, тяжелом машиностроении и в энергетике.

Такая сварочная проволока должна обеспечивать требуемые свойства металла сварного шва, которые строго регламентируются, например, для нефтегазовых трубопроводов, а также должна быть применима для сварки новых высокопрочных сталей (временное сопротивление разрыву не менее 700 МПа) с заданным уровнем свариваемости, показателей пластичности и ударной вязкости.

Среди прочих, наиболее важным технологическим свойством является свариваемость [1, 2]. Свариваемость – это комплексная характеристика как основного, так и присадочного материала, которая зависит

Таблица 1

Классификация высокопрочной сварочной проволоки по EN ISO 16834

Марка проволоки	OK Aristorod 55	OK Aristorod 69	OK Aristorod 79	OK Aristorod 89
Классификация по EN ISO 16834	EN ISO 16834-A: G Mn3NiCrMo	EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo	EN ISO 16834-A: G Mn4Ni2CrMo	EN ISO 16834-A: G Mn4Ni2CrMo
Химический состав проволоки, %	C = 0,07-0,14 Mn = 1,3-1,8 Si = 0,60-0,80 Ni = 0,5-0,65 Cr = 0,4-0,65 Mo = 0,15-0,3 P _{max} 0,015 S _{max} 0,015	C max 0,1 Mn = 1,5-1,8 Si = 0,40-0,70 Ni = 1,2-1,6 Cr = 0,2-0,4 Mo = 0,2-0,3 V = 0,05-0,1 P _{max} 0,015 S _{max} 0,015	C = 0,08-0,12 Mn = 1,7-2,1 Si = 0,60-0,90 Ni = 1,8-2,3 Cr = 0,25-0,45 Mo = 0,45-0,65 P _{max} 0,015 S _{max} 0,018	C = 0,08-0,12 Mn = 1,6-2,1 Si = 0,60-0,90 Ni = 2,1-2,3 Cr = 0,25-0,45 Mo = 0,45-0,65 P _{max} 0,015 S _{max} 0,015
Тип сварки	G – дуговая сварка в среде защитных газов плавящимся электродом			
Наплавленный металл по EN ISO 16834	EN ISO 16834-A: G 55 4 M Mn3NiCrMo	EN ISO 16834-A: G 69 4 M Mn3Ni1CrMo	EN ISO 16834-A: G 79 4 M Mn4Ni2CrMo	EN ISO 16834-A: G 89 4 M Mn4Ni2CrMo
Защитный газ	M21 (80%Ar+20%CO ₂)			
Предел текучести наплавленного металла	Не менее 550 МПа	Не менее 690 МПа	Не менее 790 МПа	Не менее 890 МПа

от его состава и технологии производства, отражает реакцию данного материала на процесс сварки и определяет его пригодность для конкретных условий [3, 4].

На сегодняшний день ОАО «ММК-МЕТИЗ» является одним из лидеров метизной отрасли страны, имеющий многолетний опыт производства сварочной проволоки. Задача производства сварочной проволоки для сварки высокопрочных конструкций ответственного назначения была включена в программу освоения инновационных видов продукции предприятия и реализации инфраструктурных проектов крупнейших предприятий Челябинской области и Российской Федерации.

Учитывая вышеизложенное, целью настоящей работы является исследование влияния химического состава различных сталей, предназначенных для изготовления сварочной проволоки, на механические свойства наплавленного металла и параметры свариваемости.

Материалы и методы исследования

Склонность стали к образованию горячих трещин (ГТ) оценивали на основе расчета показателей трещиностойкости HCS (показатель К. Итамуры) [5] и UCS (Европейский стандарт EN 1011-2 : 2001):

$$HCS = \frac{C \cdot (S + P + Si / 25 + 0,01 \cdot Ni) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}, \quad (1)$$

$$UCS = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb + 12,3 \cdot Si - 5,4 \cdot Mn - 1. \quad (2)$$

Если параметр $HCS > 4$, то сталь считается склонной к образованию ГТ. Если параметр $UCS > 30$, то сталь также считается склонной к ГТ при сварке.

Для оценки склонности стали к образованию холодных трещин (ХТ) может быть использован комплексный параметр P_{cm} (показатель Ито-Бессии) [6]:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5 \cdot B. \quad (3)$$

Однако наиболее широкое применение для оценки свариваемости углеродистых и низколегированных сталей получил параметр углеродного эквивалента $C_{эКВ}$. Данный параметр регламентируется стандартами различных стран и организаций, при этом существует множество уравнений для определения $C_{эКВ}$. В своей работе мы использовали наиболее известные зависимости, применяемые в практике сварки.

Согласно ГОСТ 27772 – 2015 для низколегированных сталей эквивалент углерода вычисляется по формуле

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}. \quad (4)$$

Считается, что при $C_{эКВ} \geq 0,35\%$ стали потенциально склонны к образованию ХТ. При $C_{эКВ} \geq 0,40\%$

при сварке становится возможным образование закалочных структур в металле сварного соединения.

Для сталей, содержащих микролегирующие компоненты, может быть применена формула (СТО Газпром) [7]:

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + \Sigma(V + Ti + Nb)}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} + 15 \cdot B. \quad (5)$$

При $C_{эКВ} = 0,40-0,45\%$ сталь склонна к образованию ХТ, что требует изменения технологии сварки.

Метод Британской ассоциации (BWRA) также регламентирует параметр $C_{эКВ}$:

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10} + \frac{V}{10} + \frac{Ni}{15}. \quad (6)$$

При $C_{эКВ} < 0,25\%$ сталь не склонна к образованию ХТ и сваривается без подогрева; при $C_{эКВ} \leq 0,30\%$ сталь склонна к образованию ХТ и сваривается с предварительным подогревом от 50 до 125°C; при $C_{эКВ} \leq 0,35\%$ сваривается с подогревом от 50 до 175°C; при $C_{эКВ} \leq 0,40\%$ сваривается с подогревом от 75 до 200°C; при $C_{эКВ} \leq 0,45\%$ сваривается с подогревом от 100 до 225°C.

Согласно требованиям «Международного института сварки» (МИС), эквивалент углерода определяется по следующему уравнению:

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}. \quad (7)$$

Использование вышеприведенных зависимостей позволяет ориентировочно оценить склонность сталей к образованию того или иного типа трещин при сварке.

В исследованиях использовали данные химического состава катанки диаметром 8,0 мм из инновационной стали марки 10Г2СН2,5ХМ производства ООО «Златоустовский металлургический завод», которая была произведена впервые по заказу ОАО «ММК-МЕТИЗ».

Определение временного сопротивления и предела текучести наплавленного металла осуществляли расчетным методом по следующим зависимостям [8]:

– временное сопротивление разрыву σ_B , МПа:

$$\sigma_B = (4,8 + 50 \cdot C + 25,2 \cdot Mn + 17,5 \cdot Si + 23,9 \cdot Cr + 7,7 \cdot Ni + 8 \cdot W + 70 \cdot Ti + 17,6 \cdot Cu + 29 \cdot Al + 16,8 \cdot Mo) \cdot 10; \quad (8)$$

– предел текучести σ_T , МПа:

$$\sigma_T = 0,73 \cdot \sigma_B. \quad (9)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки свариваемости металла сварных швов высокопрочных трубных сталей были рассмотрены химические составы марок сталей, которые

применяют для изготовления проволоки, используемой для сварки высокопрочных сталей (табл. 2).

Анализ химического состава показал, что в рассматриваемых марках в качестве основных легирующих элементов преобладают кремний, марганец, никель, хром и молибден (рис. 1). В качестве микролегирующих добавок можно выделить добавки титана в количестве до 0,15 %.

Анализ свариваемости сталей (табл. 3), на основе решения параметрических уравнений UCS и HCS, показал (рис. 2), что рассматриваемые марки не склонны к образованию горячих трещин при сварке.

Результаты расчета параметров углеродного эк-

вивалента $C_{экв}$ и показателя Ито-Бессю $P_{см}$ (рис. 3) показали повышенную склонность рассматриваемых сталей к образованию холодных трещин при сварке и после ее окончания. Это связано со сложной химической композицией сталей, которая обеспечивает необходимый комплекс механических свойств сварных соединений. Однако при выполнении многослойных сварных швов негативный эффект может нивелироваться за счет эффекта автотермообработки, а также за счет применения дополнительных технологических операций, таких как предварительный и сопутствующий подогрев соединения [9,10].

Таблица 2

Химический состав различных сталей, предназначенных для изготовления сварочной проволоки

Марка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti	Nb	W	N	B
S3Ni1Mo	0,15	0,3	2,4	0,008	0,012	0,2	1,1	0,3	0,65	-	-	0,1	-	-	0,007	-
S3NiCrMo	0,15	0,3	1,9	0,015	0,015	0,55	2,25	0,35	0,65	-	-	0,1	-	-	-	-
S3MoTiB	0,08	0,3	1,1	0,003	0,015	0,05	0,7	0,1	0,7	-	-	0,15	-	-	0,008	0,015
Mn3Ni1CrMo	0,1	0,7	1,8	0,015	0,015	0,4	1,6	0,25	0,3	-	-	0,04	-	-	0,01	-
Mn4Ni2CrMo	0,12	0,9	2,1	0,015	0,015	0,45	2,3	0,1	0,65	-	-	0,1	-	-	0,008	-
10Г2СН2,5ХМ	0,11	0,7	1,84	0,005	0,012	0,39	2,56	0,08	0,47	0,008	0,020	0,002	-	-	0,01	-

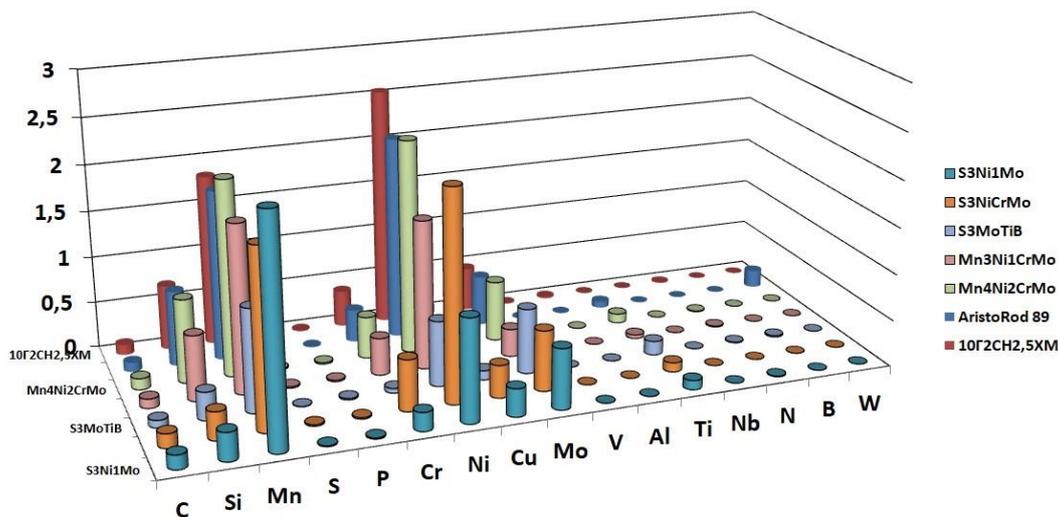


Рис. 1. Химический состав различных сталей, предназначенных для изготовления сварочной проволоки

Таблица 3

Результаты расчета параметров, характеризующих свариваемость сталей

Марка	$C_{экв}$				Показатель Ито-Бессю $P_{см}$	EN 1011-2:2001 UCS	Показатель К. Игамуры HCS
	по ГОСТ 27772-2015	по BWRA	СТО-Газпром	МИС			
S3Ni1Mo	0,82	0,43	0,83	0,81	0,37	19,27	0,80
S3NiCrMo	0,84	0,52	0,90	0,88	0,38	23,53	1,40
S3MoTiB	0,49	0,26	0,72	0,47	0,29	9,47	0,73
Mn3Ni1CrMo	0,65	0,37	0,67	0,66	0,29	7,65	1,21
Mn4Ni2CrMo	0,83	0,49	0,87	0,85	0,36	8,17	1,44
10Г2СН2,5ХМ	0,72	0,46	0,77	0,77	0,32	7,60	1,22

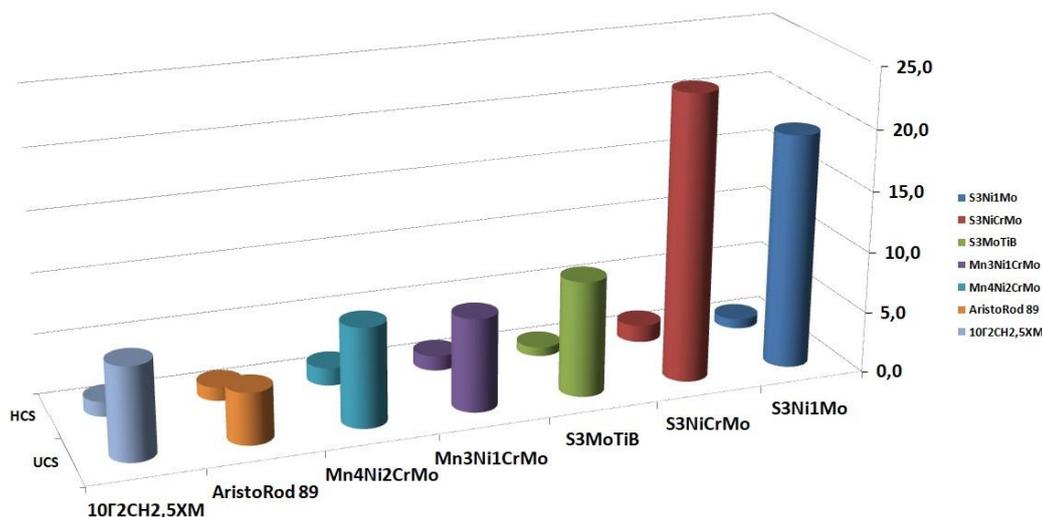


Рис. 2. Результаты расчета склонности сталей к образованию горячих трещин при сварке

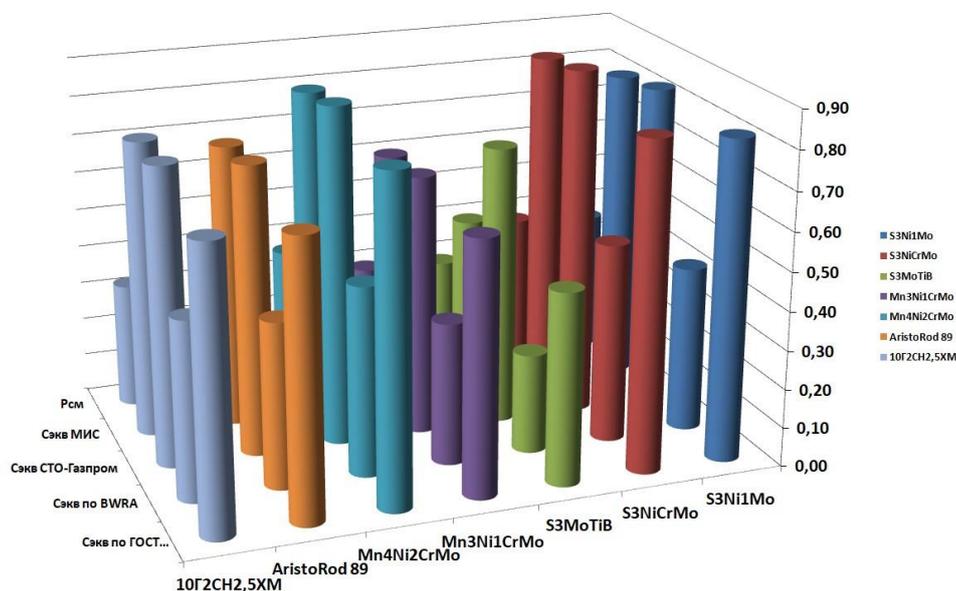


Рис. 3. Результаты расчета склонности сталей к образованию холодных трещин при сварке

Таблица 4

Прочностные характеристики металла сварных швов низколегированных высокопрочных сталей

Марка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа
S3Ni1Mo	1144	835
S3NiCrMo	1199	875
S3MoTiB	723	528
Mn3Ni1CrMo	1015	741
Mn4Ni2CrMo	1276	931
10Г2СН2,5ХМ	1079	788

На основании проведенного анализа можно заключить, что марки сталей, предназначенные для изготовления сварочной проволоки, применяемой для сварки высокопрочных сталей, обладают пониженной склонностью к образованию горячих трещин при сварке. Если учитывать параметры углеродного эквивалента, то свариваемость рассматриваемых сталей ниже и они проявляют склонность к образованию холодных трещин при сварке и после ее окончания.

Подставив значения химического состава различных марок сталей из табл. 2 в уравнения (8) и (9), получили ориентировочные данные по уровню прочностных свойств металла сварных швов, обеспечиваемых данными сталями (табл. 4).

Результаты расчетов прочностных свойств стали 10Г2СН2,5ХМ показали, что параметр $\sigma_{\text{в}} \sim 1079$ МПа, а параметр $\sigma_{\text{т}} \sim 788$ МПа.

Если опираться на требования стандарта AWS A5.28, то данная сталь по параметру $\sigma_{\text{в}}$ попадает в категорию 79 ($880 \geq \sigma_{\text{в}} \leq 1080$ МПа) и 89 ($940 \geq \sigma_{\text{в}} \leq 1180$ МПа), а по параметру $\sigma_{\text{т}}$ близка к категории 79 ($\sigma_{\text{т}} = 790$ МПа).

При учете требований стандарта ISO 16834 по прочностным свойствам данная сталь попадает в категорию ER 120 S - G.

В сравнении со сталями из табл. 2, сталь 10Г2СН2,5ХМ по прочностным свойствам наиболее близка к марке Mn3Ni1CrMo (разница в большую сторону по $\sigma_b \sim 6\%$, по $\sigma_T \sim 6\%$), которые предназначены для сварки высокопрочных низкоуглеродистых, низколегированных сталей.

Необходимо отметить, что расчеты учитывают только состав проволок, а не самого наплавленного металла, без учета выгорания элементов и подмешивания компонентов основного металла во время процессов сварки.

Выводы

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проволоки для сварки низкоуглеродистых, низколегированных высокопрочных сталей различные производители выполняют из сталей на кремний-марганцевой основе с добавлением в качестве основных легирующих элементов никеля, молибдена и хрома. Для улучшения характеристик металла проволок и сварных швов к базовым составам сталей добавляют микролегирующие компоненты, такие как титан и ванадий.

2. Анализ свариваемости сталей для проволок, предназначенных для сварки низкоуглеродистых, низколегированных высокопрочных сталей, показал, что они по параметрам UCS < 30 и HCS < 4 не склонны к образованию горячих трещин при сварке. Оценка трещиностойкости по параметрам углеродного эквивалента $C_{э\text{кв}} > 0,45$ и показателю $P_{\text{см}} > 0,23$ установила склонность рассматриваемых сталей к холодным трещинам при сварке. Это связано со сложной химической композицией сталей, которая обеспечивает необходимый комплекс механических свойств сварных соединений. Однако при выполнении многослойных сварных швов негативный эффект нивелируется за счет эффекта автотермообработки, а также за счет применения дополнительных технологических операций, таких как предварительный и сопутствующий подогрев соединения.

3. Расчетная оценка прочностных свойств наплавленного металла, полученного с помощью перспективной проволоки, показала, что значение σ_b до-

стигает 1079 МПа, σ_T находится на уровне 788 МПа. Таким образом, прогнозируемый уровень прочностных свойств металла шва превышает регламентируемый стандартами AWS A5.18 и EN ISO 14171-A примерно 1,6–2 раза.

Список источников

1. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 549 с.
2. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных газонефтепроводов / Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М., Капустин О.Е., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Москва: Логос, 2011. 304 с.
3. Шоршоров М.Х., Чернышова Т.А., Красовский А.И. Испытания металлов на свариваемость. Москва: Металлургия, 1972. 240 с.
4. Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Шекшеев М.А. Исследование свариваемости высокопрочной трубной стали класса прочности K56 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 26-30.
5. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М. Особенности подхода к оценке свариваемости низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей // Сварочное производство. 2010. №5. С. 5–11.
6. Сварка. Резка. Контроль: справочник. В 2-х т. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. М.: Машиностроение, 2004. Т.1. 624 с.
7. Исследование свариваемости высокопрочных трубных сталей категории прочности X80 / Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Капустин О.Е., Вышемирский Е.М. // Сварочное производство. 2009. №2. С. 3–7.
8. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
9. Yemelyushin A.N., Sychkov A.B., Manin V.P., Shekshyev M.A. Investigation of the structure and mechanical properties of welded joints in steels of the K56 strength grade in different welding conditions // Welding International. 2014, vol. 28, no. 1, pp. 70-74.
10. Особенности формирования структуры и свойств сварных соединений стали класса прочности K56 при дуговой сварке / Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Завалищин А.Н., Шекшеев М.А. // Черные металлы. 2013. № 8 (980). С. 18-22.

Сведения об авторах

Шекшеев Максим Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shecsheev@yandex.ru.

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

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

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

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFECTS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL WELDING WIRE ON WELDABILITY PARAMETERS

Sheksheev Maxim A. – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sheksheev@yandex.ru.

Yazvenko Andrey M. – Chief Specialist of the Technology Center of OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yazvenko.am@mmk-metiz.ru

Stolyarov Alexey Yu. – PhD (Eng.), Head of the Technology Center – Chief Technologist, OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Korchunov Alexey G. – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Abstracts. The article presents the results of analytical studies of the effect of the chemical composition of certain grades of steel wires on the weldability parameters and mechanical properties of the deposited metal. It is shown that wires for welding low-carbon, low-alloy high-strength steels are made mainly of silicon-manganese-based steels with the addition of nickel, molybdenum and chromium. To improve the metal characteristics of wires and welds, microalloying components such as titanium and vanadium are added to the basic steel compositions. It has been established that wire steels according to the parameters $UCS < 30$ and $HCS < 4$ are not prone to the formation of hot cracks during welding. The assessment of crack resistance based on the parameters of the carbon equivalent $C_{eqv} > 0.45$ and the index $P_{cm} > 0.23$ showed the tendency of the steels under consideration to cold cracks during welding. This is primarily due to the complex chemical composition of the steels, which provides the necessary set of mechanical properties of the welded joints. An assessment of the strength properties of the deposited metal obtained using a promising wire showed that the value of the temporary resistance reaches 1079 MPa, and the yield strength is at the level of 788 MPa. The predicted level of strength properties exceeds those regulated by AWS A5.18 and EN ISO 14171-A standards by about 1.6 – 2 times.

Keywords: welding, surfacing, welding wire, weld, weldability, crack resistance, carbon equivalent, mechanical properties

Ссылка на статью:

Влияния химического состава стальной сварочной проволоки на параметры свариваемости / Шекшеев М.А., Язвенко А.М., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 31-36.

Sheksheev M.A., Yazvenko A.M., Stolyarov A.Yu., Korchunov A.G. Effects of the chemical composition of steel welding wire on weldability parameters. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 31-36.

ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 665.66

Шубина М.В., Тайсина С.М.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация. При эксплуатации оборудования в металлургическом производстве применяются индустриальные масла, которые подвергаются воздействию высоких температур и давлений, контактируют с различными металлами, воздухом, водой и агрессивными средами, что приводит к ухудшению их эксплуатационных свойств. Накапливающиеся объемы отработанных масел токсичны, имеют низкую степень биоразлагаемости (10-30%) и являются опасными отходами, которые подлежат обязательному сбору и утилизации. Эффективный способ утилизации – регенерация отработанных масел адсорбционным методом для ресурсосбережения и решения экологических проблем. В связи с этим актуальным является изучение возможности регенерации отработанных индустриальных масел с применением различных сорбентов для их последующего использования при эксплуатации оборудования в металлургическом производстве. Цель проведенного исследования – восстановление качественных характеристик отработанного индустриального масла методом адсорбции до показателей, которые нормирует ГОСТ 20799-2022 «Масла индустриальные. Технические условия». Задачи исследования: разработка технологической схемы регенерации отработанных масел методом адсорбции; определение качественных характеристик масла после адсорбции; сравнительный анализ результативности разных сорбентов для регенерации отработанных индустриальных масел. Анализ результатов исследования показал следующее: адсорбционный метод регенерации отработанного индустриального масла И-40 позволяет полностью восстановить его качественные характеристики до значений по ГОСТ 20799-2022 и использовать повторно для металлургического оборудования; наилучшую адсорбционную и регенерационную способность из двух примененных сорбентов показал трепел – сорбент марки А (фракция 0,2-0,7 мм) производителя ООО «ЧелКрист»; после регенерации масла другим сорбентом – цеолитом производителя ООО «ЦЕО ГРУПП» – получены значительные отклонения от норм по кислотному числу и цвету на колориметре ЦНТ; разработанная технологическая схема регенерации отработанных масел с применением адсорбционной установки позволяет эффективно восстанавливать качественные характеристики масла для его повторного использования в производстве.

Ключевые слова: индустриальное масло, регенерация, адсорбция, сорбент, цеолит, трепел, адсорбционная установка

Введение

Индустриальные масла находят широкое и разнообразное применение при эксплуатации современной техники в металлургическом производстве в различных машинах, механизмах и другом стационарном оборудовании в качестве охлаждающих, смазочных жидкостей и основы для технологических смазок. Оборудование, используемое в металлургии, предъявляет высокие требования к смазочным материалам, поскольку работает при постоянных повышенных температурах, загрязнениях, в условиях абразивной пыльной среды и тяжелых нагрузках. Использование смазочных материалов высокого качества эффективно влияет на увеличение срока службы деталей и оборудования, что уменьшает затраты на его содержание, а также способствует сохранению благоприятной экологической обстановки [1].

Индустриальные масла должны отводить тепло от узлов трения, защищать детали от коррозии, очищать поверхности трения от загрязнения, быть уплотняющим средством, не допускать образования пены при контакте с воздухом, предотвращать образование стойких эмульсий с водой или быть способными эмульгировать, хорошо фильтроваться через филь-

трующие элементы, быть нетоксичными, не иметь неприятного запаха и т.д. В условиях металлургического производства индустриальные масла подвергаются воздействию высоких температур и давлений, контактируют с различными металлами, воздухом, водой и агрессивными средами. Поэтому при эксплуатации индустриальные масла окисляются, что приводит к повышению вязкости, кислотного числа, коррозионной активности, появлению механических примесей, которые усиливают абразивный износ и ухудшают фильтрацию, кроме того, происходит возникновение продуктов деструкции, что понижает температуру вспышки, появляется вода и др. [2].

Ежегодно увеличиваются объемы потребления смазочных материалов и, как следствие, объемы отработанных масел. Отработанные нефтепродукты токсичны, имеют невысокую степень биоразлагаемости (10-30%) и являются опасными отходами, которые подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях – уничтожению.

На современном этапе развития российской промышленности важным и актуальным является вопрос вовлечения в производство вторичного сырья, а именно отработанных масел, которые представляют собой сырьевую базу для получения ценных нефтепродуктов при надлежащей переработке [3, 4]. Наиболее эффективный способ утилизации – регене-

рация отработанных масел для полного восстановления их первоначальных свойств и последующего использования по назначению для ресурсосбережения и решения экологических проблем.

Восстановление качества отработанных промышленных масел возможно при использовании технологических операций, основанных на физических, физико-химических, химических процессах и комбинированных [5, 6]. Обычно соблюдается следующая последовательность методов: механическая операция, которая позволяет удалить из масла свободную воду и твердые загрязнения, теплофизическая операция (выпаривание, вакуумная перегонка), физико-химический процесс (коагуляция, адсорбция) [7]. Если вышеперечисленные методы не обеспечивают требуемого эффекта, то используются химические способы регенерации масел, связанные с применением более сложного оборудования и большими затратами.

Одним из эффективных методов восстановления отработанных промышленных масел является физико-химический процесс адсорбционной очистки [8]. Применение адсорбентов основано на их способности, удерживать на своей поверхности значительные количества асфальто-смолистых веществ, кислотных соединений, эфиров и других продуктов старения. Активной поверхностью твердых адсорбентов служит наружная поверхность зерен (гранул) и поверхность бесчисленных пронизывающих их тонких пор – капилляров. Во многих процессах регенерации масел применяют естественные адсорбенты (отбеливающие глины, бокситы и др.) и искусственные (силикагель, окись алюминия, алюмосиликатный катализатор).

После такой обработки становится возможным применение восстановленных промышленных масел по прямому назначению в чистом виде или в смеси со свежим маслом той же марки в соответствии с требованиями ГОСТ 20799-2022 «Масла промышленные. Технические условия» [9]. При значительных отклонениях от норм по отдельным показателям, например вязкости, кислотному числу и коксуемости, такие масла можно применять для смазки грубых механизмов и оборудования, имеющих второстепенное значение [10]. Если правильно организовать переработку

отходов, из них можно получить качественное вторичное сырье [11]. Стоимость восстановленных масел будет на 40-70% ниже, чем для свежих масел.

В связи с этим актуальным является исследование возможности регенерации отработанных промышленных масел для их последующего использования при эксплуатации оборудования в металлургическом производстве. Цель проведенного исследования – восстановление качественных характеристик (физико-химических свойств) отработанного промышленного масла методом адсорбции до показателей, которые нормирует ГОСТ 20799-2022 «Масла промышленные. Технические условия». Достижение поставленной цели осуществлялось решением следующих задач: разработка технологической схемы регенерации отработанных масел методом адсорбции; определение качественных характеристик масла после адсорбции; сравнительный анализ результативности разных сорбентов для регенерации отработанных промышленных масел.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования и определения показателей качества готового регенерированного смазочного масла применялась лабораторная и ресурсная база аккредитованной Испытательной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (ИЛ). Объектом исследования являлось отработанное промышленное масло И-40, предоставленное ООО «Уральский пружинный завод». Фактические исходные показатели качества отработанного промышленного масла И-40 в сравнении с их требуемыми значениями для свежего масла по ГОСТ 20799-2022 «Масла промышленные. Технические условия» приведены в табл. 1 [9]. По экспериментальным данным выявлено, что в испытуемом масле выше нормы оказались следующие показатели: кислотное число; содержание механических примесей; цвет на колориметре ЦНТ.

Показатели качества отработанного промышленного масла И-40 до и после регенерации определялись с применением оборудования ИЛ, представленного в табл. 2.

Таблица 1

Фактические показатели качества отработанного промышленного масла И-40 и нормы для свежего масла по ГОСТ 20799-2022

Наименование показателя	Фактический показатель	Норма для марки И-40 (ГОСТ 20799)	Метод испытания
Кинематическая вязкость при 40°C, мм ² /с	66,03	61-75	ГОСТ 33-2016
Кислотное число, мг КОН на 1г масла	2,5	не более 0,05	ГОСТ 5985-2022
Зольность, %	0,003	не более 0,005	ГОСТ 1461-2023
Массовая доля серы, %	1,1	не более 1,1	ГОСТ 32139-2024
Содержание механических примесей, %	0,06	отсутствие	ГОСТ 6370-2018
Содержание воды, %	следы	следы	ГОСТ 2477-2014
Плотность при 20°C, кг/м ³	883,5	не более 900	ГОСТ 3900-2022
Температура застывания, °C	-17	не выше -15	ГОСТ 20287-2023
Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ	8	не более 3,0	ГОСТ 20284-1974
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °C	238	не ниже 220	ГОСТ 4333-2021

Испытательное оборудование и средства измерений, используемые для определения показателей качества индустриального масла

Наименование показателя	Испытательное оборудование и средства измерений
Кинематическая вязкость при 40°C, мм ² /с	Вискозиметр капиллярный ВПЖ-4 Ø 0,82
	Вискозиметр капиллярный ВПЖ-2 Ø 0,99
Кислотное число, мгКОН на 1 г масла	Иономер лабораторный И-160
Зольность, %	Печь электрокамерная зуботехническая для нагрева литейных форм ЭКПС-10
Массовая доля серы, %	Анализатор рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный серы в нефти и нефтепродуктах Спектроскан S
Содержание механических примесей, %	Насос, колба Бунзена, фильтровальная бумага
Содержание воды, %	Аппарат количественного определения воды в нефтепродуктах типа АКОВ-10
Плотность при 20°C, кг/м ³	Ареометр АН (860 - 890 кг/м ³)
Температура застывания, °С	Аппарат лабораторный для определения температур текучести и застывания нефтепродуктов ЛАЗ-93М
Вспомогательные средства измерений	Весы лабораторные электронные ВЛ-210
	Весы лабораторные электронные ВЛТЭ-500
	Секундомер механический СОПр-2а-3-000
	Секундомер механический СОПр-2а-3-000
	Термометр стеклянный для испытания нефтепродуктов ТИН 5-3 (0...+50°C)

Для регенерации отработанного индустриального масла И-40 при проведении исследования применялись два сорбента:

1 – цеолит активированный осадочный (фракция 0,2-1,0мм), производитель ООО «ЦЕО ГРУПП»;

2 – трепел, сорбент марки А (фракция 0,2-0,7 мм), производитель ООО «ЧелКрист».

Для проведения процесса адсорбции использовали установку, собранную в условиях ИЛ: в сухую, чистую делительную воронку засыпали сорбент и заливали нагретый до 60°C испытуемый материал, через отводную трубку в мерный стакан поступало отрегенированное индустриальное масло. Наглядно процесс адсорбции отработанного индустриального масла представлен на рис. 1. По мере пропитывания сорбента наблюдалось изменение его цвета по высоте. По окончании процесса адсорбции испытуемый материал был отфильтрован при помощи фильтровальной бумаги для удаления частичек сорбента. Испытания проводились с разными сорбентами, представленными выше.



Рис. 1. Пропитывание сорбента при адсорбции отработанного индустриального масла

Результаты и их обсуждение

Проведенное исследование позволило разработать технологическую схему регенерации отработанных масел методом адсорбции с применением адсорбционной установки, представленной на рис. 2. Технологическая схема процесса адсорбции включает следующие этапы. Начало процесса происходит путём смачивания сорбента отработанным маслом из расходного резервуара 3 под давлением 0,3-0,7 атм. Процесс смачивания сорбента можно оценить путем открытия сливного крана адсорбционной колонны после приёмника-накопителя 11, где можно увидеть процесс очистки отработанного индустриального масла по изменению цвета масла. Далее, повышая давление до 1,5-3,0 атм в зависимости от загрязнённости и вязкости изначального масла, начинается процесс адсорбции.

Масло из расходного резервуара 3 (рис. 2) подается в адсорбционную колонну при помощи шестеренчатого насоса (НШ-10) 6 путем разбрызгивания через лейку 8, чтобы избежать нарушения слоя сорбента. Для индустриального масла марки И-40 используется сорбент фракцией 0,2-0,7 мм. Внизу адсорбционной колонны установлен сетчатый фильтр 10 диаметром 0,16 мкм, который фильтрует регенированное масло от сорбента в приемник-накопитель 11. Из приёмника-накопителя очищенное индустриальное масло поступает в резервуар для хранения. Скорость поглощения адсорбентом продуктов окислительного старения и других примесей зависит от вязкости очищаемого масла (чем больше вязкость, тем меньше скорость адсорбции) и от степени измельчения адсорбента.

Результаты определения качественных характеристик регенированного масла, полученного после адсорбции с применением двух разных сорбентов, представлены в табл. 3.

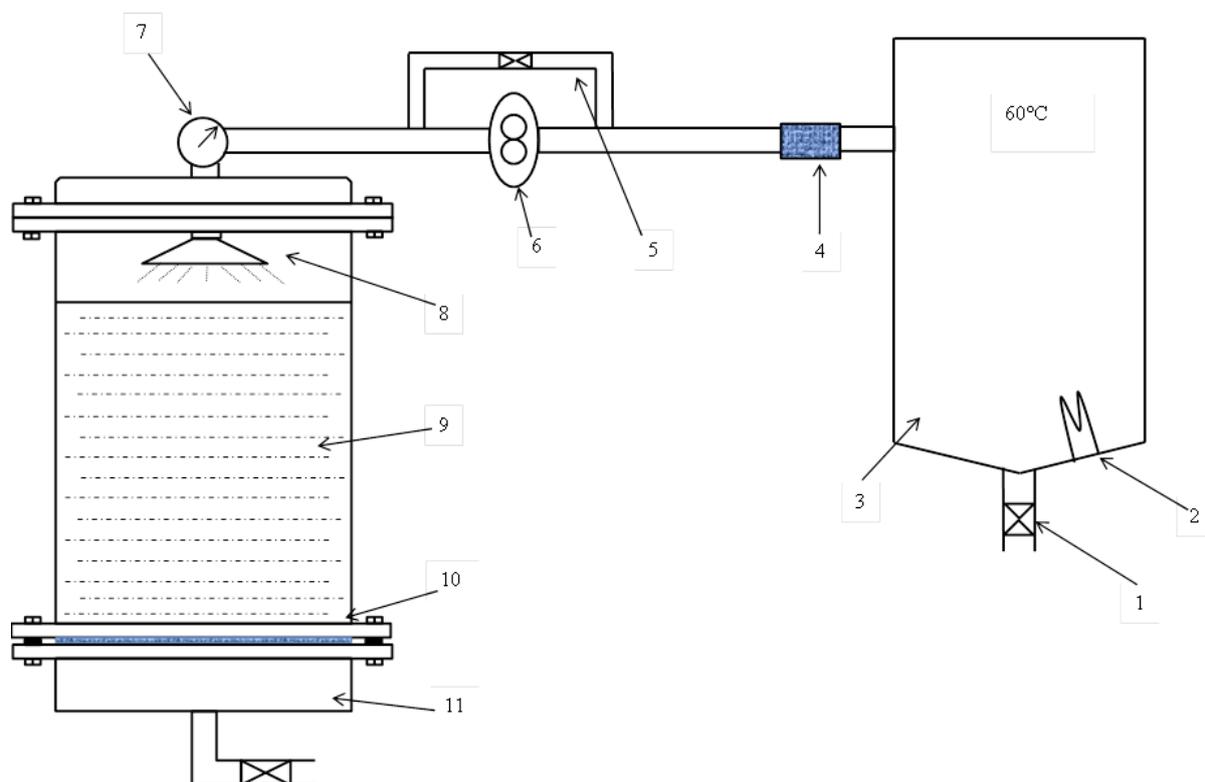


Рис. 2. Адсорбционная установка:

- 1 – сливной кран; 2 – нагревательный элемент; 3 – расходный резервуар; 4 – сетчатый фильтр;
5 – байпас; 6 – насос; 7 – манометр; 8 – лейка для равномерного распределения; 9 – сорбент;
10 – сетчатый фильтр; 11 – приёмник-накопитель

Таблица 3

Показатели качества регенерированного промышленного масла после применения разных сорбентов и нормы для свежего масла по ГОСТ 20799-2022

Наименование показателя	Норма для марки И-40 (ГОСТ 20799)	Цеолит активированный осадочный, производитель ООО «ЦЕО ГРУПП»	Трепел, сорбент марки А, производитель ООО «ЧелКрист»
Кинематическая вязкость при 40°C, мм ² /с	61-75	62,34	61,32
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	не более 0,05	0,08	0,02
Зольность, %	не более 0,005	0,003	0,002
Массовая доля серы, %	не более 1,1	0,927	0,932
Содержание механических примесей, %	отсутствие	отсутствие	отсутствие
Содержание воды, %	следы	отсутствие	отсутствие
Плотность при 20°C, кг/м ³	не более 900	881,6	881,6
Температура застывания, °C	не выше -15	-17	-19
Цвет на колориметре ЦНТ, единиц ЦНТ	не более 3,0	7	2,5
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °C	не ниже 220	240	244

Сорбенты, используемые для восстановления качества отработанного промышленного масла, положительно повлияли на его характеристики, приближая их к нормативным значениям. Сравнительный анализ результативности разных сорбентов для регенерации отработанных промышленных масел показал большую адсорбционную эффективность трепела – сорбента марки А от производителя ООО «ЧелКрист». Этот сорбент обеспечил полное восстановление отработан-

ного масла до нормативных характеристик свежего масла И-40 по ГОСТ 20799. Применение этого сорбента улучшило ряд показателей качества масла:

- плотность при 20°C уменьшилась на 1,9 кг/м³;
- кинематическая вязкость при 40°C уменьшилась на 4,71 мм²/с;
- кислотное число уменьшилось на 2,48 мг КОН на 1 г масла;
- цвет снизился на 5,5 единиц ЦНТ.

Вместе с тем второй сорбент – цеолит – не обеспечил восстановление двух показателей качества масла – кислотное число и цвет на колориметре ЦНТ – до нормативных значений. Кислотное число характеризует наличие в масле кислотных компонентов (элементы присадок, продукты сгорания, продукты окисления), отвечает за коррозионную активность и срок службы масла. Цвет визуально характеризует степень окисленности масла, а также оценивает качество и товарный вид. Цвет масла, полученного в результате регенерации после применения двух разных сорбентов, представлен на рис. 3 и показывает качественные преимущества регенерированного масла после адсорбции сорбентом марки А от производителя ООО «ЧелКрист».



Рис. 3. Цвет регенерированного промышленного масла после разных сорбентов (слева направо: исходное отработанное промышленное масло И-40; масло, регенерированное цеолитом, производитель ООО «ЦЕО ГРУПП»; масло, регенерированное трепелом - сорбентом марки А, производитель ООО «ЧелКрист»)

Заключение

В результате проведенных исследований возможности регенерации отработанных промышленных масел для их последующего использования при эксплуатации оборудования в металлургическом производстве можно сделать следующие выводы:

– адсорбционный метод регенерации отработанного промышленного масла И-40 позволяет полностью восстановить его качественные характеристики до нормированных значений по ГОСТ 20799-2022 «Масла промышленные. Технические условия» и применять регенерированное масло по прямому назначению для металлургического оборудования в чистом виде или в смеси со свежим маслом той же марки;

– наилучшую адсорбционную и регенерационную способность из двух примененных сорбентов показал трепел – сорбент марки А (фракция 0,2-0,7 мм) производителя ООО «ЧелКрист»; после регенерации масла другим сорбентом – цеолитом производителя ООО «ЦЕО ГРУПП» получены значительные откло-

нения от норм по отдельным показателям (кислотное число и цвет на колориметре ЦНТ);

– разработанная технологическая схема регенерации отработанных масел методом адсорбции с применением адсорбционной установки позволяет эффективно восстанавливать качественные характеристики (физико-химические свойства) отработанного промышленного масла для его повторного использования в производстве, обеспечивая ресурсосбережение и решение экологических проблем.

Список источников

1. Корячкин В.П. Реологические характеристики смазок // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. №7. С.25-28.
2. Утаев С.А. Результаты расчета изменения концентрации загрязнителя и щелочности моторных масел газовых двигателей // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90. №3. С. 265-272. doi: 10.17816/0321-4443-321243.
3. Юсевич А.И., Грушова Е.И., Куис О.В. Вторичные виды сырья в технологии органического синтеза: учеб. пособие для студентов специальности «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий». Минск : БГТУ, 2012. 164 с.
4. Шубина М.В., Махоткина Е.С., Тайсина С.М. Актуальность регенерации минеральных масел // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 81-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. Т. 1. С. 132.
5. Регенерация отработанных минеральных масел / Петрик П.Т., Афанасьев Ю.О., Богомолов А.Р., Дворовенко И.В., Богомолов А.А. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. №3 (47). С. 87-89.
6. Пахотин Н.Е., Осадчий Ю.П., Пахотина И.Н. Регенерация отработанных моторных масел с использованием наномембран // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 7 (15). С.63-67.
7. Чарыков В.И. Зуев В.С., Маянцев А.В. Ресурсосберегающая технология и технические средства возобновления эксплуатационных свойств отработанных моторных масел // Аграрный вестник Урала. 2008. № 6 (48). С.79-82.
8. Шубина М.В., Махоткина Е.С., Тайсина С.М. Регенерация промышленных масел методом адсорбции // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 82-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2024. Т. 1. С. 149.
9. ГОСТ 20799-2022. Масла промышленные. Технические условия.
10. Адсорбционная очистка отработанного трансформаторного масла с использованием промышленных монтмориллонитсодержащих сорбентов / Коваль Е.О., Богомолов М.С., Майер Э.А., Бондале-

тов В.Г. // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т.310. № 3. С.86-89.
11. Зачиняев Я.В., Зачиняева А.В. Восстановление качества отработанных смазочных масел с целью их

повторного использования. Текст : электронный // NovaInfo, 2022. № 134. С. 10-13. URL: <https://novainfo.ru/article/19468>.

Сведения об авторах

Шубина Марианна Вячеславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shubina_mar@mail.ru

Тайсина Светлана Михайловна – инженер Испытательной лаборатории, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

REGENERATION OF WASTE INDUSTRIAL OILS FOR USE IN METALLURGICAL PRODUCTION

Shubina Marianna V. – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technology Chair, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shubina_mar@mail.ru.

Taysina Svetlana M. – Engineer of Testing Laboratory, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. When the equipment is operated in metallurgical production, industrial oils are used. The exposure to high temperatures, pressures, various metals, air, water and aggressive environments leads to a deterioration in their operational properties. The accumulated volumes of waste oils are toxic, have a low degree of biodegradability (10-30%) and are hazardous waste that must be collected and disposed. An effective disposal method is the regeneration of the waste oil using the adsorption method to save resources and solve environmental problems. In this regard, it is relevant to study the possibility of regenerating waste industrial oils using various sorbents for their subsequent use in the operation of equipment in metallurgical production. The study purpose is to restore the quality characteristics of waste industrial oil by adsorption to the indicators standardized by GOST 20799-2022 «Industrial oils. Technical conditions». The study objectives: development of technological scheme for waste oil regeneration by the adsorption method; determination of the oil quality characteristics after adsorption; comparative analysis of the efficiency of different sorbents for waste industrial oil regeneration. The study result analysis showed the following: the adsorption regeneration method for waste industrial oil I-40 allows to completely restore its quality characteristics to the values according to GOST 20799-2022 and reuse it for metallurgical equipment; the best adsorption and regeneration capacity of the two sorbents used was demonstrated by trepel, a sorbent type A (fraction 0,2-0,7 mm) manufactured by LLC «ChelKrist»; after the oil regeneration with another sorbent – zeolite manufactured by LLC «TSEO GRUPP», significant deviations from the standards for acid number and color on colorimeter TsNT were obtained; the developed technological scheme for the waste oil regeneration using an adsorption installation allows for the effective restoration of the oil quality characteristics for its reuse in production.

Keywords: industrial oil, regeneration, adsorption, sorbent, zeolite, trepel, adsorption facility

Ссылка на статью:

Шубина М.В., Тайсина С.М. Регенерация отработанных промышленных масел для применения в металлургическом производстве // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 37-42.
Shubina M.V., Taysina S.M. Regeneration of waste industrial oils for use in metallurgical production. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 37-42.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемые коллеги!

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

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

Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

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

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

1. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Determination of the length to point of solidification in strands of Peritectic Low Alloyed steels for pipes with using “Mini whale” effect. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo 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