

# **ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**№ 2 (29) 2019**

Журнал входит в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

## **Редакционный совет**

### **Председатель ред. совета:**

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

### **Члены ред. совета:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Главный редактор:**

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

### **Научный редактор:**

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

### **Технический редактор:**

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

### **Дизайнер:**

*Е.О. Харченко*

## **© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019**

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  
связей, информационных технологий и массовых коммуникаций

### **Адрес редакции:**

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

### **Адрес типографии:**

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

### **Адрес издателя:**

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

Выход в свет 29.12.2018. Заказ 463. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 2 (29) 2019**

---

The journal is incorporated into databases of the Russian Science Citation Index (RSCI)

---

## **Editorial Board Members**

### **Chairman:**

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

### **Honorary Board Members:**

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

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

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

**V.M. Kolokoltsev** – D. Sc., Professor,  
President of Nosov Magnitogorsk State Technical  
University

**Z. Konopka** – D.Sc., Professor,  
Czestochowa University of Technology, Poland

**O. Ostrowski** – D.Sc., Professor,  
University of New South Wales, Australia

**A.M. Pesin** – D. Sc., Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

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

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

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

**A.A. Kazakov** - D.Sc., Associate Professor,  
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

**O. Ju. Sheshukov** – D.Sc., Professor,  
alloys Federal State Autonomous Educational  
Institution of Higher Professional Education  
«Ural Federal University named after the first President  
of Russia B.N.Yeltsin»

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

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

### **Scientific Editor:**

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

### **Technical Editor:**

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

### **Designer:**

**E.O. Harchenko**

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2019

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:**

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 29.12.2018. Order 463. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>4</b>
Савинов А.С., Харченко М.В., Ангольд К.В., Рудь К.И.	
<b>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ТЕРМООБРАБОТКИ.....</b>	<b>4</b>
Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Никитенко О.А., Феоктистов Н.А.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВАЛКОВОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ГРАФИТИЗАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....</b>	<b>10</b>
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>15</b>
Великий А.Б., Ряхов А.А., Петрученко В.Н., Евсеев Д.П.	
<b>ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛА С МИКРОАРМИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ В ТЕХНОЛОГИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ.....</b>	<b>15</b>
Власов М.А., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Чиглинцев А.В., Шевченко О.И., Елин В.Ю.	
<b>ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ ОТ СОСТАВА ШЛАКА НА УСТАНОВКЕ «ПЕЧЬ- КОВШ».....</b>	<b>19</b>
Бигеев В.А., Кретова А.О., Баландина Т.А., Коптякова С.В., Слющенко Д.С.	
<b>ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В ЭСПЦ ПАО «ММК».....</b>	<b>23</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>29</b>
Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е.	
<b>РАСЧЕТ ЗАГОТОВКИ ПОРШНЯ ИЗ ОБЪЕМНОГО НАНОСТРУКТУРНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕДИ ДЛЯ МАШИН ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ.....</b>	<b>29</b>
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ .....</b>	<b>37</b>
Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ПРОКАТКИ КАК СПОСОБА ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ 5083/2024 И 5083/1070.....</b>	<b>37</b>

## CONTENTS

<b>METALS SCIENCE AND THERMAL TREATMENT OF METALS AND ALLOYS.....</b>	<b>4</b>
Savinov A.S., Kharchenko M.V., Angold K.V., Rud K.I.	
<b>PREDICTION OF THERMAL-STRESSED STATE OF CYLINDRICAL OBJECT DURING HEAT TREATMENT.....</b>	<b>4</b>
Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Nikitenko O.A., Feoktistov N.A.	
<b>RESEARCH OF THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF IRON FOR ROLLING PRODUCTION AFTER GRAPHITIZATION AND HEAT TREATMENT.....</b>	<b>10</b>
<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS .....</b>	<b>15</b>
Veliky A.B., Ryakhov A.A., Petruchenko V.N., Evseev D.P	
<b>FEATURES OF THE APPLICATION OF MATERIAL WITH MICRO ARMING PROPERTIES IN THE COURSE OF SLAG MIXTURES GRANULATION TECHNOLOGY .....</b>	<b>15</b>
Vlasov M. A., Sheshukov O. Yu., Metelkin A. A., Chiglintsev A. V., Shevchenko O. Yu., Elin V. Yu.	
<b>THE DEPENDENCE OF THE CONTENT OF NON- METALLIC INCLUSIONS IN STEEL ON THE COMPOSITION OF THE SLAG ON THE UNIT "FURNACE-LADLE".....</b>	<b>19</b>
Bigeev V.A., Kretova A.O., Balandina T.A., Koptyakova S.V.	
<b>Evaluation of the prospects for vacuum processing of steel in the EOF shop (PJSC «MMK»).....</b>	<b>23</b>
<b>FOUNDRY .....</b>	<b>29</b>
Vladimirova Yu. O., Shalunov E. P., Illarionov I. E.	
<b>CALCULATION OF PLUNGER BLANK MADE OF COPPER BASED VOLUMETRIC NANOSTRUCTURED MATERIAL FOR THE DIE CASTING MACHINES .....</b>	<b>29</b>
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....</b>	<b>37</b>
Biryukova O.D., Pustovoytov D.O., Pesin A.M.	
<b>THE RESEARCH OF ACCUMULATIVE ROLL BONDING AS A METHOD OF PROCESSING ALUMINUM COMPOSITES 5083/2024 AND 5083/1070.....</b>	<b>37</b>

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.78

Савинов А.С., Харченко М.В., Ангольд К.В., Рудь К.И.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ТЕРМООБРАБОТКИ

**Аннотация.** В работе рассмотрено напряженное состояние цилиндрического объекта, который подвергается тепловому воздействию. Показана методика оценки напряженного состояния цилиндрического стержня, возникающего вследствие температурного перепада по его радиусу. На основании численного решения одномерной задачи теплопроводности для цилиндрического объекта разработано уравнение изменения относительной деформации, что позволяет рассчитать напряжения, возникающие в термомодеформированном цилиндре. С использованием задачи Ламе - Гадолина определены радиальные и окружные напряжения. Рассмотрено сопротивление деформации стали 170ХНМ в различных температурных условиях, из которых следует, что при нагреве образца характер разрушения изменяется с хрупкого на пластичный. Показана проверка напряжений в объекте по различным гипотезам прочности. Полученный математический аппарат позволяет оценить прочность цилиндрического стержня при температурных перепадах по радиусу объекта.

**Ключевые слова:** термонапряженное состояние, цилиндрический объект, радиальные координаты, главные напряжения, гипотезы прочности, термическая обработка, критические напряжения.

Технологический этап термической обработки литой заготовки зачастую сопряжен с риском возникновения нарушения сплошности в теле отливки вследствие температурных перепадов по ее сечению. Риск возникновения критических напряжений может быть связан как с тепловым ударом в процессе закалки, так и с желанием технологов ускорить процесс термообработки, который занимает для некоторых видов крупногабаритных литых изделий значительное время [1, 2].

В настоящее время модели тепловых условий формирования литой заготовки значительно помогают технологам в процессе поиска оптимальных режимов термообработки для исключения брака по трещинам в средне- и высокотемпературных областях ее режимов [3, 4].

Рассмотрим напряженное состояние цилиндрического объекта (в частном случае прокатного вала), подвергающегося тепловому воздействию в процессе термообработки. В общем случае напряжения в элементарном объеме такого тела представлены на рис. 1.

При этом в теле образуются радиальные  $\sigma_r$ , окружные  $\sigma_\theta$ , продольные  $\sigma_n$  и касательные  $\tau$  напряжения, возникающие вследствие неравномерного температурного поля, по радиусу цилиндра.

Для определения теплового поля цилиндрического объекта рассматривается нестационарный перенос тепла, описанный уравнением Фурье-Кирхгофа [5, 6], устанавливающим

связь между температурой и временем в любой точке пространства:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t, T),$$

где  $\rho$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг<sup>0</sup>С;

$T$  – температура, °С;

$\lambda$  – теплопроводность, Вт/м<sup>0</sup>С;

$Q(x, y, z, t, T)$  – мощность внутренних источников тепла, Вт.

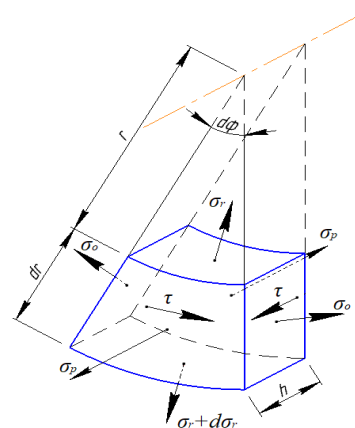


Рис. 1. Схема напряженного состояния при нагреве цилиндра

Рассмотрим решение линейной одномерной задачи теплопроводности применительно к отливкам, имеющим геометрию тел вращения. Схема к поставленной задаче отображена на рис. 2 [6].

Постановка данной задачи в математическом

выражении на основании уравнения (1) будет иметь следующий вид:

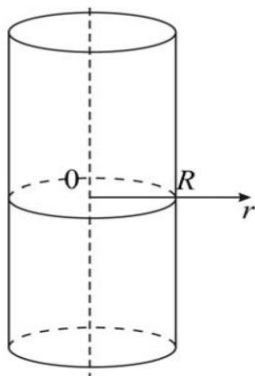


Рис. 2. Геометрия задачи

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R. \quad (2)$$

где \$r\$ – радиальная координата, м;

\$R\$ – радиус тела вращения, м.

Для решения данного уравнения методом конечных разностей требуется создание пространственно- временной сетки.

Пространственная сетка [6] (рис. 3)

$$\begin{cases} r_i = (i-1)h, & i = 1, \dots, N, \\ r_1 = 0, \dots, r_N = R, \\ h = \frac{R}{N-1}. \end{cases} \quad (3)$$

Временная сетка [6]

$$\begin{cases} t_n = n\tau, & n = 0, 1, \dots, M; \\ t_0 = 0, \dots, t_M = t_{\text{конечное}}. \end{cases} \quad (4)$$

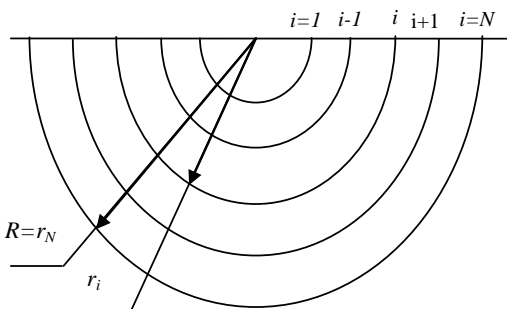


Рис. 3. Пространственная сетка к задаче термонапряженного состояния цилиндрического объекта

Заменив дифференциальные параметры выражения (2) разностными аналогами, получим следующее уравнение:

$$\rho c \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \frac{\lambda}{r_i h^2} \left( r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1}^{n+1} - \left[ r_{i-\frac{1}{2}} + r_{i+\frac{1}{2}} \right] T_i^{n+1} + r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1}^{n+1} \right), \quad i = 2, \dots, N-1, \quad n = 0, 1, \dots, M. \quad (5)$$

Полученная система сводится к следующему виду:

$$A_i T_{i+1}^{n+1} - B_i T_i^{n+1} + C_i T_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad (6)$$

где

$$\begin{cases} A_i = \frac{\lambda r_{i+\frac{1}{2}}}{h^2 r_i}; \\ B_i = \frac{\lambda \left[ r_{i-\frac{1}{2}} + r_{i+\frac{1}{2}} \right]}{h^2 r_i} + \frac{\rho c}{\tau}; \\ C_i = \frac{\lambda r_{i-\frac{1}{2}}}{h^2 r_i}; \\ F_i = -\frac{\rho c}{\tau} T_i^n. \end{cases} \quad (7)$$

В случае если отливка выполнена в виде сплошного цилиндра, а теплофизические свойства материала по всему периметру считаем одинаковыми, то для определения теплового поля рассматривается симметричная задача (прогнозируя температуру только в половине отливки). Для такого случая из условия симметрии определяют \$\alpha\_1=1, \beta\_1=0\$ [6].

Таким образом, выражения (1) – (7) позволяют определять тепловое поле отливок цилиндрической конфигурации.

Определив температурное поле по радиусу цилиндра, возможно нахождение продольных температурных деформаций \$\epsilon\_{i-j}^{рбщ}\$ путем алгебраического сложения деформаций растяжения и сжатия [7]

$$\varepsilon_{i=f}^{общ} = \varepsilon_{i=f}^{раст} - \varepsilon_{i=f}^{сж}, \quad (8)$$

где  $i=f$  граница в которой определяется деформация.

При этом деформация растяжения будет найдена как

$$\varepsilon_{i=f}^{раст} = \Delta T^P \alpha \left( 1 - \frac{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i < T_f; f \neq i}}^N E_i(t)(2i-3) \left( 1 + \frac{T_f - T_i}{T_{\max} - T_f} \right)}{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i \geq T_f; f \neq i}}^N E_i(t)(2i-3) \left( \frac{T_i - T_f}{T_{\max} - T_f} \right) + \sum_{\substack{i=1, \\ T_i < T_f; f \neq i}}^N E_i(t)(2i-3) \left( 1 + \frac{T_f - T_i}{T_{\max} - T_f} \right)} \right), \quad (9)$$

где  $\Delta T^P = T_{\max} - T_{i=f}$  – разность между максимальной температурой цилиндра (температурой центра при охлаждении) и температурой исследуемой границы слоя  $i=f$ , °C ;

$E_i(t)$  – температурная зависимость модуля продольной упругости  $i$ -й границы слоя, МПа;

$\alpha$  – коэффициент температурного расширения, °C<sup>-1</sup>.

А деформация сжатия

$$\varepsilon_{i=f}^{сж} = \Delta T^{сж} \alpha \left( \frac{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i \leq T_f; f \neq i}}^N E_i(t)(2i-3) \left( \frac{T_f - T_i}{T_f - T_{\min}} \right)}{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i > T_f; f \neq i}}^N E_i(t)(2i-3) \left( 1 + \frac{T_i - T_f}{T_f - T_{\min}} \right) + \sum_{\substack{i=1, \\ T_i \leq T_f; f \neq i}}^N E_i(t)(2i-3) \left( \frac{T_f - T_i}{T_f - T_{\min}} \right)} \right), \quad (10)$$

где  $\Delta T^{сж} = T_f - T_{\min}$  – разность между температурой исследуемой границы слоя  $i=f$  и минимальной температурой  $i$ -го слоя цилиндра, °C .

Возникающие вследствие продольных деформаций напряжения  $\sigma_n$  и  $\tau$  могут быть получены с использованием формул [8-10]:

$$\sigma_{ni} = E(t) \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2}; \quad (11)$$

$$\tau = \frac{E(t)}{2(1+\mu)} \operatorname{arctg} \left| \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{2} \right|, \quad (12)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Значения радиальных и окружных напряжений можно рассчитать, используя задачу Ламе - Гадолина [11]. Определив температурное поле по радиусу цилиндра, было получено уравнение давлений в границах исследуемого объекта [12, 13].

$$-P_{i-1}C + P_i(A+D) - P_{i+1}B = \frac{\delta E}{r_{i-1}}; \quad (13)$$

$$A = \frac{r_{i+1}^2 + r_i^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2}; \quad (14)$$

$$B = \frac{2r_{i+1}^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2}; \quad (15)$$

$$C = \frac{2r_{i-1}^2}{r_i^2 - r_{i-1}^2}; \quad (16)$$

$$D = \frac{r_i^2 + r_{i-1}^2}{r_i^2 - r_{i-1}^2}; \quad (17)$$

$$\delta = \frac{\alpha r_i (T_{i-1} - T_{i+1})}{2}, \quad (18)$$

где  $P_i$  – давление в  $i$ -й границе, МПа.

Определив по выражениям (13) – (18) давление на границах  $i=2...N-1$ , используя функции Ламе, рассчитали радиальные и окружные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{-1}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \left[ P_{i+1} r_{i+1}^2 \left( 1 + \frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} \right) + P_i r_i^2 \left( \frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right) \right]; \quad (19)$$

$$\sigma_o = \frac{1}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \left[ P_{i+1} r_{i+1}^2 \left( 1 + \frac{r_i^2}{r_{i+1}^2} \right) - P_i r_i^2 \left( \frac{r_i^2}{r_{i+1}^2} - 1 \right) \right]. \quad (20)$$

Для оценки напряженного состояния, определив по выражениям (11), (12), (19), (20) напряжения  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{oi}$ ,  $\sigma_{ni}$  и  $\tau$ , рассматриваемый на рис. 4 элементарный объем развернем относительно направления  $\sigma_r$  на угол  $\gamma$  так, чтобы исключить действия касательных напряжений.

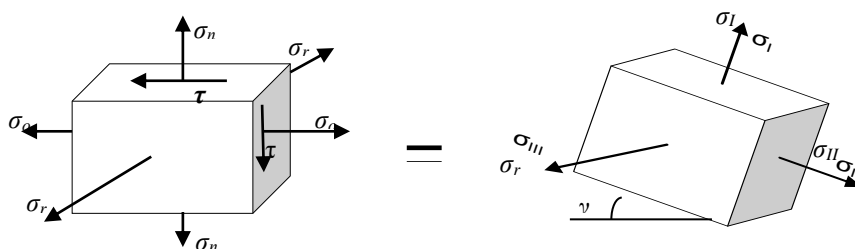


Рис. 4. Схема к расчету напряженного состояния в точке

Тогда напряжения на элементарных площадках после разворота будут определены как [14]:

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_n - \sigma_o) + \sqrt{(\sigma_n - \sigma_o)^2 + 4\tau^2} \right]; \quad (21)$$

$$\sigma_{II} = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_n - \sigma_o) - \sqrt{(\sigma_n - \sigma_o)^2 + 4\tau^2} \right], \quad (22)$$

учитывая условия записи главных напряжений  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  [14].

Полученным напряжениям  $\sigma_r$ ,  $\sigma_o$ ,  $\sigma_m$  присвоим соответствующие значения:

$$\sigma_1 = \{ \max(\sigma_r; \sigma_I; \sigma_{II}) \}; \quad (23)$$

$$\sigma_3 = \{ \min(\sigma_r; \sigma_I; \sigma_{II}) \}. \quad (24)$$

$\sigma_2$  может быть найдено как

$$\sigma_2 = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_r - \sigma_1 - \sigma_3. \quad (25)$$

Полученные выражения были использованы для определения напряженного состояния валков из

стали 170XHM в процессе их термической обработки. Анализ сопротивления деформации в различных температурных условиях показал (рис.5), что в процессе нагрева характер разрушения может меняться с хрупкого на пластичный. Так, на рис. 5, а, б при температуре 50°C мы видим хрупкое разрушение образца (отсутствие шейки, зона упрочнения отсутствует вплоть до разрушения).

Между тем при 800°C на рис. 5, в четко видна зона пластической деформации, а также шейка на разорванном образце (рис.5, г). Как следствие, данный материал при расчете по критическим напряжениям в различных температурных зонах следует проверить по различным гипотезам прочности.

В зоне низких и средних температур - по II гипотезе:

$$\sigma_{экр}^{II} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma],$$

где  $\sigma_{экр}^{II}$  - эквивалентное напряжение по II гипотезе прочности, МПа;

$[\sigma]$  - допускаемое напряжение, МПа.

При пластических деформациях в зоне высоких температур – по IV гипотезе прочности, используя формулу Мизеса-Генки:

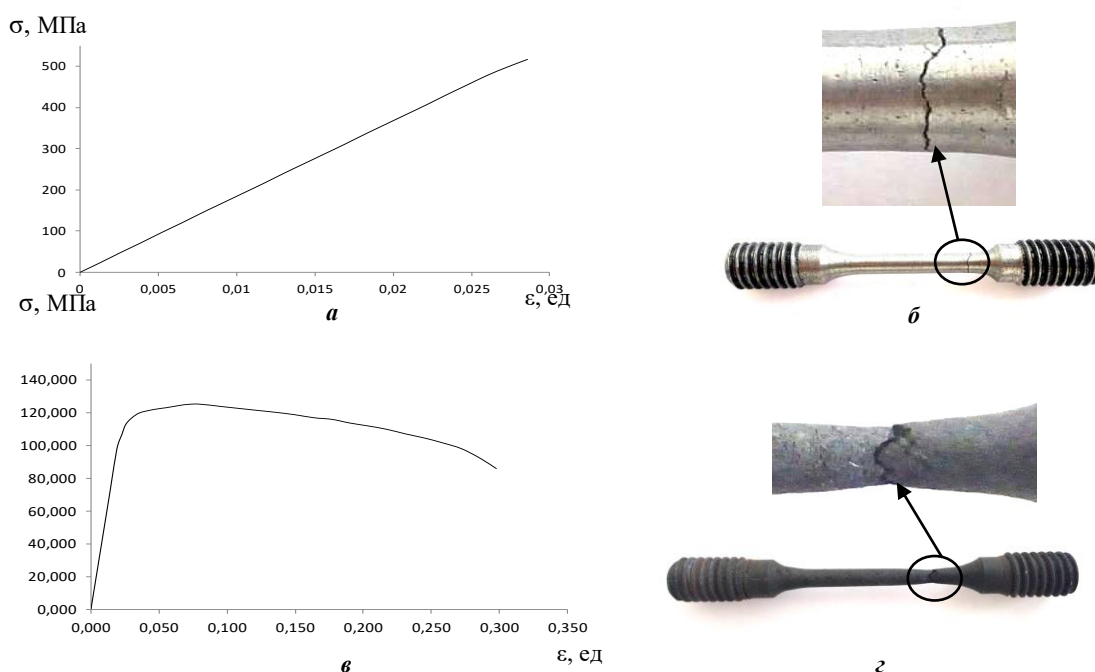


Рис.5. Сопротивление деформации стали 170XNM и образцы на разрыв после испытаний при температурах: а, б – 20 °С; в, г – 800 °С

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \leq [\sigma],$$

где  $\sigma_{\text{экв}}^{IV}$  - эквивалентное напряжение по IV гипотезе прочности, МПа.

Таким образом, разработанный математический аппарат позволяет, при использовании условий однозначности для материалов различных валков, прогнозировать

критические напряжения, возникающие вследствие теплового взаимодействия литой заготовки с окружающей средой при термической обработке изделия. Полученное решение направлено на снижение вероятности образования дефекта сплошности в теле отливки и может быть использовано для определения рационального времени режима термообработки валков различного химического состава.

#### Список литературы

1. Вдовин К.Н., Савинов А.С., Феоктистов Н.А. Прогнозирование трещиностойкости крупных стальных отливок // Литейное производство. 2014. № 12. С. 8 - 10.
2. Вдовин К.Н., Савинов А.С., Феоктистов Н.А. Технологические особенности производства крупного стального литья Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 195 с.
3. STRESSED STATE OF SHAPED CASTING CAUSED BY HINDERED CONTRACTION/ V.M. Kolokol'tsev, A.S. Savinov, A.S. Tubol'tseva, Stressed state of the shaped casting under the impact of hindered contraction, Solid State Phenomena, v. 265, pp. 1092-1098, 2017.
4. Quantitative evaluation of the effect of technological factors on origination of hot cracks in «track link» casting/ [CIS Iron and Steel Review](#). 2017, pp. 14-18.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
6. Кузнецов Г.В., М.А. Шерemet Разностные методы решения задач теплопроводности/. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
7. Колокольцев В.М., Савинов А.С., Андреев С.М., Ангольд К.В. Расчет термонапряженного состояния на примере нагрева стального цилиндрического объекта// Вестник 2019 №1. С. 37- 45.
8. Колокольцев В.М., Савинов А.С., Ибрагимов Ф.Г. Идентификация термических напряжений при температурном градиенте в



- плоской стенке отливки// Сталь. 2014. №4. С. 21-24.
9. Инновационные металлические материалы: монография/[Аксенова К.В.](#), [Барков Л.А.](#), [Барышников М.П.](#) и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова 2016. 371 с.
  10. Савинов А.С., Дьяченко Д.Я., Фролушкина К.А. //Расчет температурных деформаций при охлаждении пластины/ // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. С. 177 - 180.
  11. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1975. 654 с.
  12. Savinov A.S. Strength of castings with cavity formation by a cylindrical rod / [Steel in Translation](#). 2016, vol. 46, [iss. 1](#), pp. 29–32.
  13. Савинов А.С. Определение контактного давления при силовом взаимодействии отливки со стержнем // Литейщик России. 2015. №6. С. 21- 24.
  14. Дарков А.В., Г.С. Шпиро Сопротивление материалов./ М.: Высш. шк., 1975. 654 с.

#### Сведения об авторах

**Савинов Александр Сергеевич** - д-р техн. наук, доцент, директор института металлургии, машиностроения и материалообработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [savinov\\_nis@mail.ru](mailto:savinov_nis@mail.ru)

**Харченко Максим Викторович** – канд. техн. наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [kharchenko.mv@bk.ru](mailto:kharchenko.mv@bk.ru)

**Ангольд Каролина Владимировна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия. E-mail: [angoldk@bk.ru](mailto:angoldk@bk.ru).

**Рудь Ксения Игоревна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия. E-mail: [koks1690@mail.ru](mailto:koks1690@mail.ru)

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### PREDICTION OF THERMAL-STRESSED STATE OF CYLINDRICAL OBJECT DURING HEAT TREATMENT

**Savinov Aleksand Sergeevich** - D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Director of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [savinov\\_nis@mail.ru](mailto:savinov_nis@mail.ru)

**Kharchenko Maxim Viktorovich** - Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [kharchenko.mv@bk.ru](mailto:kharchenko.mv@bk.ru)

**Angold Karolina Vladimirovna** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [angoldk@bk.ru](mailto:angoldk@bk.ru).

**Rud Ksenia Igorevna** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [koks1690@mail.ru](mailto:koks1690@mail.ru).

**Abstract.** *The stress state of a cylindrical object that is exposed to heat is represented in the work. The method of estimating the stress state of a cylindrical rod arising due to a temperature difference along its radius is shown. Based on the numerical solution of the one-dimensional heat conduction problem for a cylindrical object, the equation for the change in relative deformation, which makes it possible to calculate the stresses arising in a thermally deformed cylinder, has been developed. Using the Lamé – Gädolin problem, the radial and circumferential stresses are determined. The deformation resistance of steel 170XHM in various temperature conditions, from which it follows that when the sample is heated, the nature of the fracture changes from brittle to plastic, is considered. The verification of stresses in an object according to various strength hypotheses is shown. The obtained mathematical apparatus allows to estimate the strength of a cylindrical rod at temperature differences along the radius of the object.*

**Keywords:** *thermal stress state, cylindrical object, radial coordinates, main stresses, strength hypotheses, heat treatment, critical stresses.*

---

Ссылка на статью:

Савинов А.С., Харченко М.В., Ангольд К.В., Рудь К.И. Прогнозирование термонапряженного состояния цилиндрического объекта в процессе его термообработки // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 4-9.

Savinov A.S., Kharchenko M.V., Angold K.V., Rud K.I. Prediction of thermal-stressed state of cylindrical object during heat treatment [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 29, no. 2, pp.4-9.

УДК 621.78.08

Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Никитенко О.А., Феоктистов Н.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВАЛКОВОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ГРАФИТИЗАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**Аннотация:** В статье приведены результаты исследования влияния изотермической выдержки индифинитного чугуна, применяемого для изготовления рабочего слоя двухслойных прокатных валков. Показано, что изотермическая выдержка при высоких температурах, которая возникает в процессе изготовления прокатного валка, а именно при заливке металла сердцевины, влияет на абразивную износостойкость сплава. Также изучено влияние окончательной термической обработки – отпуска, на изменение значения коэффициента абразивной износостойкости исследуемых сплавов. В качестве исследования выбран половинчатый хромоникелевый чугун, дополнительно легированный ванадием, в том числе и азотированным, в концентрации до 0,5 %.

**Ключевые слова:** валок, рабочий слой, графитизация, отпуск, абразивная износостойкость.

**Введение**

Важным технологическим этапом в производстве индифинитных прокатных валков является процесс графитизации рабочего слоя, который происходит в момент заливки сердцевины из высокопрочного чугуна. Причиной графитизации легированного чугуна является достаточно длительное его пребывание в изотермических условиях при высоких температурах после заливки сердцевинной части валка. Графит является обязательной структурной составляющей половинчатого чугуна, т.к. именно он обеспечивает антифрикционные свойства валка в системе трения металл-металл и повышенный срок службы изделия.

Решающее влияние на структуру чугуна рабочего слоя оказывает химический состав сплава. Помимо обязательных химических элементов, для этого класса чугуна (никель, хром) на практике применяется дополнительное легирование. Одним из перспективных легирующих элементов является ванадий, в том числе и азотированный. Введение в расплав этого карбидообразующего элемента приводит к перераспределению углерода между металлической основой и карбидной фазой, а также изменению устойчивости эвтектических карбидов к графитизации. Помимо этого наличие в сплаве ванадия должно оказывать влияние на структурообразование в твердом состоянии: при термической обработке литого сплава – отпуске [1-17].

Целью настоящей работы является исследование влияния легирования индифинитного чугуна ванадием и азотом на абразивную износостойкость после графитизации и термической обработки.

**Методы исследования**

Выплавку опытных сплавов производили в литейной лаборатории Магнитогорского

государственного технического университета им. Г.И. Носова в индукционной печи с основной футеровкой ёмкостью 2 кг.

Износостойкость сплавов изучали согласно ГОСТ 23.208-79 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы».

С целью имитации условий, близких к производственным, образцы экспериментальных сплавов рабочего слоя с различным содержанием ванадия помещали в печь, разогретую до 1100 °С. После чего печь контролируемо охлаждалась в течение нескольких суток, имитируя условия формирования графитизированной литой структуры рабочего слоя прокатного валка.

Окончательную термическую обработку проводили при температуре 470 °С. Нагрев и охлаждение образцов осуществлялся со скоростью 5-15 °С/ч, время изотермической выдержки при отпуске – 25 ч.

**Полученные результаты и их обсуждение**

На рис. 1 представлено влияние концентрации ванадия на коэффициент абразивной износостойкости валкового чугуна в литом состоянии неграфитизированном (рис. 1, а) и прошедшем графитизацию (рис. 1, б). На каждом графике представлены по две зависимости, соответствующие введению ванадия в сплав азотированным и неазотированным ферросплавом.

Проведя испытания опытных сплавов в литом состоянии, установили, что при увеличении количества ванадия в валковом чугуне до 0,3 % происходит снижение коэффициента абразивной износостойкости независимо от того, какую легатуру применяли – обычную или азотированную (рис. 1, а).

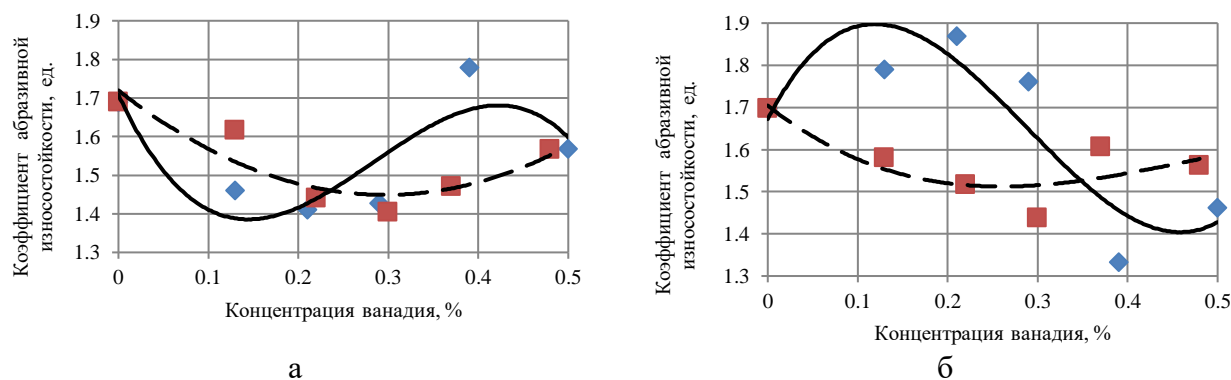


Рис. 1. Зависимость коэффициента абразивной износостойкости неграфитизированного (а) и графитизированного (б) чугуна от концентрации ванадия в нем (литое состояние): ———— - не азотированный; — — — - азотированный

Прежде всего, это обусловлено обеднением расплава углеродом за счёт возможного выделения специальных карбидов, а также частичной заменой эвтектических карбидов на комплексно-легированные вторичные.

Превышение концентрации ванадия в валковом чугуне свыше 0,3 % способствует увеличению коэффициента абразивной износостойкости на 26 % при легировании только ванадием и на 12 % при легировании в комплексе с азотом. При этом значение коэффициента износостойкости увеличивается более интенсивно в валковом чугуне, легированном только ванадием, в интервале концентраций ванадия от 0,3 до 0,5 %. Это обусловлено возможным увеличением количества специальных карбидов ванадия, а также повышением микротвёрдости матрицы.

В процесс изотермической выдержки и медленного охлаждения рабочего слоя валкового чугуна, проведённых в лабораторной печи и имитирующих технологический этап заливки сердцевины прокатного вала, происходит выделение графита. Это приводит к изменению параметров микроструктуры и, как следствие, уровня эксплуатационных свойств. Графит может оказывать двойное действие. С одной стороны, он способствует повышению антифрикционных свойств валкового чугуна в системе металл – металл, т.е. в процессе прокатки. С другой стороны, при испытании на износостойкость о не жёстко закреплённые частицы, в частности корунд, происходит взаимодействие включений графита с ним, что приводит к их разрушению. В этом месте начинается интенсивный износ.

Согласно графику (рис. 1, б) можно констатировать, что характер изменения значений коэффициента износостойкости при комплексном легировании валкового чугуна ванадием и азотом не

меняется по сравнению с неграфитизированным сплавом. Однако происходит увеличение значений коэффициента износостойкости относительно неграфитизированного валкового чугуна при одинаковых концентрациях ванадия в среднем на 3 – 9 %. Сохранение характера изменения значений коэффициента абразивной износостойкости валкового чугуна после графитизации обусловлено, вероятнее всего, наличием комплексных карбонитридов ванадия, которые являются структурной составляющей, препятствующей процессам изнашивания. В процессе графитизации происходит разложение карбидов с выделением структурно-свободного углерода – графита, в то время как нитриды остаются.

В случае легирования рабочего слоя валкового чугуна только ванадием, в микроструктуре отсутствуют нитриды легирующих элементов. В процессе графитизации происходит частичное растворение карбидов, а также выделение углерода из матрицы с образованием графита. При этом до концентрации ванадия в сплаве 0,2 % происходит выделение графита, что способствует увеличению коэффициента износостойкости. Превышая указанную концентрацию ванадия, происходит образование его специальных карбидов, что обуславливает падение коэффициента износостойкости на 20 – 25 %.

Термическая обработка, следствием которой является изменение параметров микроструктуры, способствует изменению эксплуатационных свойств валкового чугуна. При этом, в основном, происходит увеличение значения коэффициента абразивной износостойкости на 5 – 18 % в зависимости от количества ванадия в составе сплава (рис. 2).

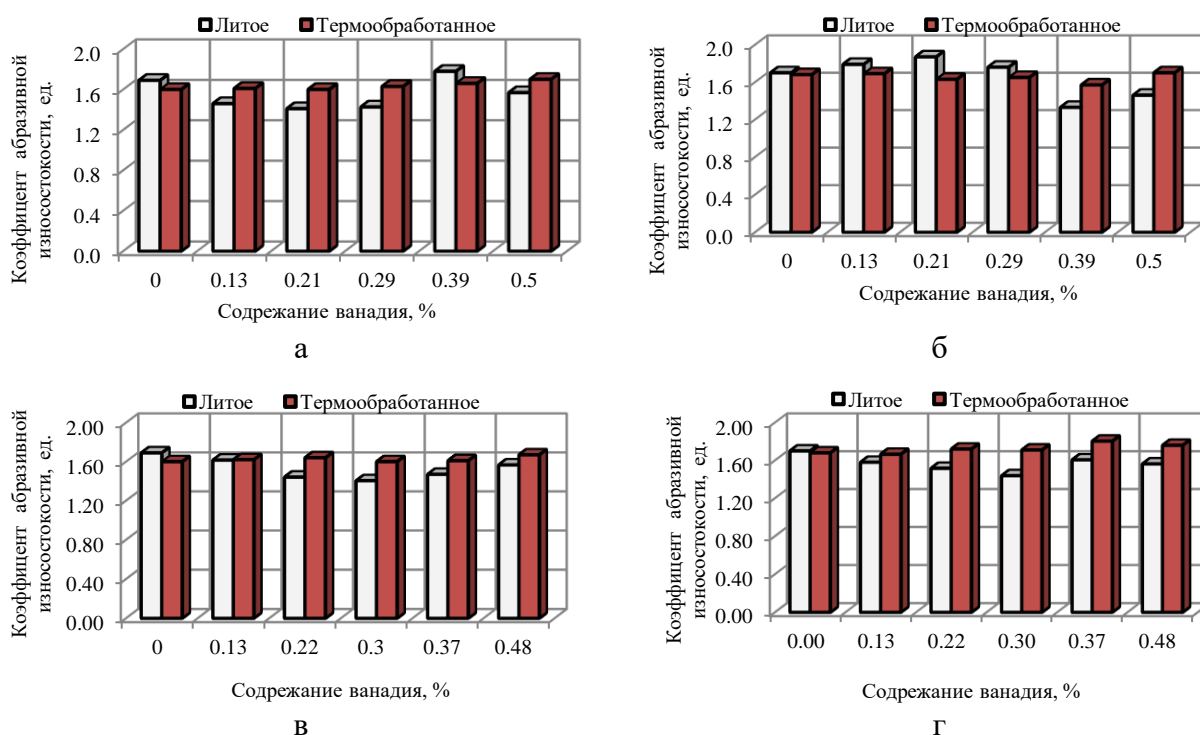


Рис. 2. Изменение коэффициента абразивной износостойкости неграфитизированного (а, в) и графитизированного (б, г) чугуна после термической обработки при различной концентрации ванадия в сплаве: а, б – не азотированный ванадий; в, г – азотированный ванадий

Следует отметить, что в чугуне рабочего слоя прокатного вала, прошедшем предварительную графитизацию, а также легированном только ванадием (без азота), увеличение коэффициента абразивной износостойкости наблюдали только при концентрации ванадия свыше 0,3 %. В остальных случаях значение этого коэффициента уменьшается на 1,5 – 5,0 %. В случае комплексного легирования валкового чугуна азотом и ванадием термическая обработка приводит к увеличению коэффициента абразивной износостойкости на 5 – 19 %.

На рис. 3 представлен график изменения значений коэффициента абразивной износостойкости валкового чугуна, прошедшего предварительную графитизацию с последующей термической обработкой, а также легированного различным количеством только ванадия и в комплексе с азотом.

Очевидно, что в случае легирования валкового чугуна только ванадием значение коэффициента абразивной износостойкости увеличивается по мере увеличения концентрации ванадия в нем. Максимальное значение исследуемого коэффициента достигается при концентрации ванадия в сплаве от 0,4 до 0,5 %.

Высокое значение коэффициента

абразивной износостойкости базового сплава, в котором отсутствует ванадий, вероятнее всего обусловлено большим количеством графита, выделившимся в процессе графитизации. Интенсивному выделению графита способствовало отсутствие ванадия в химическом составе экспериментальных сплавов, являющимся сильным карбидообразующим элементом. Таким образом, углерод, не связанный в карбиды, выделяется в процессе изотермической выдержки (графитизации) в виде включений графита и является своеобразной «смазкой» в процессе изнашивания.

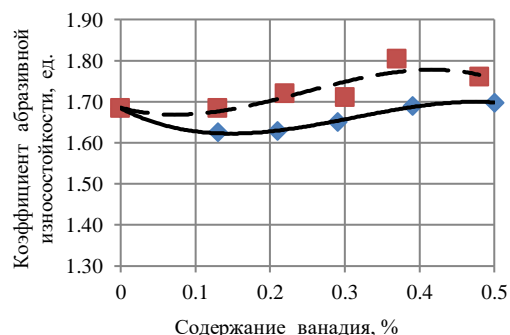


Рис. 3. Зависимость коэффициента абразивной износостойкости графитизированного и термообработанного валкового чугуна от концентрации ванадия в нем: — — — — — не азотированный; — — — — — азотированный

Однако в реальных условиях эксплуатации валков наличие только графита в микроструктуре изделия является недостаточным условием для обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств изделий. Он может выкрашиваться в процессе прокатки, что приведёт к обеднению смазки в системе «металл-металл» и понижению эксплуатационных свойств. Для предотвращения этого в микроструктуре сплава должна быть фаза, которая имеет высокую твёрдость и препятствует истиранию металлической основы. Этой фазой являются карбиды различных легирующих элементов.

В случае легирования валкового чугуна ванадием в комплексе с азотом значение коэффициента абразивной износостойкости выше на 3 – 7 %, чем при легировании только ванадием. В первую очередь это обусловлено тем, что в структуре чугуна помимо карбидов присутствуют нитриды, которые в процессе высокотемпературной изотермической выдержки не распадаются. В комплексе это приводит к обеспечению более высокого уровня эксплуатационных свойств валкового чугуна.

#### Выводы

1. Графитизация валкового чугуна оказывает существенное влияние на уровень эксплуатационных свойств валкового чугуна, легированного только ванадием. При легировании сплава ванадием совместно с азотом влияние графитизации существенно снижается.

2. Легирование валкового чугуна азотированным феррованадием способствует повышению коэффициента абразивной износостойкости на 3-7 % по сравнению с чугуном, легированным только ванадием.

3. Максимальное значение коэффициент абразивной износостойкости валкового чугуна, легированного ванадием в комплексе с азотом, наблюдается при остаточных концентрациях ванадия в пределах 0,1 до 0,2 %, а при легировании только ванадием – в пределах 0,4-0,5 %.

#### Список литературы

1. Structure and properties of cast iron designated for working layer of rolls. Vdovin K.N., Zavalishchin A.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. // Journal of Materials Science Research. 2016. Vol. 5. № 1. P. 77-88.
2. Карбидные превращения при отпуске комплексно-легированного белого чугуна / Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Завалищин А.Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 3 (717). С. 3-7.
3. Влияние отпуска на свойства карбидной фазы в белом комплексно легированном чугуне. / Вдовин

- К.Н., Горленко Д.А., Завалищин А.Н., Савинов А.С., Синицкий Е.В. // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 10-2 (29). С. 14-16.
4. Влияние режима отпуска на соотношение структурных составляющих в белом комплексно-легированном чугуне / Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Завалищин А.Н. // Технология металлов. 2013. № 8. С. 13-16.
5. Structure changes of chromium-nickel indefinite cast irons in heating / Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Zavalishchin A.N. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 9-11.
6. Влияние температуры отпуска на структурные составляющие в индифинитном чугуне. Завалищин А.Н., Горленко Д.А., Вдовин К.Н. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. Т. 1. № 71. С. 298-301.
7. Воздвиженский Б. М., Кононов В. А. Исследование структуры и свойств хромо-ванадиевого чугуна // Тр. Ин-та; Яросл. политехн. ин-т. Ярославль, 1979. С. 59 - 62.
8. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. М.: Машиностроение, 1976. 287 с.
9. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
10. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны / М.Е. Гарбер. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 279 с.: ил.
11. Гималетдинов Р.Х. Производство прокатных валков из высококачественных чугунов. М.: Полтекс, 2000. 330 с.
12. Будагьянц Н. А., Карский В. Е. Литые прокатные валки. М.: Машиностроение, 1983. 175 с.
13. Отливки из специальных чугунов: учеб. пособие / Под ред. В. М. Колокольцева. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 139 с.
14. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов И.С. Износостойкие отливки из комплекснолегированных чугунов. М.: Машиностроение, 1984. 104 с.
15. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. М.: Машиностроение, 2005. 428 с.
16. Влияние легирующих элементов на свойства чугунных валков для горячей прокатки / В. М. Колокольцев, А. В. Науменко, В. А. Куц и др. // Теория и технология металлургического производства. Магнитогорск, 2001. Вып. 2. С. 210 - 219.
17. Смирнов А.Н., Лейрих И.В. Производство отливок из чугуна: учеб. пособие Донецк: Норд-Пресс, 2005. 245 с.



Сведения об авторах

**Вдовин Константин Николаевич** – д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»;  
**Горленко Дмитрий Александрович** – канд. техн. наук, ст. преподаватель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»;  
**Никитенко Ольга Александровна** - канд. техн. наук, инженер-исследователь ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»;  
**Феоктистов Николай Александрович** – канд. техн. наук, зав. кафедрой ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**RESEARCH OF THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF IRON FOR ROLLING PRODUCTION AFTER GRAPHITIZATION AND HEAT TREATMENT**

**Vdovin Konstantin Nikolayevich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University;  
**Gorlenko Dmitry Aleksandrovich** - Ph.D., Art. teacher, Nosov Magnitogorsk State Technical University;  
**Nikitenko Olga Aleksandrovna** - Ph.D., Research Engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University ;  
**Feoktistov Nikolay Aleksandrovich** - candidate of technical sciences, head of Foundry Processes and Material Science Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University

***Abstract.** The results of the study of the effect of isothermal holding of the indefinite cast iron used for the manufacture of the working layer of two-layer mill rolls are given in the article. It is shown that isothermal exposure at high temperatures, which occurs during the manufacture of the mill roll during the pouring of the core metal, affects the abrasive wear resistance of the alloy. The effect of the final heat treatment, tempering, on the change in the value of the abrasive wear resistance coefficient of the alloys under study was also studied. As the object of study, half-chromium-nickel iron, additionally alloyed with vanadium, including nitrated, in a concentration of up to 0.5% was chosen.*

***Keywords:** roll, working layer, graphitization, tempering, abrasive wear resistance.*

---

Ссылка на статью:

Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Никитенко О.А., Феоктистов Н.А. Исследование абразивной износостойкости валкового чугуна после графитизации и термической обработки // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 10-14.  
Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Nikitenko O.A., Feoktistov N.A. Research of the abrasive wear resistance of iron for rolling production after graphitization and heat treatment *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 29, no. 2, pp.10-14.

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.746.5.047:669.046.581

Великий А.Б., Ряхов А.А., Петрученко В.Н., Евсеев Д.П.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛА С МИКРОАРМИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ В ТЕХНОЛОГИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ

**Аннотация:** В уникальной технологии гранулирования шлакообразующих смесей ООО «Шлаксервис» для увеличения прочностных характеристик гранул использовали материал с микроармирующими свойствами – волластонит. Отличительной особенностью волластонита является игольчатая форма кристаллов, характеризующихся определенным отношением длины к диаметру ( $Ш > 1$ ) - фактором анизотропии. Этот минерал в качестве микроармирующего наполнителя активно применяют при производстве полимерных композиционных материалов. Для внедрения его в технологию гранулирования ШОС подобрали оптимальные параметры: продолжительность смешивания и тонкость помола материалов шихты, момент подачи в суспензию микроармирующего материала, влажность и плотность суспензии и режим сушки распылением.

Новая технология позволяет в промышленном масштабе получать гранулированную шлакообразующую смесь с микроармирующим материалом, при этом обеспечивается практически полное отсутствие пыли, равномерное распределение частиц и высокая прочность гранул по отношению к вибрационным и ударным нагрузкам.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, шлакообразующая смесь, гранула, волластонит, суспензия, структура гранул, прочность, микроармирующие свойства.

Шлакообразующие смеси (ШОС) являются неотъемлемой частью непрерывной разливки стали. Они обеспечивают стабильность процесса разливки на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и способствуют получению качественной непрерывнолитой заготовки. Существуют ШОС двух типов: порошковые и гранулированные. Гранулированные ШОС значительно преобладают в использовании на металлургических заводах России из-за следующих преимуществ по сравнению с порошкообразными:

- более однородный состав;
- практически полное отсутствие влаги;
- меньшая гигроскопичность;
- лучшие теплоизолирующие свойства;
- растекаемость;
- отсутствие пыли.

Одним из факторов стабильности процесса разливки на МНЛЗ является поддержание заданного уровня ШОС в кристаллизаторе и промежуточном ковше [1]. С этим связан интерес многих металлургических заводов России к автоматическим системам подачи ШОС. В основном такие системы устанавливаются на вновь вводимые в эксплуатацию МНЛЗ, так как внедрение их на действующие машины требует дополнительного оборудования в зоне кристаллизатора и промежуточного ковша. Так как в основе автоматической подачи ШОС зачастую заложен принцип пневмотранспорта, то необходимо

использовать только гранулированные ШОС без пылевидной фракции с высокими прочностными характеристиками.

На предприятии ООО «Шлаксервис» с 1995 года производят гранулированные ШОС по технологии, защищенной патентом [2], основанной на процессе сушки распылением. Технологический процесс производства гранулированных ШОС в зависимости от потребности может быть дискретным или непрерывным. При непрерывном процессе его производительность превышает 2,0 т/ч [3]. Имеются сведения о зарубежной технологии непрерывного гранулирования ШОС путем сушки распылением производительностью 3,5 т/ч [4].

Образование гранул ШОС происходит в сушиле, как показано на рис. 1 [4].

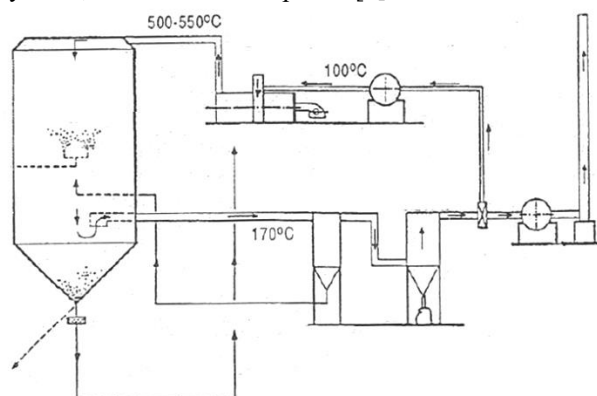


Рис.1. Гранулирование ШОС путем сушки распылением

Распыление водного раствора компонентов ШОС (суспензии) осуществляется под давлением через форсунки в пространстве сушила с температурой 500 – 550 °С. При снижении давления до атмосферного происходит образование капель суспензии, которые обезвоживаются и превращаются в гранулы.

В исследованиях [5] и [6] для совершенствования процесса грануляции подобрали новое связующее и доказали существенное влияние компонентного состава на прочность гранул ШОС. При этом отмечена ключевая роль в повышении прочности гранул материала с микроармирующими свойствами.

Микроармирующий материал применили в составе разработанной в ООО «Шлаксервис» новой ШОС для кристаллизатора слябовых МНЛЗ. По результатам промышленных испытаний в ПАО «Северсталь» получено положительное заключение: новая ШОС позволяет осуществлять стабильный процесс разлива и обеспечивает необходимое качество непрерывнолитых заготовок. Новая ШОС подавалась на зеркало металла через автоматическую систему.

Для производства новой смеси в промышленном масштабе в ООО «Шлаксервис» разработали и внедрили технологию гранулирования ШОС с использованием микроармирующего материала – волластонита. Этот минерал в качестве микроармирующего наполнителя активно применяют при производстве полимерных композиционных материалов (ПКМ). Отличительной особенностью волластонита является игольчатая форма кристаллов, характеризующихся определенным отношением длины к диаметру ( $Ш > 1$ ) - фактором анизотропии, который и определяет эффективность применения волластонита в качестве упрочняющего (армирующего) компонента ПКМ [7, 8].

На этапе приготовления суспензии ШОС продолжительность мокрого помола материалов в смесительно-помольном устройстве увеличили с 3-х до 6-ти часов. При этом добавка в суспензию

микроармирующего материала, с целью сохранения его армирующей структуры, осуществлялась за 20 мин до начала ее выпуска в приемные ёмкости, только для смешивания с остальными компонентами смеси. Помол в течение 6-ти часов обеспечил необходимую тонкость помола (2,5 %). Предлагалось, что армирование гранулы волластонитом происходит только при отсутствии или минимизации пустот внутри ее. Для этого обеспечили минимальную влажность суспензии в пределах 30 - 40 % и высокую плотность (1,8 - 1,9 т/м<sup>3</sup>), при этом продолжительность выпуска суспензии не превышала нормативно установленного требования (для обеспечения непрерывности производства). Дальнейшее снижение влажности приводит к существенному повышению условной вязкости, затрудняющей перемешивание, помол и, соответственно, истечение суспензии из смесительно-помольного устройства. Помимо обеспечения армирования волластонитом, такая низкая влажность упрощает процесс сушки. На испарение влаги тратится меньше тепла, производительность сушки распылением возрастает и снижается нижний предел содержания влаги в ШОС (до 0,06 %), что очень важно для непрерывной разлива стали и получения качественных непрерывнолитых заготовок.

Как и ожидалось, снижение влажности суспензии привело к снижению расхода газа и увеличению производительности сушки распылением до 3,2 т/ч.

Полученные по новой технологии гранулы ШОС с микроармирующим материалом исследовали с помощью микрорентгеноспектрального анализа (МРСА), осуществляемого на минералогическом комплексе MLA System Quanta 650 в НИТУ МИСиС (г. Москва). На рис. 2 представлены черно-белые изображения гранул новой ШОС с волластонитом в режиме эмиссии вторичных электронов. Для сравнения даны изображения гранул отечественной ШОС, изготовленные по существующей технологии без волластонита и гранулы импортной смеси.

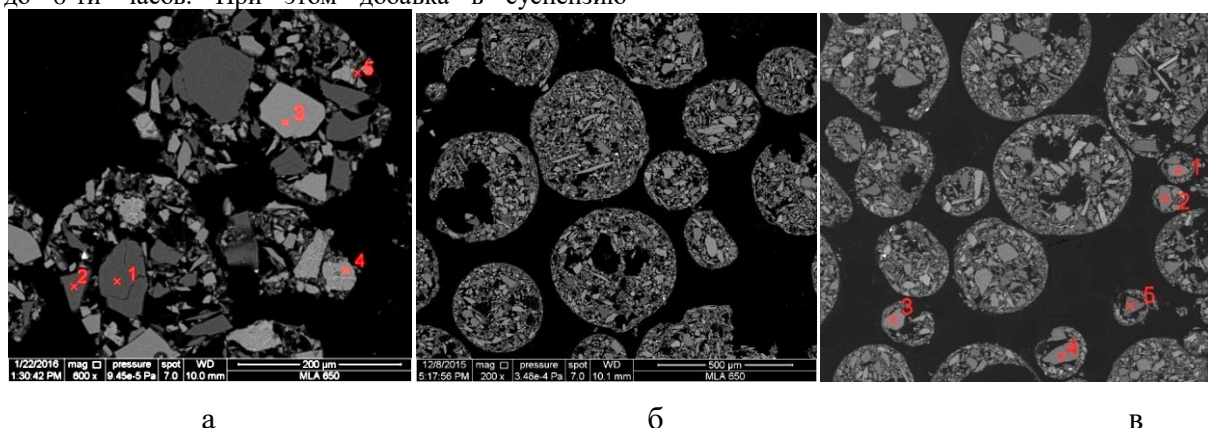


Рис. 2. Структура гранул отечественной ШОС (а), импортной ШОС (б) и новой ШОС (в), изготовленной по новой технологии с волластонитом



Из рис.2 видно, что структура гранул новой ШОС (в) с волластонитом отличается от структуры гранулы отечественной ШОС (а) и схожа с импортной смесью (б). При этом в гранулах (б) и (в) практически отсутствуют пустоты.

Для оценки эффективности новых параметров технологии гранулирования с волластонитом определили прочность гранул ШОС вибрационным и ударным нагрузкам, имеющим место во время транспортировки смесей к месту применения. В работе [6] описана

методика проведения эксперимента на прочность. Два образца ШОС, изготовленные по существующей и новой технологии с волластонитом, и один образец импортной ШОС подвергли вибрационным и ударным нагрузкам на установке типа 029 Усманского завода литейного оборудования. Перед испытанием образцов ШОС определили их исходный гранулометрический состав, затем изменение гранулометрического состава до и после испытания (рис.3). Изменение каждой фракции выражено как разность ее долей до и после испытания.

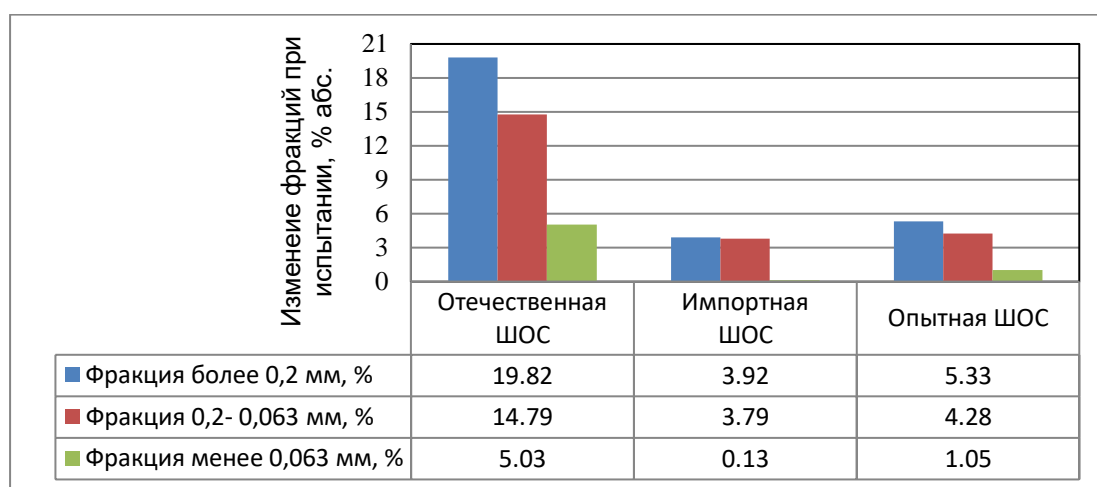


Рис. 3. –Изменение гранулометрического состава отечественного ШОС, импортного ШОС и опытного ШОС, изготовленного по новой технологии с волластонитом

Из рис. 3 видно, что изменения фракций гранулометрического состава ШОС, изготовленной по новой технологии с волластонитом, находится примерно на одном уровне с импортной ШОС, тогда как гранулы отечественной ШОС, изготовленной по стандартной технологии, разрушились, что и привело к увеличению фракции более 0,063 мм.

#### Выводы

Технология гранулирования шлакообразующих смесей на предприятии ООО «Шлаксервис» позволяет изготавливать ШОС с микроармирующим материалом для кристаллизаторов слябовых МНЛЗ в промышленном масштабе. Прочность получаемых гранул смеси сравнима с прочностью гранул импортных ШОС.

Важной задачей в обеспечении армирования гранулы ШОС волластонитом является минимизация пустот в ее структуре. Это обеспечивается минимальной влажностью (30 – 40 %) и высокой плотностью (1,8 - 1,9 т/м<sup>3</sup>) водного раствора компонентов ШОС.

*Статья написана под руководством Вдовина К.Н., д-ра техн. наук, профессора ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».*

#### Список литературы

1. Куклев А.В., Лейтес А.В.. Практика непрерывной разливки. М.: Металлургиздат, 2011. 432 с.
2. Патент 2100131 РФ. 2001. БИМП № 12. / Способ получения гранулированной шлакообразующей смеси. Ногтев В.П., Цикарев Ю.М., Носов С.К. и Маркин В.Ф.
3. О производстве и качестве гранулированных шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали. // Ногтев В.П., Маркин В.Ф., Горосткин С.В., Свиридов О.Г. Сборник трудов Центральной лаборатории ОАО «ММК» 2002. Вып. №6. С. 82-86.
4. Айтиль Г.И.. Разработка и производство гранулированного разливочного порошка путем сушки распылением // Черные металлы 1993. №6. С. 13 – 19.

5. Ryakhov A.A., Kuklev A.V., Anisimov K.N., Toptygin A.M., Lebedev I.V. Choice of Binder and Optimization of Slag-Forming Mixture Granulation Technology to Improve Granule Strength // Metallurgist [Springer]. January 2017. Volume 60. Issue 9–10. Pp. 1054–1061.

б. Вдовин К.Н., Ряхов А.А. и др. Влияние компонентного состава на прочность гранул шлакообразующей смеси // Сталь 2018. №2. С. 7 – 12.

7. Еще раз о волластоните / Корнеев В.И., С.А. Жморчук, Ю.Н. Жморчук, С.Н. Чижиков, Н.П. Стародубцев // СтройПРОФИЛЬ. 2002. № 2(16). С. 58-59.

8. Лакокрасочные покрытия. Теория и практика / под ред. Р. Ламбурна. СПб.: Химия, 1991. 512 с.

#### Сведения об авторах

**Великий Андрей Борисович** - канд.техн.наук, директор ООО «Шлаксервис Магнитогорск, Россия.

**Ряхов Алексей Анатольевич** - Инженер ООО «Шлаксервис». Магнитогорск, Россия.

E-mail: [ryakhov.aa@mmk.ru](mailto:ryakhov.aa@mmk.ru)

**Петрученко Владимир Николаевич** - Заместитель директора ООО «Шлаксервис Магнитогорск, Россия.

**Евсеев Данил Петрович** - Главный инженер ООО «Шлаксервис»

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### FEATURES OF THE APPLICATION OF MATERIAL WITH MICRO ARMING PROPERTIES IN THE COURSE OF SLAG MIXTURES GRANULATION TECHNOLOGY

---

**Veliky Andrei Borisovich** - Ph. (Eng.), Director of Shlakservice Magnitogorsk LLC, Russia.

**Ryakhov Alexey Anatolyevich** - Engineer LLC Shlakservice. Magnitogorsk, Russia. E-mail: [ryakhov.aa@mmk.ru](mailto:ryakhov.aa@mmk.ru)

**Petruchenko Vladimir Nikolayevich** - Deputy Director of Shlakservis Magnitogorsk LLC, Russia.

**Evseev Danil Petrovich** - Chief Engineer, Shlakservice LLC

**Abstract.** In a unique technology of granulation of slag-forming mixtures, LLC Shlakservice used material with micro-reinforcing properties - wollastonite to increase the strength characteristics of the granules. A distinctive feature of wollastonite is the needle-shaped form of crystals, characterized by a certain ratio of length to diameter ( $W>1$ ) - the anisotropy factor. The mineral is actively used as a micro-reinforcing filler in the production of polymer composite materials. To introduce it into the SCO granulation technology, optimal parameters were selected: the duration of mixing and the fineness of grinding charge materials, the moment of supplying the micro-reinforcing material to the suspension, the humidity and density of the suspension, and the mode of spray drying.

The new technology makes it possible to obtain a granulated slag-forming mixture with a micro-reinforcing material in industrial scale, ensuring almost complete absence of dust, uniform distribution of particles and high strength of the granules with respect to vibration and shock loads.

**Keywords:** continuous casting, slag-forming mixture, granule, wollastonite, suspension, structure of granules, strength, micro-reinforcing properties.

---

#### Ссылка на статью:

Великий А.Б., Ряхов А.А., Петрученко В.Н., Евсеев Д.П. Особенности применения материала с микроармирующими свойствами в технологии гранулирования шлакообразующих смесей // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 15-18.

Veliky A.B., Ryakhov A.A., Petruchenko V.N., Evseev D.P. Features of the application of material with micro arming properties in the course of slag mixtures granulation technology. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 29, no. 2, pp. 15-18.

УДК 669.01

Власов М.А., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Чиглинец А.В., Шевченко О.И., Елин В.Ю.

**ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ ОТ СОСТАВА ШЛАКА НА УСТАНОВКЕ «ПЕЧЬ-КОВШ»**

*Аннотация:* Рассмотрена гипотеза о зависимости содержания неметаллических включений в стали от состава шлака на установке «печь-ковш». Предметом исследования является массив данных о неметаллических включениях в продукции, данные о химическом составе шлака на ПК, объектом исследования является продукция (рельсы, колеса, трубы), а также металл и шлак. В ходе проведенного исследования была аппроксимирована взаимосвязь между химическим составом шлака на АКП и неметаллическими включениями в продукции с помощью метода корреляции.

*Ключевые слова:* метод парных корреляций, неметаллические включения, установка «печь-ковш».

В процессе кристаллизации и охлаждения стали неизбежно выпадение примесей из раствора с образованием различных химических соединений. Из этих химических соединений только СО является летучим (газом), а все остальные образуют самостоятельную, конденсированную фазу в виде неметаллических включений (далее НВ), которые в той или иной степени фиксируются в объеме твердой стали. Также опасность представляют включения, состоящие из огнеупорных материалов и шлака, механически увлекаемые потоком жидкого металла во время выпуска и разливки и фиксируемые в затвердевшей стали [1].

В работе [1] показано, что состав неметаллических включений в нераскисленном металле практически не отличается от состава шлака, под которым плавилась сталь. Таким образом, в любой твердой стали неизбежно содержание различных НВ, которые снижают ее эксплуатационные свойства. Отрицательное влияние НВ на механические свойства стали связано с тем, что они, во-первых, нарушают сплошность металла, во-вторых, имеют по сравнению с металлом разный коэффициент расширения и неодинаковую деформируемость, поэтому при повышении содержания НВ снижаются усталостная прочность и износостойкость стали [1].

Следовательно, из-за оказываемого отрицательного воздействия НВ на продукцию возникает необходимость удаления НВ из металла во время технологического процесса.

На скорость удаления включений из металла влияют: 1) физические свойства включений, их состав, температура плавления и плотность; 2) способность включений к укрупнению; 3) межфазное натяжение на границе металл-включение и шлак-включение; 4) интенсивность перемешивания ванны; 5) физические характеристики металла и шлака (температура, вязкость) и др. [2].

Газовые пузыри, проходящие через ванну (при кипении металла, продувке ванны инертным

газом и т. п.), способствуют флотации включений. В результате включение будет «прилипать» к пузырю газа и уноситься с ним в шлак [2-4].

Очень интенсивное перемешивание может вызвать разобщение, разрушение образовавшихся ранее скоплений, конгломератов включений и тем самым ухудшить процесс их удаления. Кроме того, при чрезмерно интенсивном перемешивании ванны в металл могут «затягиваться» частички шлака; при этом содержание включений не уменьшается, а увеличивается. Может иметь место также ускорение процесса эрозии огнеупоров, соответственно возрастает содержание в металле и экзогенных включений [2].

Важно организовать технологию так, чтобы всплывающее включение в момент соприкосновения со шлаком успело им усвоиться прежде, чем нисходящие потоки металла увлекут его опять вниз. Скорость «захватывания» шлаком включения зависит от многих факторов, в том числе от межфазного натяжения на границе шлак - включение. Скорость удаления включений из металла в шлак зависит также от площади поверхности контакта (отношения поверхности шлак - металл к массе металла), степени перемешивания ванны, физических свойств шлака и др. [2].

Усвоение неметаллических включений шлаком зависит от химического состава и температуры шлака. Таким образом, актуально исследование зависимости наличия НВ, в металле после разливки, от состава шлака, наводимого в агрегате «ковш-печь» (далее АКП). Результаты исследования позволят определить достоверность гипотезы о влиянии химического состава шлака на возникновение НВ в стали.

Данные о НВ в готовой продукции были взяты из химического анализа данной продукции: колеса (плавки № 3, 4, 8, 12, 13, 14), рельсы (плавки № 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 17), трубы (плавка № 6). Далее номера предоставленных плавок с известными данными о НВ были сопоставлены с химическим составом шлака, наводимого в АКП (табл.1).

© Власов М.А., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Чиглинец А.В., Шевченко О.И., Елин В.Ю., 2019

Таблица 1

Состав шлака с АКП

№ плавки	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>
1	14,66	6,02	60,47	16,83
2	14,17	3,09	62,19	18,52
3	16,073	7,21	57,78	16,91
4	14,1	4,28	61,31	18,27
5	15,95	4,58	60,93	16,5
6	2,91	4,48	76,52	14,05
7	15,27	4,75	62,41	15,52
8	10,71	4,93	68,3	14,02
9	17,16	3,88	53,86	23,06
10	8,99	3,12	72,22	13,63
11	16,35	3,31	60,27	18,04
12	20,85	3,52	54,2	19,39
13	3,92	5,84	69,7	18,5
14	22,26	4,49	54,6	16,62
15	3,82	3,87	71,23	19,04
16	7,94	5,008	67,12	17,9
17	6,95	12,37	37,28	41,36

Таблица 2

Состав жидкой фазы шлака

Номер плавки	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>
1	17,09	7,02	53,93	19,61
2	15,84	3,46	57,7	20,72
3	17,97	8,06	52,77	18,91
4	15,9	4,82	56,37	20,61
5	18,27	5,25	55,26	18,89
6	5,64	8,65	54,6	27,19
7	18,42	5,73	54,66	18,73
8	15,64	7,2	53,72	20,47
9	17,16	3,88	53,86	23,06
10	14,24	4,94	56,03	21,58
11	17,63	3,57	57,15	19,46
12	19,54	3,29	57,09	18,17
13	5,8	8,63	55,25	27,33
14	22,26	4,49	54,6	16,62
15	5,57	5,65	58,05	27,77
16	10,68	6,74	55,75	24,1
17	6,95	12,37	37,28	41,36

Зависимость содержания неметаллических включений от состава шлака

Частицы	Валовый состав шлака в пересчете на 100%						Выделилось из исходной оксидной смеси (гетерогенного шлака), % от её массы			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO, %	CaO, %	MgO, д.е.	CaO, д.е.
Сульфи-ды	-	-	-	-	-	0,41	-	-	-	-
Сульфи-ды	-	-	-	-	-	0,42	-	-	-	-
Сульфи-ды	-	-	-	-	-	0,41	-	-	-	-
Силик. хрупкие	-	-	-	-	-	-	0,44	-	0,44	-
Силик. хрупкие	-	-	-	-	-	0,48	-	-	-	-
Силик. пластичные	-	-	-	0,39	-	0,56	-	-	-	-
Силик. пластичные	-	-	-	-	0,39	-	-	0,41	-	-
Силик. пластичные	-	-	-	-	-	-	-	0,42	-	-
Силик. пластичные	-	-	-	-	0,4	-	-	0,43	-	-
Силик. недеф.	-	-	-	0,46	-0,42	0,43	-	-	-	-

Результаты расчетов выполнены на полимерной модели, разработанной в УПИ им. С.М. Кирова на кафедре ТМП «Теории металлургических процессов» [5,6]. Данные по составу жидкофазного шлака и процент наличия нерастворенных частиц представлены в табл. №2,3.

В рамках проведенного исследования было необходимо аппроксимировать взаимосвязь между химическим составом шлака на АКП и неметаллическими включениями в продукции с помощью метода корреляции. Коэффициент парной корреляции служит мерой линейной корреляционной зависимости между величинами  $x$  и  $y$  при условии, что на формирование их значений оказывают влияние некоторые другие, неучтенные факторы. Кроме того, в ходе исследования следует учитывать, что корреляционная связь проявляется не в каждом отдельном случае, а только в средних величинах при достаточно большом числе статистических наблюдений [7].

Так как в процессе исследования было использовано достаточно большое число статистических наблюдений, значения коэффициента парных корреляций можно считать действительными. Метод парных корреляций показал, что существует зависимость между процентным содержанием оксидов кремния и содержанием в шлаке нерасплавленных хрупких и пластичных силикатов. Также в ходе исследования было выявлено, что если шлак пересыщен твердыми нерасплавленными частицами оксидов кальция и магния, т.е. чем больше доля нерасплавленных частиц CaO и MgO, тем выше содержание неметаллических включений в продукции.

Возможно шлак с высоким содержанием

твердой фазы не обладает достаточными свойствами, необходимыми для усвоения неметаллических включений. Следовательно, факторов [1-4] недостаточно для успешного удаления неметаллических включений из жидкой стали.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующий вывод: для уменьшения содержания НВ в стали необходимо гомогенизировать шлак, наведенный в АКП, путем введения дополнительных разжижающих добавок.

#### Список литературы

1. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали : учебник для вузов / Бигеев А.М., Бигеев В.А. Магнитогорск: МГТУ, 2000. С.134-135.
2. Теория и технология производства стали: учебник для вузов / Кудрин В.А.- М.: Мир; АСТ, 2003. 528 с.
3. Кньюпель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии. М. : Металлургия, 1984. 414 с.
4. Производство стали. Т. 3: Внепечная металлургия стали / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко. Москва : Теплотехник (ТТ), 2008. 544 с.
5. Новиков В. К. Развитие полимерной модели силикатных расплавов // Расплавы. 1987. № 6. С. 21–33.
6. Новиков В.К., Невидимов В.Н. Применение полимерной модели к расчету вязкости оксидных расплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1999. № 11. С. 9–12.
7. Эконометрика. Ч. I. Парная регрессия: учебное пособие для вузов / Ишхаян М.В., Карпенко Н.В. Москва: МГУПС, 2016. С. 6-8.

**Сведения об авторах**

**Власов Михаил Александрович** – бакалавр, студент кафедры металлургической технологии, «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагильский технологический институт (филиал).

**Шешуков Олег Юрьевич** – д-р техн. наук, проф. директор Института новых материалов и технологий УрФУ, главный научный сотрудник лаборатории пиromеталлургии черных металлов ИМЕТ УрО РАН. Екатеринбург, Россия. E-mail: [o.j.sheshukov@urfu.ru](mailto:o.j.sheshukov@urfu.ru)

**Метелкин Анатолий Алексеевич** – канд техн. наук, ст. преп. кафедры металлургической технологии, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал). Нижний Тагил. E-mail: [anatoliy82@list.ru](mailto:anatoliy82@list.ru)

**Чиглинецв Алексей Викторович** – зам.начальника КЦ №1 по технологии, АО ЕВРАЗ НТМК, г. Нижний Тагил. E-mail: [Aleksej.Chiglintsev@evraz.com](mailto:Aleksej.Chiglintsev@evraz.com)

**Шевченко Олег Юрьевич** – д-р техн. наук, зав.кафедрой металлургической технологии, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал). Нижний Тагил. E-mail: [Shevchenko-OI@ntiustu.ru](mailto:Shevchenko-OI@ntiustu.ru)

**Елин Вячеслав Юрьевич** – огнеупорщик, АО ЕВРАЗ НТМК, г. Нижний Тагил. E-mail: [Vyacheslav.Elin@evraz.com](mailto:Vyacheslav.Elin@evraz.com)

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**THE DEPENDENCE OF THE CONTENT OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL ON THE COMPOSITION OF THE SLAG ON THE UNIT "FURNACE-LADLE"**

**Vlasov Mikhail Aleksandrovich** - student Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, Nizhny Tagil technological Institute (branch), Nizhny Tagil.

**Sheshukov Oleg Yurevich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of new materials and technologies, Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, chief researcher, laboratory of pyrometallurgy of ferrous metals IMET UB RAS. Ekaterinburg, Russia.

**Metelkin Anatoly Alexeyevich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Metallurgical technologies Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, Nizhny Tagil technological Institute (branch), Nizhny Tagil, Russia.

**Chiglintsev Aleksey Viktorovich** - deputy Head of Converter Department №1 by technology, EVRAZ NTMK, Nizhny Tagil, Russia.

**Shevchenko Oleg Yurevich** - D.Sc. (Eng.), Head of the Metallurgical Technology Department, Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, Nizhny Tagil technological Institute (branch), Nizhny Tagil, Russia.

**Elin Vyacheslav Yurevich** - fireproofer of the hot-work sector, Converter Department №1, EVRAZ NTMK, Nizhny Tagil, Russia.

***Abstract.** The hypothesis of the dependence of the content of non-metallic inclusions in steel on the composition of the slag at the ladle-furnace has been considered. The subject of the research is an array of data on non-metallic inclusions in products, data on the chemical composition of slag on the "ladle-furnace", the object of study is products (rails, wheels, pipes), as well as metal and slag. In the course of the study, the connection between the chemical composition of slag on the "furnace-ladle" and non-metallic inclusions in products was approximated by correlation method.*

***Keywords:** the method of pair correlations, nonmetallic inclusions, unit "furnace-ladle".*

---

Ссылка на статью:

Власов М.А., Шешуков О.Ю. Метелкин А.А., Чиглинецв А.В., Шевченко О.И., Елин В.Ю. Зависимость содержания неметаллических включений в стали от состава шлака на установке «печь-ковш» // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 19-22.

Vlasov M. A., Sheshukov O. Yu., Metelkin A. A., Chiglintsev A. V., Shevchenko O. Yu., Elin V. Yu. The dependence of the content of non-metallic inclusions in steel on the composition of the slag on the unit "furnace-ladle". *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 29, no. 2, pp.19-22.



УДК 669.1

Бигеев В.А., Кретова А.О., Баландина Т.А., Коптякова С.В., Слющников Д.С.

**ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В ЭСПЦ ПАО «ММК»**

**Аннотация.** В работе рассмотрены основные способы вакуумирования стали, произведено сравнение вакуумных установок VD и RH. Произведен расчет производительности установки вакуумирования для ковша 180 т. Приведен обзор циклической работы вакууматоров различного типа, который показывает, что среднесуточная производительность RH установки выше установки VD на 5-10%. Рассмотрен способ повышения годовой производительности вакууматора путем установки двухпозиционной системы вакуумирования: две рабочие вакуумкамеры RH, две вакуум-камеры и общая вакуум-крышка для процесса VD.

**Ключевые слова:** вакуумирование стали, циркуляционное вакуумирование, двухпозиционная система вакуумирования, электросталеплавильный цех, высокоуглеродистая сталь.

Электросталеплавильный цех (ЭСПЦ) был создан в результате коренной реконструкции мартеновского цеха №1 в 2004-2008 годах. В его составе две дуговые электропечи ДСП-180, один двухванный сталеплавильный агрегат ДСА №32, три агрегата «ковш-печь», две сортовые пятиручьевые и одна двухручьевая слябовая МНЛЗ. Серьезным недостатком этого цеха, ограничивающим сортамент и качество производимой стали, является отсутствие агрегата вакуумирования стали в ковше. Для разрабатываемого проекта необходимо выбрать тип вакууматора.

**Особенности вакуумирования.** Основная задача процесса вакуумирования металла в ковше – по возможности максимальное удаление газов, прежде всего водорода и азота, из стали. Кроме того, здесь достигается особо низкое содержание углерода в металле, удаляются кислород и неметаллические включения [1-4].

Согласно исследованиям англичанина А.Сивертса, содержание водорода и азота, растворенного в жидком металле, определяется следующими уравнениями.

Переход водорода и азота из газовой фазы в металл и обратно можно представить как



Предложен коэффициент, связывающий содержание этих газов с их парциальным давлением.

$$k_{H;N} = \frac{[\%H;N]}{\sqrt{p_{H;N_2}}} \quad (2)$$

Отсюда

$$[\%H; N] = k_{H;N} \cdot \sqrt{p_{H;N_2}} \quad (3)$$

Наибольшее распространение в мировой практике получили способы ковшевого (VD) и циркуляционного (RH) вакуумирования. Изредка встречаются порционный (DH) и струйный способ [5-6].

Вакуумирование стали в ковше (VD) является наиболее простым и надежным способом

вакуумной обработки металла. Такой обработке подвергают как нераскисленную, так и раскисленную сталь. Для повышения эффективности вакуумирования применяют перемешивание расплава инертным газом через донные продувочные пробки сталеразливочного ковша, так как пузырьки аргона, барботирующие расплав, в значительной мере способствуют ускорению хода реакций обезуглероживания и дегазации. Кроме того, пневматическое перемешивание обеспечивает усиление взаимодействия высокоосновного рафинировочного шлака с металлом, что благоприятствует десульфурации стали и удалению азота. Таким образом, конечный результат в камерном вакууматоре достигается в ходе одной технологической стадии.

В состав камерной установки для вакуумирования стали в ковше входят вакуум-камера (чаще стационарная), накатная крышка, система дозирования и подачи сыпучих материалов, вакуум-провод, высокопроизводительные вакуумные насосы и АСУ ТП (рисунок 1).

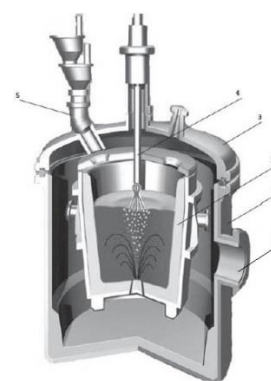


Рисунок 1 - Общая схема камерного вакууматора VD/VOD:

- 1 – сталеразливочный ковш; 2 – вакуумная камера; 3 – крышка вакуумной камеры; 4 – кислородная фурма; 5 – устройство для подачи сыпучих под вакуум; 6 – отвод газов

В корпусе вакуум-камеры, которая футерована огнеупорным кирпичом, имеется стенд для размещения сталеразливочного ковша. Корпус оборудован отверстием-мембраной с термодатчиком для аварийного слива стали, соединительным патрубком вакуум-провода, а также системой подачи азота при разгерметизации. Верхний торец вакуум-камеры имеет уплотнитель для обеспечения надежной герметизации. На рабочей площадке вакууматора устанавливают трайб-аппарат.

Крышка вакуум-камеры установлена на транспортной тележке и может вертикально перемещаться с помощью гидропривода. На крышке вакуум-камеры размещены следующие устройства: защитный тепловой экран с элементами подвода и отвода охлаждающей воды, система визуального контроля процесса вакуумной обработки, устройство отбора проб и измерения температуры, фурма для продувки стали кислородом (VD/VOD), шлюзовые устройства для ввода легирующих и других добавок.

Для проведения обработки сталеразливочный ковш с помощью мостового крана помещают в вакуум-камеру. Крышку вакууматора на тележке транспортируют к камере и устанавливают на ней. С помощью вакуумных насосов создают необходимое разрежение и проводят соответствующие технологические операции.

**Циркуляционное вакуумирование (RH)** впервые было успешно испытано в 1957 году немецкой компанией RUHRSTAHL HENRICHSHUTTE (позже вошла в состав THYSSENSTAHL AG) в городе Геттингем.

Конструктивное исполнение циркуляционного вакууматора может быть двух типов: с вертикальным перемещением вакуум-камеры или сталеразливочного ковша.

В состав установки RH входят (рис. 2): вакуум-камера с вакуум-проводом, вакуумные насосы, механизм перемещения вакуум-камеры (ковша), система дозирования и ввода добавок, а также АСУ ТП. Иногда вакуумную камеру устанавливают на транспортной тележке для перемещения между рабочим положением и позицией готовности к вакуумной обработке. Над сталеразливочным ковшом в рабочей позиции размещают манипуляторы для отбора проб и измерения температуры, а также трайб-аппарат. Корпус вакууматора — цилиндрический (объем до 300—350 м<sup>3</sup>) с двумя патрубками в нижней части. Внутренняя поверхность корпуса футерована специальным огнеупорным кирпичом. Циркуляционные патрубки имеют дополнительную футеровку с внешней стороны. Входной патрубок оснащен системой сопел для подачи инертного транспортирующего газа. Кроме того, вакуум-камера

имеет систему визуального контроля процесса вакуумной обработки и шлюзовые устройства для ввода добавок.

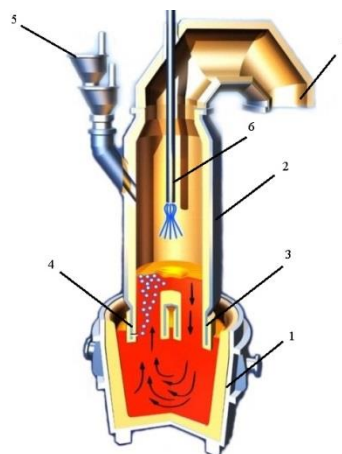


Рисунок 2 - Схема циркуляционного вакууматора RH – TOP:

- 1 – сталеразливочный ковш; 2 – вакуумная камера; 3 – входной патрубок; 4 – сливной патрубок; 5 – устройство для подачи сыпучих в вакуум; 6 – кислородная фурма; 7 – отвод газов

Широкое применение циркуляционных вакууматоров (типа RH - TOP) обусловлено возможностью более полного и быстрого обезуглероживания расплава стали, что выражается в сокращении продолжительности обработки (на 7—10 мин), уменьшении температурных потерь и достижении более низкой концентрации углерода в сравнении с VD/VOD. Кроме того, отсутствие интенсивного взаимодействия с рафинировочным шлаком сталеразливочного ковша оказывается полезным при выплавке особо чистых по содержанию углерода марок стали типа IF.

**Сравнительная стоимость эксплуатации установок VD и RH.** В планах реконструкции ЭСПЦ ПАО «ММК» решается дилемма выбора типа агрегата для вакуумирования стали в ковше. Поэтому были сделаны некоторые технико-экономические расчеты [7-9].

**Расчет производительности установки вакуумирования.** Принимая во внимание общий фонд рабочего времени в ЭСПЦ ПАО «ММК», цикличность работы и вынужденных простоев, теоретическую производительность вакууматора в сутки, рабочий цикл вакуумкамеры, количество циклов между заменами вакуумной камеры или ее частей, получены теоретические данные об эффективной производительности вакуумкамеры типа RH и VD для ковша вместимостью 180т (табл. 1).



Таблица 1

Сравнительная характеристика вакууматоров типа VD и RH

Параметр	RH	VD
Среднее время цикла, ч	0,97	1,03
Время вакуума (общее), ч	0,39	0,45
Среднее эффективное количество вакуумированных плавок в год	6300	6084
Среднее эффективное количество вакуумированной стали в год, т	1330560	1275120

Таблица 2

Теоретически максимальные объемы обработки стали вакуумом в 180- тонном ковше, т/год

Система	Однопозиционная	Двухпозиционная
RH	1774080	3548160
VD	1718640	3437280

Целесообразность использования двухпозиционной системы вакуумирования определяется возможностями плавильного, внепечного и транспортного оборудования цеха, а также наличием соответствующих площадей для размещения основного и вспомогательного оборудования.

Также следует принимать во внимание, что величина стартовых капиталовложений в RH вакуум-камеру превосходит стоимость камеры VD в два раза. При этом стоимость годового обслуживания камеры VD типа ниже в десятки раз.

**Сравнение эксплуатационных затрат на вакуумирование.** RH вакууматор требует как минимум на 50% более производительную вакуумную станцию, что и определяет повышенное по сравнению с VD установкой потребление рабочего пара. Также из-за технологических особенностей RH процесс потребляет в 100 раз большее количество транспортирующего газа – аргона, чем требуется для эффективного перемешивания металла в ковше.

При эксплуатации парожетторного насоса средняя оценочная стоимость вакуумирования тонны металла на вакууматоре составляет 3,5-4,5 доллара и 1,5-2 доллара на вакууматоре VD.

При этом в рамках первичного анализа произведен учет расхода только непосредственно во время цикла вакуумирования. При эксплуатации RH установки надо учитывать расходы на замену, прогрев футеровки и стоимость работ по обслуживанию комплекса вспомогательного оборудования вакуум-камеры RH.

Результаты расчета потребления энергосред при использовании вакуумных механических насосов на процессе VD показывают, что, обладая в 3-3,5 раза более высокой ценой по сравнению с парожетторными насосами, механические вакуумные насосы имеют в 8-9 раз более низкую стоимостью эксплуатации. Средняя оценочная стоимость вакуумирования при эксплуатации механически насосов составляет 0,25-0,4 доллара за тонну.

Приведенный обзор цикличной работы вакууматоров различного типа показывает, что среднесуточная производительность RH установки выше установки VD на 5-10%. Таким образом, вакуумирование по методу RH обеспечит большую производительность цеха за серию. Длительность серии ограничена стойкостью футеровки вакуум-камеры и в среднем не превышает 100 плавок.

Однако коэффициент готовности установки RH ниже установки VD на 15-19% в следствие простоя вакууматора RH на время обслуживания и ремонта вакуумкамеры. В этом случае годовая производительность вакууматора камерного типа оказывается выше циркуляционного вакууматора на 12%.

Коэффициент готовности вакууматора RH может быть доведен до значений, равных вакууматору VD, путем установки резервной «горячей» вакуум-камеры, что позволит исключить простои. Такой промежуточный вариант исполнения установки вакуумирования автоматически повышает годовую производительность RH вакууматора на 12%. При этом годовая производительность однопозиционного вакууматора VD окажется ниже не более чем на 7-9% (см. таб.1).

Вторым способом повысить годовую производительность вакууматора является возможность установки двухпозиционной системы вакуумирования: две рабочие вакуум-камеры RH, две вакуум-камеры и общая вакуум-крышка для процесса VD. При этом возможность обработки металла под вакуумом повышается практически в два раза для обоих методов.

Ниже в таблице 2 представлены теоретически максимальные объемы обработки стали вакуумом в 180 тонном ковше на обоих установках работающих в описанных выше режимах.

**Расположение вакууматоров в цехе.** Схема компоновки вакуумных агрегатов в сталеплавильном цехе определяется прежде всего объемом и сортаментом вакуумируемой стали, химическим составом жидкого полупродукта, необходимостью выполнения ряда других технологических операций по маршруту внепечной обработки, а также возможностью размещения того или иного типа оборудования. Так, например, с учетом ограничений в производственных площадях при реконструкции цеха установить камерный вакууматор проще, чем циркуляционный. При этом для обеспечения высокой производительности и снижения капитальных затрат возможны следующие варианты компоновки оборудования с одной системой вакуумных насосов:

- однокамерный вакууматор;
- двухкамерный вакууматор с одной крышкой;
- двухкамерный вакууматор с двумя крышками.

Ковшевая металлургия не должна стать «узким местом» в производственной цепочке при поточном вакуумировании, поэтому, например, в новых конвертерных цехах, где продолжительность цикла плавки не превышает 25—35 мин, предпочтение отдают циркуляционному вакууматору или сдвоенному циркуляционному вакууматору с одной системой вакуумных насосов. Возможны и другие варианты. Например, в ЭСПЦ на Белорусском металлургическом заводе с одной системой вакуумных насосов успешно работают камерный и циркуляционный агрегаты с шибберным переключением.

Необходимо отметить, что производительность однокамерной установки VD почти вдвое ниже установки RH, но она на 50 % дешевле. При этом производительность двухкамерного вакууматора VD и вакууматора RH примерно одинакова. Двухкамерная установка VD с одной крышкой дороже установки RH на 20 %, а с двумя крышками — на 40 %. При более продолжительном цикле обезуглероживания процесс VD/VOD является простым и надежным способом вакуумной обработки металла. Оборудование камерного вакууматора не контактирует со сталью, не требует специальных огнеупоров для футеровки камер, на их стойкость не влияет периодичность применения, что особенно важно при возможных простоях оборудования. Около 65 % построенных с 1990 г. вакууматоров являются камерными. При этом на установке ковшевого вакуумирования необходимо иметь свободный борт сталеразливочного ковша высотой до 600 мм, а в отдельных случаях — до 1000 мм вследствие возможного подъема уровня расплава в ходе вакуумирования.

Агрегаты RH получили развитие, и их успешно эксплуатируют на крупных предприятиях, имеющих плавильные агрегаты большой емкости и

высокой производительности. Вероятно, это связано с возможностью стабилизации в узких пределах технологических параметров при производстве стали массового сортамента, что позволяет жестко регламентировать, например, высоту налива стали в ковше и толщину шлака (табл. 3).

Комплексный анализ всех аспектов вакуумной обработки расплава показывает, что более высокая скорость процесса обезуглероживания в агрегате RH способствует предпочтительному его применению при производстве стали IF со сверхнизким содержанием углерода (менее 30 ppm) и позволяет завершить цикл обработки в течение от 26 (ThyssenKrupp Stahl, 265 т) до 35 мин (ЕКО Stahl, 240 т).

Таблица 3

Общие рекомендации по выбору типа вакууматора

Класс стали	RH/RH-TOP	VD/VOD
Особо низкоуглеродистая типа IF	+	±
Горячекатаная листовая	+	+
Электротехническая	+	—
Низкоуглеродистая	+	+
Среднеуглеродистая	+	+
Высокоуглеродистая	+	+
Высоколегированная	—	+
Коррозионно-стойкая	+	+

Вместе с тем на производительность агрегата RH существенно влияет продолжительность технического обслуживания. Как правило, при производстве стали IF со сверхнизким содержанием углерода после последовательной обработки шести плавов погружные патрубки вакууматора нуждаются в чистке настывшей, торкретировании огнеупорной массой, контроле состояния фурм для ввода аргона и пр. В зависимости от физико-химических свойств ковшевого шлака и технологических параметров обработки, а также применяемого оборудования такое обслуживание занимает от 20 до 60 мин. После обработки 60 - 150 плавов погружные патрубки нуждаются в замене. После каждых двух-трех кампаний погружных патрубков требуется замена вакуум-камеры из-за износа огнеупорной кладки ее нижней части. Вследствие этого на передовых металлургических заводах Германии средний годовой цикл вакуумирования стали в агрегате RH составляет от 53 (ThyssenKruppStahl, 2 640 000 т/год) до 70 мин (ЕКО Stahl, 1 800 000 т/год).

Кроме того, данному способу присущи

повышенные удельные затраты на обработку и содержание, связанные, например, с расходом огнеупоров, энергоносителей для подогрева камеры, значительным снижением температуры металла в ходе вакуумирования и пр.

В настоящее время на мировом рынке растёт спрос на плоский прокат высококачественной низкоуглеродистой стали. В связи с этим в ПАО «ММК» проведена коренная реконструкция листопрокатного цеха (ЛПЦ) № 4, находящегося в одной логистической и технологической цепи с ЭСПЦ. Все это, на наш взгляд, является решающим аргументом в пользу выбора вакуумирования стали в агрегате типа RH.

#### Список литературы

1. Внепечное вакуумирование стали /Морозов А.Н.,Стрекаловский М.М., Чернов Г.И., Кацнельсон Я.Е. М.: Metallurgia, 1974 288 с.
2. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали М. Metallurgia, 1984. 416 с.
3. Metallургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цехе: учеб. пособие / В.А. Бигеев, А.М. Столяров, А.Х. Валиахметов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 308 с.
4. В.В. Пивцаев, В.В. Эндерс, М.П. Гуляев Сравнительная эффективность дегазации стали при вакуумировании на установках RH и VD // Сборник научных трудов специалистов Белорусского металлургического завода. / Минск: Технология, 2009. 360 с.
5. Смирнов А.Н., Сафонов Б.М. Вакуумирование стали: технологии и оборудование // Электрометаллургия.-2008.С. 8-14.
6. Вакуумирование стали процессом RH на Магнитогорском металлургическом комбинате /Бодяев Ю.А., Бурмистрова Е.В., Овсянников В.Г., Носов А.Д., Самойлин С.А. //Черная металлургия. Бюл. НТИ. 2003, С. 48-52.
7. Совершенствование управления инновационным развитием производства предприятий России: монография /Н.Т. Баскакова, Д.Б. Симаков, Т.К. Арапова, Т.А. Баландина, З.В. Якобсон. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 163 с.
8. В.Э. Абдульманов, Т.А. Баландина Особенности проведения предпроектной стадии при внедрении автоматизированных систем управления на промышленных предприятиях // Сборник научных трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. С. 63-69.
9. Костина Н.Н., Коптякова С.В., Зиновьева Е.Г. Теория нечётких множеств как метод управления интеграционными рисками на предприятиях чёрной металлургии // Менеджмент в России и за рубежом. 2019. № 2.С. 71–81.

#### Сведения об авторах

**БигеевВахитАбдрашитович** – д-р техн.наук, профессор кафедры МиХТ, «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

**Кретьова Анна Олеговна** – аспирант кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [anukretova@yandex.ru](mailto:anukretova@yandex.ru).

**Баландина Татьяна Александровна** – канд. экон. наук доцент кафедры менеджмента, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [balandina.ta@mmk.ru](mailto:balandina.ta@mmk.ru).

**Коптякова Светлана Владимировна** – канд. пед. наук, доцент кафедры государственного и муниципального управления и управления персоналом, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [Svetlana.cop@yandex.ru](mailto:Svetlana.cop@yandex.ru).

**Слющенков Денис Сергеевич** – магистрант кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия.

**EVALUATION OF THE PROSPECTS FOR VACUUM PROCESSING OF STEEL IN THE EOF SHOP (PJSC «ММК»)**

**Bigeev Vakhit Abdrashitovich** – D.Sc (Eng), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: [v.bigeev11@yandex.ru](mailto:v.bigeev11@yandex.ru)

**Kretova Anna Olegovna** – graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: [anyakretova@yandex.ru](mailto:anyakretova@yandex.ru).

**Balandina Tatiana Alexandrovna**–Ph.D. (Economics), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: [balandina.ta@mmk.ru](mailto:balandina.ta@mmk.ru).

**Koptyakova Svetlana Vladimirovna** – Assistant Professor Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, E-mail: [Svetlana.cop@yandex.ru](mailto:Svetlana.cop@yandex.ru).

**Slyuschenkov Denis Sergeevich** – master's degree student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation.

***Abstract.** The main methods of steel vacuuming are considered in the work and vacuum units VD and RH are compared. The calculation performance of vacuum systems for 180-ton ladle is done. An overview of the cyclical operation of various types of vacuum tanks, which shows that the average daily capacity of the RH installation above the VD installation is 5-10% reduced. A method for increasing the annual productivity of a vacuum cleaner by installing a two-position evacuation system is considered: two working vacuum chamber RH and two vacuum chamber and a common vacuum cover for the VD process.*

***Keywords:** steel degassing, circulation\_degassing, high\_carbon\_steel, two-stage vacuum system, EOF shop.*

---

Ссылка на статью

Бигеев В.А., Кретова А.О., Баландина Т.А., Коптякова С.В., Слощенко Д.С. Оценка перспективы вакуумной обработки стали в ЭСПЦ ПАО «ММК» // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 23-28.

Bigeev V.A., Kretova A.O., Balandina T.A., Koptyakova S.S.

Evaluation of the prospects for vacuum processing of steel in the EOF shop (PJSC «ММК»). *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 29, no. 2, pp.23-28.

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.762:539.4.014

Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е.

## РАСЧЕТ ЗАГОТОВКИ ПОРШНЯ ИЗ ОБЪЕМНОГО НАНОСТРУКТУРНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕДИ ДЛЯ МАШИН ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

**Аннотация.** Предложена методика определения геометрических параметров заготовки поршня для машин литья под давлением на основе прочностного расчета поршня при одновременном воздействии на него силовых нагрузок, высокой температуры и сил трения. По полученным выражениям произведен расчет минимально допустимых значений толщины стенки трубчатой части и днища поршня при разных его наружных диаметрах для случая, когда поршень изготовлен из жаропрочного и износостойкого объемного наноструктурного материала системы  $Cu-Al-C-O$ .

**Ключевые слова:** поршень, машины литья под давлением, порошковая металлургия, объемный наноструктурный материал, расчеты, заготовка, стенка поршня, днище поршня.

Поршень (плунжер) является одной из наиболее быстроизнашиваемых и ответственных деталей машин литья под давлением [1-3]. Выталкивая порцию расплава из литниковой втулки в камеру прессования и далее в пресс-форму, он работает при экстремальных условиях, обуславливаемых одновременным воздействием на него больших удельных нагрузок, высокой температуры и значительных сил трения его по камере прессования [2,4-9]. В частности, для получения плотных отливок из алюминиевых сплавов необходимо обеспечить давление прессования 35-85 МПа при температуре расплава, достигающего 720°C [3,8-13]. Давление прессования, потребное для получения отливок из медных сплавов, возрастает до 120 МПа (при температуре расплава, например латуни, 960°C) и в некоторых случаях может достигать 900 МПа [2,5].

В работах [14-16] показано, что наибольшим ресурсом обладают поршни машин литья под давлением и другие детали машин и механизмов, подвергаемые воздействию больших силовых и температурных нагрузок, а также трению, когда они изготавливаются из объемных наноструктурных материалов системы  $Cu-Al-C-O$  [14-21] и, в частности, из материала С16.104 ДИСКОМ®, который получают с использованием метода реакционного механического легирования в атриторах и технологий порошковой и гранульной металлургии. Как правило, поршни из такого материала изготавливаются механической обработкой горячепрессованного прутка со значительными отходами этого материала в виде стружки. Поэтому получение поршня из предварительно изготовленной методом объемного деформирования заготовки, по форме и размерам

максимально приближающейся к поршню, является актуальной задачей, решению которой должна способствовать настоящая работа.

Для разработки чертежа требуемой заготовки поршня с заданным наружным диаметром  $D$  необходимо, прежде всего, определить толщину его стенки  $S_c$  и толщину днища  $S_d$  (рис.1,а) при воздействии на него всех указанных выше факторов, силовая составляющая которых представлена на рис. 1,б. Очевидно, что для определения геометрических параметров заготовки такого поршня необходимо полученные при расчете поршня значения  $D$ ,  $S_c$  и  $S_d$  увеличить на соответствующие значения припусков и после этого назначить требуемые допуски на механическую обработку.

При проведении расчетов были приняты допущения, что подпор (давление) жидким металлом при его прессовании поршнем  $p$ , контактное давление между поршнем и камерой прессования  $\sigma_k$  и напряжение  $\tau$ , обусловленное силой трения  $N$ , возникающего в сопряжении поршня с камерой прессования, распределены по поверхностям, по которым они действуют, равномерно (см. рис. 1,б).



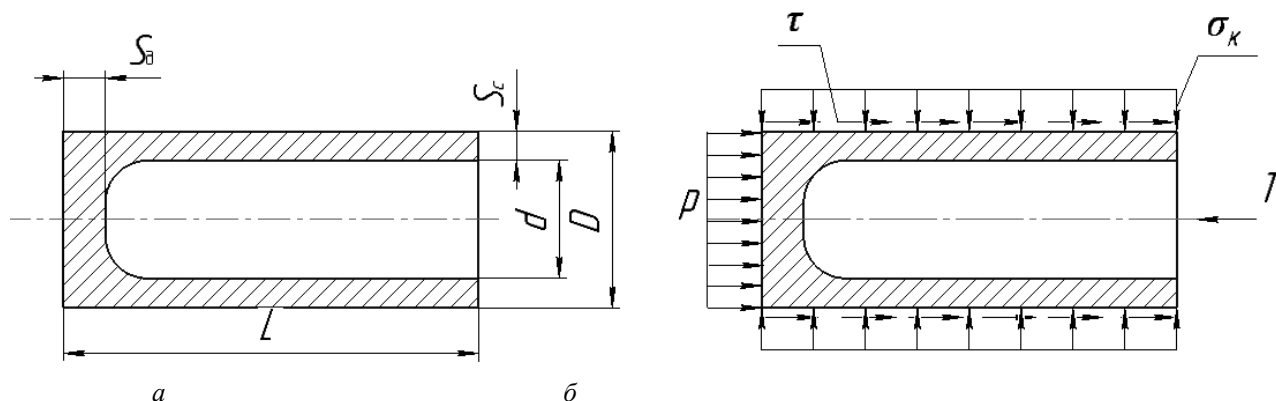


Рис. 1. Эскиз поршня (а) и схема его нагружения (б)

При движении поршня он преодолевает сопротивление не только подпора прессуемого металла  $P$ , но и сопротивление силы трения  $N$ , направленной так же, как и сила подпора, встречно силе прессования  $T$  (см. рис. 1,б). Для обеспечения движения поршня, т.е. для обеспечения прессования им металла в жидком состоянии необходимо, чтобы выполнялось условие

$$P + N < T. \quad (1)$$

Здесь сила трения может быть определена по формуле

$$N = \tau \cdot F_{\text{тр}} = \tau \cdot \pi \cdot D \cdot L, \quad (2)$$

но она может быть выражена также через контактное давление  $\sigma_k$

$$N = f \cdot \sigma_k \cdot \pi \cdot D \cdot L, \quad (3)$$

где  $L$  - общая длина поршня;

$f$  - коэффициент трения пары «поршень – камера прессования».

Из источника [8] известно, что расчетное контактное давление  $\sigma_k$  в сопряжении «поршень-камера прессования» при отсутствии холодного зазора между камерой прессования и плитой машины литья под давлением составляет 255 МПа, а при холодном зазоре, равном 0,16 мм, контактное давление будет снижаться до 104 МПа. При таком контактном давлении, согласно [8], сила трения в сопряжении «поршень-камера прессования» при нормальном холодном зазоре между камерой прессования и плитой машины, равном 0,16 мм, диаметре поршня 110 мм длиной 135 мм составляет  $N = 1,914$  МН. Подставив эти данные в (3), получим, что коэффициент трения указанного трибосопряжения составляет 0,39. Столь высокое значение коэффициента трения свидетельствует о чрезвычайно тяжелом взаимодействии указанных элементов трибосопряжения друг с другом, граничащим с ситуацией возможного «заедания».

Для решения задачи был применен метод суперпозиции, согласно которому результат воздействия на тело системы сил равен сумме результатов воздействия отдельных составляющих этой системы, прикладываемых к телу последовательно и в любом порядке [22]. В соответствии с этим поршень был разбит на два простейших элемента: на днище в виде диска и стенку поршня в виде трубы, схемы нагружения которых приведены на рис. 2.

При нагружении диска (рис.2,а) контактным давлением  $\sigma_k$ , равномерно распределенным по его наружной поверхности на длине  $S_d$  диаметром  $D$ , элементарный объем, выделенный из диска поперечными, цилиндрическими и осевыми сечениями, будет находиться в объемном напряженном состоянии; при этом радиальные  $\sigma_r$  и тангенциальные  $\sigma_\theta$  напряжения равны между собою и одинаковы во всех точках диска:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -\sigma_k. \quad (4)$$

Для определения действующих в диске осевых нормальных напряжений  $\sigma_z$  было составлено уравнение его равновесия при действии на него давления подпора металла  $p$ , поверхностных касательных напряжений трения  $\tau$  (выраженных через контактное давление  $\sigma_k$ ) и внутренних напряжений  $p_{д-с}$ , являющихся реакцией на отчленение от диска трубчатой части поршня, откуда было получено

$$p_{д-с} = \frac{l}{(1-k^2)} P + \frac{4f \cdot \sigma_k \cdot S_\theta}{(1-k^2) D}. \quad (5)$$

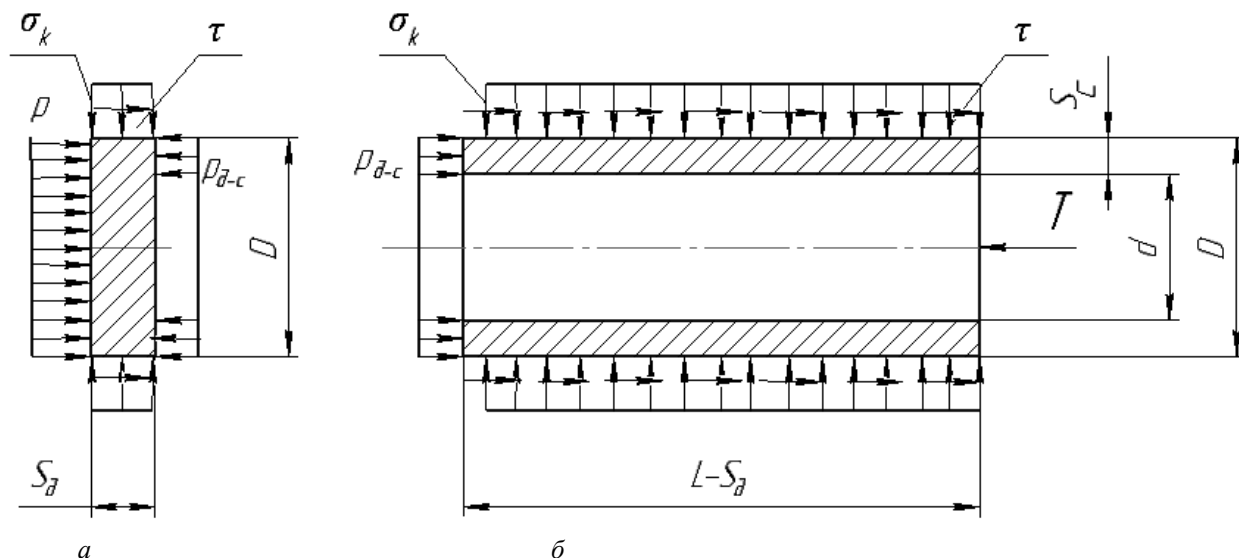


Рис. 2. Схемы нагружения дна (а) и стенки (б) поршня

Осевые напряжения  $\sigma_z$ , действующие в объеме диска, ограниченном наружным и внутренним диаметрами поршня, равны:

$$\sigma_z = -p_{d-c} \cdot \quad (6)$$

В предположении, что температура нагрева дна поршня (диска) постоянна в радиальном направлении в каждом его поперечном сечении и изменяется линейно по толщине диска от  $t_1$  до  $t_2$ , для температурного нормального напряжения  $\sigma'_z$  можно записать:

$$\sigma'_z = -E \cdot \alpha \cdot \Delta t_d, \quad (7)$$

где  $\Delta t_d = t_1 - t_2$  – разность температур на наружной и внутренней торцевых поверхностях дна поршня;

$E$  – модуль продольной упругости материала поршня;

$\mu$  – коэффициент Пуассона материала поршня;

$\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения материала поршня.

Суммарное осевое напряжение будет равно

$$\Sigma \sigma_z = \sigma_z + \sigma'_z = -\frac{1}{(1-k^2)} * \left[ p + \frac{4f \cdot \sigma_k \cdot S_d}{D} + E \cdot \alpha \cdot \Delta t_d \cdot (1-k^2) \right] \quad (8)$$

Поскольку объемный наноструктурный материал С16.104 ДИСКОМ® обладает разным сопротивлением растяжению и сжатию и является относительно хрупким материалом, то для описания условия прочности диска (дна поршня) наиболее обоснованным будет выбор гипотезы прочности Кулона-Мора, называемой также пятой гипотезой прочности [22,23]. Она так же, как и третья гипотеза прочности, не учитывает действия второго главного напряжения  $\sigma_2$ , но учитывает разницу в свойствах материала поршня при растяжении и сжатии, и условие прочности согласно этой гипотезе будет иметь вид

$$\sigma_{\text{экв}}^{(5)} = \sigma_1 - \eta \cdot \sigma_3 \leq [\sigma], \quad (9)$$

где  $\sigma_{\text{экв}}^{(5)}$  – эквивалентное напряжение в наиболее опасной точке диска;

$\sigma_1, \sigma_3$  – главные напряжения в наиболее опасной точке;

$\eta$  – коэффициент, равный отношению предела прочности при растяжении к пределу прочности материала поршня при сжатии;

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение, которое определяется как  $[\sigma] = \sigma_B / n$ ,

(здесь  $\sigma_B$  – предел прочности материала поршня при растяжении;  $n$  – коэффициент запаса прочности при растяжении).

В связи с полярной симметрией диска и действующих на него нагрузок напряжения  $\sigma_r, \sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  являются главными напряжениями, а в площадках, по которым они действуют, касательные напряжения равны нулю [22,23]. С учетом этого и полученных выражений для напряжений можно указать, что опасной точкой будет любая точка объема диска, находящегося между наружным и внутренним диаметрами поршня, а условие прочности запишется в виде

$$\sigma_{\text{экв}}^{(5)} = \sigma_1 - \eta \cdot \sigma_3 - \sigma_k + \frac{\eta}{(1-k^2)} \times \left[ p + \frac{4f \cdot \sigma_k \cdot S_d}{D} + E \cdot \alpha \cdot \Delta t_d \cdot (1-k^2) \right] \leq [\sigma]. \quad (10)$$

Однако в том случае, когда диск (дно поршня) будет слишком тонким, может возникнуть опасная ситуация, при которой под действием подпора (давления) прессуемого металла  $p$ , приложенного в зоне  $A$  поверхности дна диска с диаметром этой зоны  $d$  (рис.3), может произойти сначала деформирование дна, а затем и его срез.

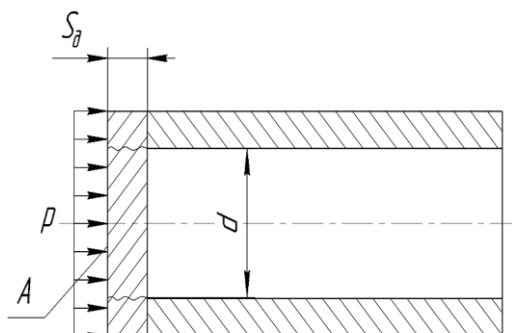


Рис. 3. Схема нагружения диска (днища поршня), работающего на срез

Результирующая сила подпора прессуемого металла  $P_A$ , действующая на указанную зону поверхности днища поршня, определяется по формуле

$$P_A = \frac{\pi d^2}{4} p, \quad (11)$$

Условие прочности зоны  $A$  днища поршня записывается в виде

$$\tau = \frac{P_A}{F_{cp}} \leq [\tau_{cp}], \quad (12)$$

где  $[\tau_{cp}]$  – допускаемое напряжение на срез материала поршня при 400°C;

$F_{cp}$  – площадь, по которой может произойти разрушение (срез) днища поршня, вычисляемая по формуле:

$$F_{cp} = \pi \cdot d \cdot S_d. \quad (13)$$

Допустимое напряжение на срез определяется по формуле

$$[\tau_{cp}] = \frac{\tau_{cp}}{n_{cp}}, \quad (14)$$

где  $\tau_{cp}$  – предел прочности материала поршня на срез;

$n_{cp}$  – коэффициент запаса прочности при срезе.

После подстановки (11), (13) и (14) в (12) и проведения преобразования с учетом  $n_{cp} = 1,5$  и  $d = k \cdot D$  получим

$$S_d \geq 0,375 k \cdot D \cdot \frac{P}{\tau_{cp}}. \quad (15)$$

Таким образом, прочностной расчет днища поршня следует вести, определив сначала по (15) значение  $S_d$ , а затем провести проверку выполнения условия прочности с использованием выражения (10).

При расчете трубы под действием контактного давления  $\sigma_k$ , равномерно приложенного к ее наружной поверхности диаметром  $D$ , могут быть использованы известные формулы Ламе (при отсутствующем внутреннем и осевом давлении) [22], которые позволяют определить радиальные  $\sigma_r$  и тангенциальные  $\sigma_\theta$  напряжения в ее стенке.

В частности, на наружной поверхности трубы (при  $r = D/2$ ) эти напряжения будут равны:

$$\sigma_r = -\sigma_k, \quad (16)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{1+k^2}{1-k^2} \sigma_k, \quad (17)$$

где  $k = d/D$ .

Очевидно, что оба указанные напряжения в этом случае сжимающие, причем  $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ .

На внутренней поверхности трубы (при  $r = d/2$ ) напряжения будут равны:

$$\sigma_r = 0, \quad (18)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{2}{1-k^2} \sigma_k. \quad (19)$$

В этом случае радиальное напряжение отсутствует, а сжимающее тангенциальное напряжение стало больше, чем на наружной поверхности трубы.

Сила трения на трубчатой части поршня  $N_c$  определяется из выражения

$$N_c = \tau \cdot \pi \cdot D \cdot (L - S_d) = f \cdot \sigma_k \cdot \pi \cdot D \cdot (L - S_d). \quad (20)$$

Уравнение равновесия для трубчатой части поршня, нагруженной равнодействующей силой  $P_{д-с}$  внутренних напряжений  $p_{д-с}$ , силой трения по поверхности стенки поршня  $N_c$  и усилием прессования  $T$  (рис.4), может быть представлено в виде

$$p_{д-с} \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} + f \cdot \sigma_k \cdot \pi \cdot D \cdot (L - S_d) = T, \quad (21)$$

откуда получим

$$p_{д-с} = \frac{4 \cdot T}{\pi(D^2 - d^2)} - \frac{4 \cdot \sigma_k \cdot D \cdot f \cdot (L - S_d)}{D^2 - d^2}. \quad (22)$$

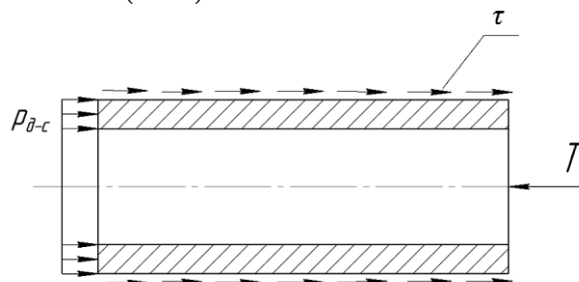


Рис. 4. Цилиндр, нагруженный осевыми нагрузками

Выразив в выражении (1) силу  $T$  через давление  $p$  и напряжение  $\sigma_k$  и далее подставив полученный результат в (22), получим:

$$p_{д-с} = \frac{1}{(1-k^2)} p + \frac{4f \cdot \sigma_k \cdot S_d}{(1-k^2)D}. \quad (23)$$

Как и следовало ожидать, выражение (23) идентично выражению (5) и описывает реакцию трубчатой части поршня на отклонение от нее его днища.

Решение Ламе [22,23] для случая, когда



радиальные  $\sigma_r$  и тангенциальные  $\sigma_\theta$  напряжения в стенке трубы отсутствуют, отсутствует также нагрев, а касательное напряжение  $\tau_{rz}$  не зависит от  $\xi = \frac{z}{R}$ , дает возможность записать для осевого нормального напряжение  $\sigma_z$ , не зависящего от  $k$  и длины трубчатой части поршня:

$$\sigma_z = -p_{d-c} = - \left[ \frac{1}{(1-k^2)} p + \frac{4f \cdot \sigma_k \cdot S_\theta}{(1-k^2)D} \right]. \quad (24)$$

При воздействии на стенку поршня нагрева в ней развиваются температурные напряжения. При этом будем считать, что температура в стенке поршня изменяется в радиальном и осевом направлениях по линейному закону. Используя известные решения для расчета нагреваемых толстостенных цилиндров при распространении тепла в радиальном направлении [22], получим применительно для рассматриваемого случая температурные напряжения на наружной поверхности трубы (при  $r=D/2$ ):

$$\begin{aligned} \sigma_r^t &= 0, \\ \sigma_\theta^t = \sigma_z^t &= \frac{E\alpha\Delta t_c}{1,5(1-\mu)(D-d)} \left[ \frac{3D}{2} - \frac{D^3-d^3}{D^2-d^2} \right] = \\ &= \frac{E\alpha\Delta t_c(0,5k+0,5k^2-1)}{1,5(1-\mu)(1-k^2)}, \end{aligned} \quad (25)$$

где  $\Delta t_c = t_1 - t_2$  – разность температур на наружной и внутренней поверхностях стенки поршня.

Эти напряжения на внутренней поверхности трубы (при  $r=d/2$ ):

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0, \\ \sigma_\theta^t = \sigma_z^t &= \frac{E\alpha\Delta t_c}{1,5(1-\mu)(D-d)} \left[ \frac{3d}{2} - \frac{D^3-d^3}{D^2-d^2} \right] = \\ &= \frac{E\alpha\Delta t_c(0,5k+0,5k^2-1)}{1,5(1-\mu)(1-k^2)}, \end{aligned} \quad (26)$$

В предположении, что температура нагрева стенки поршня изменяется линейно и по ее длине от  $t_1$  до  $t_2$  можно записать для температурного нормального напряжения  $\sigma_z^t$ :

$$\sigma_z^t = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (27)$$

где  $\Delta T = t_1 - t_2$  – разность температур на торцевой поверхности трубы, примыкающей к днищу поршня, и на ее свободной торцевой поверхности.

Таким образом, для трубчатой части поршня определены все напряжения, возникающие от наличия контактного давления, нагрева и трения.

Расчет эквивалентного напряжения в наиболее опасной точке стенки поршня будем вести, используя гипотезу прочности Кулона – Мора, а в качестве условия прочности этой части поршня будем использовать выражение (9).

Суммарные напряжения у внутренней поверхности трубчатой части поршня (при  $r=d/2$ ), где находится опасная точка, будут равны:

$$\Sigma\sigma_z = - \left[ \frac{1}{(1-k^2)} p + \frac{4f \cdot \sigma_k \cdot S_\theta}{(1-k^2)D} \right] +$$

$$+ \frac{E\alpha\Delta t_c(0,5k+0,5k^2-1)}{1,5(1-\mu)(1-k^2)} - E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (28)$$

$$\Sigma\sigma_\theta = - \frac{2}{(1-k^2)} + \frac{E\alpha\Delta t_c(0,5k+0,5k^2-1)}{1,5(1-\mu)(1-k^2)}, \quad (29)$$

$$\Sigma\sigma_r = 0. \quad (30)$$

Учитывая, что  $\sigma_1 = \Sigma\sigma_r = 0$  и  $\sigma_3 = \Sigma\sigma_z$ , условие прочности стенки поршня в ее наиболее опасной точке (на внутренней поверхности поршня) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{экв}}^{(5)} &= -\eta \sigma_3 = \\ &= \eta \left[ \frac{1}{(1-k^2)} p + \frac{4f \cdot \sigma_k \cdot S_\theta}{(1-k^2)D} + \frac{E\alpha\Delta t_c(0,5k+0,5k^2-1)}{1,5(1-\mu)(1-k^2)} - E \cdot \alpha \cdot \Delta T \right] \leq [\sigma]. \end{aligned} \quad (31)$$

Расчет поршня проводится в следующем порядке. Сначала по формуле условия прочности (15) определяется толщина днища поршня  $S_d$  при значении коэффициента  $k$ , которое задается, исходя из стремления его разумной минимизации (т.е. минимизации толщины стенки поршня  $S_c$ ). Затем производится проверка выполнения другого условия прочности, приведенного в (10), при этих значениях толщины днища и стенки поршня. Если прочность днища поршня обеспечивается, то далее проводится расчет по условию прочности (31) при данных значениях  $S_d$ ,  $S_c$  и  $k$ . Если эквивалентное напряжение

$\sigma_{\text{экв}}^{(5)}$  получается равным допускаемому напряжению  $[\sigma]$  или не более чем на 5% меньше его, то расчет заканчивается. Если условие прочности (10) не выполняется, то, используя метод простой итерации, по (10) определяется при  $\sigma_{\text{экв}}^{(5)} = [\sigma]$  для данного значения  $D$  искомый коэффициент  $k$ , а затем с его учетом – уточненная толщина днища  $S_d$ . Таким же способом находят уточненные значения коэффициента  $k$  и толщины стенки поршня  $S_c$ , если условие прочности (31) не было обеспечено.

На рис. 5 приведена номограмма для определения минимально допустимых значений толщины стенки  $S_c$  и днища  $S_d$  поршня из объемного наноструктурного материала системы Cu-Al-C-O марки С16.104 ДИСКОМ® при разном его наружном диаметре  $D$ , построенная на основании результатов численного расчета поршня на языке программирования MATLAB [24] при следующих значениях силовых, температурных параметров, физико-механических и триботехнических свойств материала поршня:  $p = 140$  МПа;  $\sigma_k = 104$  МПа;  $\eta = 0,75$ ;  $f = 0,39$ ;  $\mu = 0,32$ ;  $E = 72000$  МПа (при температуре днища неохлаждаемого поршня 400°C);  $\Delta t_d = 60$ °C;  $\Delta t_c = 40$ °C;  $\Delta T = 50$ °C;  $\alpha = 23,5 \cdot 10^{-6}$  1/°C (при диапазоне температур 350 - 450°C);  $\tau_{cp} = 340$  МПа при температуре 400°C и  $[\sigma] = 280$  МПа (рассчитанного с учетом коэффициента запаса прочности при растяжении  $n = 1,5$  и температуры нагрева неохлаждаемого поршня 400°C).



Рис. 5. Номограмма для определения минимально допустимой толщины стенки  $S_c$  и днища  $S_d$  поршня при заданном его наружном диаметре  $D$

Используя приведенную выше номограмму, получаем для поршня с наружным диаметром, например, 90 мм, что толщина его стенки  $S_c$  должна быть не менее 19,3 мм, а толщина днища этого поршня  $S_d$  должна составлять не менее 8 мм. Общий вид заготовки поршня типа с учетом припусков и допусков приведен на рис. 6.

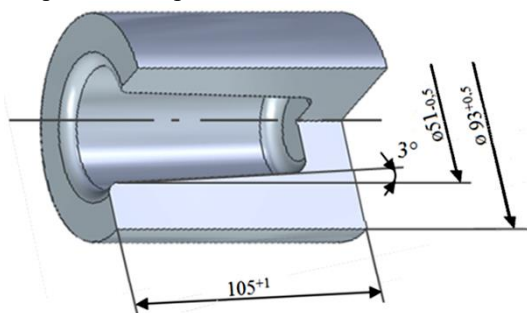


Рис. 6. 3D-модель заготовки поршня из объемного наноструктурного материала системы Cu-Al-C-O марки С16.104 ДИСКОМ®

Такая заготовка поршня может быть изготовлена путем холодного прессования заранее полученных в атриторе гранул объемного наноструктурного материала марки С16.104 ДИСКОМ® в гранульный брикет, нагрева этого брикета и горячего выдавливания из него требуемой заготовки [17,18,20], которая затем доводилась точением до требуемых формы и размеров.

С помощью приведенные выше формулы были рассчитаны используемые в машине литья под давлением Buhler Z-250D поршни диаметром 40, 50 и 60 мм, составлены чертежи на них и их заготовки, по которым были изготовлены поршни из указанного материала. При этом коэффициент использования металла повысился в 1,18–1,26 раза (в зависимости от диаметра поршня), а облегченная конструкция поршней не снизила их ресурс, который при литье под давлением различных отливок из силуминов составил от 19 до 23 тыс. запрессовок.

### Список литературы

1. Литье под давлением / М. Б. Беккер, М. Л. Заславский, Ю.Ф. Игнатенко [и др.]. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
2. Йоханнабер Ф. Литьевые машины. Справочное руководство: пер. с англ.: 4-е изд./под ред. Э.Л.Калинчева. Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия», 2009. 400с.
3. ГОРДОН М. ДЖ. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ: ПЕР. С АНГЛ.: 2-Е ИЗД., ПЕРЕРАБ. И ДОП. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ: НОТ, 2012. 824 с.
4. Белопухов А.К. Технологические режимы литья под давлением. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.
5. Analysis of die casting tool material / M. Muhič, J. Tušek, F. Kosel, D. Klobčar // *Strojniški vestnik – J. Mechan. Eng.* 2010. No. 56 (6), pp. 351-356.
6. Колесников М.С., Мухаметзянова Г.Ф. Детали пресс-узлов горячекамерных машины литья под давлением Zn-сплавов из ЧШГ // *Литейное производство*. 2014. № 8. С.21-22.
7. Тимофеев Г.И., Рождественский В.Г., Чувагин Н.Ф. Условия надежности прессовой пары машины литья под давлением // *Изв. вузов. Машиностроение*. 1986. №8. С.120-124.
8. Чеберяк О.И., Чувагин Н.Ф. Особенности прессовой пары на машинах ЛПД с горизонтальной камерой прессования // *Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы III Междунар. науч.- практ. конф.* Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. С. 98-104.
9. DAŃKO R., KOWALCZYK W. NEW TRENDS IN COLD-CHAMBER DIE CASTING MACHINE DESIGN // *CHINA FOUNDRY*. 2015, NO. 12 (4), PP. 305-309.
10. PODPROCKÁ R., MALIK J., BOLIBRUCHOVÁ D. DEFECTS IN HIGH PRESSURE DIE CASTING PROCESS // *MANUFACTURING TECHNOLOGY*. 2016, VOL. 15, NO. 4, PP. 674-678.
11. Murugarajan A., Raghunayagan P. The impact of pressure die casting process parameters on mechanical properties and its defects of A413 aluminium alloy // *Metalurgija*. 2019, no.58 (1-2), pp. 55-58.

Теория и технология металлургического производства

12. PASTUCHOVA Ž.P., RACHŠTADT A.G. FEDERLEGIERUNGEN AUS NE-METALLEN. ÜBERSETZUNG AUS DEM RUSSISCHEN UND BEARBEITUNG DER DEUTSCH-SPRACHIGEN AUSGABE. BERLIN: SPRINGER-VERLAG, 1985. 336 S.
13. BONOLLO F., GRAMEGNA N., TIMELLI G. HIGH-PRESSURE DIE-CASTING: CONTRADICTIONS AND CHALLENGES // *JOM*. 2015, VOL. 67, NO. 5, PP. 901-908.
14. Разработка жаро- и износостойких порошковых нанокomпозиционных материалов для поршней машин литья под давлением / Ю.О. Владимирова, Е.П. Шалунов, Н.В. Мулюхин, И.Е. Илларионов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы I-ой Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2015. С. 153-160.
15. Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П. Разработка жаро- и износостойкого нано-композиционного материала на основе порошковой меди и технологии его изготовления для поршней машин литья под давлением // Новые материалы и перспективные технологии: сб. материалов 4-го междисциплинар. науч. форума. М.: РАН, ООО «Буки Веди». 2018. Т. 1. С. 106-110.
16. Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е. Разработка жаропрочных и износостойких наноструктурных материалов на основе порошковой меди для поршней литейного оборудования // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы (ИМТОМ-2018): сб. тр. 9-й Междунар. науч.-техн. конф. Казань: КНИАТ, 2018. С. 23-27.
17. Dovydenkov V.A., Shalunov E.P Experience of production and use of precipitation strengthened copper based materials made by mechanical alloying // *Powder Metallurgy*. 1998, no. 1, p. 372.
18. Shalunov E., Matrosov A, Chen L. Development, production and application of DISCOM® copper nanocomposites as highly resource electrode and electric contact materials: *Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition (Euro PM 2008)*. Mannheim: EPMA, 2008, pp. 33-38.
19. Шалунов Е.П., Илларионов И.Е. Создание теплопрочных композиционных материалов матрично-наполненного типа для тяжело нагруженных элементов узлов трения // *Литейщик России*. 2018. № 5. С. 25-29.
20. Шалунов Е.П., Данилов Н.В., Липатов Я.М. Разработка научных основ, технологии и оборудования для получения и обработки полуфабрикатов из дисперсно-упрочненных композиционных материалов // *Охрана труда и прогрессивные технологические процессы в литейном производстве, порошковой металлургии и машиностроении*: тез. межреспубл. науч.-практ. конф. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1990. С. 287-289.
21. Шалунов Е.П., Смирнов В.М. О механизмах формирования структуры и свойств композиционных материалов системы Cu-Al-C-O, получаемых на основе метода реакционного механического легирования // *Вестник Чувашского университета*. 2013. № 3. С. 314-322.
22. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
23. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник: в 3 т. Т. 2 / А.Я. Александров [и др.]; под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 463 с.
24. Применение пакета matlab в лабораторном и компьютерном практикуме / Ю.П. Лисовец, А.М. Ревякин, М.Н. Рычагов, С.А. Терещенко. М.: МИЭТ. 1998. 96 С.

#### Сведения об авторах

**Владимирова Юлия Олеговна** – ассистент кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия. E-mail: [yulivladimirova@mail.ru](mailto:yulivladimirova@mail.ru)

**Шалунов Евгений Петрович** – канд. техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, научный руководитель Объединенной научно-исследовательской лаборатории качества, обрабатываемости и композиционных материалов, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия. E-mail: [shalunov2000@mail.ru](mailto:shalunov2000@mail.ru)

**Илларионов Илья Егорович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и металлургических процессов, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия. E-mail: [tmilp@rambler.ru](mailto:tmilp@rambler.ru)

**CALCULATION OF PLUNGER BLANK MADE OF COPPER BASED VOLUMETRIC NANOSTRUCTURED MATERIAL FOR THE DIE CASTING MACHINES**

**Vladimirova Yuliya Olegovna.** – Assistant of Mechanical Engineering Technology Department, I. N. Ulyanov Chuvash State University, Russia, Cheboksary. E-mail: [yulivladimirova@mail.ru](mailto:yulivladimirova@mail.ru)

**Shalunov Eugeny Petrovich.** – Ph.D. (Eng.), Professor of Mechanical Engineering Technology Department; Scientific leader of the Joint research and development laboratories of mechanically alloyed nanocomposite materials, their technology and quality, I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia. E-mail: [shalunov2000@mail.ru](mailto:shalunov2000@mail.ru)

**Illarionov Ilya Egorovich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Head of Materials Science and Metallurgical Processes Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary. E-mail: [tmilp@rambler.ru](mailto:tmilp@rambler.ru)

*Abstracts.* A method for determining the dimensions of plunger blank for die casting machines based on the strength calculation of the plunger simultaneously affected by force loads, high temperature and friction forces is proposed. The calculation of the minimum permissible wall and bottom thickness of the plungers having different external diameters is made on the bases of the obtained results in case when the plunger is made of a heat and wear – resistant volumetric nanostructured material of Cu-Al-C-O system.

*Keywords:* plunger, die casting machines, powder metallurgy, volumetric nanostructured material, calculations, blank, plunger wall, plunger bottom.

---

Ссылка на статью:

Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е. Расчет заготовки поршня из объемного наноструктурного материала на основе меди для машин литья под давлением // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 29-36.

Vladimirova Yu. O., Shalunov E. P., Illarionov I. E. Calculation of plunger blank made of copper based volumetric nanostructured material for the die casting machines *Teoriia i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 29, no. 2, pp.29-36.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ПРОКАТКИ КАК СПОСОБА ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ 5083/2024 И 5083/1070

**Аннотация:** Рассмотрен процесс аккумулярующей прокатки алюминиевых биметаллических композитов 5083/2024 и 5083/1070. Представлены расчетные характеристики процесса на основе моделирования в программном комплексе DEFORM 2D. Проанализировано состояние границ соединяемых металлов в биметаллических композитах. Получены результаты, позволяющие оценить закономерности пластического течения соединяемых разнородных металлов в очаге деформации при аккумулярующей прокатке, а также изучить некоторые особенности формирования интерметаллидного слоя.

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, алюминиевые сплавы, интенсивная пластическая деформация, ультрамелкозернистая структура, аккумулярующая прокатка.

### Введение

В последнее время использование алюминиевых сплавов в различных отраслях техники становится все более популярным. Применение высокопрочных материалов, особенно при криогенных температурах, увеличило спрос на получение мелкозернистой структуры в алюминиевых сплавах различных серий. Основным способом получения таких структур остаются методы интенсивной пластической деформации. На сегодняшний день алюминиевые сплавы являются легкими материалами, обладающими высокой удельной прочностью и пластичностью. Данный синергетический эффект позволяет алюминиевым сплавам соответствовать высокому уровню современного технологического развития. Все чаще производят биметаллические соединения по типу композитов из различного сочетания серий алюминиевых сплавов [1-6]. Выбор сочетания основан на двух основных положениях: использование сплавов с противоположными свойствами (1xxx и 5xxx, 2xxx и 5xxx) или, наоборот, совмещение двух похожих между собой (5xxx и 7xxx). Очень важно отметить способы сварки сплавов всех перечисленных серий. Так, например, при получении композита сваркой взрывом на образование прочного интерметаллидного слоя влияет уровень внедрения одного слоя алюминиевого сплава в другой. Наряду с высоким уровнем прочности сварных соединений, большую роль играет в этом вопросе уровень пористости сварных швов, который обязательно должен учитываться. Также вопрос состоит в том, как в итоге будет обрабатываться данный шов и будет ли он поддаваться криогенной обработке при определенном уровне установленных температур. Соответственно

здесь дополнительная криогенная обработка сплавов выступает катализатором для получения наилучших механических характеристик. Было выявлено, что именно алюминий и его сплавы являются наилучшим материалом, способным воспринимать криогенную обработку, пластичность данных материалов возрастает наравне с прочностью [7, 8]. Кроме перечисленных свойств важны другие характеристики металлов, такие как свариваемость, что было указано выше, а также коррозионная стойкость, теплопроводность, коэффициент термического расширения и т.д. Как раз последние указанные характеристики влияют на термодинамический разогрев, происходящий в процессе обработки алюминия. Особенно остро данный вопрос стоит при применении интенсивной пластической деформации в процессе получения ультрамелкозернистой структуры в алюминиевых сплавах. Известно, что при невысоких обжатиях разогрев полосы составит от 150 °С, а при больших обжатиях, например в 50%, разогрев в очаге деформации может достичь 260 °С [9]. В связи с этим применение криогенной обработки становится целесообразным.

### Метод исследования и используемые материалы

Целью данной работы являлось конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния композитов при аккумулярующей прокатке алюминиевых сплавов 1070, 2024 и 5083, химический состав которых представлен в таблице.

Химический состав алюминиевых сплавов 1070, 2024, 5083

Сплав	Mn	Si	Mg	Fe	Cu	Cr	Ti	Zn	Al
1070	0.03	0.15	0.02	0.16	0.01	-	0.01	0.04	99.7
2024	0.019	0.422	0.473	0.178	0.02	0.001	0.15	0.25	98.487
5083	0.682	0.091	4.479	0.285	0.027	0.104	0.007	0.014	94.282

© Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., 2019



В работе представлены результаты численного исследования симметричного и асимметричного случаев аккумулирующей прокатки алюминиевых сплавов. Аккумулирующая прокатка имеет свои преимущества перед подавляющим большинством методов интенсивной пластической деформации [10-12]. Например, данный процесс не требует сложного оборудования, возможно использование стандартного прокатного стана. При этом сплавы алюминия являются наилучшим материалом, поддающимся обработке методом аккумулирующей прокатки. Технология данного процесса, представленная на рис. 1, состоит в начальной обработке полос, соединения их, например, сваркой взрывом, прокатки, последующей резки на равные части и повторении предыдущих действий несколько раз до получения требуемой толщины материала и его свойств.

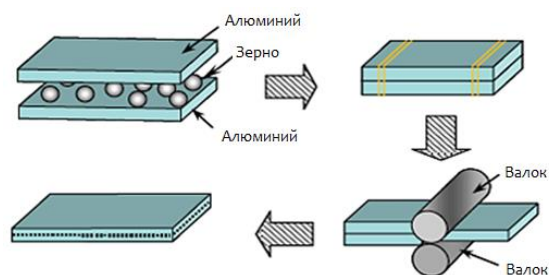


Рис. 1. Технология процесса аккумулирующей прокатки

Процесс моделировался в программном комплексе Deform 2D. Система моделирования, построенная на методе конечных элементов в двумерной постановке задач, позволяет определять характеристики напряженно-деформированного состояния материалов, преимущественно металлов при обработке их давлением. Deform 2D может произвести анализ сложных сред с детальным изучением влияния нескольких исследуемых объектов с разными или противоположными свойствами при выбранных методах воздействия на них. Данный программный комплекс дает возможность с высокой точностью и уровнем реалистичности смоделировать процесс деформации материала в производственных условиях [13].

При моделировании параметры процесса были следующие: композиты были составлены из сплавов алюминия 5083/2024 и 5083/1070. Толщина исходной заготовки составляла 2 мм, модель трения была выбрана согласно закону Кулона, значение коэффициента трения приняли равным 0,3. Данное значение было подобрано исходя из ранее

проведенных экспериментов [14, 15]. Скорость вращения валков составляла 10 об/мин при диаметре в 250 мм. Показателем асимметрии являлась разность скоростей валков, в зависимости от варианта этот параметр варьировался от 10 до 50 %. Относительное обжатие во всех вариантах расчета было постоянным и равным 50 %.

#### Полученные результаты моделирования

Было проанализировано состояние границ двух соединяемых металлов в алюминиевых композитах. В частности, была выполнена оценка и анализ поведения слоев композита в очаге деформации. Скорость верхнего валка в асимметричном случае была выше скорости нижнего валка. При этом расположение слоев композита было следующим: верхний слой составлял сплав 5083 (более прочный), а нижний слой – 2024 или 1070 (более мягкий). Течение металлов на границе раздела оценивалось в пределах очага деформации.

В случае с прокаткой композита 5083/2024 поведение материала при изменении отношения скоростей валков имеет определенные закономерности (рис.2). Кривые имеют схожий вид, особенно в случаях симметричной прокатки и асимметричной с рассогласованием скоростей валков в 10 %, а также при рассогласовании скоростей валков в 20 и 40 %. При этом отклонение сплава 5083 от центральной оси композита наиболее ярко выражено именно при данных параметрах. Также с увеличением рассогласования скоростей валков верхняя граница уровня отклонения увеличивается от 0,015 до 0,08 мм. Резкие нижние и верхние экстремумы говорят о неравномерности деформации и неравномерном распределении слоев друг относительно друга.

При аккумулирующей прокатке композита 5083/1070 кривые имеют похожий вид (рис. 3). При увеличении рассогласовании скоростей валков происходит увеличение неравномерности деформации: это подтверждают значения уровня отклонения слоев металла друг от друга. Минимальные отклонения наблюдаются в случае симметричной прокатки в значениях 0,015 мм, тогда как при рассогласовании скоростей валков в 50 % показывает отклонение в 0,12 мм. Возрастание отклонения слоев от центра соединения заготовок происходит равномерно от случая к случаю. Соответственно при увеличении рассогласования скоростей валков наблюдается увеличение неравномерности деформации в интерметаллидном слое.

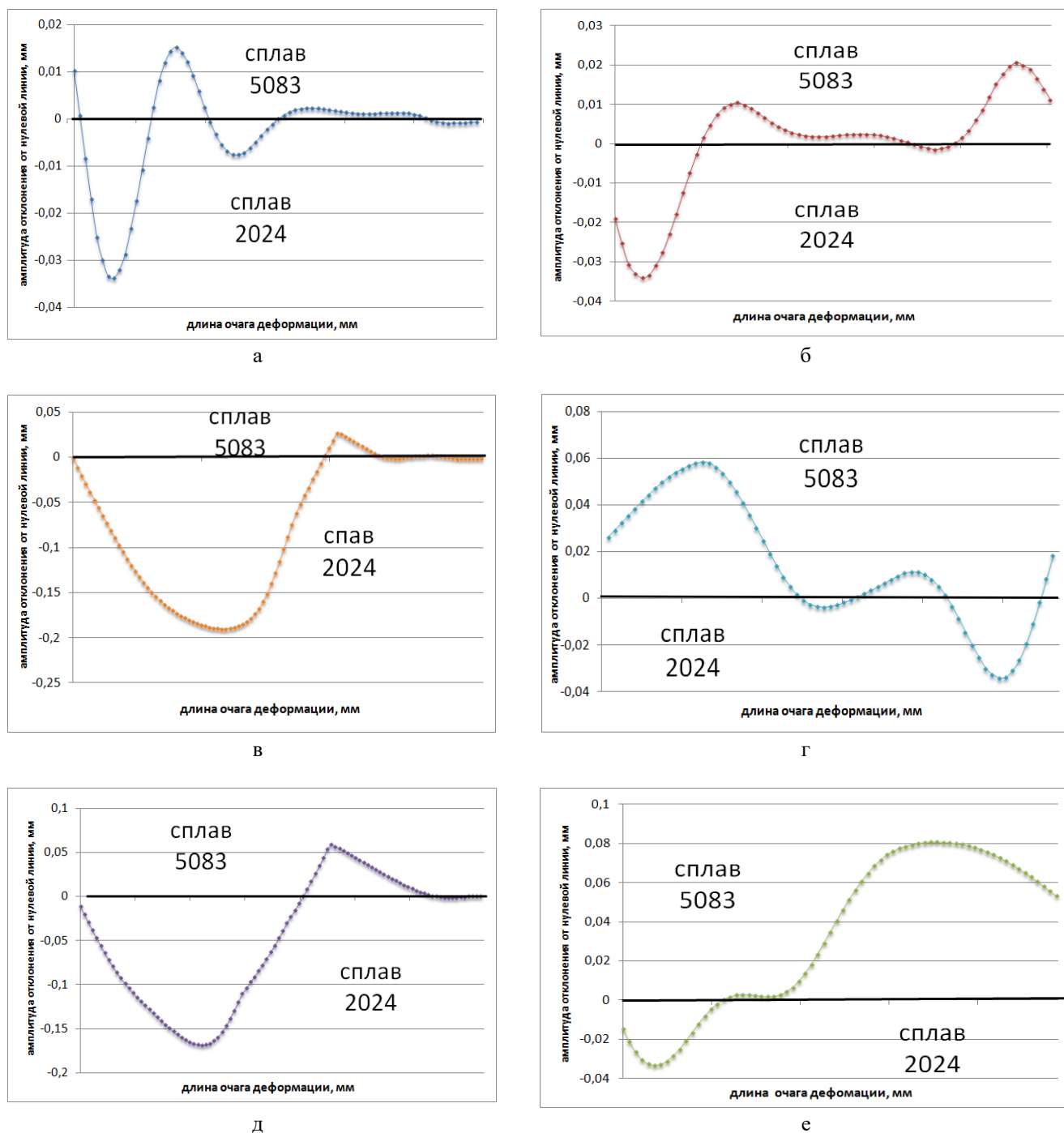


Рис. 2. Распределение слоев алюминиевых сплавов 2024 и 5083 по длине очага деформации (а – симметричная прокатка композита 5083/2024; б – асимметричная прокатка композита 5083/2024 при рассогласовании скоростей валков 10 %; в - асимметричная прокатка композита 5083/2024 при рассогласовании скоростей валков 20 %; г - асимметричная прокатка композита 5083/2024 при рассогласовании скоростей валков 30 %; д - асимметричная прокатка композита 5083/2024 при рассогласовании скоростей валков 40 %; е - асимметричная прокатка композита 5083/2024 при рассогласовании скоростей валков 50 %)

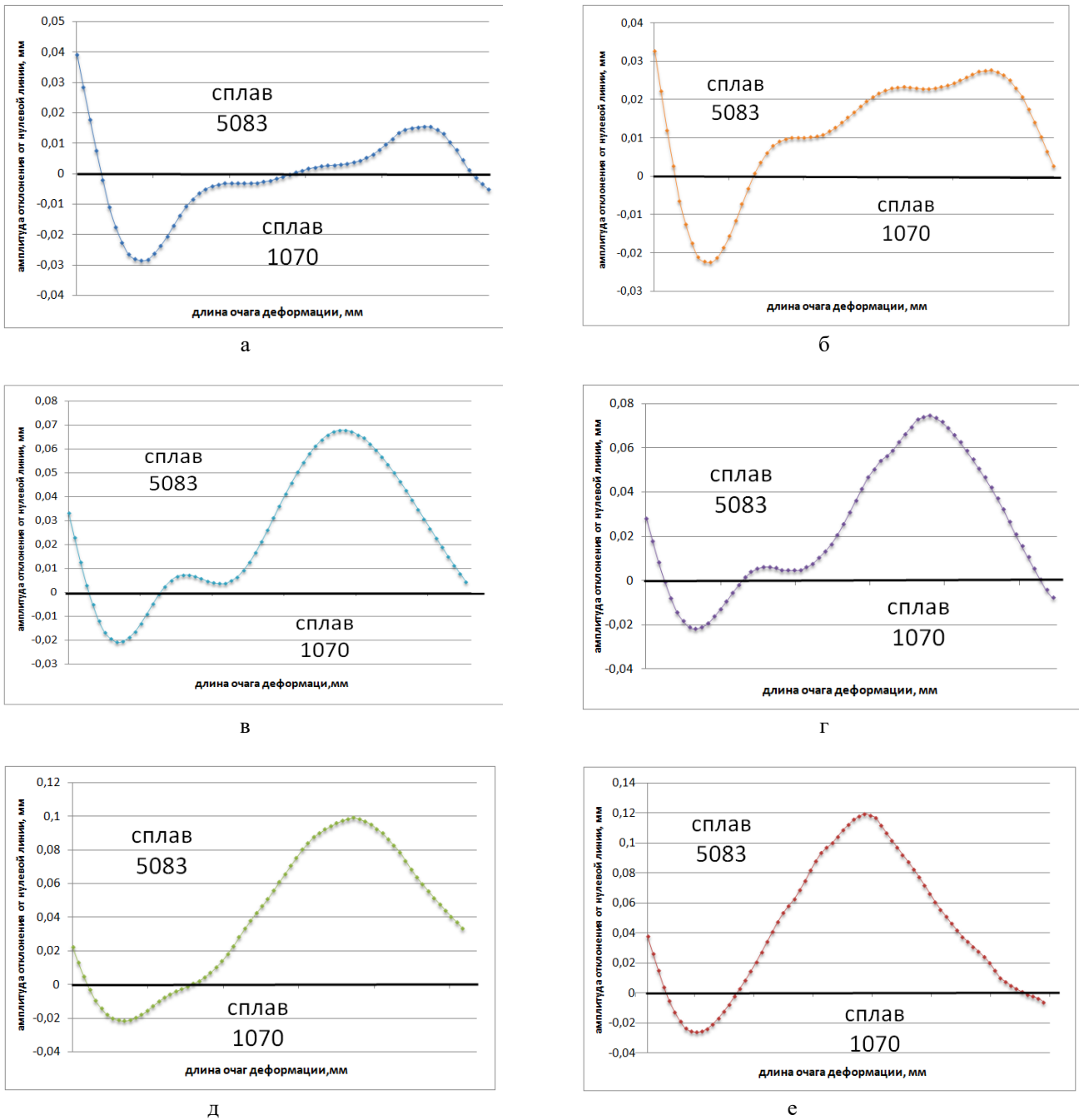


Рис.3. Распределение слоев алюминиевых сплавов 1070 и 5083 по длине очага деформации (а – симметричная прокатка композита 5083/1070; б – асимметричная прокатка композита 5083/1070 при рассогласовании скоростей валков 10 %; в - асимметричная прокатка композита 5083/1070 при рассогласовании скоростей валков 20 %; г - асимметричная прокатка композита 5083/1070 при рассогласовании скоростей валков 30 %; д - асимметричная прокатка композита 5083/1070 при рассогласовании скоростей валков 40 %; е - асимметричная прокатка композита 5083/1070 при рассогласовании скоростей валков 50 %)

Необходимо отметить, что неравномерность деформации обуславливается определенными причинами: особенностями оборудования и формоэлементами материала, наличием химических ликваций и распределением температуры по объему заготовки, условиями трения, деформациями и т.д.

[16]. В случае влияния всех этих факторов в совокупности, неравномерность деформации неизбежна.

**Выводы**

Аккумулирующая прокатка имеет свои преимущества перед подавляющим большинством



методов интенсивной пластической деформации. С ее помощью возможно получать мелкозернистую структуру. Было выявлено, что наибольшая неравномерность наблюдается при аккумулирующей прокатке композита 5083/2024 с обжатиями 50 % и значением коэффициента трения 0,3 при рассогласовании скоростей в 50 % - отклонение от оси среднего слоя суммарно составляет 0,135 мм. Наименьшие отклонения наблюдаются в случае симметричной прокатки и асимметричной с рассогласованием скоростей в 10 %. При обработке алюминиевых сплавов 5083/1070 наблюдается увеличение разницы распределения слоев по длине очага деформации при увеличении разности скоростей валков. Наименьшие отклонения соответствуют первому случаю, наибольшее отклонение составляет суммарно 0,148 мм. Для получения требуемой структуры при обжатиях в 50 % требуемое значение рассогласования скоростей валков должно составлять минимум 20 % для композита 5083/1070 и 40 % для 5083/2024.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант Президента Российской Федерации, контракт № 075-02-2018-347 от 16.11.2018 г.).*

#### Список литературы

1. M. Heydari Vini Mechanical Properties and Microstructural Evolution of AA5083/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites Fabricated by Warm Accumulative Roll Bonding// Advanced Design and Manufacturing Technology. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 10-17.
2. M. Heydari Vini Mechanical properties and bond strength of bimetallic AA1050/AA5083 laminates fabricated by warm-accumulative roll bonding // Canadian Metallurgical Quarterly. 2017. P.45-50.
3. Helbert A., Paillard P., Brisset F. Microstructure, mechanical properties and texture of an AA6061/ AA5754 composite fabricated by cross accumulative roll bonding Article in Materials Science and Engineering // Materials Science & Engineering. May 2015, vol. 640, no.1, 2015, pp. 235–242.
4. Reihanian M., Lari Baghal S.M., Haddadian F. K. A Comparative Corrosion Study of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC Hybrid Composite Fabricated by Accumulative Roll Bonding (ARB). //Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, vol. 49, no.1, 2016, pp. 29-35
5. Salimia A., Borhanian E., Emadoddin E. Evaluation of Mechanical Properties and Structure of 1100-Al Reinforced with ZrO<sub>2</sub> Nano-Particles via Accumulatively RollBonded // Procedia Materials Science, no. 11, 2015, pp. 67 – 73.
6. Nie J., Liu M. Fabrication of Al/Mg/Al Composites via Accumulative Roll Bonding and Their Mechanical Properties // Materials .Vol. 951, no. 9, 2016, pp.1-14.
7. Ambrosy F., Zanger F. An Experimental Study of Cryogenic Machining on Nanocrystalline Surface Layer Generation Procedia CIRP No. 13, 2014, pp. 169 – 174.
8. Bermingham, M.J., Kirsch, J., Sun, S., Palanisamy, S., Dargusch, M.S. New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V //International Journal of Machine Tools and Manufacture. No. 51, pp. 500-511.
9. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.К. Свердлик; МОиН РФ, ФГБОУ ВО МГТУ им.Г.И. Носова. Магнитогорск 2017. 152 с.
10. Trojanova Z., Džugan K. Influence of Accumulative Roll Bonding on the Texture and Tensile Properties of an AZ31 Magnesium Alloy Sheets // Materials, vol. 11, no. 1, January 2018.
11. Pazhuhanfarb Y., Eghbalib E. Effect of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Al6061/B4C Metal Matrix Composite Fabricated by Using Stir Casting, vol. 72, no. 2, November 2018.
12. Lenard J.G. Severe Plastic Deformation – Accumulative Roll Bonding book: Primer on Flat Rolling, December 2014.
13. Zvonov S., Klochkov Y. Computer-aided Modelling of a Latch Die Cutting in Deform -2D Software System Key Engineering Materials, vol. 685, pp. 811-815.
14. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. Study of deformed condition aluminium alloys 1070, 2024 and 5083 at asymmetric and package rolling by method final elements // Materials IIIrd international youth scientific and practical conference. 2018, №1. P. 3-5.
15. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetal during accumulative rolling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2018, №1, pp.1-4.
16. Singh B.M., Dhaliwal R.S. Asymmetric problem of a Grittith crack in a nonhomogeneous medium under shear // Journal of Elasticity, 1978, vol. 8, no. 3.

**Сведения об авторах**

**Бирюкова Олеся Дмитриевна** – аспирант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [fimapatisonchik@inbox.ru](mailto:fimapatisonchik@inbox.ru).

**Пустовойтов Денис Олегович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [pustovoitov\\_den@mail.ru](mailto:pustovoitov_den@mail.ru).

**Песин Александр Моисеевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [pesin@bk.ru](mailto:pesin@bk.ru).

---

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

**THE RESEARCH OF ACCUMULATIVE ROLL BONDING AS A METHOD OF PROCESSING ALUMINUM COMPOSITES 5083/2024 AND 5083/1070**

**Biryukova Olesya Dmitrievna** - Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [fimapatisonchik@inbox.ru](mailto:fimapatisonchik@inbox.ru).

**Pustovoitov Denis Olegovich** - Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [pustovoitov\\_den@mail.ru](mailto:pustovoitov_den@mail.ru).

**Pesin Alexander Moiseevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [pesin@bk.ru](mailto:pesin@bk.ru)

***Abstract:** The process of accumulative roll bonding of aluminum bimetallic composites 5083/2024 and 5083/1070 is considered. The calculated characteristics of the process based on modeling in the software package DEFORM 2D are presented. The state of the boundaries of the coupled metals in bimetallic composites is analyzed. The results, that allow to evaluate the regularities of plastic flow of the coupled dissimilar metals in the deformation zone during accumulative roll bonding, were obtained, as well as possibility to study some features of the intermetallic layer formation.*

***Keywords:** asymmetric rolling, aluminum alloys, severe plastic deformation, ultrafine-grained structure, accumulative roll bonding.*

---

Ссылка на статью:

Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М. Исследование метода аккумулирующей прокатки как способа обработки алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 37-42.

Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Pesin A.M. The research of accumulative roll bonding as a method of processing aluminum composites 5083/2024 and 5083/1070 *Teoriia i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 29, no. 2, pp.37-42.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

### *Уважаемые коллеги!*

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

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

### *Журнал включает в себя следующие разделы:*

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

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

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

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. Пример оформления статьи приведен в (**Приложении 1**).
- аннотация (*Abstracts*) (150-250слов), выполняется *курсивом* (*аннотация должна быть логически выстроена*);
- ключевые слова (*Keywords*) (5-15 основных терминов), выполняется *курсивом*;
- список литературы выполняется в соответствии с требованиями (пример оформления литературы приведен в (**Приложении 2**);
- сведения об авторах (*Information about authors*) должны включать: Ф.И.О. полностью, должность, место работы, ученая степень, ученое звание, контактный телефон, электронный и почтовый адреса;
- в конце статьи дается английская версия фамилий, инициалов авторов, названия статьи, авторского резюме, ключевых слов, сведений об авторах. **За качество перевода несут ответственность авторы статьи. Использование электронного переводчика не допустимо.**

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

## Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

## Пример оформления литературы

## Список литературы

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

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

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

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

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