

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 3 (50) 2024

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

## Редакционный совет

### Председатель ред. совета:

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

### Члены ред. совета:

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

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

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

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

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

*З. Конопка* – д-р техн. наук, проф.,  
Ченстоховский технологический  
университет, Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Главный редактор:

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

### Научный редактор:

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

### Технический редактор:

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

*К.И. Рудь*

### Дизайнер:

*Е.О. Харченко*

## © ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2024

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

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

### Адрес редакции:

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

### Адрес типографии:

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

### Адрес издателя:

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

Выход в свет 30.09.2024. Заказ 260. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

# ***THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION***

---

**No. 3 (50) 2024**

---

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

---

## **Editorial Board Members**

### **Chairman:**

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

### **Honorary Board Members:**

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

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

### **Editor-in-Chief:**

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

### **Scientific Editor:**

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

### **Technical Editor:**

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

### **Designer:**

*E.O. Harchenko*

## **© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2024**

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

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

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

### **Editorship address:**

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia  
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.  
E-mail: TTaPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

### **Printing office:**

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,  
455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

### **Editorial office:**

45/2 Karla Marksa prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,  
455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date 30.09.2024. Order 260. Circulation: 500.  
Open price.

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>4</b>
Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В. <b>КАЧЕСТВО НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО МЕТАЛЛА, РАЗЛИТОГО РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ.....</b>	<b>4</b>
Дубский Г.А., Нefeldьев А.А., Долгушин Д.М., Мавринский В.В., Лебедев А.В. <b>ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОМ МЕДИ НА ТЕМПЕРАТУРУ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВА .....</b>	<b>9</b>
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ .....</b>	<b>14</b>
Песин А.М., Разинкин А.В., Замараев В.А., Дымшакова Е.Г., Замараева Ю.В., Пустовойтов Д.О. <b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441 ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СЖАТИЕ И КРУЧЕНИЕ .....</b>	<b>14</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>21</b>
Зарицкий Б.Б., Савинов А.С., Фочина К., Рудь К.И., Нефедьев А.А., Дубский Г.А. <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 170 ХНМ.....</b>	<b>21</b>
Леушин И.О., Кошелев О.С., Рябова Л.И., Горохов Д.А. <b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОПИТКИ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ ПОЛИМЕРНЫМ ИНФИЛЬТРАТОМ .....</b>	<b>28</b>

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS .....</b>	<b>4</b>
Stolyarov A.M., Potapov I.M., Yudin D.V. <b>QUALITY OF CONTINUOUSLY CAST METAL POURED BY DIFFERENT METHODS.....</b>	<b>4</b>
Dubskiy G.A., Nefediev A.A., Dolgushin D.M., Mavrinsky V.V., Lebedev A.V. <b>INFLUENCE OF COPPER MICROALLOYING WITH IRON ON ALLOY RECRYSTALLIZATION TEMPERATURE .....</b>	<b>9</b>
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....</b>	<b>14</b>
Pesin A.M., Razinkin A.V., Zamaraev V.A., Dymshakova E.G., Zamaraeva Yu.V., Pustovoytov D.O. <b>COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOW STRESS OF ALUMINUM-LITHIUM ALLOY 1441 IN COMPRESSION AND TORSION TESTS.....</b>	<b>14</b>
<b>FOUNDRY .....</b>	<b>21</b>
Zaritskii B.B., Savinov A.S., Fochina K.V., Rud K.I., Nefediev A.A., Dubsky G.A. <b>STUDY OF 170HNM STEEL THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS .....</b>	<b>21</b>
Leushin I.O., Ryabova L.I., Koshelev O.S., Gorohov D.A. <b>THEORETICAL MODEL OF IMPREGNATION OF POROUS ALUMINUM CASTING WITH POLYMER INFILTRATE.....</b>	<b>28</b>

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В.

## КАЧЕСТВО НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО МЕТАЛЛА, РАЗЛИТОГО РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ

**Аннотация.** В электросталеплавильном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» разливка стали производится на сортовых МНЛЗ двумя способами: закрытой и открытой струей. Расчетная суточная производительность машины при разливке открытой струей на 3,3–5,7% (отн.) выше, чем при разливке закрытой струей из-за возможности разливать металл более длинными сериями. Однако качество металла, отлитого открытой струей, ниже, чем при разливке закрытой струей. Целью данной работы является сравнение качества сортовой заготовки, отлитой разными способами. Арматурная сталь марки А500С, предназначенная для армирования железобетонных конструкций, изготовления фундаментных блоков, тяжелых арматурных сеток и каркасов, дорожного строительства, разливается как открытой, так и закрытой струей. В работе проанализирован массив производственных данных из 144 плавов. Металл 118 плавов (82%) был разлит открытой струей, а 26 плавов (18%) – закрытой струей. Сравнение качества макроструктуры сортовой заготовки сечением 150×150 мм, отлитой разными способами, показало, что все без исключения дефекты внутреннего строения при разливке открытой струей имеют большую степень развития, чем при разливке закрытой струей. Наибольшее различие (на 1,28 балла) характерно для краевых точечных загрязнений. Установлена возрастающая линейная зависимость степени развития данного дефекта от содержания серы в металле, разлитом открытой струей. Это свидетельствует о том, что при данном способе разливки существенный вклад в общую загрязненность металла вносят сульфидные и окисульфидные включения. Для снижения загрязненности стали включениями рекомендуется иметь в металле содержание серы менее 0,010 %.

**Ключевые слова:** сталь, сортовая МНЛЗ, способы разливки, непрерывнолитая заготовка, макроструктура, качество

В электросталеплавильном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» эксплуатируются две сортовые МНЛЗ фирмы «VAI» [1–3]. На пятиручьевых МНЛЗ радиального типа с радиусом изгиба 9 м в основном отливаются заготовки с размерами поперечного сечения 150×150 мм. Разливка стали из промежуточного ковша в кристаллизаторы производится двумя способами: закрытой и открытой струей.

В режиме разливки закрытой струей для регулирования подачи металла из промежуточного ковша в кристаллизаторы используются стопоры промежуточного ковша, представляющие собой корундографитовые моноблоки с нижней пробкой из периклазоуглеродистого материала. Жидкий металл поступает в кристаллизаторы под уровень через погружные стаканы с осевыми отверстиями. Стопоры подвергаются агрессивному воздействию жидкого металла и шлака и лимитируют продолжительность кампании промежуточного ковша и серийной разливки, не превышающей 6–8 плавов.

При разливке открытой струей в качестве дозирующих элементов металлической проводки промежуточного ковша применяются постоянные верхние и сменные нижние циркониевые стаканы. Регулирование подачи жидкого металла в кристаллизаторы осуществляется путем смены нижних стаканов, имеющих разный диаметр калиброванных отверстий. Смена этих стаканов осуществляется при помощи специаль-

ных механизмов быстрой замены (отстрела). Отсутствие стопоров позволяет увеличить длительность кампании промежуточного ковша до 30–35 часов и серийность разливки до 18–20 плавов за сутки.

В работе [4] приведены расчетные значения суточной производительности сортовой МНЛЗ при разливке металла разными способами. Установлено, что при разливке открытой струей суточная производительность машины на 3,3–5,7% (отн.) выше, чем при разливке закрытой струей из-за возможности разливать металл более длинными сериями. Однако отмечено, что качество металла, отлитого открытой струей ниже, чем при разливке закрытой струей.

Целью данной работы является сравнение качества сортовой заготовки, отлитой разными способами. Следует отметить, что открытой и закрытой струей может разливаться далеко не каждая марка стали.

Арматурная сталь марки А500С, предназначенная для армирования железобетонных конструкций (рис. 1), изготовления фундаментных блоков, тяжелых арматурных сеток и каркасов, дорожного строительства, разливается как открытой, так и закрытой струей.

В работе проанализирован массив производственных данных из 144 плавов. Металл 118 плавов (82%) был разлит открытой струей, а 26 плавов (18%) – закрытой струей.

Химический состав металла представлен в табл. 1.



Рис. 1. Вид арматуры

Таблица 1

Данные о среднем содержании химических элементов в стали, мас. %

Способ разливки	C	Si	Mn	S	P	N	Al
Открытой струей	0,19	0,19	0,64	0,013	0,009	0,008	0,002
Закрытой струей	0,19	0,21	0,70	0,010	0,009	0,008	0,012

Из табл. 1 видно, что металл при разных способах разливки имеет схожий химический состав, различающийся только содержанием алюминия. Это объясняется тем, что из-за опасности затягивания узких калиброванных отверстий сменных стаканов содержание алюминия в металле при разливке открытой струей должно быть не выше 0,006 %.

Данные о температурно-скоростном режиме разливки металла приведены в табл. 2.

Параметры температурно-скоростного режима при разливке разными способами отличаются незначительно.

Для общего массива данных получена линейная зависимость (рис. 2) скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора ( $v$ , м/мин) от величины перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус ( $\Delta t$ , °C):

$$v = 3,073 - 0,0224 \cdot \Delta t, \quad r = -0,5054.$$

Из сортовой заготовки каждой плавки был вырезан поперечный темплет. После необходимой подготовки производилась металлографическая оценка качества макроструктуры металла согласно ОСТ 14-4-73 по четырехбальным стандартным шкалам.

Усредненные результаты оценки представлены на рис. 3.

Таблица 2

Усредненные параметры режима

Способ разливки	Температура металла в промежуточном ковше, °C	Температура ликвидус, °C	Перегрев металла, °C	Скорость вытягивания заготовки, м/мин
Открытой струей	1545	1513	32	2,41
Закрытой струей	1545	1515	30	2,35

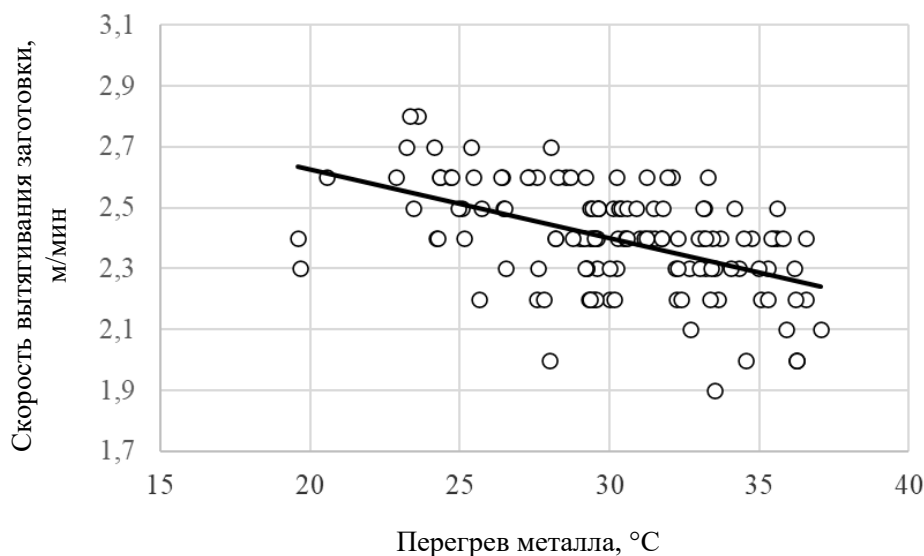


Рис. 2. Зависимость скорости вытягивания сортовой заготовки из кристаллизатора от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус

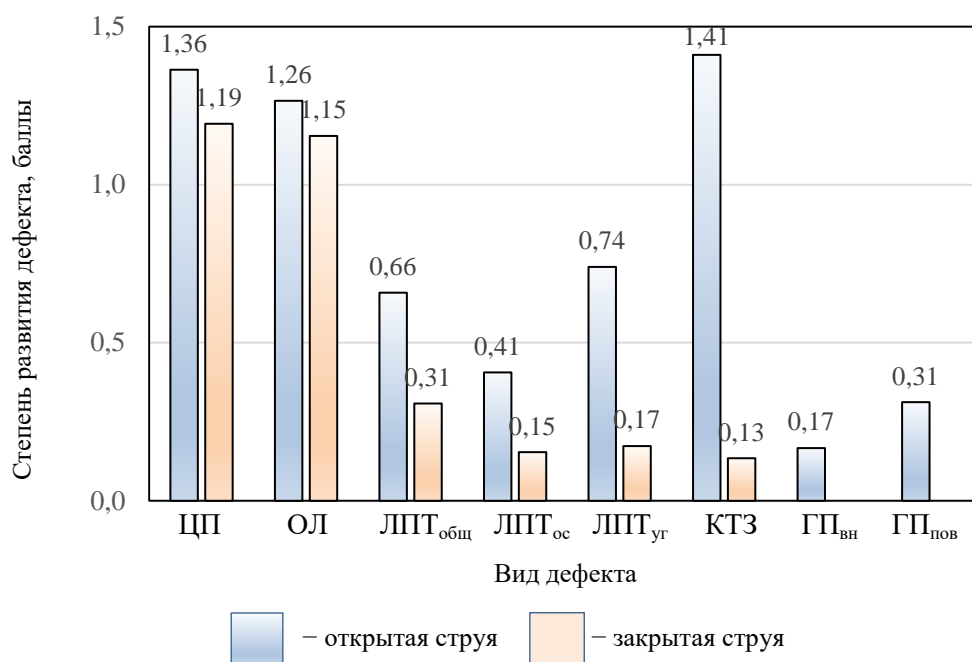


Рис. 3. Результаты оценки качества макроструктуры сортовой заготовки из стали марки 500С, отлитой разными способами:

ЦП – центральная пористость; ОЛ – осевая ликвация; ЛПТ<sub>общ</sub>, ЛПТ<sub>ос</sub>, ЛПТ<sub>уг</sub>, – ликвационные полоски и трещины общие, осевые, угловые; КТЗ – краевые точечные загрязнения; ГП<sub>вн</sub>, ГП<sub>пов</sub> – газовые пузыри внутренние, поверхностные

Анализ полученных результатов показал, что все рассмотренные дефекты в металле, отлитом открытой струей, имеют большую степень развития, чем при разливке закрытой струей. Разница в значениях следующая: для центральной пористости – 0,17 балла; осевой ликвации – 0,11 балла; ликвационных полосок и трещин общих, осевых и угловых – 0,35, 0,26 и 0,57 балла соответственно; краевых точечных загрязнений – 1,28 балла; газовых пузырей внутренних и поверхностных – 0,17 и 0,31 балл. Наиболее серьезное различие наблюдается в краевых точечных загрязнениях.

Краевые точечные загрязнения – это скопления неметаллических включений, располагающиеся в виде рассеянных точек в верхней части поперечного сечения квадратной заготовки, отлитой на машине с изогнутой технологической осью. Дефект проявляется после глубокого травления металла и на серном отпечатке (рис. 4) [5–8].

Степень развития дефекта определяется размером и количеством расположенных в металле неметаллических включений. Краевые точечные загрязнения образуются вследствие фиксации продвигающимся фронтом кристаллизации всплывающих в лунке жидкого металла неметаллических включений.

В работе проведен корреляционно-регрессионный анализ влияния содержания различных химических элементов и параметров температурно-скоростного режима разливки стали открытой струей на степень развития краевых точечных загрязнений. Установлена возрастающая линейная зависимость загрязненности

металла неметаллическими включениями (КТЗ, баллы) от содержания серы в стали ([S], %):

$$КТЗ = 101,93 \cdot [S] + 0,122, \quad r = 0,5512.$$

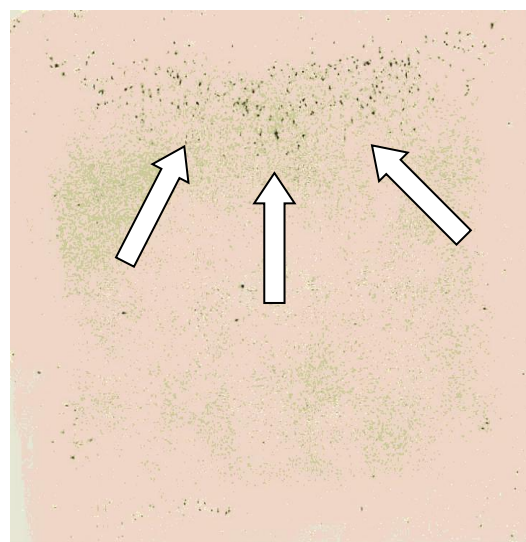


Рис. 4. Краевые точечные загрязнения (показаны стрелками) на серном отпечатке с поперечного темплетта сортовой заготовки

Данная зависимость статистически значима с вероятностью 99,9% ( $r_{0,001}=0,3211$ ).

Графически она представлена на рис. 5 в виде столбчатой диаграммы.

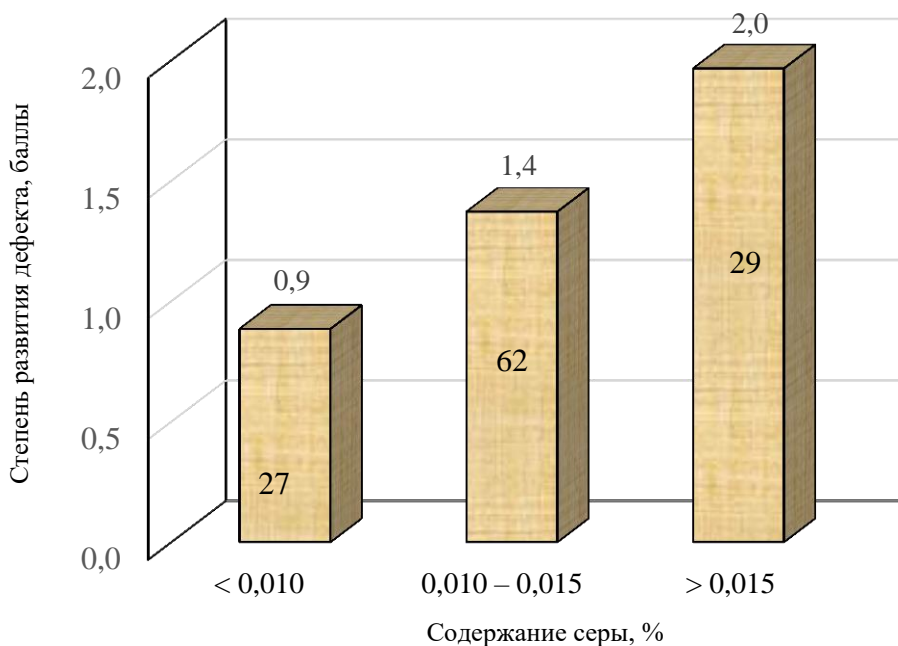


Рис. 5. Зависимость степени развития краевых точечных загрязнений в сортовой заготовке от содержания серы в металле при разливке открытой струей: цифры внутри столбиков – количество плавков

Из приведенных данных следует, что при увеличении содержания серы в металле на 0,005 % степень развития краевых точечных загрязнений возрастает в среднем на 0,5 балла. Следовательно, причиной этого является рост загрязненности металла сульфидными и окисульфидными неметаллическими включениями. Для снижения загрязненности стали включениями рекомендуется иметь в металле, разливаемом открытой струей, содержание серы менее 0,010 %.

#### Заключение

Сравнение качества макроструктуры сортовой заготовки сечением 150×150 мм из стали марки 500С, отлитой разными способами, показало, что все без исключения дефекты внутреннего строения при разливке открытой струей имеют большую степень развития, чем при разливке закрытой струей. Наибольшее различие (на 1,28 балла) характерно для краевых точечных загрязнений. Установлена возрастающая линейная зависимость загрязненности металла неметаллическими включениями от содержания серы в металле, разлитом открытой струей. Это свидетельствует о том, что существенный вклад в общую загрязненность металла при данном способе разливки вносят сульфидные и окисульфидные включения. Для снижения загрязненности стали включениями рекомендуется иметь в металле содержание серы менее 0,010%.

#### Список источников

1. Бигеев В.А., Столяров А.М., Валиахметов А.Х. *Металлургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цехе: учебное*

пособие. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 320 с.

2. Столяров А.М., Селиванов В.Н. *Непрерывная разливка стали. Машины непрерывного литья заготовок: учебное пособие.* Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
3. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / Сомнат Басу, А.М. Столяров, М.В. Потапова, С.В. Дидович // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2014. №1 (45). С. 24 – 27.
4. Разливка на сортовой МНЛЗ арматурной стали разными способами / А.А. Миннигулов, А.М. Столяров, И.М. Потапов, Д.В. Юдин // *Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки: сб. тр. по материалам национальной конференции / под ред. В.М. Колокольцева.* Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. Вып. 22. С. 30-35.
5. Ботников С.А. *Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла.* Волгоград: Панорама, 2011. 97 с.
6. Мурапталова Р.Р., Столяров А.М., Потапова М.В. *Краевые точечные загрязнения сортовой непрерывнолитой заготовки // Теория и технология металлургического производства.* 2017. №4 (23). С. 23-25.
7. Изучение загрязненности неметаллическими включениями сортовой непрерывнолитой заготовки / А.М. Столяров, В.В. Мошкунов, М.В. Потапова, Р.Р. Мурапталова // *Теория и технология ме-*

таллургического производства. 2018. №1 (24). С. 14-20.

8. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / А.М.

Столяров, Сомнат Басу, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 24 – 27.

#### Сведения об авторах

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

**Потапов Иван Михайлович** – бакалавр, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

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

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### QUALITY OF CONTINUOUSLY CAST METAL Poured BY DIFFERENT METHODS

**Stolyarov Alexander M.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Professor, Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru.

**Potapov Ivan M.** – Bachelor's degree, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Yudin Danil V.** – Bachelor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** In the electric steelmaking shop of PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" steel casting is carried out on longitudinal CCMs by two methods: closed and open casting. Estimated daily productivity of the machine at casting by open jet is 3.3-5.7 % (relative) higher than at casting by closed jet because of the possibility to cast metal in longer series. However, the quality of metal cast by open jet is lower than that of closed jet casting. The purpose of this paper is to compare the quality of billets cast by different methods. Reinforcing steel of A500C grade, intended for reinforcing reinforced concrete structures, manufacturing of foundation blocks, heavy reinforcement meshes and frames, road construction, is cast by both open and closed jet casting. The paper analyzes an array of production data from 144 melts. Metal from 118 melts (82 %) was cast by open casting, and 26 melts (18 %) - by closed casting. A comparison of the macrostructure quality of a 150×150 mm section billet cast by different methods showed that all defects of internal structure without exception have a higher degree of development in open jet casting than in closed jet casting. The greatest difference (by 1.28 points) is characteristic for edge point contamination. An increasing linear dependence of the degree of development of this defect on the sulfur content in the metal poured by open jet was established. This indicates that at this method of casting a significant contribution to the total contamination of metal is made by sulfide and oxysulfide inclusions. To reduce the contamination of steel by inclusions, it is recommended to have a sulfur content of less than 0.010 % in the metal.

**Keywords:** steel, longitudinal CCM, casting methods, continuous cast billet, macrostructure, quality.

---

Ссылка на статью:

Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В. Качество непрерывнолитого металла, разлитого разными способами // Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 4-8.  
Stolyarov A.M., Potapov I.M., Yudin D.V. Quality of continuously cast metal poured by different methods. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 4-8.



УДК 538.93+669

Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Долгушин Д.М., Мавринский В.В., Лебедев А.В.

## ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОМ МЕДИ НА ТЕМПЕРАТУРУ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВА

**Аннотация.** Рабочие стенки кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) изготавливают из меди с различными легирующими добавками. Использование меди обусловлено ее большой теплопроводностью, обеспечивающей быстрый отвод тепла от кристаллизующегося металла, а легирующие добавки уменьшают быстрый износ меди в процессе работы кристаллизатора. В данной работе исследуется медь, легированная железом различной концентрации. Получены экспериментальные зависимости термоэлектродвижущей силы, электрического сопротивления и твердости (НВ) от температуры при различных величинах пластической деформации. Показано, что при одной и той же величине деформации с увеличением концентрации железа растет твердость сплава и ее температура рекристаллизации. В качестве индикатора структурных изменений, происходящих в сплавах при термических способах обработки было проанализировано электросопротивление, которое, как известно, является структурно чувствительным свойством. Так анализ показал, что в меди пластически деформируемой до 50% и дополнительно легированной железом процесс восстановления удельного электрического сопротивления протекает медленней и при более высоких температурах, в сравнении с чистой медью. При этом полное восстановление остаточного электрического сопротивления наблюдается в диапазоне 350°C. В данном случае главными процессами отжига дефектов являются – рекристаллизация и возврат. В заключительной части работы сформулированы рекомендации для практического использования железомедных сплавов.

**Ключевые слова:** железомедный сплав, электротехническая медь, четырехэлектродный метод, термоэлектродвижущая сила, электрическое сопротивление, твердость, температура рекристаллизации

Наряду с теплофизическими свойствами железомедных сплавов для их использования в качестве первых стенок кристаллизаторов МНЛЗ, важной характеристикой, определяющей работоспособность данных стенок, является температура начала их рекристаллизации.

Рекристаллизация – это процесс образования новых зерен при нагреве наклепанного металла до определенной температуры (температуры начала рекристаллизации). Рекристаллизация – самый распространенный из процессов, формирующих структуру металлов и сплавов, а тем самым и структурно чувствительные механические и физические свойства и их анизотропию.

Существует несколько видов рекристаллизации, отличающихся типом движущих сил, вызывающих миграцию границ зерен. Традиционно выделяют следующие виды рекристаллизации [1-5]:

- первичная рекристаллизация;
- собирательная рекристаллизация;
- вторичная рекристаллизация.

В отличие от температуры фазового равновесия температура начала рекристаллизации не является физической постоянной для металла или сплава. Она зависит не только от химического состава, но и от продолжительности отжига, степени деформации, исходной структуры и ряда других внутренних и внешних факторов [2, 6].

Поскольку температура начала рекристаллизации является показателем способности металла или сплава противостоять тепловым воздействиям, желательно исследовать влияние малых концентраций легирующих добавок на эту температуру. Считается,

что в интервале малых концентраций добавки почти всегда повышают температуру начала кристаллизации, причем с увеличением их температуры рекристаллизации возрастает с дальнейшим затуханием. Однако для медных сплавов это не всегда так [6].

Для детального исследования процессов рекристаллизации подготовленные образцы из микролегирующей железом меди подвергали пластической деформации до заданной величины, а затем отжигали. При отжиге измеряли:

- 1) дифференциальную термоэлектродвижущую силу ( $dE/dT$ );
- 2) относительное изменение сопротивления ( $\Delta R/R_0$ ) четырехэлектродным методом;
- 3) твердость по Бриннелю (НВ).

При пластическом деформировании или быстром охлаждении нагретого до высокой температуры металла внешние или внутренние силовые напряжения совершают работу, одна часть которой идет на увеличение энергии дислокаций (имеющихся и вновь рождающихся), другая рассеивается, превращаясь в конечном счете в тепло, а третья расходуется на образование в пластически или термически деформируемом металле структурных дефектов и новых фаз, понижая или увеличивая его внутреннюю энергию. Это приводит к порче кристаллической структуры деформированных металлов из-за:

- 1) значительного увеличения плотности дислокаций;
- 2) их скопления на различного рода препятствиях;
- 3) увеличения концентрации точечных дефектов, образующихся на шлейфах движущихся дислокаций и на вновь образующихся границах субзерен исходного поликристалла;
- 4) возникновения микропор и микротрещин.

Все эти изменения кристаллической структуры приводят к так называемому «наклепу» (или упрочнению), который связан с повышением его сопротивления дальнейшим пластическим сдвигам, появлению хрупкости, ломкости и т.д. Очевидно, что пластически деформируемый металл находится в неравновесном возбужденном состоянии – чем выше это возбуждение, тем больше «наклеп». Это состояние металла или сплава после снятия внешних энергетических воздействий остается метастабильным. Единственным способом избавления от структурного возбуждения является нагрев, то есть повышение температуры в заданном режиме до определенной величины с последующим медленным охлаждением.

При пластической деформации происходят структурные изменения ионного остова, а значит, и легкой, быстро адаптирующейся подсистемы – электронной плотности состояний, что обязательно приводит к изменению многих физических свойств, например электрического сопротивления, термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), намагниченности и др.

Проведя эксперименты, мы установили, что при увеличении степени пластической деформации в изотермических условиях величина электрического сопротивления растет. А если отжечь предварительно пластически деформированный до определенной величины металл, то его сопротивление падает до величины, соответствующей нормализованному металлу. Начало и конец падения электрического сопротивления точно даст температуру наибольшей скорости отжига накопленных при пластическом деформировании структурных дефектов (температуру рекристаллизации), так как их количество, распределение и вид в основном определяют величину изменения электрического сопротивления  $\Delta R$ , то есть  $\Delta R \approx f(\Delta n_g)$ . Кроме того, величина степени пластической деформации измеряется ТЭДС, которая очень чувствительна к изменению электронной плотности состояний электронной фазы.

Результаты проведенных исследований зависимости  $\Delta R/R_0$ , НВ и  $dE/dT$  электротехнической меди от температуры при заданной величине степени пластической деформации приведены на рис. 1-3.

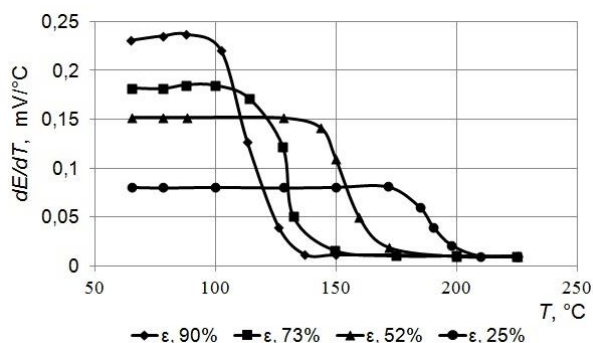


Рис. 1. Влияние степени деформации при протяжке электротехнической меди на величину ( $dE/dT$ ) – дифференциальная ТЭДС

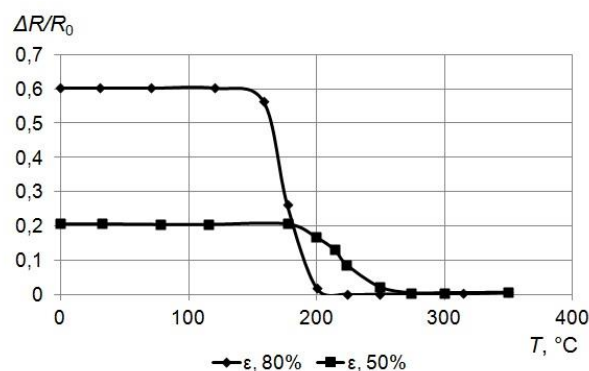


Рис. 2. Изменение относительного электрического сопротивления медной проволоки от температуры при разной величине пластической деформации

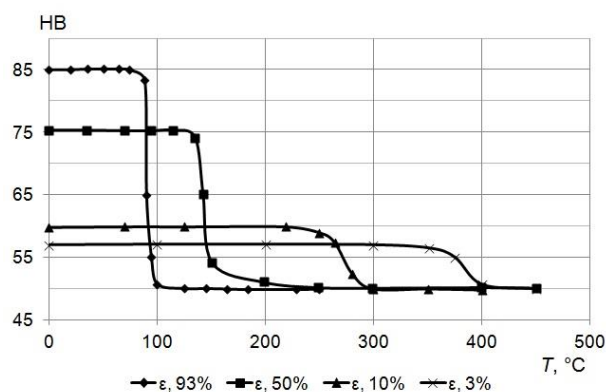


Рис. 3. Изменение твердости упрочненной электролитической меди при отжиге

При рассмотрении изменения сопротивления [7] видно, что при изотермическом увеличении степени пластической деформации величина  $\Delta R/R_0$  растет до насыщения, а при отжиге упрочненного металла в некотором температурном интервале не меняется, потом монотонно падает от  $T_n$  (температура начала сброса) до  $T_k$  (температура конца сброса) и после  $T_k$  выходит на значение, соответствующее нормализованному металлу (отожженному).

На рис. 3 приведена зависимость твердости (по Бриннелю) от температуры медных образцов, предварительно пластически деформированных до определенной величины.

Поведение твердости (НВ) при изменении температуры аналогично поведению  $\Delta R/R_0$  и  $dE/dT$  от  $T$ . Поскольку величина НВ от  $T$  определяется структурой и фазовым состоянием исследуемого образца, то поведение  $\Delta R/R_0$  и  $dE/dT$  от  $T$  обусловлено изменением электронной плотности состояния за счет изменения структуры и фазового состояния. Таким образом, напряженно-деформированное состояние (наклеп) может быть снято нагреванием наклепанного образца с последующим медленным охлаждением.

Температурный интервал начала и конца сброса напряжений определяется из температурных зависимостей  $\Delta R/R_0$  и  $dE/dT$  от  $T$  и НВ. Воспользовавшись экспериментальной зависимостью НВ от  $T$ , приведенной на рис. 3, построили график зависимости температуры отжига  $T_m$  (температуры конца рекристаллизации), соответствующей наибольшей скорости сброса наклепа, от деформации (рис. 4). Из рисунка видно, что чем меньше величина пластической деформации, тем выше температура процесса снятия напряженного состояния (наклепа). Это может быть объяснено изменением скрытой энергии поглощения при пластической деформации.

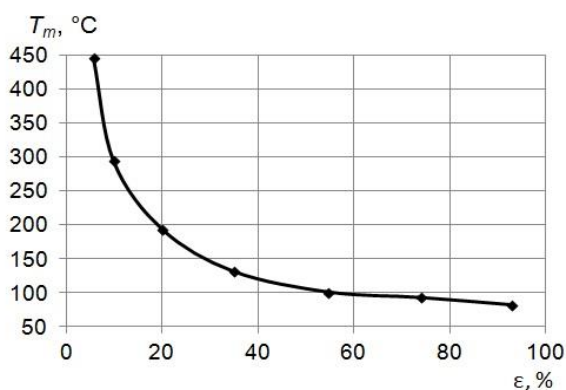


Рис. 4. Зависимость температуры отжига, соответствующей наибольшему сбросу наклепа от степени пластической деформации (температуры конца рекристаллизации)

Также исследования были проведены для образцов меди, микролегированной железом. Исследованные образцы меди содержали 0,097, 0,17, 0,28 и 0,3% Fe. Зависимости твердости этих образцов от величины обжатия приведены на рис. 5.

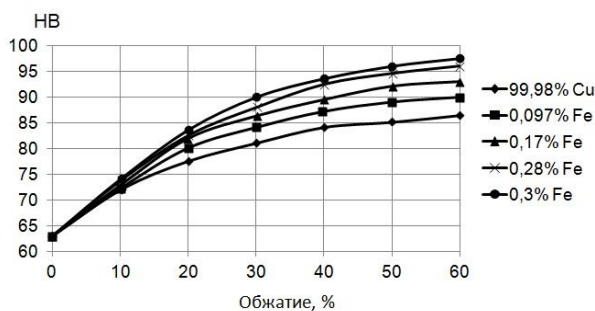


Рис. 5. Зависимость твердости медных образцов от величины обжатия с различным содержанием железа

Из графика рис. 5 видно, что при одной и той же величине обжатия твердость возрастает с увеличением концентрации железа в сплаве. Если предположить, что концентрация дислокаций при заданной величине обжатия и разной концентрации железа одинакова, то увеличение твердости может быть связано

с возрастанием числа стопоров дислокаций, образующихся за счет введения примеси. Их тем больше, чем больше концентрация легирующей добавки.

В последующем каждый образец с заданной концентрацией железа в меди и величиной обжатия подвергался ступенчатому режиму отжига с одновременным замером изменяющейся температуры отжига от твердости. Было получено четыре серии кривых, отражающих зависимости твердости от температуры отжига для каждой концентрации железа в меди. Одна из таких серий приведена на рис. 6.

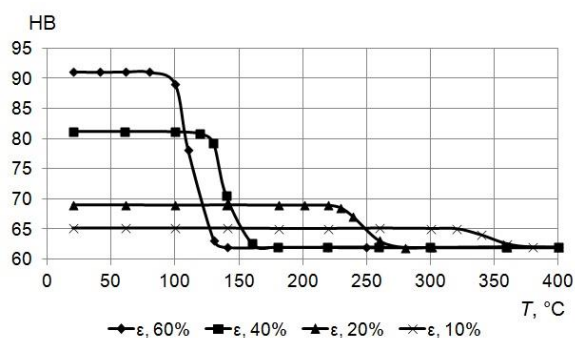


Рис. 6. Зависимость твердости от температуры отжига для Cu с 0,17% Fe для разных величин обжатия

По результатам проведенных исследований построены зависимости температуры отжига (рекристаллизации) от величины обжатия для разных концентраций железа в меди. Графики этих зависимостей изображены на рис. 7.

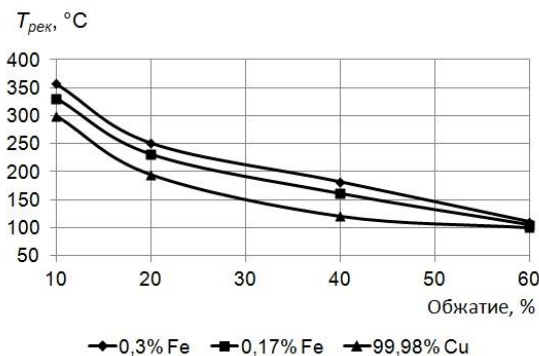


Рис. 7. Зависимость температуры рекристаллизации от величины обжатия образцов Cu с различным процентным содержанием железа

Анализ этих зависимостей показывает, что увеличение микролегирующей добавки железа в меди повышает ее температуру рекристаллизации.

Общее увеличение температуры рекристаллизации  $\Delta T_{рек}$  в пределах растворимости железа в меди ( $0 < c \leq 0,3\% \text{ Fe}$ ) составляет примерно  $70^\circ\text{C}$ .

Кроме этого, из проведенного комплекса исследований железомедных сплавов и результатов, которые они дали, можно предложить несколько рекомендаций для их практической реализации:

1. Наиболее подходящими микролегированными сплавами железо-медь для изготовления стенок кристаллизаторов являются сплавы с концентрацией железа в меди в пределах  $0,17 < c \leq 0,25\%$ .

2. Прежде чем заготовку для изготовления стенок кристаллизатора пускать в работу, ее необходимо подвергать механической обработке, например обработке роликом с величиной обжатия порядка 10–15%, что повысит их твердость, износостойкость и жаропрочность на 25–30%.

#### Список источников

1. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов: практикум / А.В. Нохрин, Ю.Г. Лопатин, А.В. Пискунов, В.Н. Чувильдеев, Е.С. Смирнова. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. 31 с.
2. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСиС, 2005. 432 с.
3. Кан Р.У. Возврат и рекристаллизация // Физическое металловедение: в 3 т. / под ред. Р. Кан, П. Хаазена. М.: Металлургия, 1987. Т. 2. С. 434-508.
4. Рекристаллизация металлических материалов / под ред. Ф. Хеснера, М.: Металлургия, 1982. 352 с.
5. Перевезенцев В. Н., Щербань М. Ю. Рекристаллизация металлов и сплавов: учебное пособие. Н. Новгород: ННГУ, 2000. 62 с.
6. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
7. Экспериментальная установка для исследования теплофизических свойств твердых тел методом периодических тепловых волн / Дубский Г.А., Вдовин К.Н., Нефедьев А.А., Дубская Т.Я. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2007. №4. С. 81–88.

#### Сведения об авторах

**Дубский Геннадий Алексеевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: physics@magtu.ru

**Нефедьев Александр Алексеевич** – кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shuric\_xp@mail.ru

**Долгушин Денис Михайлович** – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: dolgushin@mail.ru

**Мавринский Виктор Викторович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.mavrinsky@magtu.ru

**Лебедев Алексей Викторович** – аспирант кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### INFLUENCE OF COPPER MICROALLOYING WITH IRON ON ALLOY RECRYSTALLIZATION TEMPERATURE

**Gennady A. Dubsky** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: physics@magtu.ru

**Alexander A. Nefediev** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shuric\_xp@mail.ru

**Denis M. Dolgushin** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: dolgushin@mail.ru

**Viktor V. Mavrinsky** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.mavrinsky@magtu.ru

**Alexey V. Lebedev** – postgraduate student of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Annotation.** Working walls of crystallizers of continuous casting machines (CCM) are made of copper with various alloying additives. The use of copper is due to its high thermal conductivity, which provides rapid heat removal from the crystallizing metal, and alloying additives reduce the rapid wear of copper in the process of crystallizer operation. In this paper copper alloyed with iron of different concentrations is investigated. Experimental dependences of thermoelectromotive force, electrical resistivity and hardness (HB) on temperature at different magnitudes of plastic deformation are obtained. It is shown that at the same magnitude of deformation with increasing iron concentration the hardness of the alloy and its recrystallization temperature increases. As an indicator of structural changes occurring in alloys during thermal treatment methods was analyzed electrical resistance, which is known to be a structurally sensitive property. So the analysis showed that in copper plastic deformed up to 50% and additionally alloyed with iron the process of restoration of electrical resistivity proceeds more slowly and at higher temperatures, compared to pure copper. At the same time, complete recovery of residual electrical resistivity is observed in the range of 350°C. In this case, the main processes of annealing defects are recrystallization and return. In the final part of the work recommendations for the practical use of iron-copper alloys are formulated.

**Keywords:** iron-copper alloy, electrical copper, four-electrode method, thermoelectromotive force, electrical resistance, hardness, recrystallization temperature.

---

Ссылка на статью:

Влияние микролегирования железом меди на температуру рекристаллизации сплава / Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Долгушин Д.М., Мавринский В.В., Лебедев А.В.// Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 9-13.  
Dubskiy G.A., Nefediev A.A., Dolgushin D.M., Mavrinsky V.V., Lebedev A.V. Influence of copper microalloying with iron on alloy recrystallization temperature. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 9–13.

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 620.173, 620.175

Песин А.М., Разинкин А.В., Замаараев В.А., Дымшакова Е.Г., Замаараева Ю.В., Пустовойтов Д.О.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441 ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СЖАТИЕ И КРУЧЕНИЕ

**Аннотация.** С использованием симулятора термомеханических процессов Gleeble 3800 выполнено экспериментальное исследование и сравнительный анализ сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава 1441 системы Al-Cu-Mg-Li при испытаниях на одноосное сжатие и кручение в зависимости от деформационных и температурно-скоростных параметров (450-25°C, 1-50 с<sup>-1</sup>), соответствующих процессам горячей и холодной прокатки листов и полос в условиях ПАО «КУМЗ». Показано, что испытание на кручение является наиболее подходящим методом получения экспериментальных данных о сопротивлении деформации алюминий-литиевого сплава 1441 в высокотемпературной области 450-300 °C при больших эквивалентных (истинных) деформациях (> 1,0), соответствующих условиям горячей прокатки. В свою очередь, испытание на одноосное сжатие является наиболее подходящим методом получения экспериментальных данных о сопротивлении деформации в области, соответствующей условиям холодной прокатки. Представленные в работе экспериментальные кривые сопротивления деформации могут быть использованы в специализированных инженерных программах компьютерного моделирования для совершенствования и оптимизации технологических режимов горячей и холодной прокатки листов и полос из алюминий-литиевого сплава 1441.

**Ключевые слова:** алюминий-литиевый сплав 1441, Gleeble 3800, одноосное сжатие, кручение, сопротивление деформации, сравнительный анализ

## Введение

Алюминий-литиевый сплав 1441 системы Al-Cu-Mg-Li создан для аэрокосмических и авиационных применений и относится к сплавам второго поколения. Сплав 1441 обладает пониженной плотностью (2,59 г/см<sup>3</sup>) и повышенным модулем упругости (78,5 ГПа) по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами [1-6].

Единственным производителем и поставщиком алюминий-литиевых сплавов в России является Каменск-Уральский металлургический завод (ПАО «КУМЗ»), где освоен полный технологический цикл изготовления горячекатаных и холоднокатаных листов и полос. Согласно работе [7] рекомендованный температурный интервал горячей прокатки алюминий-литиевого сплава 1441 составляет 460-390°C. Однако в условиях действующего производства фактические температурные интервалы горячей прокатки составляют: 460-340°C – при черновой прокатке, 340-300°C и даже ниже – при чистовой прокатке. Холодная прокатка алюминий-литиевого сплава 1441 должна осуществляться при температурах не выше 60°C. Промышленная прокатка осуществляется со скоростями 1-5 м/с. Несоответствие рекомендованных и фактических температурно-скоростных условий горячей и холодной прокатки может приводить к увеличению доли несоответствующей продукции и/или брака. Для совершенствования и оптимизации существующих технологических режимов горячей и холодной листовой прокатки сплава 1441 в условиях ПАО «КУМЗ» требуется применение специализированных инженерных программ компьютерного моделирова-

ния, основанных на методе конечных элементов (МКЭ). Однако при постановке и решении таких задач возникает проблема описания реологических свойств (сопротивления деформации) сплава 1441 в широком диапазоне деформационных и температурно-скоростных параметров, соответствующих процессам горячей и холодной прокатки листов и полос в условиях ПАО «КУМЗ». В известной справочной литературе информация о сопротивлении деформации алюминий-литиевого сплава 1441 системы Al-Cu-Mg-Li полностью отсутствует.

Гипотеза единой кривой постулирует независимость кривых сопротивления деформации от схемы напряженного состояния. Поэтому информацию о сопротивлении деформации материала можно получить из экспериментов с простыми схемами: одноосное растяжение, одноосное сжатие, чистый сдвиг при кручении [8-15]. При этом в ходе проведения экспериментов необходимо выдерживать постоянными температуру и скорость деформации. Каждый метод испытания имеет свои достоинства и недостатки. При растяжении для большинства материалов истинная деформация в момент образования шейки не превышает 0,2-0,5. Это существенно ограничивает возможности применения метода одноосного растяжения. Метод сжатия, как правило, применяется в области истинных (логарифмических, эквивалентных) деформаций до 0,7 (относительное обжатие 50%). Недостатком этого метода является наличие контактного трения. Кроме того, в испытаниях на сжатие для обеспечения постоянной скорости деформации  $\left( \frac{\dot{\varepsilon}_0}{\varepsilon_0} = v_0 / h_0 \right)$  скорость деформирования  $v$  (скорость движения захватов испытательной машины) должна

© Песин А.М., Разинкин А.В., Замаараев В.А., Дымшакова Е.Г., Замаараева Ю.В., Пустовойтов Д.О., 2024

уменьшаться по экспоненциальному закону:  $v = v_0 \exp\left(-\frac{1}{\varepsilon_0} t\right)$ , где  $h_0$  – начальная высота образца;

$t$  – время [8]. Испытания на кручение позволяют получать данные о сопротивлении деформации материала в области больших истинных (логарифмических, эквивалентных) деформаций ( $\geq 1,0$ ).

Целью работы является экспериментальное исследование и сравнительный анализ сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава 1441 при испытаниях на сжатие и кручение в зависимости от деформационных и температурно-скоростных параметров, соответствующих процессам горячей и холодной прокатки листов и полос в условиях ПАО «КУМЗ».

### Материалы и методы исследования\*

Химический состав сплава 1441 системы Al-Cu-Mg-Li представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав алюминий-литиевого сплава 1441

Содержание элементов*, мас. %										
Al	Cu	Mn	Mg	Ti	Ni	Zr	Be	Li	Na	Ga
Основа	1,7	0,05	0,8	0,05	0,06	0,11	0,04	1,8	0,001	0,001

\*Примеси – менее 0,05 мас. % каждого элемента, сумма примесей – менее 0,15 мас. %.

Испытания цилиндрических образцов (рис. 1) на сжатие выполнялись на симуляторе термомеханических процессов Gleeble 3800 с использованием модуля HydraWedge до 0,7 единиц логарифмической (истинной) деформации при температурах 450, 400, 350, 300, 250 и 25 °C со скоростями деформации 1, 10, 50 с<sup>-1</sup>. Все испытания выполнялись однократно (без повторов). Для уменьшения контактного трения между образцом и рабочим инструментом (твердосплавные бойки из карбида вольфрама типа ВК8) использовалась графитовая фольга толщиной 0,13 мм. Нагрев образца, помещенного в рабочую камеру с вакуумом, осуществлялся прямым пропусканием электрического тока. Для фиксации температуры образца к центральной части рабочей зоны приваривалась хромель-алюмелевая термопара. Образцы нагревались до температуры деформации со скоростью 5 °C/с, затем следовала изотермическая выдержка в течение 3 минут для выравнивания температуры по объему образца. В процессе эксперимента фиксировалась температура образца  $T$ , усилие деформации  $F$  и текущее изменение высоты образца  $\Delta h = h - h_0$ . Автоматически с помощью встроенной программы рассчитывались истинная (логарифмическая) деформация  $\varepsilon_{сж}$  и истинные напряжения (сопротивление деформации)  $\sigma_{сж}$  в

предположении о неизменности объема образца и сохранения им цилиндрической формы в процессе испытания:

$$\varepsilon_{сж} = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right); \quad (1)$$

$$\sigma_{сж} = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{F}{\left(\frac{\pi d_0^2}{4} \frac{h_0}{h}\right)}, \quad (2)$$

где  $h_0$  и  $h$  – начальная и текущая высота образца;  $S$  – текущая площадь сечения образца;  $d_0$  и  $d$  – начальный и текущий диаметр образца.

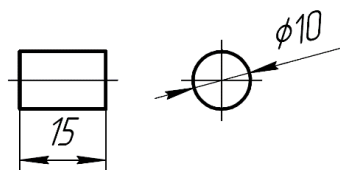


Рис. 1. Размеры образца для испытаний на сжатие

Испытания на кручение выполнялись на симуляторе термомеханических процессов Gleeble 3800 с применением модуля Torsion. Использовались цилиндрические образцы общей длиной 165 мм и диаметром 14 мм (рис. 2). Длина рабочей зоны  $L = 20$  мм, ее радиус  $R = 5$  мм. Испытания образцов проводились при температурах 450, 400, 350, 300, 250 и 25 °C со скоростями деформации 1, 10, 50 с<sup>-1</sup>. Все испытания выполнялись однократно (без повторов). Один конец образца неподвижно фиксировался в захватах, ко второму (подвижному) концу прикладывался скручивающий момент. Для фиксации температуры образца к центральной части рабочей зоны приваривалась хромель-алюмелевая термопара. Образцы нагревались до температуры деформации со скоростью 5 °C/с. После достижения заданной температуры следовала изотермическая выдержка в течение 3 минут для выравнивания температуры по объему образца. В процессе эксперимента фиксировался угол скручивания  $\theta$  и скручивающий момент  $M$ . Эквивалентная (истинная) деформация  $\varepsilon_{кр}$  и эквивалентные напряжения (сопротивление деформации)  $\sigma_{кр}$  рассчитывались по формулам

$$\varepsilon_{кр} = \frac{R\theta}{\sqrt{3}L}; \quad (3)$$

$$\sigma_{кр} = \frac{\sqrt{3}M}{2\pi R^3} (3 + n + m), \quad (4)$$

где  $n$  – показатель деформационного упрочнения;  $m$  – показатель скоростной зависимости напряжений. Принято, что  $(3 + n + m) \approx 3,3$ .

\* Исследования выполнены в лаборатории физического моделирования термомеханических процессов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» под руководством А.М. Ахмедьянова и С.П. Самойлова.

Результаты и их обсуждение

В высокотемпературной области (450–300°C) достигаемые деформации в испытаниях на кручение существенно больше, чем при одноосном сжатии (рис. 3). Однако в низкотемпературной области (250°C), наоборот, достигаемые деформации при кручении становятся ниже, чем при одноосном сжатии. Во всех испытаниях на кручение при 25°C происходило разрушение образцов в момент начала деформации. Таким образом, из сравнительного анализа следует, что кручение явля-

ется наиболее подходящим методом получения данных о сопротивлении деформации сплава 1441 в высокотемпературной области 450-300°C при больших эквивалентных (истинных) деформациях ( $\geq 1,0$ ), соответствующих условиям горячей прокатки. А испытание на одноосное сжатие – наиболее подходящий метод получения данных о сопротивлении деформации в низкотемпературной области (250°C), а также в области, соответствующей условиям холодной прокатки (25°C) с деформациями  $\leq 0,7$ .

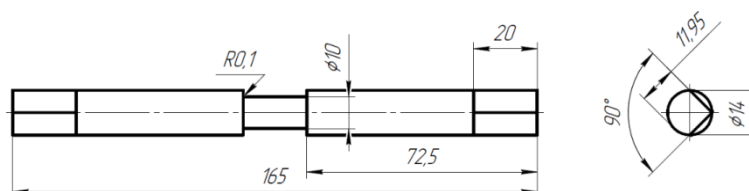


Рис. 2. Размеры образца для испытаний на кручение

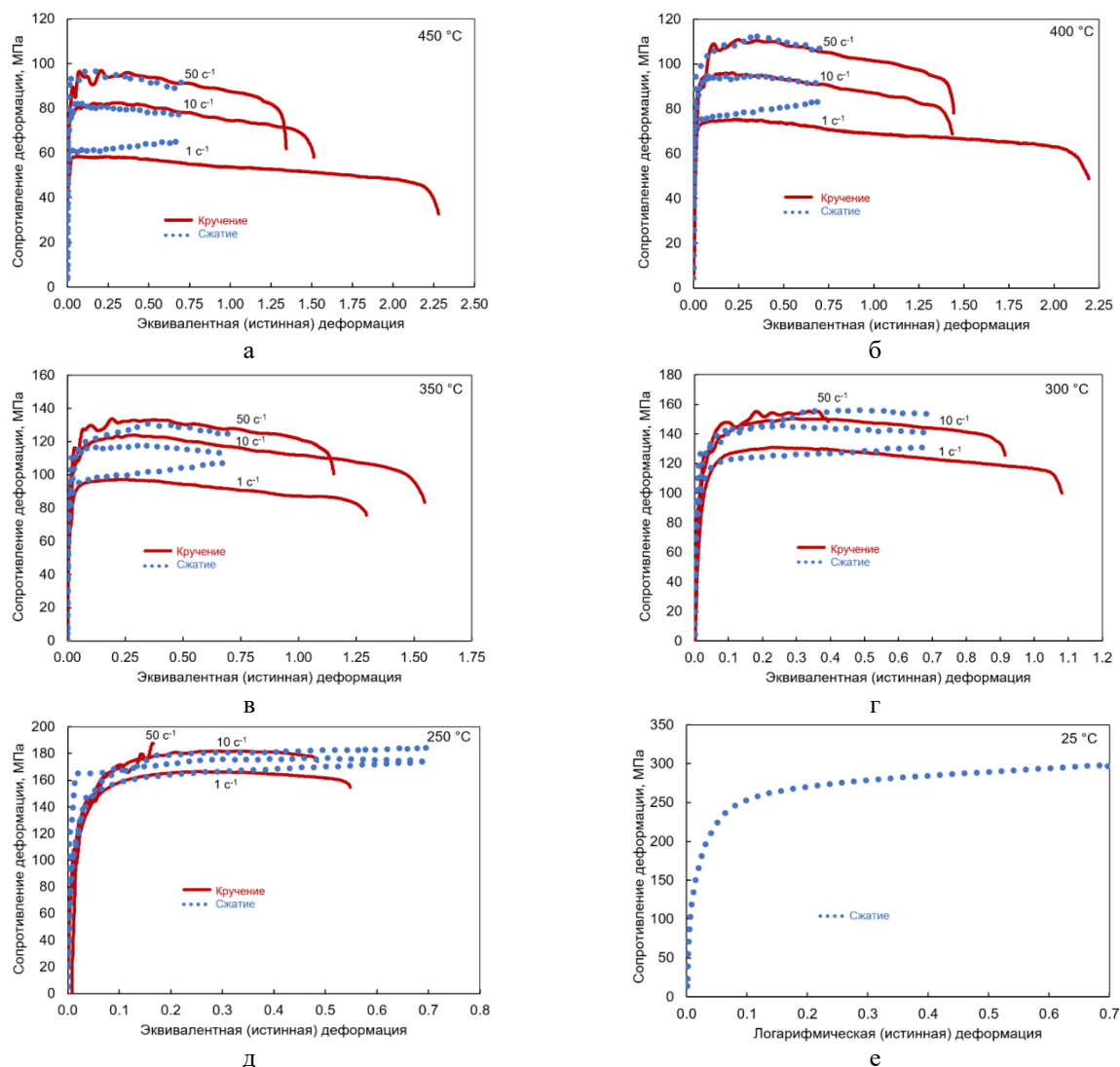


Рис. 3. Экспериментальные кривые сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава 1441 при различных видах испытания, скоростях деформации и температурах: а – 450°C; б – 400°C; в – 350°C; г – 300°C; д – 250°C; е – 25°C



Анализ результатов испытаний на одноосное сжатие показал, что изменение скорости деформаций не оказывает существенного влияния на сопротивление деформации алюминий-литиевого сплава 1441 при температуре 25°C. Поэтому кривая сопротивления деформации, изображенная на рис. 3, е, может быть использована в специализированных инженерных программах компьютерного моделирования для совершенствования и оптимизации технологических режимов холодной прокатки листов и полос из алюминий-литиевого сплава 1441 во всем интервале скоростей деформаций 1–50 с<sup>-1</sup>.

При скорости деформации 50 с<sup>-1</sup> кривые сопротивления деформации, изображенные на рис. 3, сглаживались по методам «Adjacent averaging» («По смежным значениям») и «Percentile filter» («Процентильный фильтр») в связи с влиянием вибрации, характерной для высокоскоростных тестов со скоростями деформации  $\geq 30$  с<sup>-1</sup>. На рис. 4 в качестве примера показаны экспериментальные кривые сопротивления деформации сплава 1441, полученные в испытании на одноосное сжатие при 450 °C и 50 с<sup>-1</sup> без сглаживания (из-за влияния вибрации) и после сглаживания методом «Percentile filter». Аналогичная обработка требовалась и для высокоскоростных испытаний на кручение. Для испытаний при 1 и 10 с<sup>-1</sup> сглаживания не требовалось.

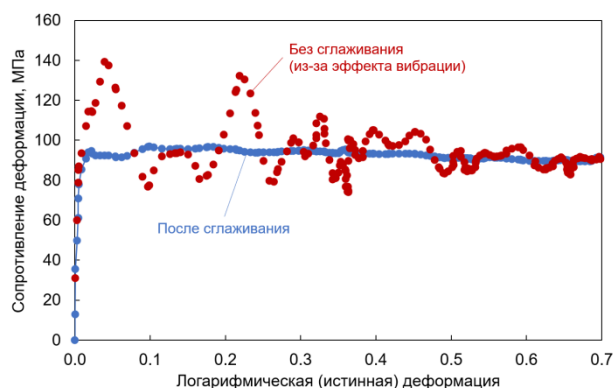


Рис. 4. Сопротивление деформации алюминий-литиевого сплава 1441 (450°C, 50 с<sup>-1</sup>)

Основным недостатком испытания на одноосное сжатие в горячем состоянии является влияние контактного трения. Это объясняет возможное расхождение кривых сопротивления деформации при испытаниях на одноосное сжатие и кручение (см. рис. 3).

Контактное трение приводит к неоднородности деформации и скорости деформации в объеме образца, дополнительному тепловыделению при пластической деформации. Это, соответственно, приводит к отклонению контролируемых параметров эксперимента (текущий диаметр образца, скорость деформации, температура, деформация) от характеристик, соответствующих условиям одноосного сжатия. Таким образом, контактное трение при одноосном сжатии увеличивает ошибку определения реологических

свойств сплава 1441. Поэтому для уменьшения такой ошибки требуется применение инверсного метода моделирования МКЭ. На рис. 5, 6 для одноосного сжатия в качестве примера показано сравнение значений усилия деформирования  $P$  в зависимости от хода инструмента при температуре 450°C и скорости деформации 1 с<sup>-1</sup> по результатам эксперимента и расчета МКЭ в программе QForm с учетом и без учета влияния контактного трения. Из рис. 6 следует, что учет контактного трения (увеличение показателя трения  $m$  от 0 до 0,5 по модели Леванова) в испытаниях на одноосное сжатие позволяет снизить относительную ошибку.

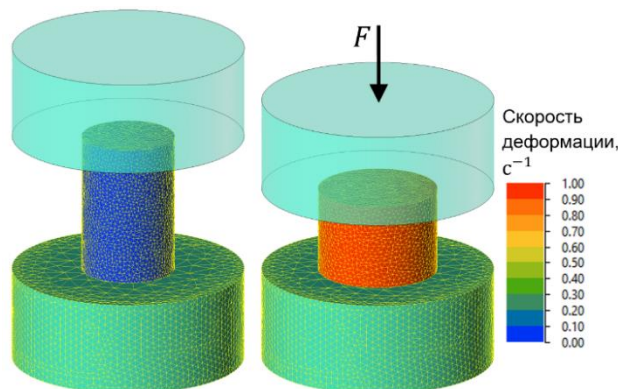


Рис. 5. Пример моделирования процесса одноосного сжатия в программе QForm (450°C без учета влияния контактного трения)

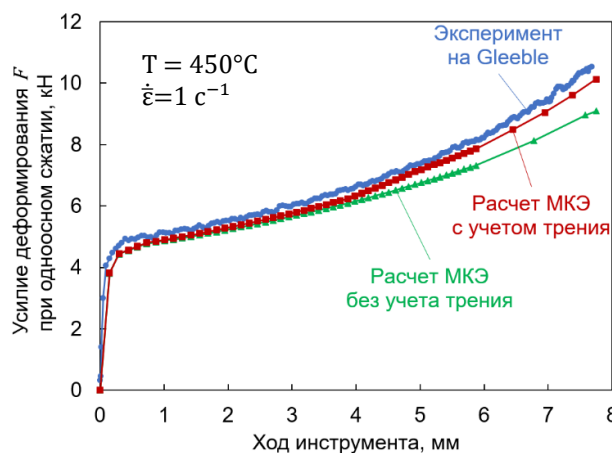


Рис. 6. Усилие деформирования при одноосном сжатии по результатам эксперимента и расчета МКЭ с учетом и без учета влияния контактного трения

В испытаниях на кручение отсутствует влияние контактного трения, поэтому точность определения реологических свойств алюминий-литиевого сплава 1441 выше. На рис. 7, 8 в качестве примера показано сравнение расчетных и экспериментальных значений скручивающего момента  $M$  в зависимости от угла скручивания  $\theta$  при температуре 450°C и скорости деформации 1 с<sup>-1</sup> по результатам эксперимента и расчета МКЭ в программе QForm. Относительная ошибка

аппроксимации экспериментальных кривых сопротивления деформации в испытаниях на кручение не превышала  $\pm 5\%$ .

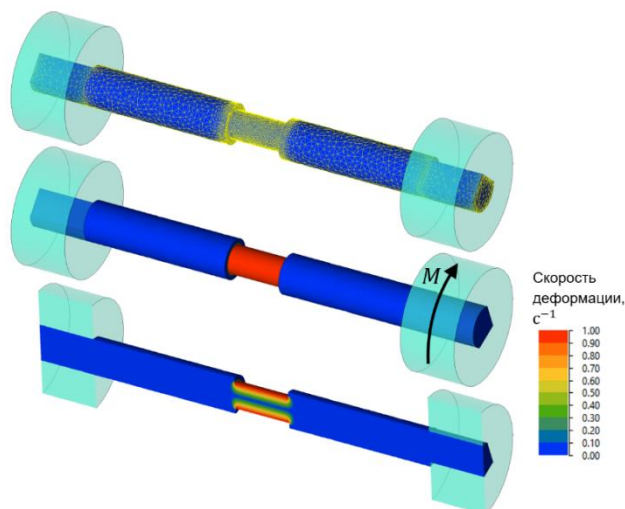


Рис. 7. Пример моделирования процесса кручения в программе QForm при  $450^\circ\text{C}$

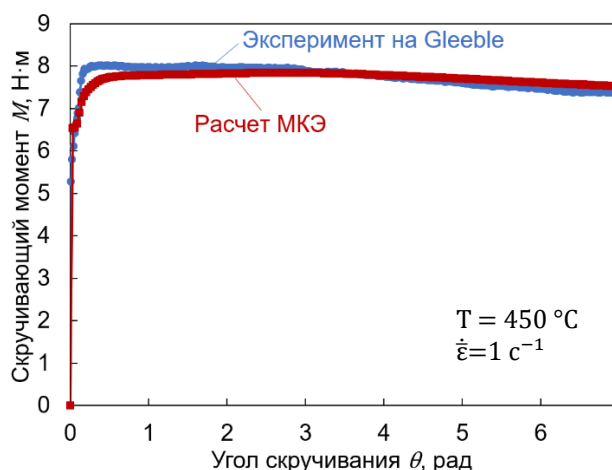


Рис. 8. Скручивающий момент по результатам эксперимента и расчета

### Заключение

С использованием симулятора термомеханических процессов Gleeble 3800 выполнено экспериментальное исследование и сравнительный анализ сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава 1441 системы Al-Cu-Mg-Li при испытаниях на одноосное сжатие и кручение в зависимости от деформационных и температурно-скоростных параметров ( $450\text{-}25^\circ\text{C}$ ,  $1\text{-}50\text{ с}^{-1}$ ), соответствующих процессам горячей и холодной прокатки листов и полос в условиях ПАО «КУМЗ».

Ключевым недостатком испытания на кручение является отсутствие возможности получения экспериментальных данных о сопротивлении деформации сплава 1441 в области, соответствующей условиям холодной прокатки из-за разрушения образцов в мо-

мент начала деформации. Основным недостатком испытания на одноосное сжатие является влияние контактного трения, увеличивающего ошибку определения реологических свойств сплава 1441. Для уменьшения такой ошибки требуется применение инверсного метода моделирования МКЭ. В обоих испытаниях (на сжатие и на кручение) при высокой скорости деформации ( $50\text{ с}^{-1}$ ) требовалось сглаживание кривых сопротивления деформации по методам «Adjacent averaging» и «Percentile filter» в связи с влиянием вибрации, что также увеличивало ошибку определения реологических свойств сплава 1441.

Испытание на кручение является наиболее подходящим методом получения экспериментальных данных о сопротивлении деформации алюминий-литиевого сплава 1441 в высокотемпературной области  $450\text{-}300^\circ\text{C}$  при больших эквивалентных (истинных) деформациях ( $\geq 1,0$ ), соответствующих условиям горячей прокатки. В свою очередь, испытание на одноосное сжатие является наиболее подходящим методом получения экспериментальных данных о сопротивлении деформации в области, соответствующей условиям холодной прокатки. Представленные в работе экспериментальные кривые сопротивления деформации могут быть использованы в специализированных инженерных программах компьютерного моделирования для совершенствования и оптимизации технологических режимов горячей и холодной прокатки листов и полос из алюминий-литиевого сплава 1441.

### Благодарность

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 23-79-30015) и договора о софинансировании №КК0987F-2023, а также в рамках государственного задания по теме «Давление» №122021000032-5.

### Список источников

1. Qin S., Lee S., Tsuchiya T., Matsuda K., Horita Z., Kocisko R., Kvackaj T. Aging behavior of Al-Li-(Cu, Mg) alloys processed by different deformation methods // Materials and Design. 2020. Vol. 196. 109139.
2. Влияние технологических параметров автоклавного метода формования деталей из гибридного материала СИАЛ на структуру и свойства листов алюминий-литиевого сплава 1441 / Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Сударчикова М.А., Карпухин С.Д., Колмаков А.Г. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2020. №3. С. 70-84.
3. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft Aluminium Alloys // Materials and Design. 2014. 56. P. 862-871.
4. Prasad N. Eswara, Gokhale A.A., Wanhill R.J.H. Aluminum-Lithium alloys: processing, properties and applications. Elsevier Inc., Oxford, UK. 2014. 596 p.

5. Xu X., Hao M., Chen J., He W., Li G., Jiao C., Burnett T.L., Zhou X. Influence of microstructural and crystallographic inhomogeneity on tensile anisotropy in thick-section Al-Li-Cu-Mg plates // *Materials Science and Engineering A*. 2022. 829: 142135.
6. Xu X., Hao M., Chen J., He W., Li G., Jiao C., Burnett T.L., Zhou X. Influence of microstructural and crystallographic inhomogeneity on tensile anisotropy in thick-section Al-Li-Cu-Mg plates // *Materials Science and Engineering A*. 2022. 829: 142135.
7. Влияние режимов гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплитков из алюминий-литиевого сплава 1441 / Антипов В.В., Ткаченко Е.А., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Овсянников Б.В. // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). С. 44-52.
8. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.
9. Петров И.Н., Батурин А.П., Удовенко Ю.П. Деформационное поведение алюминий-литиевого сплава В-1461 в условиях горячей осадки // *Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета*. 2018. №1. С. 57-62.
10. Повышение надежности и эффективности измерений параметров деформации алюминиевых сплавов на универсальной испытательной машине / Петров П.А., Фам В.Н., Бурлаков И.А., Матвеев А.Г., Сапрыкин Б.Ю., Петров М.А., Диксит У.Ш. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 3. С. 102-112.
11. Построение кривых текучести алюминиевого сплава АМг5 на основе натурного и вычислительного экспериментов / Петров П.А., Фам В.Н., Бурлаков И.А., Матвеев А.Г., Сапрыкин Б.Ю., Петров М.А. // *Технология легких сплавов*. 2022. №2. С. 6-74.
12. Peterson L.A., Horstemeyer M.F., Lacy T.E., Moser R.D. Experimental characterization and constitutive modeling of an aluminum 7085-T711 alloy under large deformations at varying strain rates, stress states, and temperatures // *Mechanics of Materials*. 2020. 151. 103602.
13. Erpalov M.V., Kungurov E.A. Examination of hardening curves definition methods in torsion test // *Solid State Phenomena*. 2018. 284. P. 598-604.
14. Сравнительный анализ результатов физического моделирования процесса прокатки прутков из стали 30MnB4 при испытании на кручение и сжатие / Лабер К.Б., Савицкий С.З., Дья Х., Кавалек А.М. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. Т.14. №2. С. 32-37.
15. Zhuchkova T., Aksenov S., Shkatov V., Mazur I. Comparison of results of dynamic recrystallization research of HC4201A steel by two types of tests on Gleeble 3800 // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53. No 2. P. 354-359.

#### Сведения об авторах

**Песин Александр Моисеевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий обработки материалов, заместитель заведующего лабораторией «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилияева», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pesin@bk.ru

**Разинкин Александр Викторович** – кандидат технических наук, директор по производству, ПАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ПАО «КУМЗ»), Каменск-Уральский, Россия. E-mail: RazinkinAV@kumz.ru

**Замараев Владимир Андреевич** – инженер-технолог, ПАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ПАО «КУМЗ»), Каменск-Уральский, Россия. E-mail: zamaraevva@kumw.ru

**Дымшакова Елена Геннадьевна** – начальник центральной заводской лаборатории, ПАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ПАО «КУМЗ»), Каменск-Уральский, Россия.

**Замараева Юлия Валентиновна** – кандидат технических наук, научный сотрудник, УрО РАН «Институт физики металлов им. М.Н. Михеева», Екатеринбург, Россия; ПАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ПАО «КУМЗ»), Каменск-Уральский, Россия. E-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

**Пустовойтов Денис Олегович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий обработки материалов, старший научный сотрудник лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилияева», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pustovoytov\_den@mail.ru

## COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOW STRESS OF ALUMINUM-LITHIUM ALLOY 1441 IN COMPRESSION AND TORSION TESTS

**Pesin Alexander M.** – Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Materials Processing Technologies, Deputy Head of the Zhilyaev laboratory “Mechanics of Gradient Nanomaterials”, Nosov Magnitogorsk State Technical University Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pesin@bk.ru

**Razinkin Alexander V.** – Candidate of Technical Sciences, director of Production, PJSC "Kamensk-Uralsky Metallurgical Plant", Kamensk-Uralsky, Russia. E-mail: RazinkinAV@kumz.ru

**Zamaraev Vladimir A.** – Engineer, PJSC "Kamensk-Uralsky Metallurgical Plant", Kamensk-Uralsky, Russia. E-mail: zamaraevva@kumw.ru

**Dymshakova Elena G.** – Head of the central plant laboratory, PJSC "Kamensk-Uralsky Metallurgical Plant", Kamensk-Uralsky, Russia.

**Zamaraeva Yulia V.** – Candidate of Technical Sciences, Research Fellow, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; PJSC "Kamensk-Uralsky Metallurgical Plant", Kamensk-Uralsky, Russia. E-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

**Pustovoitov Denis O.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Processing Technologies, Senior Research Fellow of the Zhilyaev laboratory “Mechanics of Gradient Nanomaterials”, Nosov Magnitogorsk State Technical University Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pustovoitov\_den@mail.ru

**Abstract.** An experimental study and comparative analysis of the flow stress of aluminum-lithium alloy 1441 of the Al-Cu-Mg-Li system was performed by uniaxial compression and torsion tests using the Gleeble 3800 thermomechanical process simulator. The studies were carried out depending on strain, temperature and strain rate parameters (450-25 °C, 1...50 s<sup>-1</sup>), corresponding to the processes of hot and cold rolling of sheets and strips under the conditions of PJSC KUMZ. It is shown that torsion testing is the most suitable method for obtaining experimental data on the flow stress of aluminum-lithium alloy 1441 in the high-temperature region of 450-300 °C at large equivalent (true) strains (> 1.0), corresponding to hot rolling conditions. In turn, the uniaxial compression test is the most suitable method for obtaining experimental data on the flow stress in the region corresponding to cold rolling conditions. The experimental curves of flow stress presented in the work can be used in specialized engineering programs of computer modeling for improving and optimizing technological schedules of hot and cold rolling of sheets and strips from aluminum-lithium alloy 1441.

**Keywords:** aluminum-lithium alloy 1441, Gleeble 3800, uniaxial compression, torsion, flow stress, comparative analysis

---

Ссылка на статью:

Сравнительный анализ сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава 1441 при испытаниях на сжатие и кручение / Песин А.М., Разинкин А.В., Замараев В.А., Дымшакова Е.Г., Замараева Ю.В., Пустовойтов Д.О.// Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 14-20.

Pesin A.M., Razinkin A.V., Zamaraev V.A., Dymshakova E.G., Zamaraeva Yu.V., Pustovoitov D.O. Comparative analysis of flow stress of aluminum-lithium alloy 1441 in compression and torsion tests. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 14-20.

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.744.3

Зарицкий Б.Б., Савинов А.С., Фочина К., Рудь К.И., Нефедьев А.А., Дубский Г.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 170 ХНМ

**Аннотация.** В современных условиях мировой экономики и сложившихся отношениях с другими странами (санкции и ограничения поставок сырья, оборудования, запчастей и лицензий для программных продуктов) возникла необходимость освоения новых видов прокатных валков. В связи с тем, что изготовление валков очень энерго- и ресурсозатратное производство возникла необходимость создания, с помощью математических аппаратов, программного продукта, позволяющего прогнозировать протекания технологических процессов и подобрать на стадии проектирования технологических условий наиболее подходящие и менее затратные режимы термической обработки.

Моделирование термонапряженного состояния [1, 2] невозможно без качественного прогнозирования температурного поля прокатного валка в процессе его термической обработки [3]. Для успешного применения существующих методов математического анализа теплового состояния исследуемого объекта требуется качественное определение температурных зависимостей условий однозначности (теплопроводности и теплоёмкости) при решении задачи теплопроводности существующими численными методами. При этом для качественного прогнозирования температурных полей прокатного валка требуется исследование теплофизических характеристик как в первоначальном (литом) состоянии, так и после термической обработки материала литой заготовки.

**Ключевые слова:** прокатный валок, математический анализ, теплопроводность, теплоёмкость, напряженное состояние, температурные поля

### Исследование теплофизических характеристик в литом состоянии

Эффективность работы литейного предприятия является его рентабельность, на которую в значительной мере оказывает влияние себестоимость выпускаемой продукции. Это в полной мере относится к производству прокатных валков. Следует отметить, что при изготовлении данного вида изделия на себестоимость оказывает значительное влияние длительность процесса термической обработки, в ходе которого обеспечивается заданная микроструктура, а следовательно, и механические свойства прокатного валка. Вследствие значительной металлоёмкости прокатных валков затрачиваемое время на их термообработку является определяющим фактором формирования себестоимости. Это связано с тем, что такие длительные технологические циклы отжига изделий приводят к тому, что зачастую печи термической обработки являются лимитирующим звеном в увеличении количества выпускаемой продукции.

Данную проблему возможно решить путем оптимизации существующих режимов термической обработки, для чего требуется построение качественно математического аппарата, обеспечивающего про-

гнозирование теплового состояния прокатного валка в процессе его термической обработки.

Данная задача может быть решена путем численного решения задачи теплопроводности одним из существующих методов. Однако применение данных методик сопряжено с наличием условий однозначности, нахождение которых является составной частью задачи о прогнозировании температурных полей в процессе отжига.

В данной работе рассмотрено получение условий однозначности для валковой стали 170ХНМ.

Проведение эксперимента по определению физико-механических свойств среднеуглеродистой легированной стали 170ХНМ производилось при помощи усовершенствованной высокотемпературной вакуумной установки ИМАШ 20-75, в которой реализованы импульсный и периодический методы измерения комплекса теплофизических свойств в широком температурном диапазоне.

Полученные экспериментальные значения теплопроводности стали 170ХНМ в литом состоянии могут быть описаны кривой на рис. 1.

Формула расчета теплопроводности стали 170ХНМ в литом состоянии:

$$\lambda = \frac{(1 - \tanh(50(t - 750))) \cdot (40,7 - 9,6 \cdot 10^{-7} T^{2,5} + 3 \cdot 10^{-8} T^3)}{2} + \frac{(1 + \tanh(50(t - 750))) \cdot (-2,443 \cdot 10^{-9} T^4 + 9,3115 \cdot 10^{-6} T^3 - 1,3101 \cdot T^2 + 8,06T - 1791,8)}{2} \quad (1)$$

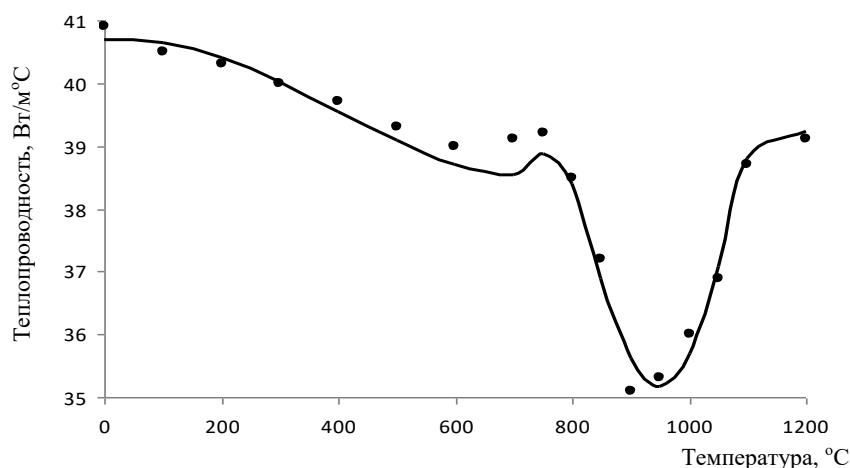


Рис. 1. Зависимость теплопроводности стали 170XHM в литом состоянии от температуры

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Для оценки тесноты связи экспериментальных данных с полученными линиями регрессии использовали корреляционное отношение  $\eta$  [9, 10], которое применяется для нелинейных математических зависимостей

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{yx}^2}{\sigma_{\bar{y}}^2}}; \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (2)$$

где  $\sigma_{yx}$  – дисперсия точек относительно линии регрессии;

$\sigma_{\bar{y}}$  – дисперсия относительно средней линии.

Величина корреляционного отношения составляет 0,98, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение между экспериментальными и расчетными данными определяли по формуле

$$\varepsilon = \left| \frac{\lambda_{\text{эксп}} - \lambda_{\text{расч}}}{\lambda_{\text{эксп}}} \right| \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{эксп}}$  и  $\lambda_{\text{расч}}$  – экспериментальные и расчетные значения теплопроводности соответственно, Вт/м·°С.

Среднее относительное отклонение составляет  $\varepsilon_{\text{ср}}=0,58\%$ , что значительно ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи  $F$ -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило  $F_{\text{расч}}=1,035$ , что меньше критического  $F_{\text{крит}}=2,384$ , взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплопроводности стали в литом состоянии может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Изменение теплоемкости в литом состоянии может быть описано кривой на рис. 2.

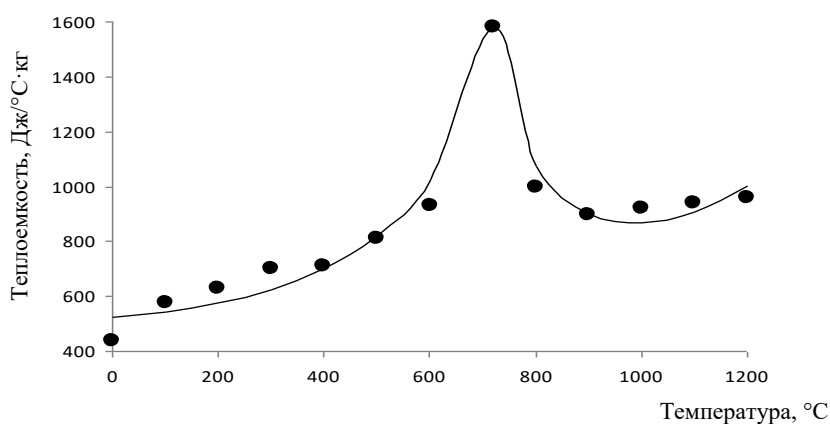


Рис. 2. Зависимость теплоемкости стали 170XHM в литом состоянии от температуры

Формула расчета теплоемкости стали 170ХНМ в литом состоянии:

$$C_p = \frac{1 - \tanh(50(t - 720))}{2 \cdot (1,9 \cdot 10^{-3} - 4,6 \cdot 10^{-7}t - 1,8 \cdot 10^{-9}t^2)} + \frac{(1 + \tanh(50(t - 720)))t}{2 \cdot (-17,54 - 1,66 \cdot 10^{-2}t - 1,116 \cdot \sqrt{t})}. \quad (4)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,97, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет  $\varepsilon_{\text{ср}} = 6,08\%$ , что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи  $F$ -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило  $F_{\text{расч}} = 1,061$ , что меньше критического  $F_{\text{крит}} = 2,787$ , взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплоемкости стали в литом состоянии может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Полученные зависимости могут быть использованы для расчёта теплового состояния прокатного валка в процессе термической обработки до теплового удара после растворения карбидов в температурной области 900–970°C. Для последующего анализа теплового состояния вала требуется определение теплофизических характеристик стали 170ХНМ в термообработанном состоянии.

### Исследование теплофизических характеристик в термообработанном состоянии

Были проведены эксперименты по измерению теплофизических свойств материала 170ХНМ после термообработки. Образцы вырезаны из кольцевой пробы, прошедшей термообработку вместе с прокатными валками.

Изменение теплопроводности после термообработки может быть описано следующей кривой рис. 3.

Формула расчета теплопроводности стали 170ХНМ после термообработки:

$$\lambda = \left( \frac{1 - \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot 34,9 \cdot t^{0,03} \cdot e^{-5,9 \cdot 10^{-4} \cdot t} \right) + \frac{1 + \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot \left( 128,4 - 0,0443 \cdot t - \frac{52131}{t} \right). \quad (5)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,99, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет  $\varepsilon_{\text{ср}} = 0,77\%$ , что значительно ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи  $F$ -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило  $F_{\text{расч}} = 1,005$ , что меньше критического  $F_{\text{крит}} = 2,942$ , взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплопроводности стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

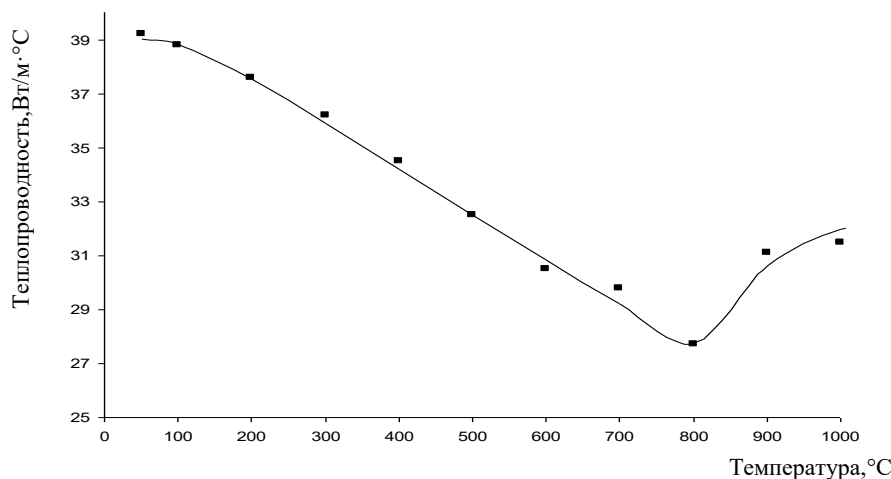


Рис. 3. Зависимость теплопроводности стали 170ХНМ после термообработки от температуры

Изменение теплоемкости после термообработки может быть описано кривой на рис. 4.

Формула расчета теплоемкости стали 170ХНМ после термообработки:

$$C_p = \frac{(1 - \tanh(50(t - 750)))535,43}{2(1 + 3,24 \cdot 10^{-4}t - 1,42 \cdot 10^{-6}t^2)} + \frac{(1 + \tanh(50(t - 750)))e^{-57,66 + \frac{8,58 \cdot 10^3}{t} + 8,137 \ln t}}{2} \quad (6)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,96, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет  $\varepsilon_{\text{ср}}=4,7\%$ , что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи  $F$ -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило  $F_{\text{расч}}=1,203$ , что меньше критического  $F_{\text{крит}}=23,16$ , взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплоемкости стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Изменение температуропроводности после термообработки может быть описано кривой на рис. 5.

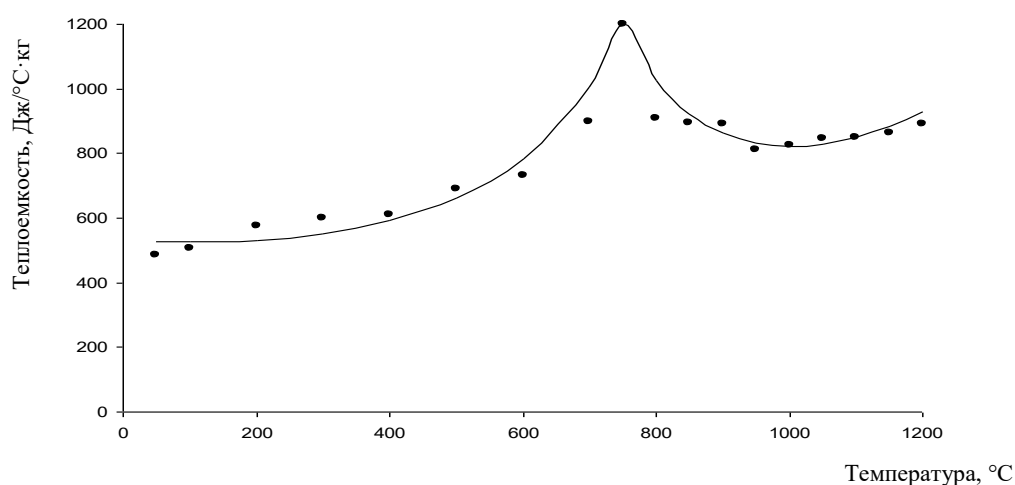


Рис. 4. Зависимость теплоемкости стали 170ХНМ после термообработки от температуры

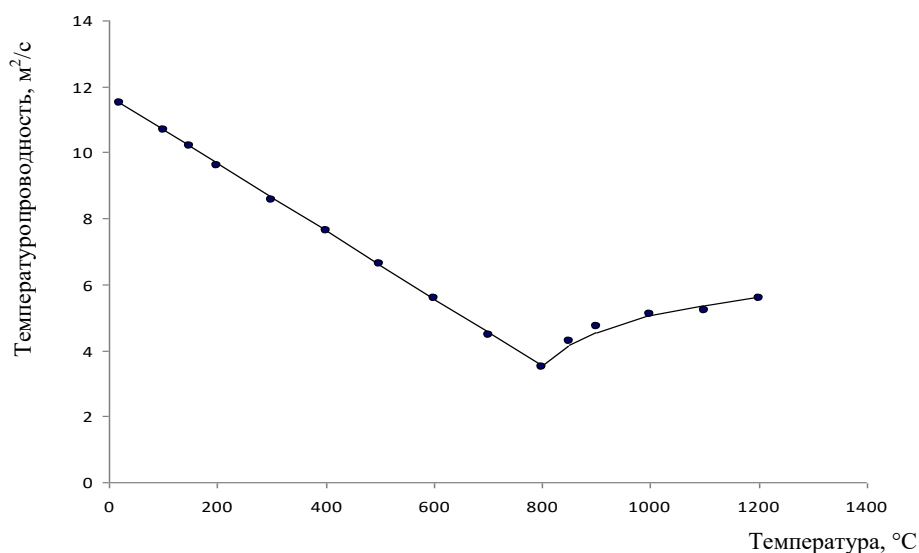


Рис. 5. Зависимость температуропроводности стали 170ХНМ после термообработки от температуры



Формула расчета температуропроводности стали 170ХНМ после термообработки:

$$a = \frac{1 - \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot (-1,03 \cdot 10^{-2} \cdot (t - 1141)) + \frac{1 + \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot \ln(-450 + 0,606 \cdot t). \quad (7)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,99, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет  $\varepsilon_{\text{ср}}=1,15\%$ , что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи  $F$ -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило  $F_{\text{расч}}=1,015$ , что меньше критического  $F_{\text{крит}}=2,553$ , взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения температуропроводности стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Изменение электропроводности после термообработки может быть описано кривой на рис. 6.

Формула расчета электропроводности стали 170ХНМ после термообработки:

$$\rho = 47,8 + 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot t^5. \quad (8)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,99, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет  $\varepsilon_{\text{ср}}=2,36\%$ , что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи  $F$ -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило  $F_{\text{расч}}=1,060$ , что меньше критического  $F_{\text{крит}}=2,005$ , взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения электропроводности стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Таким образом, в результате проведенной работы получены температурные зависимости теплофизических характеристик материала, которые могут быть использованы в МКР для обеспечения точного прогнозирования теплового состояния валка из стали 170ХНМ в процессе его термообработки.

#### Список источников

1. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. Спец. вып. С. 36-38.
2. Температурные поля системы отливка – литейная форма в условиях неравновесной кристаллизации комплекснолегированных сплавов / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, Е.В. Сеницкий, А.С. Савинов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 28–31.

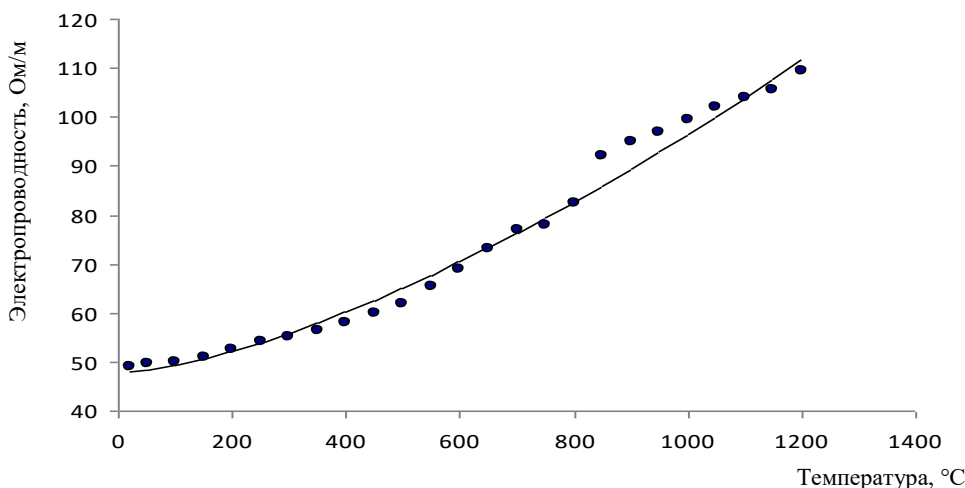


Рис. 6. Зависимость электропроводности стали 170ХНМ после термообработки от температуры

3. Савинов А.С., Андреев С.М., Тубольцева А.С. Программа расчета тепловых полей в литейных системах // Литейщик России. 2013. №3. С. 39-42.
4. Антошкина Е.Г., Смолко В.А. Процессы формирования прочности песчаных формовочных и стержневых смесей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2012. № 15 (274). С. 6–8.
5. Илларионов И.Е. Теоретические основы формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 1(86). С. 233.
6. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Установка для исследования податливости формовочных смесей // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. С. 139-144.
7. Савинов А.С. Расчет теплоемкости затвердевающей стенки отливки // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2011. Вып. 11. С. 130–133.
8. Ангольд К.В. Исследование температурной зависимости теплоемкости стали 170ХНМ // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2018. № 17. С. 122–125.
9. Дунин-Барковский И.В., Смирнов Н.В. Теория вероятности и математическая статистика в технике. М.: Машиностроение, 1955. 431 с.
10. Справочник по теории вероятности и математической статистике/ В.С. Королук, Н.И. Потенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. М.: Наука, 1985. 640 с.

#### Сведения об авторах

**Зарицкий Борис Борисович** – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru.

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

**Фочина Каролина Владимировна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия. E-mail: angoldk@bk.ru.

**Рудь Ксения Игоревна** – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: koks1690@mail.ru

**Нефедьев Александр Алексеевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. shuric\_xp@mail.ru

**Дубский Геннадий Алексеевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. physics@magtu.ru

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### STUDY OF 170HNM STEEL THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS

**Zaritskii Boris B.** – Senior Lecturer of department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru

**Savinov Alexander S.** – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov\_nis@mail.ru

**Fochina Karolina V.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: angoldk@bk.ru.

**Rud Ksenia I.** – postgraduate student of foundry and material science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: koks1690@mail.ru

**Nefediev Alexander A.** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. shuric\_xp@mail.ru

**Dubsky Gennady A.** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. physics@magtu.ru

**Abstract.** In the current conditions of the global economy and the established relations with other countries (sanctions and restrictions on the supply of raw materials, equipment, spare parts and licenses for software products), the need to develop new types of rolling rolls has arisen. The need to create a software product that allows predicting the course of technological processes and selecting the least expensive heat treatment modes at the design stage of technological conditions arose due to energy- and resource-intensive production.

Modeling of the thermal stress state [1, 2] is impossible without high-quality prediction of the rolls temperature field during its heat treatment [3]. For the successful application of existing methods of mathematical analysis of the thermal state of the study object, it is necessary to determine correctly the temperature dependencies of the uniqueness conditions (thermal conductivity and heat capacity) in the course of solving the problem of thermal conductivity using existing numerical methods. At the same time, for high-quality prediction of the temperature fields of the rolling roll, it is necessary to study the thermophysical characteristics both in the initial (cast) state and after heat treatment of the material of the cast billet. These studies will help to increase the accuracy of forecasting technological processes in production and expand the database of characteristics of 170 XHM steel.

**Keywords:** rolling roll, mathematical analysis, thermal conductivity, heat capacity, stress state, temperature fields.

---

Ссылка на статью:

Исследование теплофизических характеристик стали 170 ХНМ / Зарицкий Б.Б., Савинов А.С., Фочина К., Рудь К.И., Нефедьев А.А., Дубский Г.А. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 21-27.  
Zaritskii B.B., Savinov A.S., Fochina K.V., Rud K.I., Nefediev A.A., Dubsky G.A. Study of 170 HNM steel thermophysical characteristics. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 21-27.

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОПИТКИ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ ПОЛИМЕРНЫМ ИНФИЛЬТРАТОМ**

**Аннотация.** В центре внимания авторов статьи находится проблема осмысления и моделирования процесса пропитки пористого алюминиевого литья полимерными композициями, который играет важнейшую роль в решении задачи снижения доли производственного брака и обеспечения требуемого эксплуатационного ресурса литых изделий. Формулируются отличительные признаки макро- и микропор, формирующихся в отливках из алюминиевых сплавов. Дается краткая характеристика процесса пропитки микропор, описываются особенности, связанные с одновременным протеканием в условиях различных температур и давлений как химических реакций с участием полимерных композиций, так и тепло- и массопереноса и фильтрации. Приводится список основных операций. Обращается внимание на сложность описания процесса пропитки с позиции классической теории. Предложена достаточно простая для понимания физико-математическая модель пропитки пористого алюминиевого литья полимерным инфильтратом – жидкой полимерной композицией, фильтрующейся сквозь дефектную зону микропор в отливке. В основе модели лежит известная схема плоскопараллельной фильтрации жидкости сквозь идеализированную изотропную пористую среду. Получена расчетная формула для оценки теоретической минимально необходимой продолжительности протекания процесса пропитки. Сформулированы условия ее применения. Приводятся результаты выполненного расчета применительно к конкретной задаче, объясняющие нестабильность результатов, получаемых на практике.

**Ключевые слова:** алюминиевое литье, пористость, пропитка, фильтрация, полимерная композиция

**Введение**

Производители алюминиевого литья традиционно различают два типа пористости: микро- и макропористость. И та, и другая могут иметь усадочное и/или газовое происхождение. Макропористость, как правило, видна невооруженным глазом и необратимо снижает прочностные свойства отливок, поэтому обычно их направляют на переплав в качестве возврата. В отличие от этого, микропористость проявляет себя лишь в условиях избыточного давления воздуха, нагнетаемого в полость отливки, погруженной в воду, в виде устойчивой цепочки пузырьков, выходящих из места дефекта на поверхности отливки.

Пропитка алюминиевого литья полимерными композициями широко применяется с целью гарантированной герметизации микропористости – микропор, усадочной рыхлоты и мелких раковин газового происхождения и микротрещин размерами до 0,5 мм без повреждения поверхности, изменения геометрии отливок и потери ими прочности, позволяет снизить долю производственного брака и обеспечивает требуемый эксплуатационный ресурс литых изделий в широком диапазоне рабочих температур от -90 до +250°C даже при воздействии химически активных жидкостей, газов, масел, смазок, охлаждающих эмульсий, кислот, щелочей и топлива [1-6].

В общем случае пропитка пористых отливок проводится после их отделения от литниковой системы и включает в себя несколько основных операций [7-9]:

1) входная проверка на герметичность;

2) загрузка в емкость для герметизации;

3) обработка герметизирующим составом, включая пропитку жидкой композицией и выдержку до полного затвердевания в микропорах;

4) промывка;

5) сушка;

6) повторный контроль на герметичность.

Чаще всего отечественные предприятия практикуют вакуумную пропитку в автоклаве по схеме «влажный вакуум-давление» композициями типа Анакрол-90 (отечественный аналог зарубежного материала Loctite Resinol 88 C) [10-13], не требующими присутствия кислорода, полимеризующимися при нагреве и существенно превосходящими по эффективности материалы предыдущего поколения на основе жидкого стекла и полиэфирных смол. При этом полимеризованный материал, как правило, представляет собой реактопласт, который не расплавляется, не вытесняется из пор и не вымывается, либо термопласт, который успешно выдерживает достаточно высокие температуры эксплуатации. При превышении максимальных рекомендованных температур происходит озоление и разрушение реактопласта или, соответственно, расплавление термопласта.

Следует отметить, что, несмотря на кажущуюся простоту практической реализации, пропитка пористых отливок весьма сложна для описания с позиции классической теории. Очевидно, что здесь имеют место как химические реакции с участием полимерных композиций, протекающие в условиях различных температур и давлений, так и такие физические процессы, как тепло- и массоперенос и фильтрация.

Тем не менее осмысление и математическое описание процессов, происходящих в ходе пропитки пористого алюминиевого литья полимерными композициями, пусть даже в упрощенном, модельном виде, крайне важно для повышения управляемости этой технологической операцией в целом и обеспечения прогнозирования длительности операции в частности.

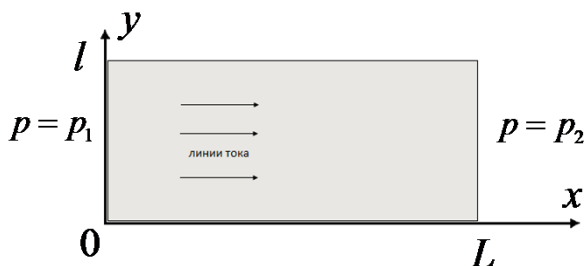
Цель данного исследования – разработать физико-математическую модель пропитки пористого алю-

миниowego литья полимерным инфильтратом – жидкой полимерной композицией, фильтрующей сквозь дефектную зону микропор в отливке, и предложить на ее основе расчетную формулу для оценки продолжительности полного протекания процесса.

### Теоретические выкладки

Для построения искомой модели используем известную схему плоскопараллельной фильтрации [14, 15]. Будем рассматривать дефектную зону микропор в отливке как классическую пористую среду – прямоугольную изотропную область с проницаемостью  $k$ , сквозь которую пропускается полимерный инфильтрат – однородная несжимаемая жидкость с динамической вязкостью  $\mu$ , причем так, что линии тока параллельны оси  $Ox$  (см. рисунок).

Границы дефектной зоны  $y = 0$  и  $y = l$  принимаем совпадающими со стенками автоклава, следовательно, непроницаемыми. Рассматриваем стационарный процесс, поэтому давление на входе в дефектную зону ( $x = 0$ ) и на выходе из нее ( $x = L$ ) фиксируем равным соответственно  $p_1$  и  $p_2$ , причем  $p_1 > p_2$ . Массовыми силами, связанными с действием гравитации, пренебрегаем. Полимерный инфильтрат на стадии пропитки до полимеризации (затвердевания) с определенными допущениями рассматриваем как ньютоновскую жидкость.



Расчетная схема

В таком случае модель пропитки может быть описана системой, состоящей из двух уравнений математической физики, а именно уравнений баланса массы, или неразрывности, и баланса импульса, или фильтрации Дарси:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, u_y = u_z = 0, \end{cases}$$

в которой  $u_x, u_y, u_z$  – компоненты скорости движения инфильтрата по осям прямоугольной декартовой системы координат.

Исключаем из системы единственную неизвестную компоненту скорости  $u_x$  и получаем однородное дифференциальное уравнение второго порядка с разделяющимися переменными:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = 0.$$

После первого интегрирования уравнения имеем

$$\frac{dp}{dx} = C_1,$$

откуда после второго интегрирования получаем  $p = C_1 x + C_2$ .

Для стационарного процесса в структуре условий однозначности сохраняются только граничные:

$$\text{при } x = 0 \quad p = p_1; \text{ при } x = L: \quad p = p_2.$$

Учитывая этот факт, находим значения обеих констант интегрирования:

$$C_1 = \frac{p_2 - p_1}{L}, C_2 = p_1.$$

В итоге для распределения давления полимерного инфильтрата получаем

$$p(x) = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{L} \cdot x.$$

Принимая это во внимание, для компоненты скорости  $u_x$  имеем

$$u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} = -\frac{k}{\mu} C_1 = \frac{k}{\mu} C_1 = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{p_2 - p_1}{L}.$$

Средняя истинная скорость произвольной частицы, находящейся в потоке полимерного инфильтрата, с учетом изотропности среды определяется соотношением

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{u_x}{m},$$

где  $m$  – пористость.

Поскольку в нашем случае компонента полной скорости  $u$  полимерного инфильтрата вдоль оси  $Ox$  является единственной, отличной от нуля, из последнего равенства получим

$$dt = \frac{m}{u} dx.$$

Это дает возможность найти время, за которое произвольная частица проходит расстояние от начала координат до точки с текущей координатой  $x$  в однородной пористой среде:

$$t = m \int_0^x \frac{dx}{u(x)}.$$

В итоге получаем среднее время прохода произвольной частицы через прямоугольную область длины  $L$ , которое составляет

$$T = m \int_0^L \frac{dx}{u_x} = \frac{\mu m}{k} \cdot \frac{L^2}{p_1 - p_2}$$

### Обсуждение результатов

Обращает на себя внимание тот факт, что в полученной расчетной формуле среднее время пропитки оказалось прямо пропорциональным динамической вязкости инфильтрата  $\mu$  и пористости дефектной зоны отливки  $m$ , обратно пропорциональным разности давлений  $p_1 - p_2 = \Delta p$  на входе и выходе и проницаемости  $k$  дефектной зоны отливки.

При этом пористость  $m$  (безразмерная величина в системе СИ) представляет собой отношение объёма области, занятого в дефектной зоне отливки порами, к её общему объёму, а проницаемость  $k$  (размерность в системе СИ [ $\text{м}^2$ ]) – способность пористой среды пропускать жидкость при перепаде давления на входе и выходе, характеризующая сопротивление проникновению инфильтрата вглубь пористой среды. Пористость характеризует степень заполнения материала отливки порами и во многом определяет прочностные и другие эксплуатационные свойства литого изделия. Проницаемость является одним из сложных физико-химических свойств дефектной зоны отливки как пористой среды и зависит от присущих ей диффузионных и сорбционных особенностей.

В этой связи, по мнению авторов данной статьи, полученная расчетная формула вполне может быть применена для оценки теоретической минимально необходимой продолжительности полного протекания процесса пропитки, учитывая, что в качестве  $\Delta p$  допустимо использовать рабочую глубину вакуума в автоклаве, динамическую вязкость полимерного инфильтрата  $\mu$  принять постоянной в течение всего временного интервала пропитки, а толщину дефектной зоны пропитки  $L$ , а также величины ее проницаемости  $k$  и пористости  $m$  можно определить экспериментальным путем [16].

Так, например, при динамической вязкости  $\mu = 10$  МПа·с (пропитка акриловым термопластом марки Loctite Resinol 88С), глубине вакуума в автоклаве  $\Delta p = 0,05$  атм = 0,005 МПа, толщине  $L = 5$  мм, проницаемости  $k = 10^{-12}$  м<sup>2</sup> и пористости дефектной зоны  $m = 0,7$  расчетная теоретическая минимально необходимая продолжительность процесса пропитки составляет  $3,5 \cdot 10^{10}$  с  $\approx 9,7 \cdot 10^6$  ч  $\approx 405$  суток, что существенно превышает диапазон ее технологических значений, применяемых на практике (4–5 мин по данным [17]) и во многом объясняет нестабильность получаемых результатов.

### Заключение

Таким образом, авторами данной статьи предложена физико-математическая модель пропитки пористого алюминиевого литья полимерным инфильтратом, позволяющая выполнить оценку теоретической минимально необходимой продолжительности полного протекания процесса пропитки.

### Список источников

1. Евсеев В.И., Ткаченко С.В. Исправление дефектов литья и герметизация пористости деталей [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://lrx.ucoz.ru/blog/ispravlenie\\_defektov\\_litja\\_i\\_germetizacija\\_porivosti\\_detalej/2012-01-19-133](https://lrx.ucoz.ru/blog/ispravlenie_defektov_litja_i_germetizacija_porivosti_detalej/2012-01-19-133) (дата обращения 18.06.2024).
2. Леушин И.О., Субботин А.Ю., Горохов Д.А. Пропитка пористого металлического литья полимерными материалами: современные тренды // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. №7(242). С. 55-61.
3. Анакрол. Герметизация пористости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anacrol.ru/files/download/document/%D0%90%D0%9D%D0%90%D0%9A%D0%A0%D0%9E%D0%9B.%20%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8.pdf> (дата обращения 18.06.2024).
4. Технология герметизации микропористости [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://germetic.ru/questions/index/ge/closing\\_hole/](https://germetic.ru/questions/index/ge/closing_hole/) (дата обращения 18.06.2024).
5. Reger M., Horvath R., Fabian E.R., Reti T. Modelling the Impregnation of a Pressure-Tight Casting [Электронный ресурс] // International Journal of Metal-casting. 2024. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/378749909\\_Modelling\\_the\\_Impregnation\\_of\\_a\\_Pressure-Tight\\_Casting?\\_sg=Lbd4\\_kiiJl0BbFNCMEVV5oH0dYttj7zzixj1d03os\\_099RQUqViCc8iIo2svtByTZnj5Ut z2o8DGNZ0&\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijpw7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCIsInBhZ2U0iOiJfZGlyZWN0In19](https://www.researchgate.net/publication/378749909_Modelling_the_Impregnation_of_a_Pressure-Tight_Casting?_sg=Lbd4_kiiJl0BbFNCMEVV5oH0dYttj7zzixj1d03os_099RQUqViCc8iIo2svtByTZnj5Ut z2o8DGNZ0&_tp=eyJjb250ZXh0Ijpw7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCIsInBhZ2U0iOiJfZGlyZWN0In19) (дата обращения 18.06.2024).
6. Чечуха В.И., Садохина М.А. Газовые раковины и пористость при литье под высоким давлением и меры предупреждения их образования // Литейщик России. 2024. №1. С. 33-38.
7. Лордкипанидзе М.А. Обзор методов упрочнения пористого литого алюминия // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: сб. тр. XXXII Международной научно-практической конференции, 2016. С. 7-11.
8. Современные материалы и технологии для исправления дефектов литья и герметизации пористости деталей [Электронный ресурс]. Режим доступа:

- [http://www.aquaprop.ru/upload/Articles/materiali\\_i\\_tehnologii.pdf](http://www.aquaprop.ru/upload/Articles/materiali_i_tehnologii.pdf) (дата обращения 18.06.2024).
9. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н. Исследование влияния вибрации на процессы формирования пористых магниевых изделий // *Металлург*. 2024. №1. С. 91-94.
  10. Уридия З.П., Мухина И.Ю. Новые пропитывающие материалы для герметизации отливок из магниевых и алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2011/2011-205831.pdf?ysclid=lxj0esuney51647300> (дата обращения 18.06.2024).
  11. Barbeau Wilfredh, Cocco John, Cowdrey Simon, Kyle Eales S. *Loctite Worldwide Design Handbook*. Munich, Germany. Loctite European Group, 1998.
  12. Технологии устранения дефектов корпусных деталей анаэробными материалами / Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Шубенков А.В., Корнеев А.А. // *Научно-теоретические проблемы современного российского общества: сб. материалов I научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых*. М., 2006. С. 173-174.
  13. Фундаментальная электронная библиотека [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.alteh.com/suhoi\\_vakuuum.html](http://www.alteh.com/suhoi_vakuuum.html) (дата обращения 18.06.2024).
  14. Фильтрационные течения в пористых средах: монография / Коленкина Е.И., Никитин В.Ф., Логвинов О.А., Смирнов Н.Н. Москва: Изд-во ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2020. 73 с.
  15. Леонтьев Н.Е. *Основы теории фильтрации*. М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
  16. Определение пористости материалов / Житников Ю.З. и др. // *Контроль. Диагностика*. 2004. №4. С. 40-43.
  17. Технологический процесс пропитки литья [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://brudor.ru/tehnologicheskij-protsess-propitki-litya/> (дата обращения 18.06.2024).

#### Сведения об авторах

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

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

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

**Горохов Денис Александрович** – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: [denisgorokhov57@gmail.com](mailto:denisgorokhov57@gmail.com).

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### THEORETICAL MODEL OF IMPREGNATION OF POROUS ALUMINUM CASTING WITH POLYMER INFILTRATE

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

**Koshelev Oleg S.** – Dr. Sci. (Tech), Prof., Professor of the Chair of Machine-building technological complexes Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

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

**Gorohov Denis A.** – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

**Abstracts.** The authors of the article focus on the problem of understanding and modeling the process of impregnation of porous aluminum casting with polymer compositions, which plays a vital role in solving the problem of reducing the share of production defects and ensuring the required service life of cast products. The distinctive features of macro- and micropores formed in castings made of aluminum alloys are formulated. A brief description of the process

of impregnation of micropores is given, the features associated with the simultaneous occurrence of chemical reactions involving polymer compositions, as well as heat and mass transfer and filtration under conditions of different temperatures and pressures are described. A list of basic operations is provided. Attention is drawn to the complexity of describing the impregnation process from the position of classical theory. A fairly simple to understand physical and mathematical model of impregnation of a porous aluminum casting with a polymer infiltrate - a liquid polymer composition filtering through a defective zone of micropores in the casting - is proposed. The model is based on the well-known scheme of plane-parallel filtration of liquid through an idealized isotropic porous medium. A calculation formula has been obtained to estimate the theoretical minimum required duration of the impregnation process. The conditions for its application are formulated. The results of the calculation performed in relation to a specific problem are presented, explaining the instability of the results obtained in practice.

**Keywords:** aluminum casting, porosity, impregnation, filtration, polymer composition.

---

Ссылка на статью:

Теоретическая модель пропитки пористого алюминиевого литья полимерным инфильтратом / Леушин И.О., Кошелев О.С., Рябова Л.И., Горохов Д.А. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 28-32.  
Leushin I.O., Ryabova L.I., Koshelev O.S., Gorohov D.A. Theoretical model of impregnation of porous aluminum casting with polymer infiltrate. *Teoria i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 28-32.



---

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»  
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»)  
Ленина пр., д. 38, г. Магнитогорск, 455000. Тел. (3519) 29-84-64.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

*Уважаемые коллеги!*

Приглашаем Вас принять участие в издании научного журнала «Теория и технология металлургического производства» («*Teoriâ i tehnologiâ 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 источников

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](mailto:ttmp@magtu.ru)