

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 3 (34) 2020

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). 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:

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

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.
Ченстоховского технологического
университета, Польша

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

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

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 материаловедения
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
д-р техн. наук

Научный редактор:

Н.Ш. Тютряков – 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», 2020

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: ТТaPEoMP@ 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 29.09.2020. Заказ 248. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 3 (34) 2020

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:

K.N. Vdovin – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

S.V. Denisov – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

A.N. Emelyushin – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical 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

A.A. Popov – D.Sc., Professor,
Institution of Higher Professional Education
«Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N.Yeltsin»

I.Y. Illarionov – D.Sc., Professor,
Chuvash State University

V.M. Salganik – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

A.A. Kazakov - D.Sc., Associate Professor,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic 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”, 2020

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

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

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

Editorship address:

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.
E-mail: TTPeOMP@magtu.ru; tmp@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 29.09.2020. Order 248. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Соколов И.Л., Соколова Е.В. ОСОБЕННОСТИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ, НИЗКОКРЕМНИСТОЙ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ «КОВШ-ПЕЧЬ»	4
Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Паньчев А.А., Шаповалов А.Н. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОКОМКОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ В УСЛОВИЯХ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ».....	8
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	14
Нгуен З.К., Ефремов Д.Б. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПО СТЕПЕНЯМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ-ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЭКСПАНДИРОВАНИИ	14
Барышникова А.М., Барышников М.П., Носов Л.В. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СХЕМЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ.....	21
Леушин И.О., Романов А.С., Леушина Л.И., Явтушенко П.М. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАПСУЛ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ.....	26
Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г., Тандон П., Кожемякина А.Е. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ПРОКАТКИ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	31
МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	37
Куренкова Т.П., Кухаренко М.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ НА УСТАЛОСТНУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ МЕТАЛЛОКОРДА.....	37

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS.....	4
Sokolov I.L., Sokolova E.V. PECULIARITIES OF DESULFURIZATION OF LOW-CARBON, LOW-SILICON STEEL AT LADLE-FURNACE UNIT.....	4
Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. PREDICTION RESULTS PELLETIZING SINTER BURDEN AT JSC «URAL STEEL»	8
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....	14
Nguyen Duy Cuong, Efremov D.B. MATHEMATICAL SIMULATION FOR QUALITY CLASSIFICATIONS OF LARGE DIAMETER PIPES BY THE DEGREES OF UNEVEN DISTRIBUTION OF STRESS-STRAIN DURING EXPANDING.....	14
Baryshnikova A. M., Baryshnikov M.P., Nosov L.V. DEVELOPMENT OF PRODUCTION TECHNOLOGY FOR POLYMER COATED WIRE BASED ON THE STUDY OF THE STRESS STATE SCHEME IN THE PROCESS OF DRAWING	21
Leushin I.O., Romanof A.S., Leushina L.I., Yavtushenko P.M. CONSTRUCTION ELEMENTS OF CAPSULES FOR HOT ISOSTATIC PRESSURE OF METAL POWDERS: MODERN TRENDS.....	26
Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pivovarova K.G., Tandon P., Kozhemiakina A.E. FEATURES OF ACCUMULATIVE ROLL BONDING OF MULTILAYER METAL MATERIALS	36
MATERIAL SCIENCE AND THERMAL TREATMENT OF METALS AND ALLOYS	37
Kurenkova T.P., Kukharensko M.A. STUDY OF STEEL QUALITY EFFECT ON THE FATIGUE STRENGTH OF STEEL CORD.....	37

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.184.046.546.2

Соколов И.Л., Соколова Е.В.

ОСОБЕННОСТИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ, НИЗКОКРЕМНИСТОЙ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ «КОВШ-ПЕЧЬ»

Аннотация. Вопрос десульфурации низкокремнистых сталей на агрегате «ковш-печь» является актуальным. Трудность процесса десульфурации этих марок обуславливается тем, что после раскисления металла алюминиевой катанкой окисленность шлака остается по-прежнему высока, что, в свою очередь, препятствует процессу обессеривания. А при дальнейшем раскислении получается стекловидный шлак, который также негативно влияет на процесс. В статье предлагается совершенствование технологии десульфурации низкокремнистых сталей в условиях ККЦ ПАО «ММК». Было подтверждено, что успех десульфурации стали напрямую зависит от степени раскисленности шлака, которую визуально можно оценить по качеству поверхности шлака. Также необходимо для сохранения жидкоподвижности шлака рационально распределять подачу извести по всему времени обработки. Для ограничения роста содержания кремния в стали необходимо оценить наличие конверторного шлака в сталеразливочном ковше на начальном этапе обработки.

Ключевые слова: десульфурация, низкокремнистые стали, агрегат «ковш-печь», «белый» шлак.

Десульфурация стали относится к наиболее важным процессам, которые влияют на качество металла [1]. В настоящее время низкое содержание серы в металле во многом обеспечивает обработка на агрегате «ковш-печь» (АКП). Вопросом повышения эффективности процесса десульфурации на АКП занимались многие авторы [2-8]. И сейчас эта тема остается весьма актуальной.

Интерес представляет десульфурация низкоуглеродистых, низкокремнистых сталей на агрегате «ковш-печь». Снижение серы в такой стали положительно влияет как на структуру металла, так и на его механические свойства. Листовой прокат из них используется для изготовления деталей методом холодной штамповки со сложной и особо сложной вытяжкой. Эти стали сочетают высокие показатели пластичности с хорошей прочностью и используются для производства деталей кузовов автомобилей [9].

Такие стали входят в сортамент ПАО «ММК». В табл. 1 приведен химический состав некоторых производимых на этом предприятии сталей такого типа.

Трудность процесса десульфурации этих марок обуславливается тем, что после раскисления металла алюминиевой катанкой окисленность шлака остается по-прежнему высока (8-10%), что, в свою очередь,

препятствует процессу глубокой десульфурации. А при дальнейшем раскислении получается стекловидный шлак, который также негативно влияет на процесс. Также необходимо отметить, что не всегда удается удержать кремний в заданных маркой пределах.

Как известно, одним из условий десульфурации металла является глубокое раскисление шлака, его низкая окисленность. Характер зависимости величины коэффициента распределения серы между шлаком и металлом от содержания (FeO) показан на рис. 1.

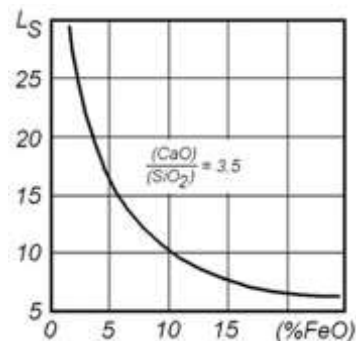


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения серы между шлаком и металлом от содержания FeO в шлаке

Таблица 1

Химический состав сталей с низким содержанием углерода и кремния

Марка стали	Массовая доля элементов, в диапазоне или не более %									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	N	Al
08Ю	0,02-0,04	0,01	0,15-0,25	0,020	0,015	не более 0,10			0,007	0,03-0,06
A424	0,02-0,05	0,01	0,15-0,25	0,020	0,015	не более 0,10			0,007	0,03-0,06
DC05	0,02-0,04	0,01	0,15-0,25	0,012	0,015	не более 0,09			0,006	0,04-0,07
DC06	0,004	0,01	0,10-0,18	0,012	0,012	н/б 0,03	н/б 0,03	н/б 0,05	0,006	0,03-0,06

© Соколов И.Л., Соколова Е.В., 2020

Важным моментом в известных технологиях обессеривания является получение так называемого «белого» шлака. На практике светло-желтый цвет шлака означает, что он нормально раскислен, а глубокая десульфурация будет обеспечена. Массовая доля (FeO)+(MnO) при этом должна составлять менее 1,5%. Однако важное значение имеет оценка состояния поверхности шлака. В табл. 2 представлены критерии визуального анализа состава ковшевого шлака и рекомендации по его корректировке.

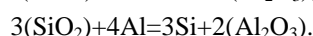
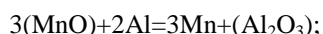
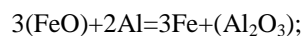
Таблица 2

Критерии визуального анализа состава ковшевого шлака и рекомендации по его корректировке

1. По цвету	
«Черный, темно-серый»	Массовая доля (FeO)+(MnO) более 2%. Шлак необходимо дополнительно раскислить Al
«Серый»	Массовая доля (FeO)+(MnO)= 1,5 – 2%. Необходимо дальнейшее раскисление шлака Al
«Белый» или «светло-желтый»	Шлак нормально раскислен (FeO)+(MnO) менее 1,5%. Светло-желтый цвет указывает, что десульфурация прошла
«Зеленый»	Шлак имеет повышенное содержание оксида хрома (Cr ₂ O ₃)
2. По состоянию поверхности	
Матовая и гладкая	Шлак требуемого состава
Зеркальная, (очень гладкая) и тонкая	Высокая доля (SiO ₂ /Al ₂ O ₃). Необходима добавка извести порциями по 0,4 кг/т
Гладкая и толстая	В холодном состоянии шлак должен распадаться. Если он не распадается, то высока доля (Al ₂ O ₃). Необходима добавка порций извести по 0,4 кг/т
Шероховатая / неровная	Высокая доля (CaO). Если имеются нерастворенные частицы извести, то необходима добавка песка (SiO ₂) и глиноземаосодержащего материала (Al ₂ O ₃) порциями не более 0,1 кг/т

При раскислении катанкой растет оксид алюминия в шлаке, соответственно, получается зеркальная гладкая поверхность, что, в свою очередь, негативно влияет на проведение десульфурации. Задача получить матовую и гладкую поверхность шлака.

Протекают следующие реакции:



На рис. 2 представлен пример подобного конечного шлака. Поверхность – гладкая и матовая. По толщине куска можно сделать вывод, что шлак был достаточно жидкоподвижен, а цвет говорит об успешной десульфурации.



Рис. 2. Шлак с матовой и гладкой поверхностью

Основываясь на промышленном опыте, для повышения эффективности процесса десульфурации предлагается следующее:

1. На начальном этапе проводить раскисление гранулами АВ-87 в количестве 100-150 кг.

2. Дальнейшее раскисление проводить катанкой АВК с одновременной присадкой извести порциями 250-350 кг до получения гладкой матовой поверхности шлака.

3. Постоянный визуальный контроль за цветом и качеством поверхности шлака.

Необходимо отметить, что получение матовой поверхности на начальном этапе раскисления, соответствует наличию конверторного шлака в ковше. В этом случае становится проблематичным сдерживать прирост кремния и фосфора.

С учетом вышеизложенных предложений на агрегате «ковш-печь» была проведена обработка опытной плавки. На рис. 3 представлено изменение содержания алюминия и кремния по ходу обработки. Из рисунка видно, что работа по данной схеме не только позволяет повысить эффективность десульфурации (удалось снизить серу с 0,02 до 0,009%), но и удерживать содержание кремния в заданных пределах (0,008%). Необходимо отметить, что процесс начинается еще при «черном» шлаке, а именно при сумме оксидов железа и марганца 5-6%. А получение «белого» шлака целесообразно только к концу обработки, в отдельных случаях необходимо остановить процесс раскисления на уровне 2-3%, в зависимости от интенсивности роста содержания кремния.

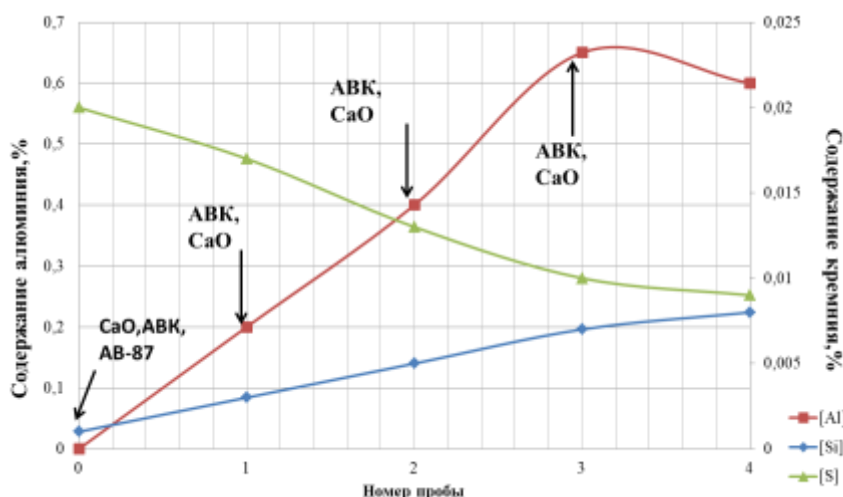


Рис. 3. Изменение содержания алюминия и кремния по ходу обработки стали марки 08Ю на агрегате «печь-ковш»

Таким образом, успех десульфурации напрямую зависит от шлака и его характеристик. Поэтому необходимо: получить низкое содержание оксида кремния в шлаке (менее 4%), соблюдать соотношение $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3 = 2 \dots 2,5$, содержание $\text{FeO} + \text{MnO} = 4 \dots 6\%$ в середине процесса десульфурации.

Еще одно условие успешной десульфурации – распределение порций извести по всей продолжительности обработки для сохранения жидкоподвижности шлака. Также нужно отметить, что для удержания содержания кремния необходимо сделать выводы о наличии конверторного шлака на начальном этапе обработки.

Список литературы

1. Остроушко А. В. Повышение эффективности десульфурации стали печным шлаком при выпуске из электродуговых печей // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 2000. №10.
2. Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарёв А.Ф. Внепечная обработка стали: учебник для вузов. М.: МИСиС, 1995. 256 с.
3. Кудрин В.А. Внепечная обработка чугуна и стали. М.: Металлургия, 1992. 336 с.

4. Лузгин В.П., Сёмин А.Е., Комолова О.А. Теория и технология металлургии стали. Внепечная обработка стали: учебное пособие. М.: МИСиС, 2010. 72 с. ISBN 978-5-87623-346-2.
5. Važan Jiří. Iron and Steelmaking (Study Support) Ostrava: Technical University of Ostrava, 2015. 135 p.
6. Ковшовая десульфурация конвертерной трубной низкосернистой стали / Ушаков С.Н., Бигеев В.А., Столяров А.М., Потапова М.В. // Металлург. 2018. № 7. С. 50-53.
7. Повышение эффективности десульфурации на установках «ковш-печь» при обработке стали с низким содержанием кремния / Храпов Г.А., Шиловских О.Ю., Тюленев Е.Н., Долгих Ю.Н. // Сталь. 2016. № 3. С. 12-13.
8. Desulfurization of pig iron and steel / Yugov P.I., Romberg A., Yang D. // Metallurgist. 2000. T. 44. № 11-12. С. 556-559.
9. Изменение содержания шлакообразующих элементов по ходу ковшевой обработки стали с регламентированным содержанием фосфора / Соколова Е.В., Бигеев В.А. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. № 1. С. 46-50.

Сведения об авторах

Соколов Иван Леонидович – совместитель кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Соколова Екатерина Владиславовна – аспирант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

PECULIARITIES OF DESULFURIZATION OF LOW-CARBON, LOW-SILICON STEEL AT LADLE-FURNACE UNIT

Sokolov Ivan L. – Moonlighter, Dpt. “Metallurgy and chemical technologies”, Institute of metallurgy, machine-building and material processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sokolova Ekaterina V. – Postgraduate, Dpt. “Metallurgy and chemical technologies”, Institute of metallurgy, machine-building and material processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. *Desulfurization of low-silicon steels at the ladle furnace is a topical issue. The difficulty of the desulfurization process for these grades is due to the fact that after the metal is deoxidized with aluminum wire rod, the oxidation of the slag remains high as before, which in turn interferes with the desulfurization process. And with further deoxidation, a glassy slag is obtained, which also negatively affects the process. The article proposes to improve the technology of desulfurization of low-silicon steels in the conditions of the oxygen-converter shop of the Public Joint Stock Company "Magnitogorsk Metallurgical Plant". It was confirmed that the success of steel desulfurization directly depends on the degree of slag deoxidation, which can be visually assessed by the quality of the slag surface. It is also necessary to rationally distribute the supply of lime throughout the processing time to maintain the fluidity of the slag. To limit the growth of silicon content in steel, it is necessary to assess the presence of converter slag in the steel-pouring ladle at the initial stage of processing.*

Key words: *desulfurization, low-silicon steels, ladle furnace unit, “white” slag.*

Ссылка на статью:

Соколов И.Л., Соколова Е.В. Особенности десульфурации низкоуглеродистых, низкокремнистой стали на агрегате «ковш-печь» // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3 (34). С. 4-7.

Sokolov I.L., Sokolova E.V. Peculiarities of desulfurization of low-carbon, low-silicon steel at ladle-furnace unit. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 4-7.

УДК 622.788.36

Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОКОМКОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ В УСЛОВИЯХ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Аннотация. Представлены результаты эксперимента по исследованию эффективности окомкования в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь», который заключался в отборе проб агломерационной шихты до и после окомкования с последующим определением свойств шихты – гранулометрического состава, влажности и насыпной плотности.

Приведены зависимости и уравнения, иллюстрирующие влияние параметров окомкования агломерационной шихты из руд и концентратов Курской магнитной аномалии на средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной агломерационной шихты и ее насыпную плотность. Выявленные зависимости позволяют прогнозировать результаты окомкования по контролируемым входным параметрам компонентов аглошихты (крупность) и влажности аглошихты, регулируемой в процессе подготовки шихты к спеканию.

Полученные уравнения достоверны и пригодны для прогнозирования результатов окомкования агломерационной шихты при спекании руд и концентратов Курской магнитной аномалии в условиях работы агломерационного цеха АО «Уральская сталь».

Ключевые слова: окомкование агломерационной шихты, влажность аглошихты, крупность агломерационной шихты, насыпная плотность агломерационной шихты.

Введение

В работах [1-3] получена математическая модель расчета удельной производительности агломерационной машины:

$$G = \sqrt{(p/d)^{1+k} \cdot (h\rho)^{1-k}} \cdot \tau^k, \quad (1)$$

где G – удельная производительность агломашин, кг/(м²·с);

p – общее газодинамическое сопротивление слоя аглошихты, кг/(с²·м);

h – высота слоя аглошихты, м;

ρ – насыпная плотность аглошихты, кг/м³;

d – крупность спекаемого материала, выраженная через средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты, м;

τ – продолжительность процесса спекания аглошихты, с;

k – показатель степени.

Для использования модели при прогнозировании производительности агломашин при спекании руд и концентратов Курской магнитной аномалии (КМА) в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь» необходимо определить средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты и ее насыпную плотность по исходному гранулометрическому составу шихты (перед окомкованием) и режиму окомкования.

Согласно данным исследования [4] результаты окомкования в барабанных грануляторах определяют следующие конструктивные и технологические параметры: диаметр, длину и угол наклона барабана; скорость вращения барабана; режим увлажнения шихты в барабане; степень заполнения барабана шихтой;

нагрузку на окомкователь и продолжительность обработки шихты в барабане.

В аглоцехе АО «Уральская сталь» для окомкования шихты используют цилиндрические барабаны диаметром 2,8 м, длиной 6 м, с углом наклона 1°30'. Скорость вращения барабана составляет 6 об/мин, а подача воды осуществляется в первой трети окомкователя струйным распылением.

Ранее рядом исследователей изучалось изменение гранулометрического состава продукта в зависимости от параметров гранулирования материалов в барабанных окомкователях: гранулометрического состава исходной шихты и ее насыпной плотности, режимов увлажнения и окомкования шихты [5-14]. Предлагаемые исследователями уравнения применимы лишь при принятых механизмах гранулирования и имеют частный характер, что ограничивает их использование в производственных условиях, в частности в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь».

Проанализировав работы [5-14], приняв конструктивные и технологические параметры работы вращающегося цилиндрического барабана-окомкователя в аглоцехе АО «Уральская сталь» постоянными (кроме режима увлажнения шихты – влажности шихты перед окомкованием и после окомкования), предположили, что в качестве исходных данных для прогнозирования результатов окомкования (при постоянных компонентном составе исходной шихты и температуре шихты при грануляции) можно использовать: гранулометрический состав шихты перед окомкованием; влажность шихты перед окомкованием и после окомкования; насыпную плотность шихты перед окомкованием.

Цель работы: исследование эффективности окомкования в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь» и получение достоверных зависимостей, позволяющих прогнозировать результаты окомкования по контролируемым входным параметрам.

Методы исследования

Для изучения влияния указанных параметров на результаты окомкования в июне-октябре 2014 г. в аглоцехе АО «Уральская сталь» был проведен эксперимент, заключающийся в отборе проб шихты и исследовании ее параметров перед окомкованием и после окомкования. Во время отбора проб фиксировался текущий состав шихты, а пробы шихты исследовались на гранулометрический состав, влажность и насыпную плотность.

Результаты исследования и их обсуждение

Условия и результаты исследования шихты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Расход шихтовых материалов на 1 т агломерата

Материалы	Расход, кг/т*
Аглоруда Бакальского рудоуправления	$\frac{89,93 \div 139,35}{115,89}$
Аглоруда Михайловского ГОКа	$\frac{139,59 \div 157,93}{150,65}$
Концентрат Михайловского ГОКа	$\frac{581,22 \div 642,23}{606,95}$
Шлам	$\frac{20,23 \div 20,31}{20,26}$
Отсев агломерата и окатышей	$\frac{33,01 \div 53,95}{37,47}$
Мелочь брикетов	$\frac{0 \div 35,85}{27,54}$
Колошниковая пыль	$\frac{14,11 \div 28,58}{23,49}$
Окалина	$\frac{3,70 \div 7,36}{5,87}$
Доменный присад	$\frac{1,43 \div 5,64}{4,74}$
ИТОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ	$\frac{971,50 \div 1013,59}{993,13}$
Известняк	$\frac{162,81 \div 208,83}{178,58}$
Известь	$\frac{24,15 \div 30,00}{28,50}$
Твердое топливо	$\frac{41,18 \div 42,44}{41,87}$

*В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

Таблица 2

Параметры аглошихты до и после окомкования

Параметры аглошихты		Значение*
Влажность аглошихты перед окомкованием, %		$\frac{2,25 \div 4,93}{3,86}$
Гранулометрический состав шихты перед окомкованием, %	+ 10 мм	$\frac{2,85 \div 7,16}{4,70}$
	5 - 10 мм	$\frac{3,96 \div 9,50}{6,94}$
	3 - 5 мм	$\frac{4,29 \div 10,11}{7,62}$
	1 - 3 мм	$\frac{18,73 \div 27,81}{22,54}$
	0 - 1 мм	$\frac{52,43 \div 65,85}{58,06}$
Средний эквивалентный диаметр гранул шихты перед окомкованием, мм**		$\frac{1,69 \div 2,53}{2,15}$
Насыпная плотность шихты перед окомкованием, кг/м ³		$\frac{1554,00 \div 1792,00}{1652,09}$
Влажность окомкованной аглошихты, %		$\frac{7,30 \div 9,23}{8,14}$
Гранулометрический состав окомкованной аглошихты, %	+ 10 мм	$\frac{7,85 \div 16,18}{11,11}$
	5 - 10 мм	$\frac{10,18 \div 19,90}{14,32}$
	3 - 5 мм	$\frac{14,46 \div 26,79}{19,34}$
	1 - 3 мм	$\frac{29,92 \div 51,07}{38,07}$
	0 - 1 мм	$\frac{6,61 \div 29,25}{16,78}$
Средний эквивалентный диаметр окомкованной аглошихты, мм **		$\frac{3,34 \div 4,97}{4,08}$
Насыпная плотность окомкованной аглошихты, кг/м ³		$\frac{1658,20 \div 1816,30}{1735,40}$

*В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

**Рассчитан по формуле [6]: $d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{(d_{cp})_i}\right)}$, мм

где p_i – выход класса i , %; $(d_{cp})_i$ – средний диаметр класса i , мм; n – количество классов.

Незначительные колебания компонентного со-

става аглошихты в период исследования позволили сделать вывод об идентичных условиях проведения эксперимента, где результаты окомкования определяются в первую очередь расходом воды на увлажнение и крупностью исходной шихты.

По полученным данным были построены графики, иллюстрирующие влияние параметров окомкования на его результаты: средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты и ее насыпную плотность.

На рис. 1 приведена зависимость среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от среднего эквивалентного диаметра гранул аглошихты перед окомкованием, которая носит экстремальный характер. В изученном диапазоне гранулометрического состава исходной шихты с увеличением средней крупности ее гранул до 2,3–2,4 мм наблюдается затухающий рост среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты, что можно объяснить уменьшением содержания в аглошихте комкуемых фракций (0–1 мм). Невысокая величина достоверности линии тренда ($R^2 = 0,1428$, $r = 0,378$) объясняется одновременным влиянием влажности на среднюю крупность гранул окомкованной аглошихты. Однако для анализируемого объема выборки с вероятностью 90 % полученная зависи-

мость статистически значима.

На рис. 2 показано влияние влажности на средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты. Трендовая линия зависимости среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от содержания в ней влаги имеет выпуклый характер с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,533$ и коэффициентом корреляции $r = 0,73$. При увеличении содержания влаги с 7,30 до 9,23% трендовая линия отражает увеличение среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты, что обусловлено ростом сил капиллярного и молекулярного сцепления. При этом с ростом содержания влаги наблюдается снижение ее влияния на средний диаметр гранул, что объясняется достижением предельной влажности аглошихты (при ее текущем гранулометрическом составе) и уменьшением неокомкованной части шихты. Дальнейшее увлажнение аглошихты приводит только к ее переокомкованию за счет слипания сформированных гранул. Достаточно высокое значение величины достоверности аппроксимации линии тренда свидетельствует о доминирующем влиянии влажности на результаты окомкования в исследуемых условиях.

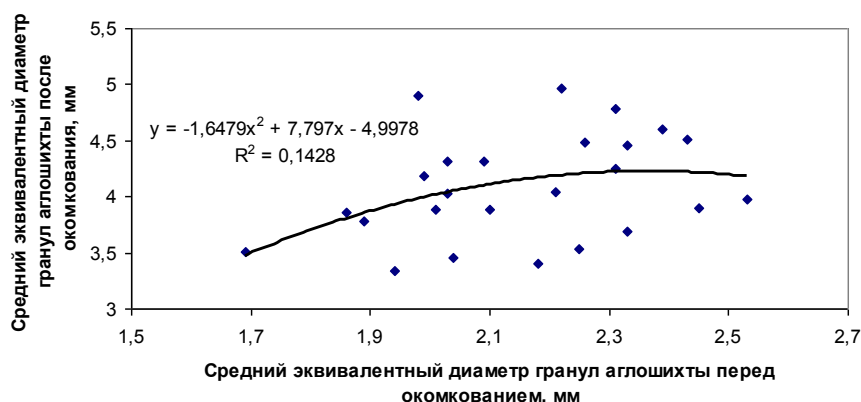


Рис. 1. Зависимость среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от эквивалентного диаметра гранул аглошихты перед окомкованием

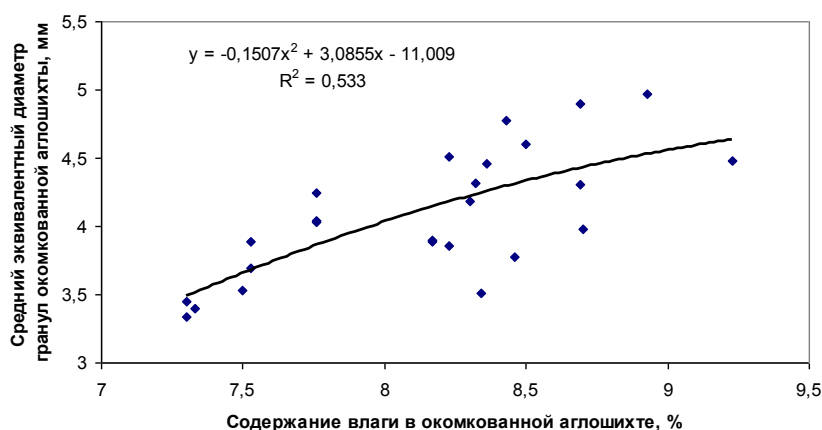


Рис. 2. Зависимость среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от содержания влаги в окомкованной аглошихте

Для количественной оценки совместного влияния влажности шихты и granulометрического состава исходной шихты на средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты выполнен множественный регрессионный анализ и получено уравнение регрессии:

$$d_o = -2,083 + 0,5613 \cdot d_n + 0,6088 \cdot w_o, \quad (2)$$

$$R^2 = 0,5848, R = 0,7647,$$

где d_o – средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты, мм;

d_n – средний эквивалентный диаметр гранул шихты перед окомкованием, мм;

w_o – влажность окомкованной аглошихты, %.

Взаимный учет влияния двух факторов с использованием линейной модели позволяет с более высокой степенью достоверности прогнозировать среднюю крупность гранул окомкованной аглошихты для исследованных условий: $R^2 = 0,5848$ превышает значения величин достоверности аппроксимации, полученных при анализе частных зависимостей (см. рис. 1, 2).

Усложнение регрессионной модели позволяет получить зависимость средней крупности гранул окомкованной аглошихты от исследуемых параметров с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,7546$ и множественным коэффициентом корреляции $R = 0,8687$:

$$d_o = -44,04 + 16,21 \cdot d_n + 6,819 \cdot w_o - 4,191 \cdot d_n^2 - 0,4129 \cdot w_o^2 + 0,2733 \cdot d_n \cdot w_o. \quad (3)$$

Другим значимым результатом окомкования, влияющим на газопроницаемость спекаемого слоя и производительность агломашины, является насыпная плотность аглошихты. На рис. 3 показано влияние влажности окомкованной аглошихты на ее насыпную плотность. Трендовая линия зависимости насыпной плотности окомкованной аглошихты от ее влажности имеет вогнутый характер с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,5407$ и коэффициентом корреляции $r = 0,735$. При увеличении влажности окомкованной аглошихты с 7,30 до 9,23 % трендовая линия отражает увеличение насыпной плотности аглошихты. Это объясняется тем, что в исследуемом интервале с ростом влажности, несмотря на увеличение порозности окомкованной аглошихты из-за роста среднего диаметра гранул, увеличивается влагонасыщенность и масса гранул.

На рис. 4 показана взаимосвязь результатов окомкования аглошихты: насыпной плотности и среднего эквивалентного диаметра гранул. Трендовая линия имеет выпуклый характер с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,4106$ и коэффициентом корреляции $r = 0,641$. При увеличении среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты растет ее насыпная плотность, что объясняется взаимным влиянием на исследуемые параметры влажности, granulометрического состава исходной шихты и порозности.

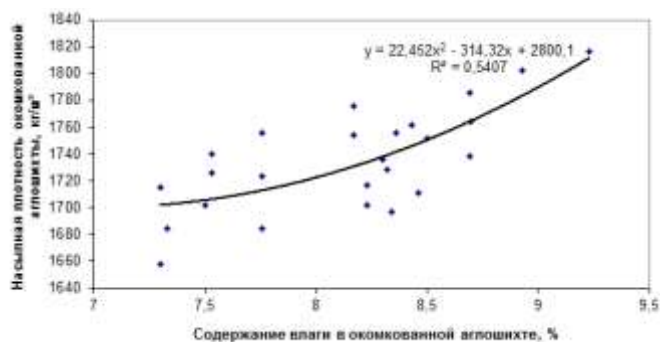


Рис. 3. Зависимость насыпной плотности окомкованной аглошихты от ее влажности

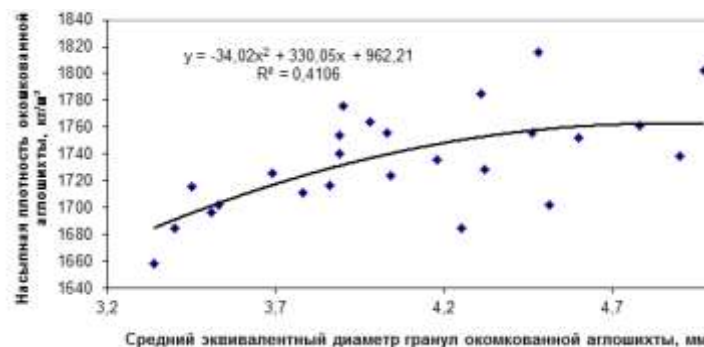


Рис. 4. Зависимость насыпной плотности окомкованной аглошихты от среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты

Для прогнозирования насыпной плотности окомкованной аглошихты наибольшая достоверность получена при использовании ее зависимости от содержания влаги в окомкованной аглошихте.

Выводы

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Получены зависимости и уравнения, иллюстрирующие влияние параметров окомкования аглошихты из руд и концентратов КМА на его результаты: средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты и ее насыпную плотность.

2. Взаимный учет влияния среднего эквивалентного диаметра гранул шихты перед окомкованием и содержания влаги в окомкованной аглошихте позволяет с более высокой степенью достоверности прогнозировать среднюю крупность гранул окомкованной аглошихты для исследованных условий, чем частные зависимости среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от тех же параметров.

3. Получены зависимости насыпной плотности окомкованной аглошихты от содержания влаги в окомкованной аглошихте и среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты. Наибольшая достоверность для прогнозирования насыпной плотности окомкованной аглошихты получена при использовании ее зависимости от содержания влаги в окомкованной аглошихте.

4. Полученные зависимости и уравнения пригодны для прогнозирования результатов окомкования аглошихты по контролируемым входным параметрам компонентов аглошихты (крупность) и влажности аглошихты, регулируемой в процессе подготовки шихты к спеканию.

Список литературы

1. Математическая модель расчёта удельной производительности агломерационной машины / Ганин Д.Р., Паньчев А.А., Дружков В.Г., Шаповалов А.Н. // *Металлург.* 2016. №1. С.14-20.
2. Ганин Д.Р., Паньчев А.А. Новая математическая модель агломерационного процесса // *Металлург.* 2013. № 5. С.44-47.
3. Обзор и анализ математических моделей расчета производительности агломерационной машины / Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Паньчев А.А., Шаповалов А.Н. // *Теория и технология металлургического производства.* 2014. №2(15). С. 20-26.
4. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологию металлургического структурообразования. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.
5. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Научное издание. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. 400 с.
6. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. М.: Химия, 1991. 240 с.
7. Umadevi T., Deodhar A.V., Kumar S., et al. Influence of coke breeze particle size on quality of sinter. (2008) *Ironmaking & Steelmaking*, 35:8, 567-574.
8. Fan X.H., Li Y., Chen X.L. Study on the Effect on Sintering Mineralization of Iron Ore. (2013) *Advanced Materials Research*. Vols. 652-654, pp. 2538-2542.
9. Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В., Майстренко Н.А. Повышение качества подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская сталь» // *Металлург.* 2015. №3. С.30-36.
10. Трушко В.Л., Утков В.А., Клямко А.С. Повышение газопроницаемости агломерационной шихты с высоким содержанием железорудного концентрата // *Обогащение руд.* 2015. №3(357). С.32-34.
11. Перспективы использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве ОАО «Уральская сталь» / Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Паньчев А.А., Шаповалов А.Н. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2016. Т.14. № 1. С. 34-40.
12. Повышение эффективности процесса агломерации при окомковании шихты с использованием ПАВ / Майстренко Н.А., Овчинникова Е.В., Шаповалов А.Н., Берсенев И.С. // *Сталь.* 2016. №1. С.12-15.
13. Nyembwe A.M., Cromarty R.D., Garbers-Craig A.M. Relationship Between Iron Ore Granulation Mechanisms, Granule Shapes, and Sinter Bed Permeability. (2017) *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 38:6. 388-402.
14. Higuchi T., Takehara K., Hirotsawa T. Influence of Agitating Conditions on Agglomeration and Collapse of Iron Ore Mixture (2018) *ISIJ International*, vol. 58 (2018), no. 11, pp. 2009-2017.

Сведения об авторах

Ганин Дмитрий Рудольфович – канд. техн. наук, доцент, кафедра металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: dmrgan@mail.ru.

Дружков Виталий Гаврилович – канд. техн. наук, доцент, кафедра металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Панычев Анатолий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

Шаповалов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PREDICTION RESULTS PELLETIZING SINTER BURDEN AT JSC «URAL STEEL»

Ganin Dmitriy R. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia. E-mail: dmrgan@mail.ru

Druzhkov Vitaly G. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Panychev Anatoliy A. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia.

Shapovalov A.N. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru

Abstracts. *The results of an experiment on the study of the efficiency of pelletizing in the conditions of the sintering shop of JSC "Ural Steel" are presented. The experiment consisted in taking samples of the sinter burden before and after pelletizing. Then, were determined the properties of pelletized sinter burden - particle size distribution, moisture content and bulk density.*

The article describes the dependencies and equations, illustrating the effect of the parameters of the pelletizing sinter burden on average equivalent diameter pellets pelletized sinter burden and its bulk density. The revealed dependences make it possible to predict the results of pelletizing according to the controlled input parameters of the sinter burden components (size) and the sinter burden moisture, which is regulated in the process of preparing the charge for sintering.

The obtained equations are reliable and suitable for predicting outcomes pelletizing sinter burden during sintering of ores and concentrates, the Kursk magnetic anomaly in the JSC "Ural Steel".

Keywords: *pelletizing the sinter burden, sinter burden moisture, size of the sinter burden, the bulk density of the sinter burden.*

Ссылка на статью:

Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н. Прогнозирование результатов окомкования агломерационной шихты в условиях АО «Уральская Сталь» // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3 (34). С. 8-13.

Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. Prediction results pelletizing sinter burden at JSC «Ural Steel». *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 8-13.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 51-37; 621.7.01

Нгуен З.К, Ефремов Д.Б.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПО СТЕПЕНЯМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ-ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЭКСПАНДИРОВАНИИ

Аннотация. Известно, что экспандирование является заключительной операцией на линиях производства труб большого диаметра (ТБД), оно применяется для исправления отклонений размеров и формы труб. Однако после экспандирования изделия часто имеют высокую неравномерность распределения напряжения-деформации по поперечным сечениям стенки, именно это может значительно снижать надежность, безопасность эксплуатации, а также ресурсы труб в суровых условиях. В настоящей работе проведена математическая связь степеней неравномерности напряжения-деформации с механическими свойствами материала труб (такими как модуль упругости, предел текучести, предел прочности и т.д.) и условием трения при экспандировании. На основе этой связи установлен метод математического моделирования на ЭВМ для оценки и классификации качества ТБД при механических свойствах материала и трении, считающихся случайными величинами в соответствии с заданными законами распределения. Результаты математического моделирования при изучении процесса экспандирования труб диаметром 1420 мм из стали класса прочности К60 показали, что при модуле упругости и пределе прочности, смещающихся в сторону больших величин, а пределе текучести, относительноном удлинении после разрыва и коэффициенте трения – в сторону меньших значений, равномерность распределения напряжения-деформации, а также качество ТБД повышены. Приведена классификация партии входных материалов и выбора смазки при экспандировании для получения высокого качества трубной продукции.

Ключевые слова: труба большого диаметра, экспандирование, неравномерность распределения, напряжение, деформация, математическое моделирование, случайная величина.

На сегодняшний день объемы производства труб большого диаметра в России составляют не менее 4,5–5,0 млн т в год благодаря современным способам формовки по схемам JCOE, UOE, а также формовкой вальцовкой на прессах и валковых листогибочных машинах (рис. 1). И в ближайшей, и в среднесрочной перспективе этот объем снижаться не будет. Системы трубопроводного транспорта, для сборки которых используются трубы большого диаметра, относятся к опасным техногенным объектам. Их аварии или отказы в работе приводят к возникновению серьезных угроз населению, инженерным сооружениям и природным массивам, поэтому к ним предъявляются высокие требования по обеспечению надежности и безопасности [1]. Надежность и безопасность эксплуатации современных магистральных трубопроводов обеспечивается не только высокими прочностными (стали К50, К52, К54, К55, К56, К58, К60 по ТУ 14-3-1573-96), вязкостными свойствами труб большого диаметра, но и их геометрическими размерами: отклонением наружного диаметра и овальности концов труб от круглой формы, отклонением от теоретической окружности в зоне сварного шва, кривизной труб и другими, которые определяются напряженно-деформированным состоянием (НДС) металла в процессе изготовления [2-5].

После операций формоизменения из стального листа труба сваривается внутренними и наружными швами. Операцию калибровки экспандированием применяют в качестве заключительной операции формования труб после сварки с продольным швом с целью выравнивания дефектов формы посредством радиального движения составного инструмента в ви-

де сегментов. В большинстве случаев используется экспандирование – пошаговая раздача трубы в требуемый размер с увеличением ее периметра на 0,8–1,5%. В процессе экспандирования высокие неравномерности распределения НДС на стенке, зависящие от механических свойств металла (модули упругости, предела текучести, прочности и т.д.) и условия трения процесса деформации, возможно возникать и влиять на качество, надежность и безопасность эксплуатации ТБД. Целью настоящей статьи является рассмотрение некоторых аспектов классификации групп и повышения качества ТБД после экспандирования по степеням неравномерности напряжения-деформации, считающихся дополнительными показателями качества, а также оценка влияния распределения механических свойств исходного металла и коэффициента трения на качество трубных изделий.



Рис. 1. Технологические операции при производстве прямошовных сварных труб большого диаметра по различным схемам формовки

Методика исследования работы представляет собой установление математической связи степеней неравномерности напряжения-деформации с механическими свойствами трубной заготовки и трением при экспандировании и применение случайного моделирования для классификации и оценки качества ТБД по дополнительным показателям.

Степени неравномерности напряжения-деформации при экспандировании и методика классификации и оценки качества ТБД

Степени неравномерности напряжения k_σ и деформации k_ε определяются как отношение максимальных значений напряжения σ_{\max} и деформации ε_{\max} от минимальных σ_{\min} и ε_{\min} соответственно, т.е. $k_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$ и $k_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\min}}$. Чем ближе значения

этих критериев к единице, тем более равномерным является распределение НДС по контуру трубы и тем больше возможность использования операции экспандирования для калибровки трубной заготовки по всему её контуру. Чем коэффициент неравномерности напряжения k_σ больше, тем равномерность распределения остаточных напряжений меньше, т.е. при эксплуатации в агрессивных средах, особенно в коррозионных как море, ТБД будут малостойкими; надежность и безопасность систем труб также значительно снизятся. Чем степень неравномерности деформации k_ε больше, тем возможность совершенствования геометрического качества ТБД меньше. Поэтому с целью повышения качества трубных изделий нужно снизить степени неравномерности напряжения и деформации до минимально возможного уровня. Уровень качества ТБД классифицирован по группам, показанным в табл. 1, где $[k_\sigma]$ и $[k_\varepsilon]$ (оба всегда не меньше 1) соответственно пределы степеней неравномерности напряжения и деформации, определенные при реальном обследовании качества ТБД. При $k_\sigma \leq [k_\sigma]$ механическое качество продукции хорошее (равномерность распределения остаточных напряжений высока, надежность и безопасность эксплуатации труб будут высокими), при $k_\varepsilon \leq [k_\varepsilon]$ геометрическое качество продукции хорошее (см. табл. 1).

Уровень качества ТБД по степеням неравномерности напряжения-деформации

Номер группы	k_σ	k_ε	Качество продукции	
			Механическое	Геометрическое
1	Не более $[k_\sigma]$	Не более $[k_\varepsilon]$	Хорошее	Хорошее
2	Не более $[k_\sigma]$	Более $[k_\varepsilon]$	Хорошее	Плохое
3	Более $[k_\sigma]$	Не более $[k_\varepsilon]$	Плохое	Хорошее
4	Более $[k_\sigma]$	Более $[k_\varepsilon]$	Плохое	Плохое

Из решения системы дифференциальных уравнений равновесия деформируемого тела совместно с условием пластичности металла, установленной математическим описанием эпюр НДС трубы по всему периметру, учитывая наличие зазоров между сегментами при экспандировании, найдены зависимости степеней неравномерности напряжения-деформации на стенке от механических свойств материала, условия трения и других параметров процесса, они выражаются следующими формулами:

$$\begin{cases} k_\sigma = e^{\mu\beta}; \\ k_\varepsilon = e^{\gamma} \end{cases}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения между сегментами экспандера и внутренней поверхностью трубной заготовки; величины β (в радианах) и γ определяются по выражениям:

$$\begin{cases} \cos \beta = \frac{u + R_1 + R_2 (\cos \frac{\alpha}{2} - 1)}{\sqrt{(u + R_1 - R_2)^2 + R_2^2 + 2(u + R_1 - R_2)R_2 \cos \frac{\alpha}{2}}}, \\ \gamma = \frac{\ln \sigma_b - \ln \sigma_{0,2}}{\ln(\frac{\delta_s}{100} - \frac{\sigma_b}{E}) - \ln 0,002}, \end{cases} \quad (2)$$

где R_1 – внутренний радиус трубной заготовки, мм; R_2 – радиус описанной окружности сегментов экспандера, мм; u – рабочий ход сегментов, мм; $\frac{\alpha}{2} = \frac{\pi}{n}$ – угол между центральными линиями сегмента и зазора; n – число сегментов; E – модуль упругости,

МПа; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа; σ_b – предел прочности, МПа; δ_5 – относительное удлинение после разрыва, %. Материал для производства ТБД должен обеспечивать по ТУ 14-3-1573-96, что $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b} \leq 0,9$.

Степени неравномерности напряжения k_σ и деформации k_ϵ представляют собой функции от совокупности аргументов $M(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$. При обследовании партии исходных материалов трубной заготовки, включающей N продукций перед производством в определенных условиях технологии, видно, что значения фактических параметров совокупности M при изготовлении подчиняются определенным закономерностям [6-9]. В общем случае вид и характер распределения случайных величин может быть различным. Однако для разработки метода математического моделирования это не имеет значения. Принципиальной является лишь объективность существования этих закономерностей в реальных производственных условиях. Вид распределения, являющийся непрерывным, нормальным, треугольным (Симпсона) зависит от конкретных технологических условий. Кроме рассмотренных числовых характеристик распределений, важное значение имеет коэффициент относительной асимметрии λ , который определяет смещение действительного центра группирования каждого исходных параметров ω от математического ожидания ω_0 (рис. 2). Это связано с тем, что их действительные законы распределения, как правило, несимметричны, и в производственных условиях коэффициент λ может изменяться в пределах $[-0,5; +0,5]$ [9]. Блок-схемой алгоритма определения распределения степеней неравномерности напряжения-деформации k_σ, k_ϵ при экспандировании (рис. 3) предложен метод математического моделирования случайных параметров на ЭВМ, где случайными величинами будут 5 параметров совокупности M с их интервалами: $E = \bar{E} \pm \Delta E$; $\sigma_{0,2} = \bar{\sigma}_{0,2} \pm \Delta \sigma_{0,2}$; $\sigma_b = \bar{\sigma}_b \pm \Delta \sigma_b$; $\delta_5 = \bar{\delta}_5 \pm \Delta \delta_5$ и $\mu = \bar{\mu} \pm \Delta \mu$, с их законами распределения и с их совокупностью коэффициентов относительной асимметрии $\lambda = (\lambda_E, \lambda_{\sigma_{0,2}}, \lambda_{\sigma_b}, \lambda_{\delta_5}, \lambda_\mu)$. После моделирования качество ТБД классифицировано по группам (см. табл. 1).

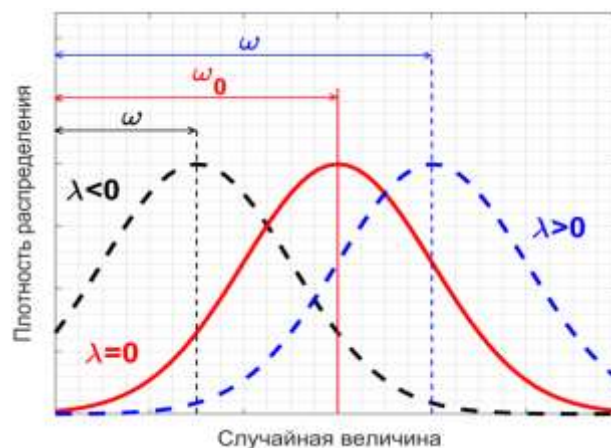


Рис. 2. Описание коэффициента относительной асимметрии

Кроме того, для количественной оценки существования связи между изучаемыми совокупностями случайных величин используется специальный статистический показатель – коэффициент корреляции r , это безразмерная величина, она может определяться нулю-величиной коэффициента относительно асимметрии и меняться от 0 до ± 1 . Чем ближе значение коэффициента к единице (неважно с каким знаком), тем с большей уверенностью можно утверждать, что между двумя рассматриваемыми совокупностями переменных существует линейная связь. Если окажется, что $r = \pm 1$, то имеет место классический случай чисто функциональной зависимости (т.е. реализуется идеальная взаимосвязь). Зная коэффициент корреляции, можно дать качественно-количественную оценку тесноты связи. Характеристика силы связи по шкале Чеддока при величине коэффициента парной корреляции r следующая: до 0,3 – очень слабая; 0,3–0,5 – слабая; 0,5–0,7 – заметная; 0,7–0,9 – сильная и 0,9–0,99 – очень сильная [10]. Здесь будет рассмотрена зависимость степеней неравномерности напряжения-деформации (k_σ, k_ϵ) от исходных параметров $M(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$. Коэффициенты корреляции степеней неравномерности напряжения $r_{\sigma p}$ и деформации $r_{\epsilon p}$ определяются формулой (3), где p может быть компонентами совокупности M :

$$\left\{ \begin{aligned} r_{\sigma p} &= \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} p_i - \left(\sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right) \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)^2 \right]}} \\ r_{\epsilon p} &= \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\epsilon i} p_i - \left(\sum_{i=1}^N k_{\epsilon i} \right) \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N k_{\epsilon i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N k_{\epsilon i} \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)^2 \right]}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

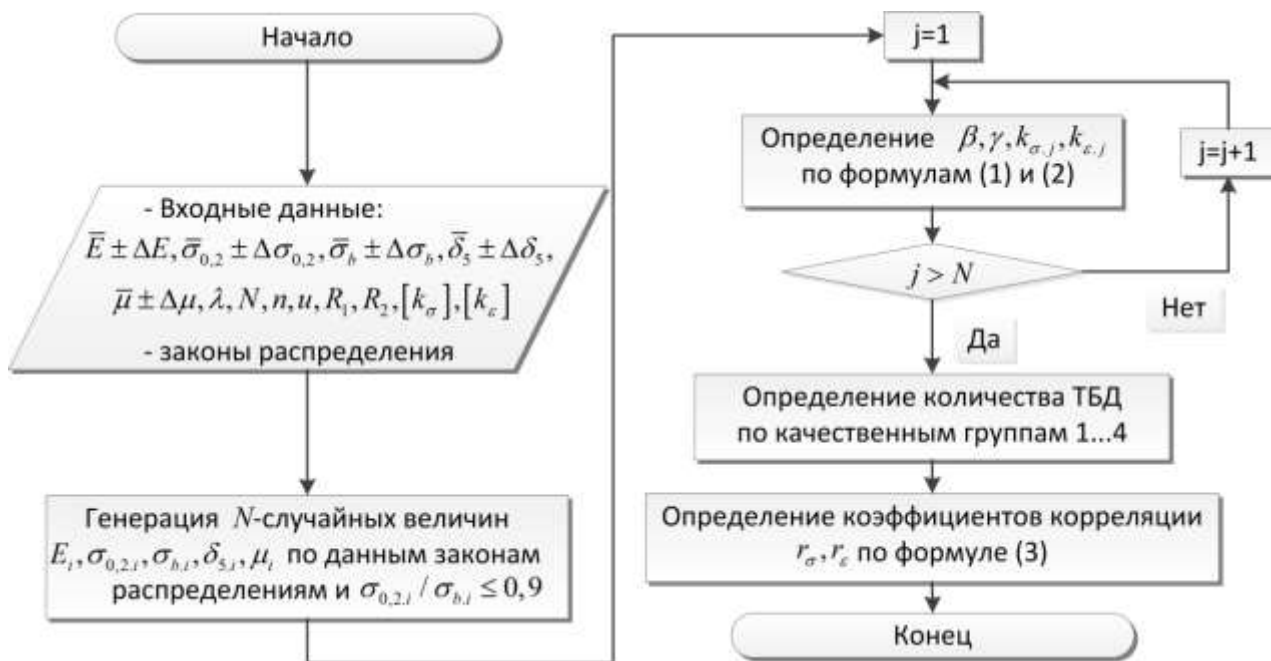


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения распределения степеней неравномерности напряжения и деформации

Таблица 2

Случайные параметры для моделирования

Коэффициенты корреляции $r_{\sigma p}$ и $r_{\epsilon p}$ отображают влияние модуля упругости, предела текучести, предела прочности, относительного удлинения после разрыва и коэффициента трения на степени неравномерности напряжения-деформации и на качество ТБД. Это основание технологических рекомендаций о контроле исходных материалов необходимо с целью получения хорошего качества труб после экспандирования. Проблемы методики будут рассмотрены ниже.

Пример работы и обсуждение

В качестве примера рассмотрены трубы с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 30мм ($R_1 = 680$ мм) из стали марки 10Г2ФБЮ класса прочности К60 по ТУ 14-3-1573. Экспандер с радиусом описанной окружности сегментов $R_2 = 666$ мм, рабочим ходом сегментов $u = 20$ мм и числом сегментов $n = 12$. Стохастическое изменение механических свойств для партии стали К60 и коэффициента трения сегментов с внутренней поверхностью трубной заготовки, для рального процесса производства представлено в табл. 2. Пределы классификации качества ТБД: $[k_\sigma] = 1,07$ и $[k_\epsilon] = 20$.

Обозначение параметров	Интервал величины	Закон распределения	Коэффициент λ	
			λ_1	λ_2
E [ГПа]	210 ± 5	Симпсона	0	0,12
$\sigma_{0,2}$ [МПа]	519 ± 59	Нормальный	0	-0,15
σ_b [МПа]	649 ± 59	Нормальный	0	0,30
δ_5 [%]	20 ± 1	Непрерывный	0	-0,20
μ [-]	$0,27 \pm 0,10$	Нормальный	0	-0,35

При рассмотрении партии ТБД после экспандирования, состоящей из 10000 листов класса прочности К60, распределение исходных данных представлено на рис. 4, При этом, генерация случайных совокупностей аргументов $M(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$ с разными совокупностями коэффициента асимметрии (табл. 2), составляла $N = 10000$. При $\lambda = \lambda_1$ исходные параметры распределены в основном симметрично (рис. 4, а), причем при $\lambda = \lambda_2$ значения модуля упругости E и предела прочности σ_b смещаются в сторону больших величин, а предела текучести $\sigma_{0,2}$, относительного удлинения после разрыва δ_5 и коэффициента трения μ – в сторону меньших значений. Математическое моделирование было сделано с помощью про-

граммы на языке MATLAB на ЭВМ по алгоритму на рис. 3.

Распределение степеней неравномерности напряжения-деформации k_σ, k_ϵ после моделирования показано на рис. 5 и в табл. 3. Когда значения входных параметров сконцентрировано в основном в центральном диапазоне ($\lambda = \lambda_1$), число изделий группы 1 (группа хорошего качества) составляет около 52%, групп 2, 3, 4 (группы плохого качества) – около 48%

(рис. 5, а), из них наихудшая группа (группа 4) – только 0,22%. Одна партия продукции считается хорошей, если количество некачественных изделий составляет менее 20% от общего всей партии. Таким образом, с симметричным распределением механических свойств материала и коэффициента трения полученная партия ТБД после экспандирования не соответствует требованиям заданного качества.

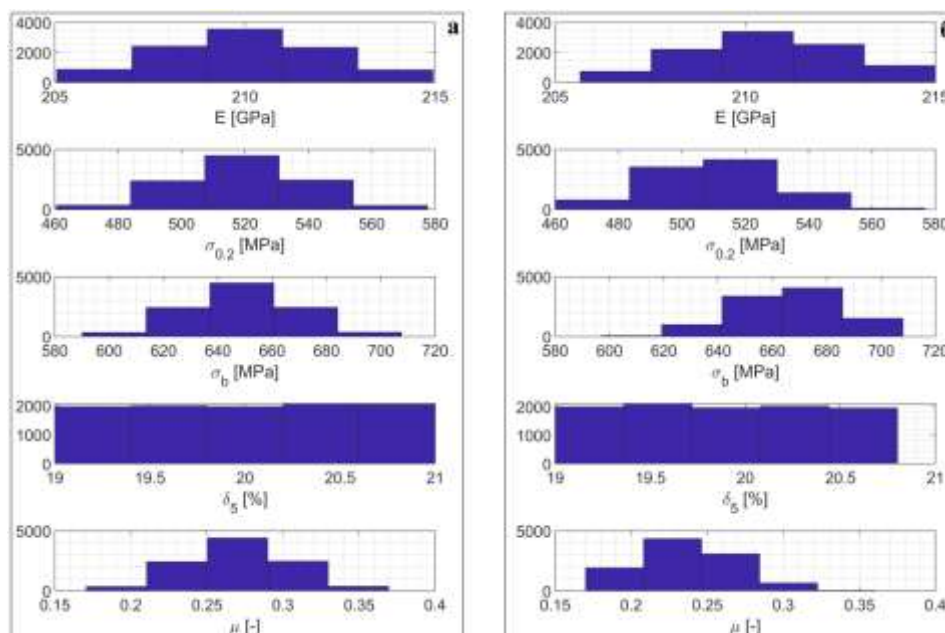


Рис. 4. Распределение для 10000 совокупностей исходных параметров по заданным законам распределения: а – при $\lambda = \lambda_1$; б – при $\lambda = \lambda_2$

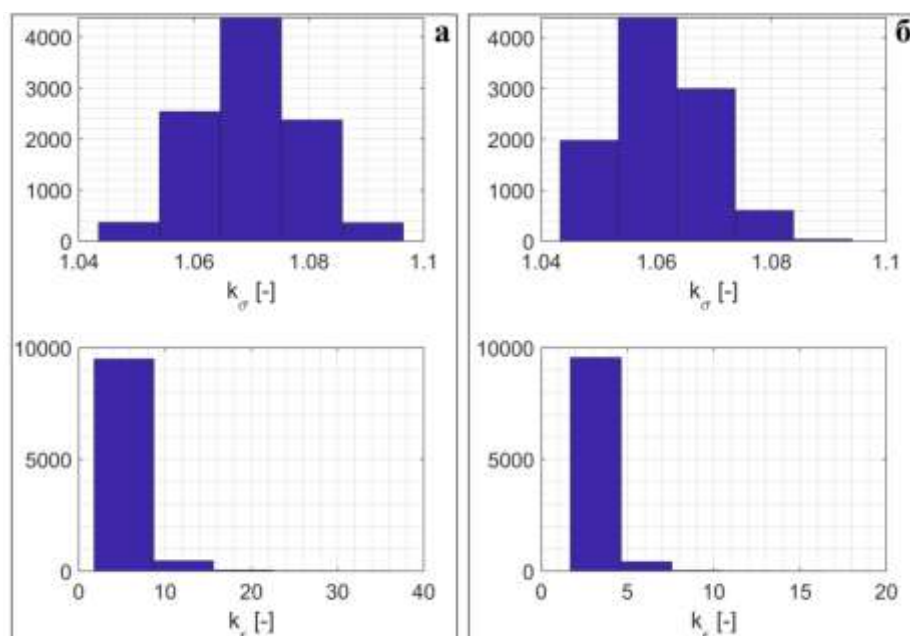


Рис. 5. Распределение степеней неравномерности напряжения и деформации: а – при $\lambda = \lambda_1$; б – при $\lambda = \lambda_2$

При асимметричном распределении ($\lambda = \lambda_2$) со стороны меньших значений $\sigma_{0,2}$, δ_5 , μ и больших E , σ_b число деталей группы хорошего качества 1 составляет около 86%, групп плохого качества 2, 3, 4 только около 14% (рис. 5, б). Заданная партия ТБД считается соответствующей требуемому качеству.

Из табл. 3 видно, что с положительными коэффициентами корреляции трение значительно снижает механическое качество и существенно влияет на геометрию труб после экспандирования. При значительном воздействии трения на ТБД механико-геометрическое качество их будет ниже. Поэтому на производстве можно контролировать трение на низком уровне специальными смазочными материалами, чтобы улучшить качество трубной продукции.

Таблица 3

Моделирование оценки качества ТБД при $N = 10000$

I. Степени неравномерности напряжения-деформации				
Номер группы	k_σ	k_ϵ	Количество деталей при	
			$\lambda = \lambda_1$	$\lambda = \lambda_2$
1	Не более 1,07	Не более 20	5159	8638
2	Не более 1,07	Более 20	0	0
3	Более 1,07	Не более 20	4819	1362
4	Более 1,07	Более 20	22	0
II. Коэффициенты корреляции степеней неравномерности				
Параметр P	Напряжения $r_{\sigma p}$		Деформации $r_{\epsilon p}$	
	Величина	Оценка	Величина	Оценка
E	0	-	-0,0180	Очень слабая
$\sigma_{0,2}$	0	-	0,5594	Заметная
σ_b	0	-	-0,4542	Слабая
δ_5	0	-	0,0227	Очень слабая
μ	1	Идеальная взаимосвязь	0,3789	Слабая

Также из табл. 3 видно, что предел текучести и прочности значительно влияют на степень неравномерности деформации, с увеличением предела текучести и уменьшением предела прочности величина степени k_ϵ увеличивается, т.е. геометрическое качество ТБД снижается. А модуль упругости и относительное удлинение после разрыва незначительно влияют на степень неравномерности деформации, однако увеличение величины E и уменьшение значения δ_5 вызывают уменьшение коэффициента k_ϵ , т.е. гео-

метрическое качество ТБД повышается.

Заключение

Установлена взаимосвязь степеней неравномерности напряжения и деформации при экспандировании с механическими свойствами входного материала и трением сопрягаемых поверхностей сегментов с трубной заготовкой, которая позволяет сделать классификацию качества ТБД при заданном допустимом значении уровня качества. Наилучшее качество ТБД обеспечивается при степенях неравномерности напряжения-деформации близких к единице.

Для оценки эффективности метода достижения высокого качества трубной продукции разработан алгоритм моделирования на ЭВМ, учитывающий вероятностный характер механических свойств материала и условие влияния трения на процесс деформации при экспандировании. Указанный математический метод позволяет прогнозировать качество выпускаемой партии трубной продукции. Для повышения механических и геометрических параметров качества партии ТБД после экспандирования, нужно классифицировать механические свойства по отклонениям распределения предела текучести и относительного удлинения после разрыва в сторону меньших значений, а модули упругости и предела прочности - в сторону больших, а также нужно обеспечивать соответствующие условия трения в процессе экспандирования.

Список литературы

1. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Галимов М.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния металла на основе математического моделирования при производстве труб большого диаметра // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 706-712.
2. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
3. Katsumi M., Kenji O. Steel Products for Energy Industries. JFE Technical Report. 2013. Vol. 43. No. 18. P. 1-11.
4. Звонарев Д.Ю. Совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ. 2015. 166 с.
5. Галкин В.В., Чебурков А.С., Пачурин Г.В. Оценка напряженно-деформированного состояния металла трубных заготовок, изготовленных пошаговой формовкой, методом математического моделирования // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 114-115.
6. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1969. 467 с.
7. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И. Метрология, стандартизация и взаимозаменяемость. Кн. 3. Взаимозаменяемость. Ч. 1. М.: МГТУ, 2000. 240 с.

8. Тимирязев В.А., Кутин А.А., Схиртладзе А.Г. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ «Станкин», 2011. 393 с.
9. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник. СПб.: Лань, 2016. 512 с.
10. Бараз В.Р. Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 103 с.

Сведения об авторах

Нгуен Зуй Кыонг – аспирант кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия. E-mail: tuoitre.hvktqs@gmail.com

Ефремов Дмитрий Борисович – канд. техн. наук, доцент, кафедра обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия. E-mail: defremov@list.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MATHEMATICAL SIMULATION FOR QUALITY CLASSIFICATIONS OF LARGE DIAMETER PIPES BY THE DEGREES OF UNEVEN DISTRIBUTION OF STRESS-STRAIN DURING EXPANDING

Nguyen Duy Cuong – graduate student of Department of Metal Forming, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia. E-mail: tuoitre.hvktqs@gmail.com.

Efremov Dmitry B. – Ph.D. (Eng.), Associate professor, Department of Metal Forming, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia. E-mail: defremov@list.ru.

Abstract: It is known that expansion is the final operation on the production lines of large diameter pipes (LDP), it is used to correct deviations in the size and shape of pipes. However, after expansion, products often have a high uneven distribution of the stressed-strain over the cross sections of their wall, and this can significantly reduce the reliability, safety of operation and also pipe resources in harsh conditions. In the present work, a mathematical dependence is made between the degrees of stress-strain non-uniformity with the mechanical properties of the pipe material (such as elastic modulus, yield strength, tensile strength, ...) and the friction condition during expansion. On the basis of this dependence, a method of mathematical simulation on a computer has been established for evaluating and classifying the quality of LDP with the mechanical properties of the material and friction friction, which are considered random variables in accordance with the given distribution laws. The results of mathematical simulation when studying the process of expanding pipes with a diameter of 1420 mm made of K60 steel showed that: with the elastic modulus and tensile strength shifting toward large values, and the yield strength, elongation after break and friction coefficient - towards lower values, the uniformity of the stress distribution deformation and also the quality of the LDP is improved, and the possibilities of classifying a batch of input materials and the choice of lubricant during expansion are given to obtain high quality pipe products.

Keywords: large diameter pipe, expansion, uneven distribution, stress, strain, mathematical simulation, random variable.

Ссылка на статью:

Нгуен З.К., Ефремов Д.Б. Математическое моделирование для классификации качества труб большого диаметра по степеням неравномерности распределения напряжения-деформации при экспандировании // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 14-20.

Nguyen Duy Cuong, Efremov D.B. Mathematical simulation for quality classifications of large diameter pipes by the degrees of uneven distribution of stress-strain during expanding. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 14-20.

УДК 669.1

Baryshnikova A. M., Baryshnikov M.P., Nosov L.V.

DEVELOPMENT OF PRODUCTION TECHNOLOGY FOR POLYMER COATED WIRE BASED ON THE STUDY OF THE STRESS STATE SCHEME IN THE PROCESS OF DRAWING

Abstract. *The relevance of the work is to develop a technology for the production of polymer-coated wire. This caused the need to study the stress-strain state in the process of drawing, as well as the need to consider modern polymer coatings and the modes of their application to the base material. The purpose of this study is to determine the mechanical characteristics of real polymer films, as well as to determine the rheological model of the polymer deformation process for the use of the developed mathematical model in determining the stress-strain state in the drawing process of metal-polymer systems. Polytetrafluoroethylene was chosen as the polymer coating material. The main research method was mathematical modeling of the steel-polymer composition drawing process, which was carried out in the SIMULIA Abaqus software package. The novelty of the study lies in the fact that the conducted studies of the wire stress state and the assessment of the cohesive stability of the coating allowed us to improve the basic drawing technologies. The results of changes in the thickness of the coating in the process of drawing, the mechanism of deformation of polytetrafluoroethylene allow us to conclude that it is impractical to use this technology for wire of large diameters. Also, based on the results of the study, to obtain a wire with an increased level of anticorrosive properties it is recommended to apply a polymer coating before the last transition of the route and then drag it to the final size.*

Key words: *the process of drawing, wire, coating, polymer-coating materials, polytetrafluoroethylene coating, stress strain state scheme.*

A study of the stress-strain state in the process of drawing was conducted and a technology for producing polymer-coated wire was developed.

Mathematical modeling of the drawing process of a steel-polymer composition was carried out in the SIMULIA Abaqus software package. There was created a model of the behavior of a two-component wire in the deformation zone in the process of drawing. The effect of the main technological parameters on the stability of the shell was studied. As a result, it became necessary to determine the rheological model of deformation of the polymer used as a coating. The mechanical properties of the coatings are included as set parameters in the equations of the system for determining the stress-strain state of elements when drawing the composition [4]. Therefore, the purpose of this study is to determine the mechanical characteristics of real polymer films, as well as to determine the rheological model of the polymer deformation process. The developed mathematical model can be used to determine the stress-strain state of the composition in the drawing processes of metal-polymer systems. Polytetrafluoroethylene was chosen as the polymer coating material.

The analysis of the obtained indicator stretch diagrams of polytetrafluoroethylene films showed that the value of the absolute elongation of the samples corresponding to the point of transition of the material from the elastic state to the plastic state is no more than 0.5% of the total absolute elongation corresponding to the beginning of neck formation on the sample [5]. Therefore, the elastic component of deformation can be ignored in drawing processes if the degrees of compression and drawing coefficients on single passes are high enough. A rheological model of a polytetrafluoroethylene-based material is transformed into a hard plastic Mises environment. The

strain resistance for such an environment does not depend on either the speed or the strain rate and is 95-100 MPa.

Modeling the process of drawing steel wire with polytetrafluoroethylene coating was to satisfy the following conditions.

- Rheological properties of the materials under study:
 - steel 20: tensile diagram, Young's modulus 210 GPA, Poisson's ratio 0.3, yield strength 325.36 MPa, tensile strength 473.69 MPa, elongation 14.14 %, density 7800 kg / m²;
 - coating: Young's modulus 100 GPA, Poisson's ratio 0.35, yield strength 100 MPa, tensile strength 100 MPa, density 3000 kg/m²;
 - drawing route: 3,2 – 2,65 – 2,2 – 1,85 – 1,5 – 1,2 mm;
 - the coating thickness is 100 microns;
 - an extended model of Ammon-Coulomb friction that takes into account shear stresses;
 - the coefficient of friction is 0.08;
 - drawing speed: 2-10 m/s.
- Boundary conditions:
 - the front end is absolutely rigid and has one degree of freedom (moving only in the longitudinal direction);
 - the draw plate is modeled as an absolutely rigid body with zero degrees of freedom;
 - the size of the final coating element is 0.03 mm;
 - the final size of the wire is 0.23 mm;
 - ductile damage.

The distribution of stress-strain state parameters in the process of drawing coated wire from a diameter of 3.2 mm (initial coating thickness-100 microns) to a diameter of 1.2 mm, at a drawing speed of 2-10 m/s, is shown in figure 1.

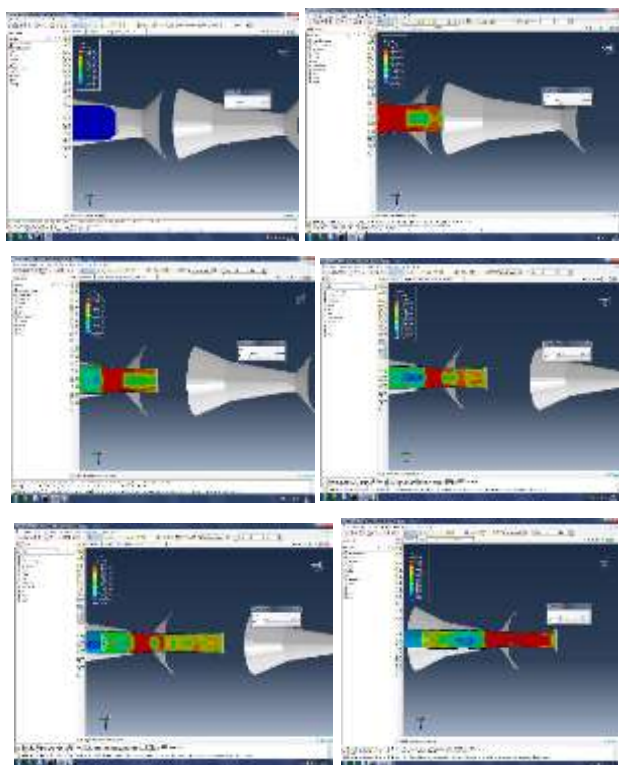


Fig. 1. The results of finite element modeling of the stress-strain state when drawing wire coated with polytetrafluoroethylene

To solve the problems of determining the stable drawing of compositions with a significant difference in the mechanical properties of materials, the criteria for the stable behavior of coatings in the deformation zone are determined [6]. When setting the problem of determining the stress state of composition elements, the assumption was made that the corresponding components of the strain rate tensor for the soft and hard components of a layered system at the interlayer boundary are equal. The compliance of this assumption with the actual conditions of the drawing process determines the feasibility of applying the kinematic stability criterion, namely

$$K_{CS} = \frac{\xi_{ij}^S}{\xi_{ij}^H} = \frac{\xi_I^S}{\xi_I^H} = 1.$$

To solve the problem of identifying areas for sustainable drawing compositions with a significant difference in mechanical properties of the layered system it is required to select a criterion to evaluate the influence of technological parameters on the type of surface loading with respect to the form of the yield surface in the soft component [1]. Using this criterion, it is possible to compare the stress intensity in the coating with the current yield strength or tensile strength of the surface layer.

It is reasonable to present this criterion as a criterion for the cohesive stability of the surface layer- K_{CS}

$$K_{CS} = \frac{\sigma_i^S}{\sigma_{TS}^S} \leq .$$

At $K_{CS} > 1$, the stress intensity values exceed the tensile strength of the surface layer, and it is possible to

break the cohesive bonds in the surface layer.

For the stable process of joint plastic deformation of the layered system according to the scheme "hard base-soft coating", the condition must be met on the inter-layer border:

$$\sigma_i^H = \sigma_i^S.$$

Then the criterion for cohesive stability is the following condition:

$$K_{CS} = \frac{\sigma_i^H}{\sigma_{TS}^S} < 1.$$

The condition for the plastic flow of a solid component is the coincidence of the loading and flow surfaces. Then, taking into account the plasticity condition, the criterion of cohesive stability will take the form

$$\sigma_{TS}^S > \frac{\xi_i}{\xi_{ZZ}} \sqrt{\frac{4}{3} \sigma_S^2 - 4\sigma_{Zr}^2}.$$

To determine the stability of the process of joint plastic deformation of elements of a layered system according to the proposed criteria, two approaches are possible:

- determination and evaluation of kinematic parameters from the pre-calculated stress state using the criterion. In this case, the condition for fulfilling the cohesive stability criterion of the coating is set;
- calculation of the stress state and evaluation of the process by the criterion of cohesive stability based on kinematic parameters under the specified condition of satisfying the kinematic criterion.

The stability of polytetrafluoroethylene coatings in the process of drawing metal-polymer compositions was evaluated using the criterion of cohesive stability, provided that the kinematic stability criterion was met. The values of the half-angle of the draw plate from 0.50 to 100; the coefficient of a single exhaust from 1.05 to the values of single hoods of the basic technology with an increase in the number of transitions [10]. The calculation was performed for various kinds of thickness of the polymer layer in the range from 5 to 50 microns. The interlayer boundary was set as a straight line without taking into account the microgeometry parameters of the wire surface. The calculation was performed for the case of entering the composition into the deformation zone.

However, as the calculation results show, none of the studied technological schemes can reduce the criterion of cohesive stability to the value that determines the area of stable drawing of metal-polymer compositions.

Thus, for a smooth inter-layer border, the process of joint plastic deformation of polytetrafluoroethylene with steel is impossible, and the destruction of the coating will always occur. This mechanism of coating behavior leads to the formation of zones of non-contact deformation [2].

The formation of zones of non-contact deformation and destruction of the polymer component of the composite system in the process of drawing is well confirmed by experimental data. As a result of drawing wire with coatings based on polytetrafluoroethylene, the thickness of which exceeds the height indicators of the microgeometry of the interlayer border, under any drawing conditions, the process of clogging the input cone of the tool with a pol-

mer material occurs [5]. However, the same experiments show evidence of the presence of a coating of polytetrafluoroethylene at the exit of the wire from the draw plate channel. The presence of a coating is observed and confirmed by an increase in the corrosion resistance of such a wire compared to the wire without a coating. In addition, the experiments show a reduction of effort by 15-20 % when drawing a wire with a polytetrafluoroethylene coating, which indicates the presence of a separating polymer layer in the deformation zone.

Based on theoretical and experimental data, a four-stage mechanism of polymer material deformation is proposed [3].

At the first stage, zones of non-contact deformation are formed and the surface layer is destroyed at the peaks of microroughnesses at the entrance to the deformation zone.

At the second stage, the polymer material enters the deformation zone at the indentations of micro-surfaces with selective deformation, due to which non-contact zones are formed at the entrance to the deformation center.

At the third stage, the "polymer pocket" is completely located in the deformation zone and the elements of the composition are deformed together.

At the last stage, when the polymer pocket exits the deformation zone, non-contact zones are formed, which contribute to an equal distribution of the coating thickness at the final diameter of the composition [4].

Based on the developed mathematical model, the influence of technological parameters (degree of deformation, yield strength of the coating, half-angle of the drawing plate, back-tension) on the stress state of the coated wire in the process of drawing was studied.

The technology of production of mesh wire with a protective polymer coating was developed.

Analysis of the processes of obtaining wire coatings, as well as the analytical and experimental studies allowed us to propose two main technological stages of the formation of polymer wire coatings:

- application of the coating to the final diameter;
- application of the coating to the sample with subsequent drawing.

The development of a complex technological process for obtaining polymer-coated wire passes through two stages. At the first stage, it is necessary to develop a process for forming high-quality defect-free coatings for wire of a final diameter from an aqueous suspension of polytetrafluoroethylene. At the second stage, it is necessary to develop a technology for drawing wire with a polymer coating, based on analytical data.

The process of applying a polymer coating consists of the following main technological stages that ensure the achievement of the required level of functional properties of the coating:

- preparation of the wire surface;
- forming the coating layer;
- heat treatment.

At the stage of preparing the surface of the wire for applying the coating with an aqueous suspension, a chemical method and jet treatment are offered. The influence of the parameters of the jet processing (the type of abrasive material and its granulometric composition, compressed

air pressure, the angle of incidence of the abrasive) on the parameters of the wire surface roughness is studied.

At the stage of applying the coating, the influence of the viscosity of the water suspension and the height parameters roughness of the wire surface on the thickness of the formed polymer layer was studied [3].

At the stage of heat treatment, the influence of temperature and drying time on the degree and speed of the dewatering of the coating was studied. Based on the proposed method of determining the adhesive strength of the polymer coating, the influence of the polymerization temperature on the level of adhesive properties of the coating and the base was studied [7].

The modes of forming a polytetrafluoroethylene coating from an aqueous suspension to a wire are shown in table 1.

The technology of applying the coating to the final diameter allows you to effectively obtain high-quality polytetrafluoroethylene coatings on wire with a diameter of more than 1.8-2 mm. The research shows that the process of coating on smaller diameters is difficult due to the formation of coating defects (discontinuities, leaks, etc.), the complexity of managing the surface preparation process (both chemical and jet methods).

In addition, production and experimental studies allow us to conclude that the corrosion resistance of coated wire is increased compared to the technology of coating the final diameter. In the process of drawing, the coating is compacted, microcracks and pores are healed, and the polymer material is evenly redistributed along the cross section and length of the wire [6]. As a result, of these processes, the corrosion resistance of drawn wire increases by an average of 10%. Therefore, in some cases, to increase the level of protective properties, it is advisable to conduct additional wire drawing of the specified diameters.

Table 1

The modes of application of polytetrafluoroethylene coatings

Technological operation	Operating mode
Surface preparation 1. Chemical method: - rough degreasing; - electrochemical degreasing; - etching; - phosphating; - washing. 2. Jet method	composition of g / l: labomide-203. Temperature 70-80 ⁰ C. Time 15-20 s; composition of g / l: Na ₃ PO ₄ -20-40; NaOH – 30-50. T – 70-80 ⁰ C, time – 10-15 s, V-10-12 V, I-8-12 A / dm ² ; composition of g / l: H ₂ SO ₄ – 120-150. T – 70-80 ⁰ C, time – 8-10 s; g/l composition: phosphate-9-40-45. T – 80-90 ⁰ C, time – 25-30 s; running or distilled water; the particle size of the abrasive is 0.6 mm, the distance of processing 0.15 m air pressure 0.35 MPa.
Application of the coating	An aqueous suspension of polytetrafluoroethylene, a concentration of 70-75 %, viscosity 40 cst .
Heat treatment: - drying; - polymerization	T – 90 ⁰ C; time – 25-30 s; T – 410-415 ⁰ C; time – 2.5-3 min.

Drawing wire with a polytetrafluoroethylene coating is used in the production of polymer-coated wire with a diameter of less than 1.8-2 mm. In this case, the sample is drawn with a pre-applied polytetrafluoroethylene coating along the entire drawing route. The conducted studies of the wire stress state and the assessment of the cohesive stability of the coating allowed us to correct the basic drawing technologies [9]. The adjustment was made by changing the drawing route by increasing the coefficient of unit drawing from 1.38-1.40 (base route) to 1.46-1.50 for the route of drawing polymer-coated wire. The increase in individual compressions was carried out in order to increase the numerical values of the criterion of cohesive stability of the polymer coating inside and at the exit of the deformation focus, taking into account the coefficient of safety margin during drawing. When producing polymer-coated wire with a diameter of more than 2 mm with an additional drawing operation, there are two possible variants of the technology. The first option corresponds to the technology of obtaining wire with a coating of small diameters, i.e., applying to the sample and drawing the wire along an adjusted route [8]. However, studies of changes in the thickness of the coating in the process of drawing, the mechanism of deformation of the polytetrafluoroethylene material allow us to conclude that it is impractical to use such a technology for wire of large diameters. The use of this technology option reduces the coefficient of using the polymer material due to the partial destruction of the coating at the entrance to the deformation zone at each transition.

To obtain a wire with an increased level of anti-corrosion properties, it is recommended to apply a polymer coating before the last transition of the route and then to draw it to the final size. The coefficient of unit drawing according to the results of calculations should vary from 1.48 to 1.52. To implement this technology, the basic routes of wire drawing were adjusted. It should be noted that this option increases the cost of polymer-coated wire due to the break in the cycle of the drawing process for applying the coating before the last transition. Therefore, it is advisable to apply the coating to the wire exposed to aggressive media (acids, alkalis, sea water, etc.) before the last transition. For a standard mesh, it is sufficient to use a wire with a coating applied to the final size.

An increase in the numerical values of the criterion of cohesive stability in the process of drawing leads to the destruction of the polymer coating at the entrance to the draw plate (due to the formation of zones of non-contact deformation), clogging of the input channel and, as a result, to an increased probability of wire breakage. It is

possible to use a special tool to suppress such zones by increasing the share of hydrostatic pressure.

References

1. Arkulis G. E. Joint plastic deformation of different metals. Moscow: Metallurgy, 1964. 271 p.
2. Perlin P. I. Research of processes of processing by pressure of multilayer metals // Proceedings of the metallurgical machine building research Institute: the collection of scientific papers. Issue 16. Moscow: Metallurgical machine building research Institute, 1999. P. 129-136.
3. Gildengorn M.S. Some features of mutual movement of layers when pressing bimetallic pipes / M.S. Gildengorn, I.L. Perlin // Forging and stamping production. 1969. № 5. P. 12-15.
4. Golovanenko S.A. Production of bimetals / S.A. Golovanenko, L. V. Meandrov. Moscow: Metallurgy, 1966. 364 p.
5. Chukin M.V. Kinematic stability criterion for drawing binary systems / M.V. Chukin, M.P. Baryshnikov, A.A. Sobakar // "Films and coatings". 5th international conference September 23-25, 1998, Saint Petersburg, Russia.
6. Chukin M.V. Research of processes of applying polymer compositions from suspensions / M.V. Chukin, M.P. Baryshnikov, A.V. Krasnov // Processing of solid and layered materials: the collection of scientific papers / ed. Magnitogorsk, Magnitogorsk mining and metallurgical academy, 1996, pp. 230-236.
7. Chukin M.V. Technological features of polymer coatings formation / M.V. Chukin, M.P. Baryshnikov, A.A. Gostev // Ways of development of the machine-building complex of the Magnitogorsk metallurgical combine: the collection of scientific papers / Ed. by A. A. Gostev. Magnitogorsk, 1995, pp. 131-140.
8. Gun G.S. Development of effective drawing processes with functional coatings / G.S. Gun, M.V. Chukin, M.P. Baryshnikov et al. // Progressive processes and equipment of metallurgical production: Materials of the first international conference. scientific-technical Conf. Cherepovets: Cherepovets state university, 1998. P. 107-109.
9. Gildengorn M.S. Fundamentals of the theory of joint pressing of multi-strength metals and alloys. Moscow: Metallurgy, 1981. 144 p.
10. Improvement of technological processes at the metallurgical plant / A.A. Gostev, V.P. Antsupov, M.V. Chukin et al. Moscow: Metallurgy, 1995. 170 p.

Сведения об авторах

Baryshnikova A.M. – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anyabar1999@mail.ru

Baryshnikov M.P. – Dr. Sci. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: arcsmag@mail.ru

Nosov L.V. – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nosov.leopold@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СХЕМЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

Барышникова Анна Михайловна – ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: anyabar1999@mail.ru

Барышников Михаил Павлович – д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: argosmag@mail.ru

Носов Леонид Васильевич – ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: nosov.leopold@yandex.ru

***Аннотация.** Актуальность работы заключается в необходимости разработки технологии производства проволоки с полимерным покрытием, что вызвало необходимость исследования напряженно-деформированного состояния при волочении, а также необходимость рассмотрения современных полимерных покрытий и режимы их нанесения на материал-основу. Целью данного исследования является определение механических характеристик реальных полимерных пленок, а также определение реологической модели процесса деформирования полимера для использования разработанной математической модели при определении напряженно-деформированного состояния композиции в процессах волочения металл-полимерных систем. В качестве полимерного материала покрытия был выбран политетрафторэтилен. В качестве основного метода исследования было выбрано математическое моделирование процесса волочения сталь-полимерная композиция, которое осуществлялось в программном комплексе SIMULIA Abaqus. Новизна исследования заключается в том, что проведенные исследования напряженного состояния проволоки, оценка по критерию когезионной устойчивости покрытия позволили скорректировать базовые технологии волочения. Результаты проведенных исследований изменения толщины покрытия при волочении, механизма деформирования фторопластового материала позволяют сделать вывод о нецелесообразности использования такой технологии для проволоки больших диаметров. А также по результатам исследования можно сделать вывод о том, что для получения проволоки с повышенным уровнем антикоррозионных свойств рекомендуется нанесение полимерного покрытия перед последним переходом маришута и последующее волочение на конечный размер.*

***Ключевые слова:** волочение, проволока, покрытие, полимерные материалы покрытия, политетрафторэтилен, схема напряженно-деформированного состояния.*

Ссылка на статью:

Барышникова А.М., Барышников М.П., Носов Л.В. Разработка технологии производства проволоки с полимерным покрытием на основе изучения схемы напряженного состояния в процессе волочения // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 21-25.

Baryshnikova A. M., Baryshnikov M.P., Nosov L.V. Development of production technology for polymer coated wire based on the study of the stress state scheme in the process of drawing. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 21-25.

УДК 621.762; 621.74

Леушин И.О., Романов А.С., Леушина Л.И., Явтушенко П.М.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАПСУЛ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ*

Аннотация. Технология горячего изостатического прессования считается одним из прогрессивных современных методов производства заготовок и изделий из металлических порошков. Эта технология наиболее широко применяется для производства плотных, беспористых изделий из металлических порошков, а также для уплотнения фасонных отливок, например из титановых сплавов. При этом микроструктура прессованных изделий из распыленных металлических порошков отличается особо высокой дисперсностью и однородностью, а прессованный материал – повышенной прочностью и вязкостью. Характерной особенностью технологии является использование формообразующей оснастки – капсулы, меняющей свою геометрию в условиях баротермического воздействия, к которой предъявляется целый ряд достаточно жестких требований. В структуре такой капсулы принято различать два элемента – оболочку, или собственно капсулу, и закладные элементы, которые оформляют сложные внешние и внутренние поверхности будущего изделия и удаляются на завершающих этапах технологического процесса. В статье затрагиваются вопросы выбора материалов и методов изготовления конструктивных элементов капсул горячего изостатического прессования металлических порошков в контексте выявленных недостатков, опасностей и рисков существующего процесса, определяются условия и намечаются мероприятия по их снижению и исключению.

Ключевые слова: горячее изостатическое прессование, капсула, металлический порошок, конструктивный элемент, закладной элемент.

Введение

Технология горячего изостатического прессования (ГИП) известна с середины XX века благодаря учёным и инженерам США и Швеции. Основная идея процесса ГИП заключается в том, что всесторонне равномерное высокое давление, оказываемое в условиях высоких температур на меняющую свою геометрию технологическую оснастку (капсулу) с металлическим порошком, позволяет обеспечить 100%-ю плотность материала и изотропность его свойств во всём объёме получаемого изделия.

В настоящее время наиболее широко ГИП применяется для производства плотных, беспористых изделий из металлических порошков, а также для уплотнения фасонных отливок, например из титановых сплавов. Важно отметить, что микроструктура прессованных изделий из распыленных металлических порошков отличается особо высокой дисперсностью и однородностью, а прессованный материал – повышенной прочностью и вязкостью [1-3].

Технологический процесс ГИП состоит из следующих основных этапов (рис. 1) [4, 5]:

- 1) проектирование и изготовление герметичной капсулы;
- 2) заполнение капсулы металлическим порошком (для увеличения плотности заполнения полостей капсул применяют вибрацию);
- 3) герметизация заполненных металлическим порошком капсул путём откачки воздуха из её поло-

сти через специальные трубки и заварка последних; после герметизации капсула подвергается проверке на герметичность (чаще всего погружением в воду);

4) изостатическое прессование заполненных герметичных капсул в газостате при высоких давлениях и температуре;

5) удаление капсулы (механическая обработка или химическое травление);

6) финишная обработка полученного изделия (если это необходимо).

Рабочий диапазон температур ГИП находится в пределах от 800 до 2500°C при давлениях от 100 до 200 и более МПа. При этом достигаемая максимальная температура должна быть ниже температуры плавления обрабатываемого металлического порошка приблизительно на 20% для предотвращения образования жидкой фазы – это обеспечивает минимизацию ликвации химических элементов.

В общем случае в составе конструкции капсулы ГИП как формообразующей деформируемой технологической оснастки различают два элемента – оболочку, или собственно капсулу, и закладные элементы, которые оформляют сложные внешние и внутренние поверхности будущего изделия и удаляются на завершающих этапах технологического процесса ГИП (рис. 2).

Как показано на рис. 2, капсула для ГИП состоит из следующих основных частей: наполнительный патрубок 1, через который происходит заполнение капсулы металлическим порошком; верхняя 2 и нижняя 5 крышки; закладной элемент 4, который формирует в будущем изделии фасонную поверхность; трубка-прокладка 6 (рис. 2, б), которая предназначена для прижимания закладного элемента ко дну капсулы и фиксации его между верхней и нижней крышками, а также с её помощью можно регулировать толщину стенки получаемого изделия. На рис. 2, в показан вариант, когда закладной элемент выполняет функцию нижней крышки. Закладные элементы также могут крепиться к стенке капсулы путём сварки [6].

© Леушин И.О., Романов А.С., Леушина Л.И., Явтушенко П.М., 2020

* Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства материалов, изделий и оборудования с использованием аддитивных технологий и технологий газостатирования на базе ПАО «РУСПОЛИМЕТ» по Соглашению № 075-11-2019-084 от 18.12.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218).

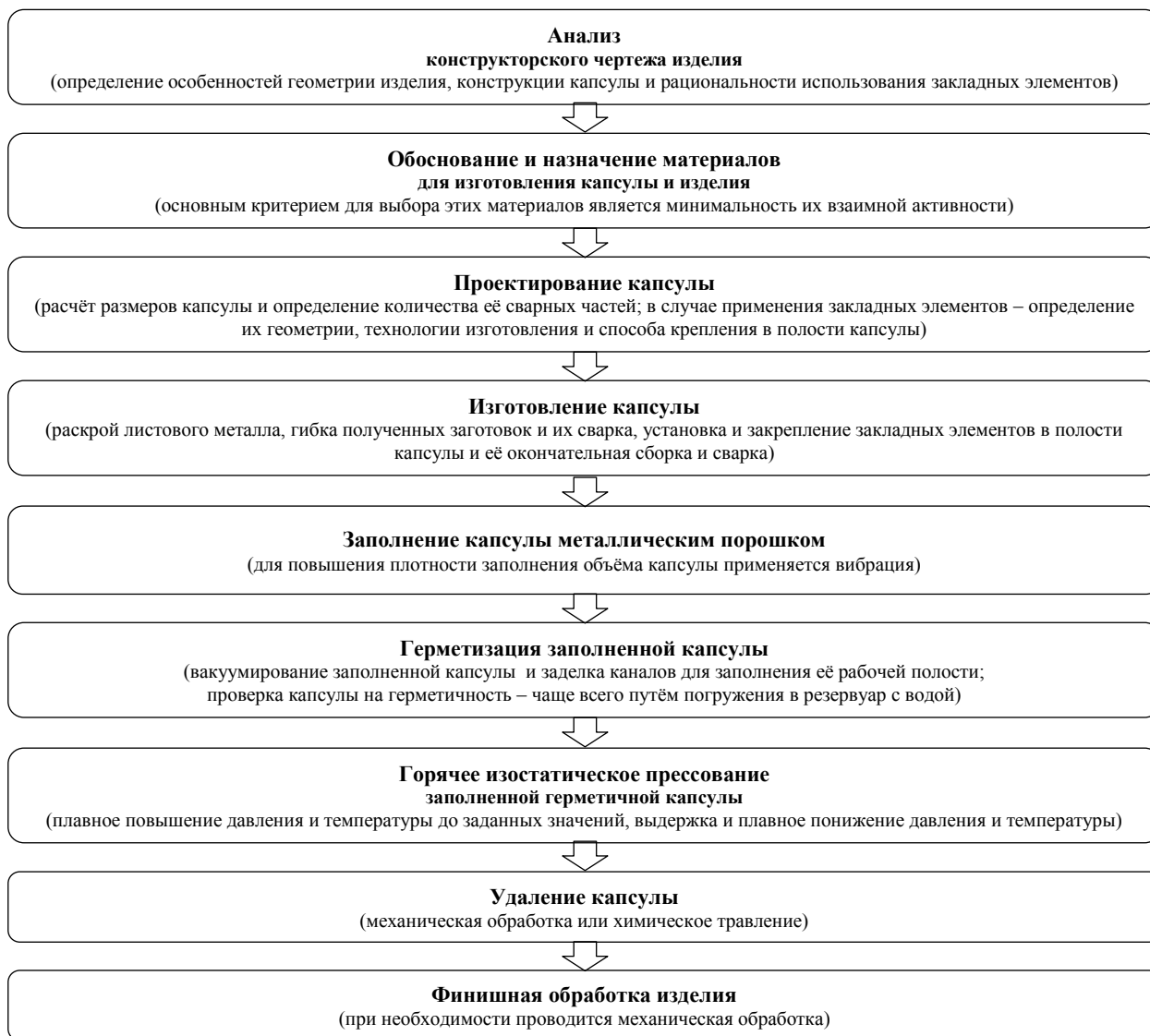


Рис. 1. Последовательность основных этапов технологического процесса ГИП

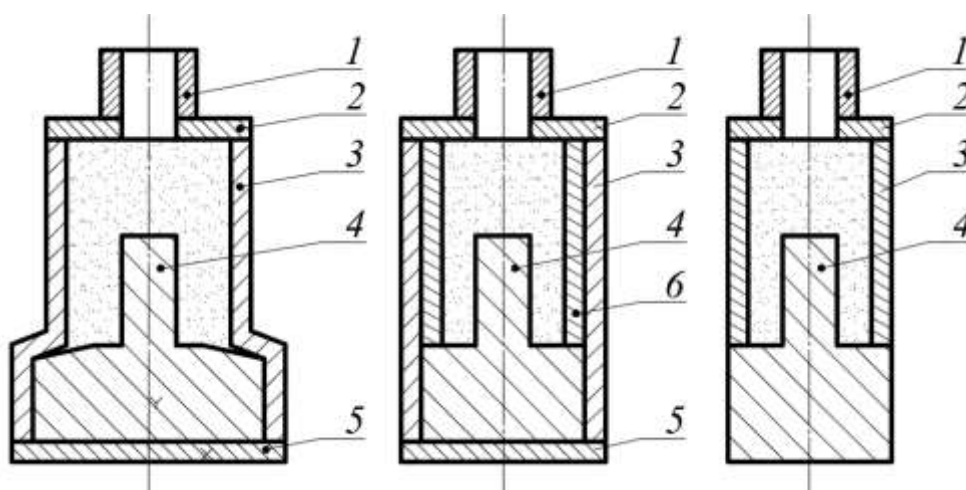


Рис. 2. Принципиальная схема капсулы и варианты способов крепления закладных элементов:
1 – наполнительный патрубок; 2 – крышка капсулы; 3 – боковая стенка (фасонная) капсулы;
4 – закладной элемент; 5 – нижняя крышка капсулы; 6 – трубка-прокладка

Технология ГИП позволяет получить:

- 1) высокие физико-механические свойства изделий (плотность, структура, химический состав);
- 2) изделия со сложной геометрией, не требующих больших объёмов механической обработки;
- 3) малые потери обрабатываемого материала;
- 4) возможность получения составных конструкций, в том числе и из нескольких материалов;
- 5) относительная простота конструкции оснастки;
- 6) возможность исправления внутренних дефектов (например, дефектов литья) и др.

Однако для этого каждый этап технологического процесса ГИП должен сопровождаться жёстким контролем размеров конструктивных элементов капсулы, точности и надёжности установки и крепления закладных элементов, качества выполнения подготовительных операций (плотность заполнения и герметичность), термовременного режима процесса изостатирования и завершающих технологических операций (полнота удаления капсулы и закладных элементов и качество механической обработки).

В этой связи особенно актуальной становится проблема выбора материала и способа изготовления конструктивных элементов капсул ГИП.

Существующие варианты решения

Капсулы

Несколько десятилетий успешного применения ГИП сформировали стереотипное мнение о том, что главным требованием к материалу капсул наряду с доступностью по цене является его хорошая свариваемость. Именно поэтому в 100% случаев капсулы ГИП в промышленных масштабах изготавливают из низкоуглеродистой листовой стали последовательными раскроем, гибкой и сваркой.

В центре внимания при этом традиционно находится качество сварных швов, которые должны выдерживать пиковые нагрузки баротермической обработки в течение достаточно длительных временных интервалов, достигающих нескольких часов. Кроме этого значение имеет обрабатываемость материала, обусловленная необходимостью удаления оболочки механической обработкой.

Закладные элементы капсул

К материалу закладных элементов ГИП предъявляют целую линейку требований: по низкой стоимости, технологичности, низкому сопротивлению деформации в рабочем диапазоне ГИП, близости значений коэффициентов линейного термического расширения с обрабатываемым материалом металлического порошка, возможности удаления травлением, совместимости с обрабатываемым материалом, проявляющейся в минимизации толщины переходного диффузионного слоя, неизбежно образующегося в ходе ГИП.

Обычно для ГИП никелевых, титановых и стальных металлических порошков в качестве материала закладных элементов капсул применяют малоуглеродистые стали. Такие закладные элементы возможно изготавливать специальными способами литья, обес-

печивающими высокую геометрическую точность (литье по выплавляемым и/или выжигаемым моделям) или механической обработкой. Они позволяют оформлять внутренние полости в деталях при ГИП в интервале температур 800-1300°C и хорошо удаляются травлением в растворе азотной, соляной и других кислот. Это обстоятельство, кроме снижения объёма механической обработки, позволяет получать изделия со сложным профилем с частично или полностью не обрабатываемыми поверхностями [7]. Известен также опыт использования в качестве материала закладных элементов оксидной керамики [8].

Недостатки, опасности и риски

1. Недостаточный уровень качества сварных швов может привести к негативным последствиям. При наличии даже самых мельчайших несплошностей и пор в сварных швах капсулы в нее под высоким давлением проникает газ (аргон не растворяется в металле), что является причиной газовой пористости и брака изделий. При этом на завершающей стадии цикла газостатирования давление в цилиндре газостата снижается быстрее, чем внутри капсулы, и нарастающая разность давлений в капсуле и газостате может вызвать эффект «раздувания», а иногда и взрыва капсулы.

2. Высокая трудоемкость операций изготовления закладных элементов капсул ГИП механической обработкой металлических заготовок, а также длительность операций и тяжелые условия труда персонала при их удалении травлением в кислоте негативно влияют на технико-экономические и экологические показатели процесса в целом.

Перспективные варианты решения

Сравнение механических характеристик материала ряда марок низкоуглеродистой стали в литом и катаном состоянии после рекомендуемой термической обработки позволяет допустить в ограниченном диапазоне толщин стенок возможность использования цельнолитых капсул ГИП, полученных специальными способами, такими как литье по выплавляемым и/или выжигаемым моделям [9].

Проведенные авторами статьи патентный поиск и информационный обзор состояния вопроса показали наличие ряда предпосылок для изготовления закладных элементов капсул ГИП помимо уже упомянутых специальных способов литья и другими методами, как, например, литье вспененных металлических сплавов и интерметаллидных композиций, некоторые аддитивные технологии (например, SLS-процесс селективного лазерного спекания), а также формообразование из неорганических содосодержащих водорастворимых материалов [10]. Основные из этих предпосылок – соответствие перечисленных перспективных материалов и методов изготовления капсул ГИП требованиям, описанным выше, и, как следствие, ожидаемое снижение зависимости результатов процесса от качества сварных швов капсул ГИП,

уменьшение трудоемкости операций изготовления конструктивных элементов капсул, а также улучшение условий труда производственного персонала за счет исключения их удаления травлением в агрессивных средах. Условиями реализации перечисленных перспективных вариантов решения проблемы представляются заинтересованность и наличие профильных производственных мощностей на базовом предприятии и/или его партнерах.

Заключение

Намечены мероприятия и определены условия для обеспечения стабильности ГИП, снижения недостатков существующего технологического процесса и рисков получения производственного брака изделий. Они связаны с изготовлением конструктивных элементов капсул ГИП современными методами точного литья, аддитивными технологиями и привлечением материалов с особыми свойствами, таких как металлические и интерметаллидные пены, а также неорганические соледержащие водорастворимые композиции. Их исследованиями активно занимается рабочая группа специалистов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева и ПАО «РУСПОЛИМЕТ».

Список литературы

1. Агеев С.В., Гиршов В.Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // Металлообработка. 2015. №4(88). С. 56-60.
2. Галстян Л.З. Получение высококачественных порошковых композиционных материалов методами порошковой металлургии // Вестник НПУА. Металлургия, материаловедение, недропользование. 2018. №2. С. 54-62.
3. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Особенности моделирования процесса получения гранул методом PREP // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. №1 (214). С. 123-129.
4. Джеймс П. Дж. Процессы изостатического прессования: пер. с англ. / под ред. И.И. Папирова, Я.Д. Пахомова. М.: Металлургия, 1990. 192 с.
5. Einführung in die PM/HIP-Technologie/ Ein Leitfaden für Anwender und Konstrukteure. URL: <http://www.epma.com> (дата обращения: 27.05.2020).
6. Способ изготовления профильных дисков методом горячего изостатического прессования: пат. 2649188 Рос. Федерация. №2016118312; заявл. 11.05.2016; опубл. 16.11.2017, Бюл. №32.
7. Maanonen M. Steel Pickling in Challenging Conditions: monograph. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2014. 40 p.
8. Способ изготовления форсунки для топливного клапана в дизельном двигателе и форсунка: пат. 2313422 Рос. Федерация. №2005114359/02; заявл. 03.10.2003; опубл. 27.12.2007, Бюл. №36.
9. Шуляк В.С. Литьё по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
10. Зленко М.А., Попович А.А., Мутьлина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: СПбГУ, 2013. 221 с.

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395. E-mail: igoleu@mail.ru.

Романов Антон Сергеевич – заведующий лабораториями кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395. E-mail: romanoffas@yandex.ru.

Леушина Любовь Игоревна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395. E-mail: kafmto@mail.ru.

Явтушенко Павел Михайлович – аспирант, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CONSTRUCTION ELEMENTS OF CAPSULES FOR HOT ISOSTATIC PRESSURE OF METAL POWDERS: MODERN TRENDS

Leushin I.O. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: igoleu@mail.ru.

Romanof A.S. – Head of laboratories of the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: romanoffas@yandex.ru.

Leushina L.I. – Ph. D (Eng.), Associate Prof., Associate Prof., the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: kafmto@mail.ru.

Yavtushenko P.M. – Postgraduate Student, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: p.yavtushenko@ruspolymet.ru.

Abstract. *Hot isostatic pressing technology is considered one of the most progressive modern methods for the production of billets and products from metal powders. This technology is most widely used for the production of dense, non-porous products from metal powders, as well as for the densification of shaped castings, for example, from titanium alloys. At the same time, the micro-structure of pressed products made of atomized metal powders is distinguished by a particularly high dispersion and uniformity, and the pressed material - by increased strength and toughness. A characteristic feature of the technology is the use of a form-building tooling - a capsule that changes its geometry under barothermal action, to which a number of rather stringent requirements are imposed. In the structure of such a capsule, it is customary to distinguish between two elements - the shell, or the capsule itself, and the embedded elements that shape the complex external and internal surfaces of the future product and are removed at the final stages of the technological process. The article deals with the selection of materials and methods for manufacturing structural elements of capsules for hot isostatic pressing of metal powders in the context of the identified shortcomings, hazards and risks of the existing process, determines the conditions and outlines measures to reduce and eliminate them.*

Keywords: *hot isostatic pressure, capsule, metal powder, structural element, embedded element.*

Ссылка на статью:

Леушин И.О., Романов А.С., Леушина Л.И., Явтушенко П.М. Конструктивные элементы капсул горячего изостатического прессования металлических порошков: современные тренды // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 26-30.
Leushin I.O., Romanof A.S., Leushina L.I., Yavtushenko P.M. Construction elements of capsules for hot isostatic pressure of metal powders: modern trends. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 26-30.

УДК 621.77

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г., Тандон П., Кожемякина А.Е.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ПРОКАТКИ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Одним из ключевых направлений научно-технического развития является разработка интеллектуальных производственных технологий создания новых металлических материалов и способов их конструирования с повышенными механическими и функциональными свойствами для инновационных применений в автомобильной, военной и других отраслях промышленности. Перспективными в этой области являются технологии, основанные на использовании методов интенсивной пластической деформации, среди которых можно выделить аккумулялирующую прокатку. Ее преимущества заключаются в простоте процесса, относительно доступном и недорогом оборудовании, высокой производительности и непрерывном производстве, что приводит к увеличению промышленных возможностей процесса. Однако, несмотря на многообразие известных методов аккумулялирующей прокатки и высокую эффективность некоторых из них, имеются проблемы, связанные с неравномерностью деформации при прокатке и недостаточной прочностью соединения слоев. Для повышения эффективности процесса аккумулялирующей прокатки, предлагается прокатывать многослойные металлические материалы с применением асимметрии.

Ключевые слова: многослойные металлические материалы, интенсивная пластическая деформация, аккумулялирующая прокатка, асимметричная прокатка, опытно-экспериментальный прокатный стан.

Благодарность

1. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46042 от 20.05.2020). The study was supported by a grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-69-46042 of 20.05.2020)
2. Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ (договор №18-58-45013\19 ИНД_а от 14.10.2019). The study was supported by a grant of the RFBR (contract No. 18-58-45013\19 IND_a from 14.10.2019)

Для транспортного, химического, энергетического, атомного, морского машиностроения, авиакосмической техники требуются материалы, обладающие высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, сниженной массой и стоимостью. Этим требованиям отвечают многослойные металлические материалы [1-4]. Важнейшей задачей в области создания многослойных металлических материалов является разработка методов направленного регулирования их структуры и свойств, которые обеспечили бы требуемые эксплуатационные характеристики.

Множество исследований посвящено изучению влияния методов получения и деформационно-термической обработки на различные свойства многослойных металлических материалов [1-3]. Большой вклад в развитие теории и практики многослойных металлических материалов внесла магнитогорская научная школа «МГТУ им. Г.И. Носова» во главе с Г.Э. Аркулисом и В.Л. Стеблянко. Аркулис Г.Э. являлся создателем теории совместной пластической деформация разных металлов. Стеблянко В.Л. основал новое научное направление в теории и технологии сварки давлением разнородных металлов, обработки металлических поверхностей электроразрядной плазмой, включая очистку и формирование функциональных покрытий.

К основным методам производства слоистых композитов относят: литейное плакирование, горячее и холодное пластическое деформирование (прокатка, прессование, волочение, винтовая экструзия), сварку взрывом, электрошлаковую наплавку, комбинирован-

ные способы (литье + прокатка, сварка взрывом + прокатка и т.д.), аккумулялирующую прокатку и равноканальное угловое прессование (РКУП).

Методы ИПД являются одними из самых современных и экономически обоснованных способов получения высоких значений механических свойств металлов и сплавов. С их помощью стало возможным получать ультрамелкозернистую структуру. Такие структурные изменения приводят к значительному увеличению прочности – в 2 раза данный параметр возрастает в чистом металле и на 40-80% в сплавах [4].

Разработка технологий ИПД является сложной научно-технической задачей. В настоящее время известны несколько различных схем ИПД, в частности кручение под высоким давлением, всесторонняя ротационная ковка, винтовая экструзия, равноканальное угловое прессование, пакетная гидроэкструзия. Данные процессы, несмотря на возможность получения ультрамелкозернистой структуры, не являются технологически выгодными из-за невозможности получения длинномерных изделий и недостаточной производительности. Этих недостатков можно избежать применением аккумулялирующей прокатки. Суть метода аккумулялирующей прокатки заключается в сборке пакета из последовательно чередующихся листов металлов и последующей прокатке пакета до толщины, равной толщине одного исходного слоя, составляющего композит. Затем осуществляется раскрой полученного проката, сборка очередного пакета и повторение описанного технологического цикла до получения требуемой толщины слоев в заготовке [5]. Таким образом осуществляется несколько проходов, количество которых ограничено размерами образца, уменьшающимися из-за

обрезки кромок. Основными преимуществами процесса аккумулярующей прокатки являются простота процесса, относительно доступное и недорогое оборудование, высокая производительность и непрерывное производство, что приводит к увеличению его промышленных возможностей [6].

Пример схемы процесса аккумулярующей прокатки многослойных материалов приведен на рис. 1 [7]. Перед прокаткой проводят мерную резку заготовок из листов, обработку их поверхности, сборку нарезанных листов в пакет, вакуумирование пакета, нагрев в печи до температуры 1000°C и последующее пластическое деформирование методом горячей прокатки.

Возможно совмещение процессов аккумулярующей прокатки и диффузионной сварки. В работе [8] приведено описание метода диффузии-прокатки для получения многослойного композита из Cu и Fe. На

рис. 2 изображена принципиальная технологическая схема обработки.

На рис. 3 приведена схема процесса аккумулярующей прокатки биметаллических листов Al-Mg [9]. Перед началом процесса прокатки заготовки очищают от загрязнений ацетоном и удаляют оксидный слой проволочными щетками. Затем листы укладывают в порядке Al/Mg/Al и соединяются в лист толщиной 4,5 мм. Сложенные листы выдерживают в печи при температуре 250°C в течение 20 мин. Предварительно нагретые штабелированные листы прокатываются сразу после извлечения из печи. Диаметр валков 120 мм, скорость прокатки 30 об/мин. Многослойный лист после прокатки охлаждают на воздухе и разрезают на требуемую длину, затем цикл повторяется. Процесс завершается в три этапа с выходом конечного многослойного листа толщиной 1,4 мм.

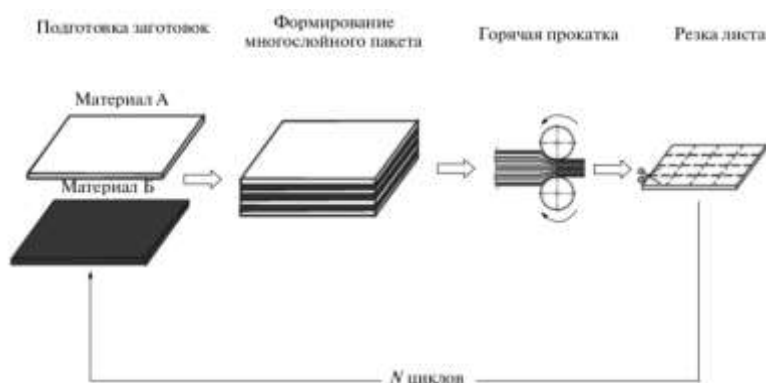


Рис 1. Схема технологического процесса аккумулярующей прокатки

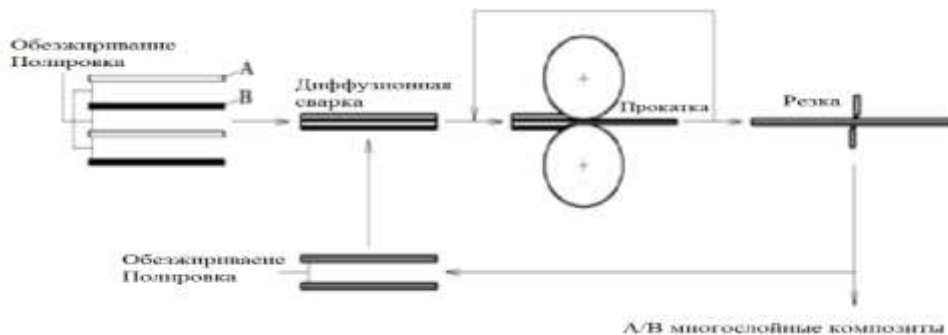


Рис. 2. Схема повторяющегося процесса диффузионной сварки и прокатки

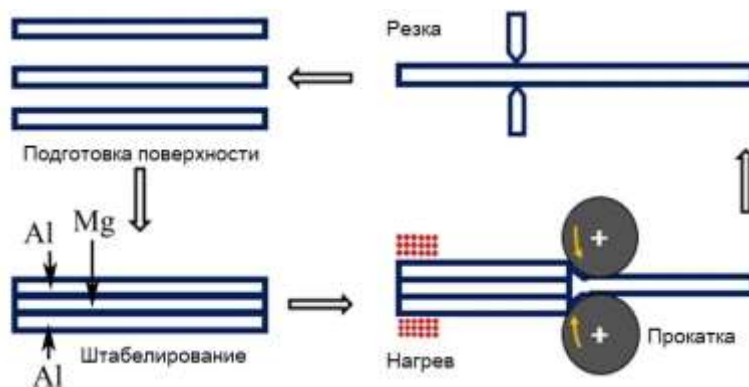


Рис. 3. Схема процесса аккумулярующей прокатки биметаллических листов Al-Mg

Аккумулирующая прокатка была успешно применена для получения алюмоматричных композитов Al-SiC [10]. Согласно этой технологии собирается пакет из двух алюминиевых листов, между подготовленными контактирующими поверхностями вводятся армирующие частицы (например, SiC, FeTiO₃) (рис. 4). Такое армирование позволяет повысить прочность материала, не увеличивая при этом существенно его вес. В работе [11] исследовано влияние добавления частиц SiC на микроструктуру и механические свойства композитов при аккумулирующей прокатке. Процентное содержание вводимых частиц SiC варьировалось в диапазоне 1, 2 и 4 об.%. Такая микроструктура привела к повышению твердости, прочности и относительного удлинения в процессе. При увеличении объемной доли частиц SiC до 4 об.% предел текучести и прочность композиционных листов увеличиваются более чем в 1,2 и 1,3 раза по сравнению с алюминиевыми листами.

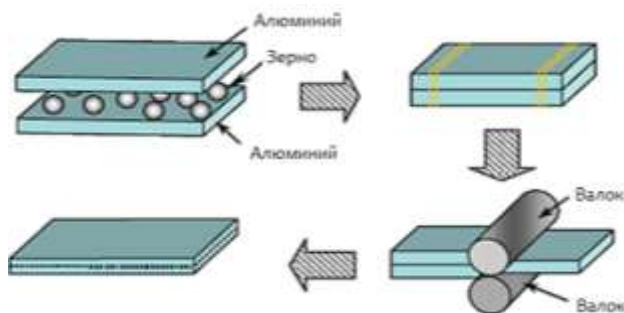


Рис. 4. Схема процесса аккумулирующей прокатки алюмоматричных композитов

Неравномерность деформации слоистых композиций при аккумулирующей прокатке, зависящая от соотношения сопротивлений деформации составляющих, исходных толщин слоев и порядка их укладки, параметров очага деформации, а также от контактных сил трения и касательных напряжений на границах соединения, оказывает отрицательное влияние на процесс прокатки и свойства биметалла, т.к. приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут вызывать расслоение биметалла, его изгиб, коробление, разрыв более твердых слоев [12].

Для повышения эффективности процесса аккумулирующей прокатки предлагается прокатывать биметаллы с применением асимметрии [13]. Асимметричная прокатка – это один из наиболее экономичных способов ИПД для повышения качества готового проката, т.к. является видом усовершенствования производства проката, который возможно внедрять без полной реконструкции на современных агрегатах. При этом процессе отсутствует полная симметрия относительно горизонтальной плоскости, т.е. или диаметры рабочих валков различны, или различно состояние их поверхности, или один из валков не приводной, или валки имеют разную скорость и прочие (рис. 5).

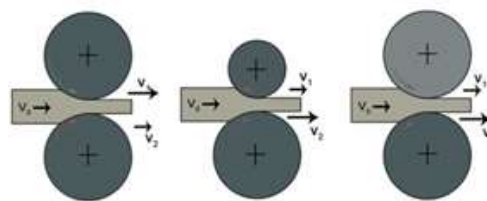


Рис. 5. Виды асимметричной прокатки

Учеными Магнитогорского государственного технического университета разработано устройство для асимметричной прокатки толстолистового металла [14] (рис. 6). Устройство содержит прокатную клетку с валками разного диаметра и установленный за клетку отгибующий ролик. Оно снабжено датчиком положения отгибующего ролика, индикатором наличия металла, расположенным в месте пересечения вертикальной оси ролика с траекторией движения листа. Отгибующий ролик выполнен с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Устройство обеспечивает создание стабильной кинематической зоны опережения на верхнем валке и сдерживание ее роста на нижнем валке, что исключает асимметрию зон трения на валках.

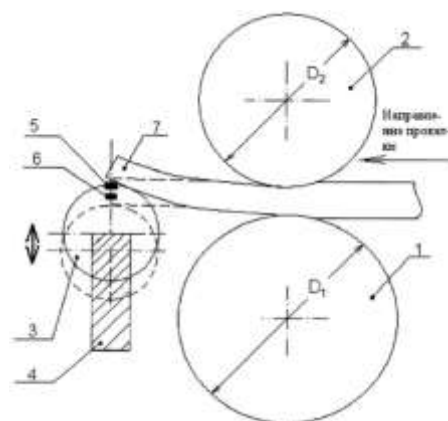


Рис. 6. Устройство для асимметричной прокатки: 1 – нижний валок; 2 – верхний валок; 3 – отгибующий ролик; 4 – механизм перемещения; 5 – датчик положения; 6 – индикатор наличия металла; 7 – лист

Для оценки деформированного состояния, условий прямолинейного выхода металла из валков было произведено моделирование процессов симметричной и асимметричной аккумулирующей прокатки в программном комплексе Deform 2D [4]. В качестве материала использовались биметаллы Al5083/Al2024, Al6061/Al2024, Al7075/Al2024, Al5083/Al1070, Al6061/Al1070.

Моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых биметаллов с рассогласованием скоростей валков показало следующие результаты: при увеличении скоростной асимметрии от 10 до 50% изменяется прямолинейность выхода металла из очага деформации. Наблюдается значительный изгиб переднего и заднего концов полосы практически во всех случаях моделирования. Влияние на изгиб полосы

оказали в первую очередь скорости валков и значения коэффициентов трения. Наиболее благоприятным случаем выступают эксперименты при коэффициенте трения $f = 0,3$. Рассогласование скоростей валков зависело от вида алюминиевого сплава: чем прочнее была марка нижнего слоя, тем большая разность скоростей требовалась для прямолинейного выхода полосы (при обработке сплавов Al5083/Al1070 и Al6061/Al1070 рассогласование составило 20 %, а для прокатки Al5083/Al2024 и Al6061/Al2024 необходимо рассогласование в 40%).

Для проведения дальнейших исследований в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» приобретен опытно-экспериментальный прокатный стан. Характеристики стана приведены в таблице.

Технические характеристики
опытно-экспериментального прокатного стана
для асимметричной прокатки

1. Тип стана	Реверсивный одноклетевой ДУО листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков
2. Максимально допустимое усилие прокатки	2500 кН (250 тс)
3. Максимально допустимый момент прокатки	2×65 кН·м (2×6,5 тс·м)
4. Номинальный диаметр рабочих валков	340 мм
5. Прокатываемые материалы	Листовые заготовки из черных (Fe) и цветных (Al, Cu, Ti) металлов и сплавов с пределом текучести до 1500 МПа
6. Начальные размеры исходных листовых заготовок на входе:	
максимальная толщина	50 мм
максимальная ширина	380 мм
7. Конечные размеры готовых листов на выходе:	
минимальная толщина	0,3±0,03 мм
максимальная ширина	380 мм
8. Режимы работы прокатного стана	1. Асимметричная прокатка с рассогласованием окружных скоростей двух рабочих валков 2. Симметричная прокатка с одинаковыми окружными скоростями двух рабочих валков
9. Тип главного электропривода	Индивидуальный
10. Максимальный крутящий момент на каждом рабочем валке	65 кН·м (6,5 тс·м)
11. Нажимное устройство	Гидравлическое
12. Масса прокатного стана (всего оборудования в сборе)	≈ 20 т
13. Установленная электрическая мощность прокатного стана	200 кВт (суммарно)

Прочность сцепления является одним из важнейших показателей эффективности многослойных металлических материалов [15-18]. Плохая межфазная прочность сцепления приводит к разделению слоев. Повышенная прочность сцепления может быть достигнута путем создания волнообразных контактных поверхностей с механическим сцеплением за счет межфазного вогнуто-выпуклого замкового эффекта. Схема слоистого композита Al-сталь приведена на рис. 7.

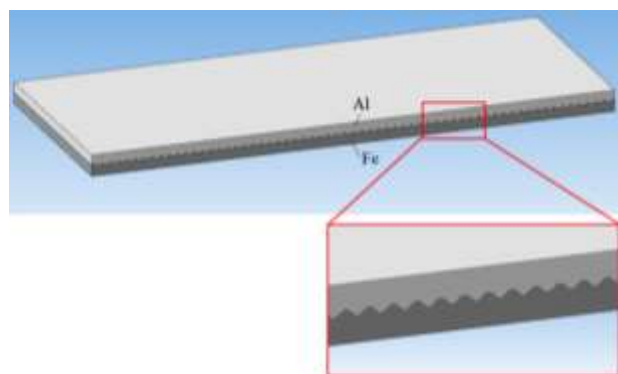


Рис. 7. Схема слоистого композита Al-сталь с механическим соединением

Взаимное проникновение твердого материала в мягкий материал на границе раздела может быть достигнуто за счет специальной технологии аккумулирующей холодной прокатки. Этот метод состоит из двух проходов холодной прокатки с общим уменьшением толщины на 50%. Во время первого прохода холоднокатаная склейка выполняется двумя рабочими валками, один из которых гладкий, а второй рабочий валок имеет специальный микроскопический синусоидальный профиль поверхности (рис. 8). Амплитуда синуса $a = 0,25$ мм и период $T = \pi / 2$ мм (рис. 9). Во время второго прохода холоднокатаная склейка выполняется двумя гладкими рабочими валками. В результате может быть получен слоистый композит из Al-стали с волнистой поверхностью раздела.

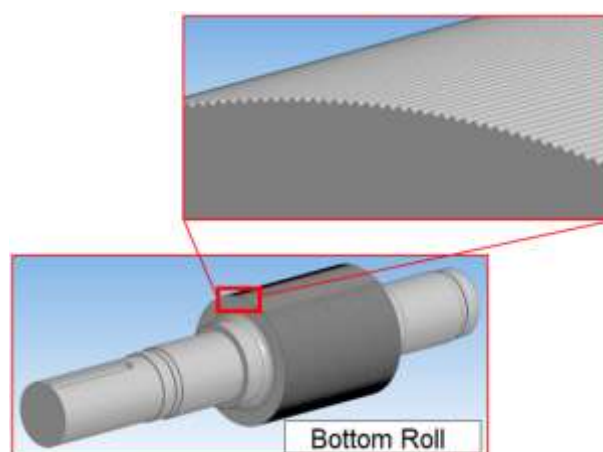


Рис. 8. Рабочий валок с микроскопическим синусоидальным профилем поверхности

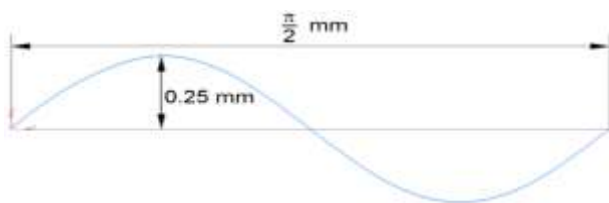


Рис. 9. Размеры синусоидальной волны

В работе [19] с использованием программного комплекса QForm проведено моделирование процесса изготовления композита, состоящего из алюминиевого сплава 6082 и стали DC04. Проанализировано влияние синусоидального профиля рабочего вала на поведение композиционного слоя. В результате проведения численного эксперимента показано, что данная технология аккумулирующей холодной прокатки способна ввести дополнительную пластическую деформацию на границе раздела композита по сравнению с обычным процессом аккумулирующей прокатки. Результаты исследования поведения межфазных связей могут быть полезны при разработке усовершенствованной технологии сварки холодным давлением для изготовления композитов Al-сталь с высокой прочностью соединения.

Вывод. Предложены технологические решения для получения слоистых металлических материалов с помощью процесса аккумулирующей прокатки. Для повышения эффективности процесса аккумулирующей прокатки предлагается прокатывать биметаллы с применением асимметрии. Прочность сцепления является одним из важнейших показателей эффективности слоистых композитов. Повышенная прочность сцепления слоистых композитов может быть достигнута путем создания волнообразных контактных поверхностей за счет межфазного вогнуто-выпуклого замкового эффекта.

Список литературы

1. Современные направления развития производства и применения двухслойных сталей / А.И. Зайцев, И.Г. Родионова, А.В. Амежнов, А.А. Павлов // *Технология колесных и гусеничных машин*. 2013. № 3 (7). С. 17-22.
2. Хузин Р.Р., Зарипов М.З. Исследование влияния сопутствующей обработки на свойства сварного соединения из биметалла 09Г2С+08Х13 // *Argioi*. Серия: Естественные и технические науки. 2018. № 3. С. 1-10.
3. Формирование структуры в зоне соединения сваренного взрывом биметалла 08Х13+09Г2С после горячей прокатки / В.Н. Арисова, А.Ф. Трудов, А.Г. Серов, Ю.А. Лобашук // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2018. № 9. С. 34-40.
4. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О. Анализ и математическое моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых сплавов серий 1xxx, 2xxx, 5xxx-7xxx // *Журнал технических исследований*. 2019. Т. 5. № 1. С. 53-59.
5. Белошенко В.А., Дмитренко В.Ю., Чижко В.В. Модификация структуры и свойств Cu-Fe-композитов методами обработки давлением // *Физика металлов и металловедение*. 2015. Т. 116. № 5. С. 484-484.
6. Rahmatabadi D. et al. Fracture toughness investigation of Al1050/Cu/MgAZ31ZB multi-layered composite produced by accumulative roll bonding process // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 734. P. 427-436.
7. Исследование многослойного материала на основе нержавеющей сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих, С.Ю. Дельгадо Рейна // *Физика металлов и металловедение*. 2014. Т. 115. № 4. С. 431.
8. Yang Y. et al. Evolution of structure and fabrication of Cu/Fe multilayered composites by a repeated diffusion-rolling procedure // *Materials & Design*. 2015. Vol. 85. P. 635-639.
9. Cheepu M. et al. Fabrication and analysis of accumulative roll bonding process between magnesium and aluminum multi-layers // *Applied Mechanics and Materials*. 2018. Vol. 877. P. 183-189.
10. Fathy A. et al. Evaluation of mechanical properties of 1050-Al reinforced with SiC particles via accumulative roll bonding process // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. № 2. P. 209-218.
11. Khair A. I., Fathy A. Enhanced strength and ductility of Al-SiC nanocomposites synthesized by accumulative roll bonding // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 1. P. 478-489.
12. Моделирование деформаций при горячей прокатке магниево-алюминиевого композита / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, В.Н. Арисова, И.А. Пономарева, Д.В. Щербин // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2015. № 8 (168). С. 120-124.
13. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М. Исследование метода аккумулирующей прокатки как способа обработки алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 // *Теория и технология металлургического производства*. 2019. № 2 (29). С. 37-42.
14. Пат.2254943 РФ, МПК В 21 В 1/22. Устройство для асимметричной прокатки толстолистового металла / Песин А.М., Салганик В.М., Дригун Э.М., Чикишев Д.Н.; заявитель и патентообладатель Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова (RU). – 2004103203/02; заявл. 04.02.2004; опубл. 27.06.2005, Бюл. № 3. – 4 с.: ил.
15. Gullino A., Matteis P., D'Aiuto F. Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications // *Metals*. 2019. Vol. 9. № 3. P. 315.
16. Groche P. et al. Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. № 10. P. 1972-1994.
17. Schmidt H. C. et al. Joining of blanks by cold pressure welding: Incremental rolling and strategies for

surface activation and heat treatment // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2019. Vol. 50. № 8. P. 924-939.

18. Haraga K. Strength Properties of Aluminium/Aluminium and Aluminium/Steel joints for light

weighting of automotive body // Welding in the World. 2000. Vol. 44. P. 23-27.

19. Pesin A. et al. FEM simulation of fabrication of Al-Steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect // Procedia Manufacturing. 2020.

Сведения об авторах

Песин Александр Моисеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-25. E-mail: a.pesin@magtu.ru.

Пустовойтов Денис Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-25. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru.

Пивоварова Ксения Григорьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-12. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru.

Тандон Пунит – PhD, профессор, Индийский институт информационных технологий, проектирования и производства, Джабалпур. Тел.: 91-761-2794411. E-mail: puneet.tandon01@gmail.com.

Кожемякина Анна Евгеньевна – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-25. E-mail: kozehmiakina.a@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FEATURES OF ACCUMULATIVE ROLL BONDING OF MULTILAYER METAL MATERIALS

Pesin Alexander M. – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel. 29-85-25. E-mail: a.pesin@magtu.ru.

Pustovoitov Denis O. – Ph. D (Eng.), associate Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Tel. 29-85-25. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru.

Pivovarova Ksenia G. – Ph. D (Eng.), associate Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel. 29-85-12. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru.

Tandon Punit – PhD, Professor; Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, Jabalpur, India. Tel. 91-761-2794411. E-mail: puneet.tandon01@gmail.com.

Kozehmiakina Anna E. – Postgraduate student of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel. 29-85-25. E-mail: kozehmiakina.a@yandex.ru.

***Abstracts.** One of the key areas of scientific and technical progress is the development of intelligent production technologies for creating new metal materials with improved mechanical and functional properties for innovative applications in the automotive, military and other industries. Promising in this area are technologies based on the use of methods of intensive plastic deformation, among which we can distinguish accumulative roll bonding. Its advantages are the simplicity of the process, relatively affordable and inexpensive equipment, high productivity and continuous production, which leads to an increase in the industrial capabilities of the process. However, despite the variety of known methods of accumulative roll bonding and the high efficiency of some of them, there are problems associated with uneven deformation during rolling and insufficient strength of the connection of layers. To increase the efficiency of the accumulative roll bonding process, it is proposed to roll multilayer metal materials using asymmetry.*

***Keywords:** multilayer metal material, severe plastic deformation, accumulative roll bonding, asymmetric rolling, pilot rolling mill*

Ссылка на статью:

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г., Тандон П., Кожемякина А.Е. Особенности процесса аккумулирующей прокатки многослойных металлических материалов // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 31-36.

Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pivovarova K.G., Tandon P., Kozehmiakina A.E. Features of accumulative roll bonding of multilayer metal materials. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 31-36.

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.778:620.17

Куренкова Т.П., Кухаренко М.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ НА УСТАЛОСТНУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ МЕТАЛЛОКОРДА

Аннотация. В современных условиях эксплуатации машин в число основных задач выдвигается повышение прочности и долговечности. Для сохранения целостности и прочности шины требуется корд с высоким сопротивлением усталости при циклическом нагружении. Обеспечение усталостной долговечности является важной проблемой применения металлокорда. Именно поэтому вопрос о повышении усталостной прочности является актуальным для ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”», в связи с чем была проведена исследовательская работа по влиянию качества стали, из которой изготовлен металлокорд, на усталостные свойства. Для определения влияния чистоты стали на усталостные свойства металлокорда были проведены сравнительные испытания циклической выносливости образцов металлокорда различных конструкций, изготовленных на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”», из катанки разных производителей. Все плавки, использованные в эксперименте, имеют одинаковое содержание углерода (0,82-0,83%). Существенное различие имеют плавки обоих производителей по содержанию примесей и азота. Загрязненность стали неметаллическими включениями оценена плотностью и индексом загрязненности. Факторы метизного производства (термообработка, скорость волочения, величина частных и суммарных обжатий) при проведении анализа результатов не учитывались. Изучение усталостных свойств металлокорда проводилось с использованием метода Хантера, при котором образец подвергается циклическому изгибу с вращением при различных напряжениях до наступления разрушения. При этих условиях наружные и внутренние волокна образца подвергаются попеременно нагрузке растяжения и сжатия, создающей напряжения в проволоке. Получены результаты, подтверждающие зависимость усталостных свойств металлокорда от содержания цветных металлов и азота в стали.

Ключевые слова: усталость, сталь, образец, металлокорд, циклы, прочность, напряжение, катанка, жесткость.

Большое значение в исследованиях армирования автомобильных шин металлокордом придается оценке его усталостных свойств, прогнозирование рабочих характеристик по лабораторным данным. Анализ литературы показывает, что на усталостные свойства металлокорда влияет качество стали, из которой он изготовлен: чем чище сталь по содержанию примесей и неметаллических включений, тем выше его усталостная долговечность. Также известно, что на усталостные свойства проволоки и металлокорда в значительной степени влияют условия волочения: скорость, величина частных и суммарных обжатий, качество волочильного инструмента и смазки [1, 2].

При движении автомобиля и перекачивании шины, корд непрерывно испытывает циклические деформации. Под действием знакопеременных повторяющихся нагрузок металл (а в случае наших исследований – металлокорд) разрушается при напряжениях меньших, чем предел текучести. Это явление называется усталостью. Сопротивление металлов усталости характеризуют пределом усталости, т.е. тем максимальным напряжением, при котором многократное повторение циклов нагружения не вызывает разрушения образца.

Основным принципом выбора метода испытания металлокорда для определения усталостной выносливости является то, что схема испытаний должна быть

максимально приближена к схеме работы элемента в изделии. Одним из используемых методов испытания является метод Хантера – изгиб с вращением, при котором наружная часть образца подвергается циклическому растяжению – сжатию. Величина максимальных изгибающих напряжений задается путем выбора длины образца (А) и расстояния между захватами (С) (рис. 1). Результат выражается в виде величины изгибающего напряжения, при котором образец выдерживает заданное количество циклов без разрушения или количества циклов до разрушения при заданном изгибающем напряжении.

Данный метод испытаний определен технологией производства металлокорда на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”», используется с момента пуска производства и соответствует требованиям отдельных потребителей металлокорда. Он отличается простотой исполнения и относительно низкой трудоемкостью.

Для определения влияния чистоты стали на усталостные свойства металлокорда в лаборатории физико-механических испытаний были проведены сравнительные испытания циклической выносливости образцов металлокорда различных конструкций, изготовленных на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”» из катанки разных производителей (далее – производитель 1 и производитель 2). Основными отличительными особенностями катанки является то, что на заводах производителя 1 высококаче-

ственную сталь получают конвертерным способом с использованием чугуна, производитель 2 выплавляет сталь в дуговой сталеплавильной печи с применением скрап-процесса. Сталь, полученная разными производителями, имеет отличия по химическому составу и неметаллическим включениям. Было принято, что проволока из катанки обоих производителей нарабатывалась в одинаковых условиях, поэтому факторы метизного производства (термообработка, скорость волочения, величина частных и суммарных обжатий) при проведении анализа результатов не учитывались. Химический состав катанки различных производителей и характеристики неметаллических включений представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, все плавки, использованные в эксперименте, имеют одинаковое содержание углерода (0,82-0,83%). Существенное различие имеют плавки обоих производителей по содержанию примесей и азота. Так, в катанке производителя 1 содержание серы в 1,5–2 раза ниже, чем у производителя 2. Содержание меди значительно (в 5 раз) выше у производителя 2. Также у производителя 2 более высокое содержание азота в стали (0,006-0,007% по сравнению с 0,004% у производителя 1). Анализируя состав стали обоих производителей, можно предположить, что

более высокое содержание азота и примесей цветных металлов в катанке производителя 2 может привести к более интенсивным процессам деформационного старения проволоки, что окажет влияние на ее усталостную долговечность.

Загрязненность стали неметаллическими включениями оценена коэффициентами D_1 (плотность неметаллических включений) – число включений на 1 см^2 поперечного сечения образца катанки и D_2 (индекс загрязненности) – площадь, занимаемая включениями на 1 см^2 поперечного сечения катанки. Данные показатели определялись с помощью растрового электронного микроскопа, оснащенного системой микроанализа. Как видно из данных табл. 1, оба коэффициента незначительно отличаются для катанки обоих производителей. Необходимо отметить, что максимальный размер включений на катанке обоих производителей составил 10 мкм. Химический состав включений имеет некоторое различие: в составе неметаллических включений производителя 2 несколько большее содержание труднодеформируемого оксида алюминия, что наглядно видно по характерным для катанки каждого производителя тройным диаграммам, представленным на рис. 2.

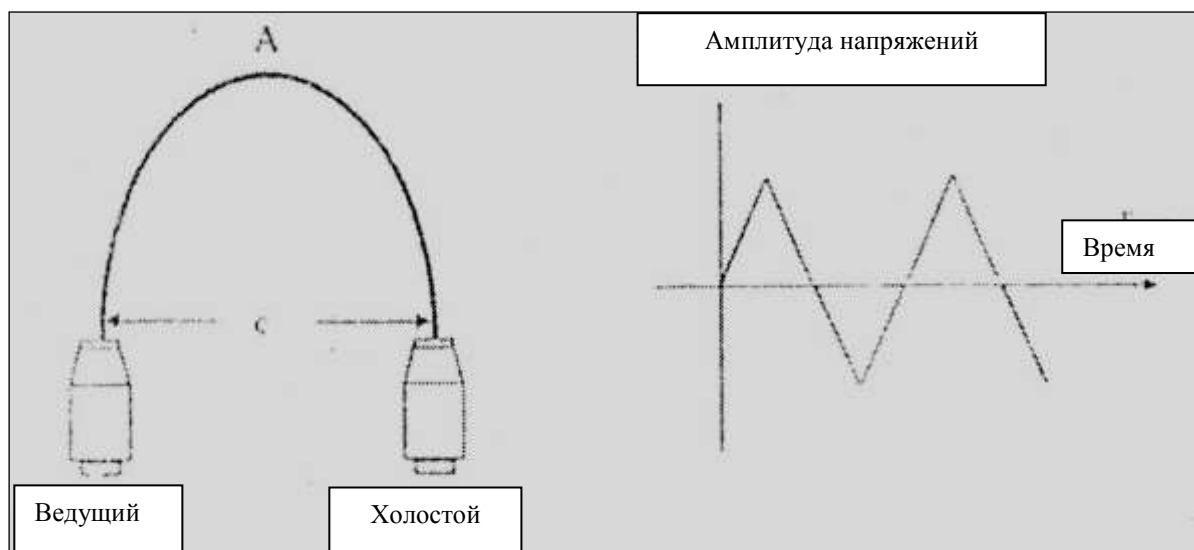


Рис. 1. Схема испытаний по методу Хантера

Таблица 1

Химический состав катанки и характеристики неметаллических включений различных производителей

Конструкция металлокорда	Производитель	C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	N, %	D_1 , вкл/см ²	D_2 , мкм ² /см ²
2+1x0,30HT	1	0,83	0,22	0,50	0,007	0,008	0,02	0,01	0,01	0,004	518	1775
	2	0,82	0,22	0,53	0,010	0,007	0,02	0,03	0,05	0,006	360	1270
3+2x0,35ST	1	0,83	0,24	0,50	0,005	0,008	0,02	0,01	0,01	0,004	470	1795
	2	0,83	0,22	0,56	0,012	0,007	0,03	0,03	0,05	0,007	381	1573
2x0,30SHT	1	0,83	0,23	0,50	0,005	0,007	0,03	0,02	0,01	0,004	385	1775
	2	0,82	0,22	0,54	0,011	0,007	0,03	0,03	0,05	0,006	398	2055

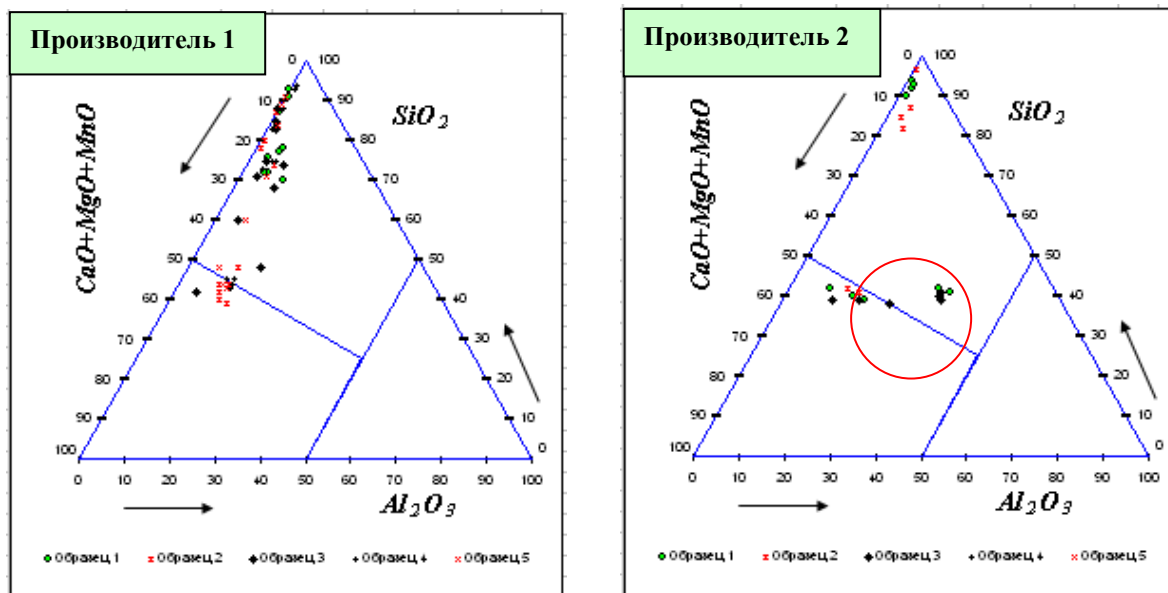


Рис. 2. Тройные диаграммы распределения неметаллических включений

Для проведения испытаний было отобрано по 2 образца металлокорда конструкций 2+1x0,30 НТ, 3+2x0,35 СТ, 2x0,30 СНТ. Усталостную прочность испытывали на приборе RBT 144 фирмы «ВЕКАЕРТ», Бельгия (рис. 3). Для получения характеристик выносливости были испытаны по два образца металлокорда (кроме конструкции 2x0,30СНТ, изготовленного из катанки производителя 1).

Отрезок корда, длина которого L_0 , мм, определяется диаметром наружной проволоки металлокорда и изгибающим напряжением (формула 1), закрепляется концами в оправках испытательного прибора:

$$L_0 = \frac{2,62 \cdot E \cdot d}{S}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости стальной проволоки ($E = 195 \text{ кН/мм}^2$);
 d – диаметр наружной проволоки металлокорда, мм
 S – изгибающее напряжение, Н/мм^2 .

Один конец образца жестко соединяется с оправкой, а другой конец свободно вращается. При вращении оправки с жестким соединением образец металлокорда поворачивается вокруг собственной оси. При этих условиях наружные и внутренние волокна образца подвергаются попеременно нагрузке растяжения и сжатия, создающей напряжения в проволоке. Прибор снабжен счетчиком числа циклов и устройством для автоматического прерывания испытаний при разрушении хотя бы одной проволоки в металлокорде.

Суть испытания сводится к тому, что к образцу корда прикладывается изгибающее усилие и фиксируется число циклов нагружения до разрушения образца. При достижении 1 млн циклов испытание прекращается и принимается, что при данном напряжении образец не разрушился. Далее нагрузка на образец увеличивается и испытание продолжается. Для повышения точности исследования испытание при каждом уровне нагружения проводится три раза. Итоговое число циклов, выдержанных образцом при определенной нагрузке, является среднее из трех измерений.

Результаты испытаний представлены в табл. 2.

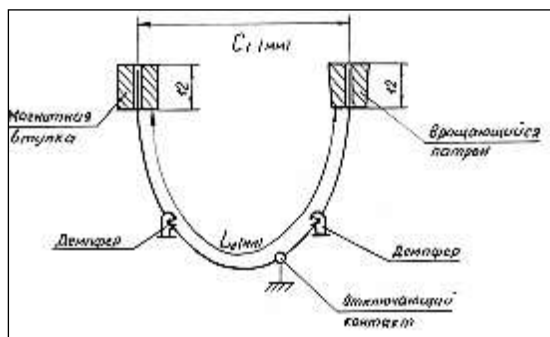


Рис. 3. Прибор для проведения усталостных испытаний RBT 144 фирмы «ВЕКАЕРТ», Бельгия

Количество циклов нагружения до разрушения металлокорда при испытании на выносливость, тыс.

Конструкция	Производитель	Образец	Изгибающее напряжение, Н/мм ²										
			850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
2+1x0,30 НТ	1	1					не разр.	632,8					
		2				не разр.	787,2	681,7					
	2	1			не разр.	970,8	659,1	544,7					
		2			не разр.	488,7	208,8						
3+2x0,35 СТ	1	1			не разр.	537,9	240,3						
		2		не разр.	672,3	605,4							
	2	1		не разр.	378,0	575,4							
		2	не разр.	800,5	280,0	171,6							
2x0,30 СНТ	1	1									не разр.	572,1	47,1
		2									не разр.	39,6	
	2								не разр.	54,0	27,3		

Как видно из данных табл. 2, образцы 1 и 2 металлокорда 2+1x0,30 НТ, изготовленного из катанки производителя 1, не разрушились при достижении 1 млн циклов при изгибающем напряжении 1050 и 1000 Н/мм², соответственно. Образцы, изготовленные из катанки производителя 2, при напряжении 1000 Н/мм² разрушились, не достигнув 1 млн циклов.

На рис. 4 представлен график изменения числа циклов нагружения до разрушения металлокорда в зависимости от приложенного напряжения. Из рисунка видно, что при испытании в одинаковых условиях образцы металлокорда, изготовленного из катанки производителя 1 показали более высокую усталостную долговечность. Важно отметить, что зависимости, представленные на графике, не определяют вид кривой усталости, так как количество испытаний для ее построения недостаточно [2].

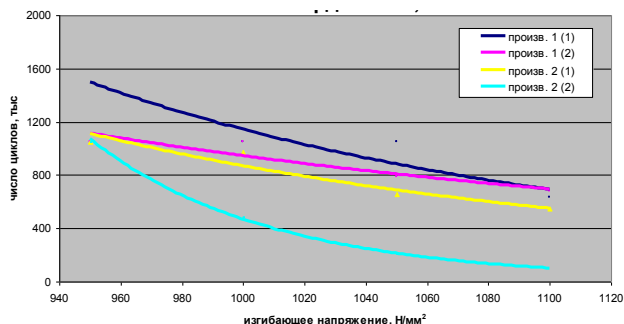


Рис. 4. График зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 2+1x0,30 НТ

Образцы металлокорда 3+2x0,35 СТ, изготовленные из катанки производителя 1, не разрушились при достижении 1 млн циклов при изгибающем напряжении 950 и 900 Н/мм² соответственно. Образцы, изготовленные из катанки производителя 2, при не разрушились при напряжении 850 и 900 Н/мм². На рис. 5 представлен график зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 3+2x0,35 СТ.

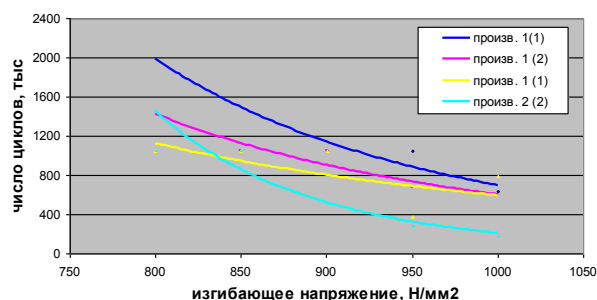


Рис. 5. График зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 3+2x0,35 СТ

Образец металлокорда конструкции 2x0,30 СНТ, изготовленного из катанки производителя 1, не разрушился при изгибающем напряжении 1250 Н/мм² (рис. 6). Образцы 1 и 2, полученные из катанки производителя 2, не разрушились при напряжении 1250 и 1200 Н/мм² соответственно. Однако при напряжении 1300 Н/мм² эти образцы выдержали более чем в 10 раз меньшее количество циклов нагружения, чем образец из катанки производителя 1.

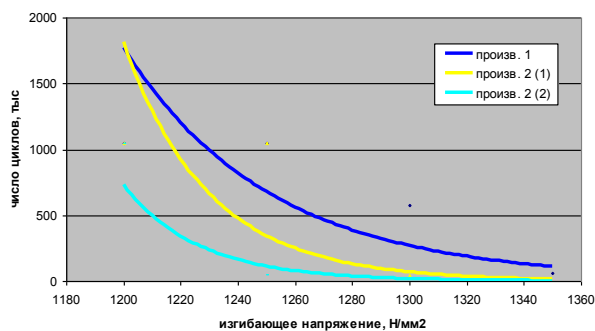


Рис. 6. График зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 2x0,30 SHT

Таким образом, образцы металлокорда всех испытанных конструкций, изготовленных из катанки производителя 1, показали более высокую усталостную долговечность при проведении лабораторных испытаний. Проведенные испытания позволяют утверждать, что в лабораторных условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”» получены результаты, подтверждающие зависимость усталостных свойств металлокорда от качества стали исходной катанки, в нашем случае от ее химического состава. Вероятно, что более низкие усталостные свойства металлокорда, изготовленного из катанки производителя 2, связаны с более интенсивным протеканием процессов деформационного старения в проволоке из-за присутствия большего количества примесей. В связи с тем, что существенных отличий в катанке двух производителей по неметаллическим включениям не было выявлено, мы считаем, что данный эксперимент не является показательным для оценки влияния неметаллических включений на выносливость металлокорда. Для оценки влияния неметаллических включений необходимо испытание образцов, изготовленных из катанки с различной плотностью, размером и химическим составом.

Сведения об авторах

Куренкова Татьяна Петровна – заместитель начальника Центральной заводской лаборатории, Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”»), Жлобин, Республика Беларусь. E-mail: zamm.czl@bmz.gomel.by

Кухаренко Маргарита Анатольевна – инженер лаборатории физико-механических испытаний производства металлокорда №2 Центральной заводской лаборатории, Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”»), Жлобин, Республика Беларусь.

Выводы:

1. Проведены сравнительные усталостные испытания металлокорда конструкций 2+1x0,30НТ, 3+2x0,35ST, 2x0,30SHT, изготовленного из катанки различных производителей. Анализ качества катанки двух производителей показал существенное различие по чистоте стали в части содержания примесей цветных металлов и азота.

2. Результаты испытаний показали, что металлокорд, изготовленный из катанки с минимальным содержанием цветных металлов и азота, имеет более высокие усталостные свойства.

3. Вероятной причиной различия усталостных свойств металлокорда, изготовленного из катанки различных производителей, является разная степень развития процессов деформационного старения, зависящая от чистоты исходной стали.

Список литературы

1. Фетисов В.П. Деформационное старение стали при волочении проволоки. Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996.
2. Фетисов В.П. Деформационное упрочнение углеродистой стали. М.: Мир, 2005.
3. Желтков А.С. Оценка вида кривой усталости холоднотянутой латунированной проволоки при изгибе с вращением, роли чистоты стали по включениям и факторов тонкого волочения в обеспечении ее выносливости // Металлургия: научный сборник. Минск, 2002.
4. Улучшение технологии внепечной обработки кордовой стали с целью снижения содержания оксидных неметаллических включений / В.В. Эндерс, Д.С. Якшук, М.П. Гуляев, В.В. Пивцаев, В.Ю. Гуненков // Сборник научных трудов специалистов белорусского металлургического завода. Т. 3. 2009.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF STEEL QUALITY EFFECT ON THE FATIGUE STRENGTH OF STEEL CORD

Kurenkova Tatyana P. – Deputy Head of Central Plant Laboratory, Open Joint Stock Company “Byelorussian Steel Works – management company of “Byelorussian Metallurgical Company” holding”, (OJSC “BSW - management company of “BMC” holding”), Zhlobin, Belarus. E-mail: zamm.czl@bmz.gomel.by

Kukhareno Margarita A. – an engineer of Physical and mechanical test laboratory of the steel cord production No. 2 of Central Plant Laboratory, Open Joint Stock Company “Byelorussian Steel Works – management company of “Byelorussian Metallurgical Company” holding”, (OJSC “BSW - management company of “BMC” holding”), Zhlobin, Belarus.

Abstract. *In current conditions of machine operation, increasing the strength and durability is among the main tasks. In order to maintain the integrity and strength of the tire, the steel cord is required with a high fatigue resistance at the cyclic load. Ensuring the fatigue life is an important issue in the steel cord application. That is why the issue of increasing the fatigue strength is challenging for OJSC “BSW - management company of “BMC” holding”, in this connection research work was carried out on the effect of the quality of steel from which the steel cord is manufactured on fatigue properties. In order to determine the effect of steel purity on the fatigue properties of the steel cord, comparative tests of the cyclic endurance of steel cord samples of various constructions manufactured at OJSC “BSW - management company of “BMC” holding” from wire rod of different manufacturers were carried out. All heats used in the experiment have the same carbon content (0.82-0.83%). The heats of both manufacturers differ significantly in the content of impurities and nitrogen. Contamination of the steel with non-metallic inclusions has been estimated by density and contamination index. The factors of steel cord and wire production (heat treatment, drawing speed, the value of concrete and total reductions) have not been taken into account when analyzing the results. The study of the fatigue properties of the steel cord has been carried out using the Hunter method, in which the sample is subjected to cyclic bending with rotation at various stresses until destruction occurs. Under these conditions, the outer and inner fibers of the sample are alternately subjected to tensile and compressive loads that create stresses in the wire. Results obtained have confirmed the dependence of the fatigue properties of the steel cord on the content of non-ferrous metals and nitrogen in steel.*

Key words: *fatigue, steel, sample, steel cord, cycle, strength, stress, wire rod, rigidity.*

Ссылка на статью:

Куренкова Т.П., Кухаренко М.А. Исследование влияния качества стали на усталостную выносливость металлокорда // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 37-42.

Kurenkova T.P., Kukhareno M.A. Study of steel quality effect on the fatigue strength of steel cord. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, 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.

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

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

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

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

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

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

Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

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

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

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

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

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