

# **ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**№ 2 (33) 2020**

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК). Сведения о журнале содержатся в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

## **Редакционный совет**

### **Председатель ред. совета:**

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

### **Члены ред. совета:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Главный редактор:**

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

### **Научный редактор:**

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

### **Технический редактор:**

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

### **Дизайнер:**

*Е.О. Харченко*

## **© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020**

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

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

### **Адрес редакции:**

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

### **Адрес типографии:**

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

### **Адрес издателя:**

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

Выход в свет 30.06.2020. Заказ 152. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 2 (33) 2020**

---

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

---

## **Editorial Board Members**

### **Chairman:**

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

### **Honorary Board Members:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Scientific Editor:**

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

### **Technical Editor:**

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

**K.I. Rud**

### **Designer:**

**E.O. Harchenko**

## **© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2020**

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

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

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

### **Editorship address:**

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

### **Printing office:**

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

### **Editorial office:**

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

Publication date 30.06.2020. Order 152. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ</b> .....	4
Ушаков С.Н. <b>ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ «КОВШ-ПЕЧЬ»</b> .....	4
Сибэгатуллин С.К., Харченко А.С., Малиханов Ю.С., Игликова У.Ж., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. <b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ПРОМЫВКЕ ГОРНА КРЕМНЕЗЁМО-МАРГАНЦОВИСТЫМ МАТЕРИАЛОМ</b> .....	11
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ</b> .....	18
Огарков Н.Н., Шеметова Е.С., Платов С.И., Терентьев Д.В., Кальченко А.А. <b>РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ, ИСКЛЮЧАЮЩИХ ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧКИ</b> .....	18
Железков О.С., Харченко М.В., Салганик В.М., Лизов С.Б. <b>ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ГОЛОВОК СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ С ФЛАНЦЕМ</b> .....	24
Пчельников А.В., Казадаева О.А. <b>ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ QFORM ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ПРУТКОВ</b> .....	29
<b>МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ</b> .....	34
Ефимов А.В., Чернов В.П. <b>ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ 150ХНМ</b> .....	34

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS</b> .....	4
Ushakov S.N. <b>DESULFURATION OF PIPE STEEL IN THE LADLE-FURNACE UNIT</b> .....	4
Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Malikhanov Yu.S., Iglukova Ju.M., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. <b>TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF BLAST FURNACE WITH LOCAL FLUSHING HORN OF SILICA-MANGANESE MATERIAL</b> .....	11
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE</b> .....	18
Ogarkov N.N., Shemetova E.S., Platov S.I., Terentyev D.V., Kalchenko A.A. <b>CALCULATION OF DRAWING PARAMETERS OF BIMETALLIC WIRE THAT EXCLUDE LOSS OF SHELL STABILITY</b> .....	18
Zhelezkov O.S., Kharchenko M.V., Salganik V.M., Lizov S.B. <b>ENERGY-POWER PARAMETERS OF THE PROCESS OF STAMPING THE HEADS OF ROD PRODUCTS WITH A FLANGE</b> .....	24
Pchelnikov A.V., Kazadaeva O.A. <b>QFORM PROGRAMM APPLICATION FOR BILLET FORGING SIMULATION</b> .....	29
<b>MATERIAL SCIENCE AND THERMAL TREATMENT OF METALS AND ALLOYS</b> .....	34
Efimov A.V., Chernov V.P. <b>INFLUENCE OF EXTERNAL INFLUENCES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CASTINGS MADE OF 150XNM STEEL</b> .....	34

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.184.046.546.2

Ушаков С.Н.

## ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ «КОВШ-ПЕЧЬ»

**Аннотация.** В работе рассмотрена обработка трубного металла на агрегате «ковш-печь» для условий ККЦ ПАО «ММК». Установлено, что в первый период времени обработки до вдувания флюидизированной извести необходимо снизить содержание серы в металле примерно до 0,005 %, при этом удаляется чуть меньше половины (около 47 %) всей выводимой серы. В результате вдувания флюидизированной извести удаляется примерно 37 % серы и остальные 16 % – в процессе дальнейшего нахождения металла под «белым» шлаком. Средняя степень десульфурации металла составляет 80 %. Выявлена убывающая линейная зависимость содержания серы в разливаемом металле от удельного расхода флюидизированной извести. Для получения содержания серы в стали марки DNV SAWL 485 FD не более 0,0015 % удельный расход флюидизированной извести должен быть в основном не менее 2,2 кг/т, или около 800 кг на ковш. В результате вдувания флюидизированной извести и дораскисления шлака до требуемой окисленности среднее значение коэффициента распределения серы возрастает втрое – с 43 до 123, а с учетом времени до разливки металла – уже до 198 (примерно в пять раз). Установлены зависимости итогового коэффициента распределения серы от содержания оксида алюминия в шлаке первого периода времени (до вдувания извести) и от удельного расхода флюидизированной извести. Итоговый коэффициент распределения серы между шлаком и металлом изменялся в очень широком интервале: от 100 до 400. Для повышения эффективности ковшевой десульфурации трубной стали необходимо увеличивать содержание оксида алюминия в шлаке перед вдуванием флюидизированной извести, что благоприятно сказывается на снижении окисленности и вязкости шлака первого периода обработки, а также вдувать флюидизированную известь в количестве 2,2–2,8 кг/т.

**Ключевые слова:** трубная сталь, агрегат «ковш-печь», шлак, флюидизированная известь, десульфурация.

Для получения высококачественных труб в стали должно быть очень низкое содержание серы [1–5]. В современных сталеплавильных цехах десульфурация металла проводится в несколько этапов, начиная с обработки жидкого чугуна, продолжая введением твердой шлакообразующей смеси в металл при выпуске его из кислородного конвертера, и заканчивая обработкой на агрегате «ковш-печь». В работе рассмотрена обработка трубного металла на агрегате «ковш-печь» для условий ККЦ ПАО «ММК».

В кислородно-конвертерном цехе данного предприятия эксплуатируется агрегат «ковш-печь» [6–10], оборудованный трансформатором мощностью 56 МВА, электродами диаметром 508 мм, обеспечивающий нагрев металл со скоростью до 5 °С/мин.

В работе исследован массив производственных данных объемом 27 плавов. Сталь класса прочности К60 и марки DNV SAWL 485 FD имела средний химический состав (% по массе):

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0,055	0,146	1,69	0,0016	0,009	0,034	0,275
Cu	Al	N	Mo	Nb	Ti	
0,169	0,035	0,005	0,10	0,047	0,027	

Информация об изменении содержания серы в металле при обработке на агрегате «ковш-печь» (АКП) и на МНЛЗ представлена на рис. 1.

Весь процесс десульфурации металла условно делится на три временных периода: первый – от начала обработки на АКП до начала вдувания флюидизированной извести, второй – вдувание извести, третий – после окончания вдувания флюидизированной извести до взятия маркировочной пробы на МНЛЗ.

В первый период производилась усреднительная продувка металла в ковше аргоном, шлак раскислялся гранулированным алюминием в количестве 0,26 кг/т, в ковш вводилась кусковая известь и плавиковый шпат в среднем количестве около 2 и 1 кг/т соответственно. Наведенный шлак характеризовался основностью 5,3 и содержанием монооксида железа 4,3 % (усредненные значения), то есть шлак еще был недостаточно раскислен, чтобы считаться «белым». В данный период содержание серы в металле снизилось в среднем с 0,0083 до 0,0052 % (см. рис. 1).

Второй период времени (в среднем 15,5 мин) – вдувание флюидизированной извести в количестве 1,11 кг/т осуществлялось при расходе аргона 2,8 м<sup>3</sup> (средние значения параметров). В ковше был наведен «белый» шлак со средними показателями по основности – 6,6 и окисленности – 0,80 %. Содержание серы в металле уменьшилось с 0,0052 до 0,0027 % (см. рис. 1).

Третий период времени – нахождение металла после окончания вдувания флюидизированной извести под «белым» шлаком с усреднительной продувкой аргоном на АКП и до разливки металла на МНЛЗ. Из рис. 1 видно, что в этот период времени произошло снижение содержания серы в металле с 0,0027 до 0,0016 %.

Общая степень десульфурации металла (рис. 2) составила 80 %, а в первый, второй и третий периоды времени 37, 30 и 13 % (средние значения) соответственно.

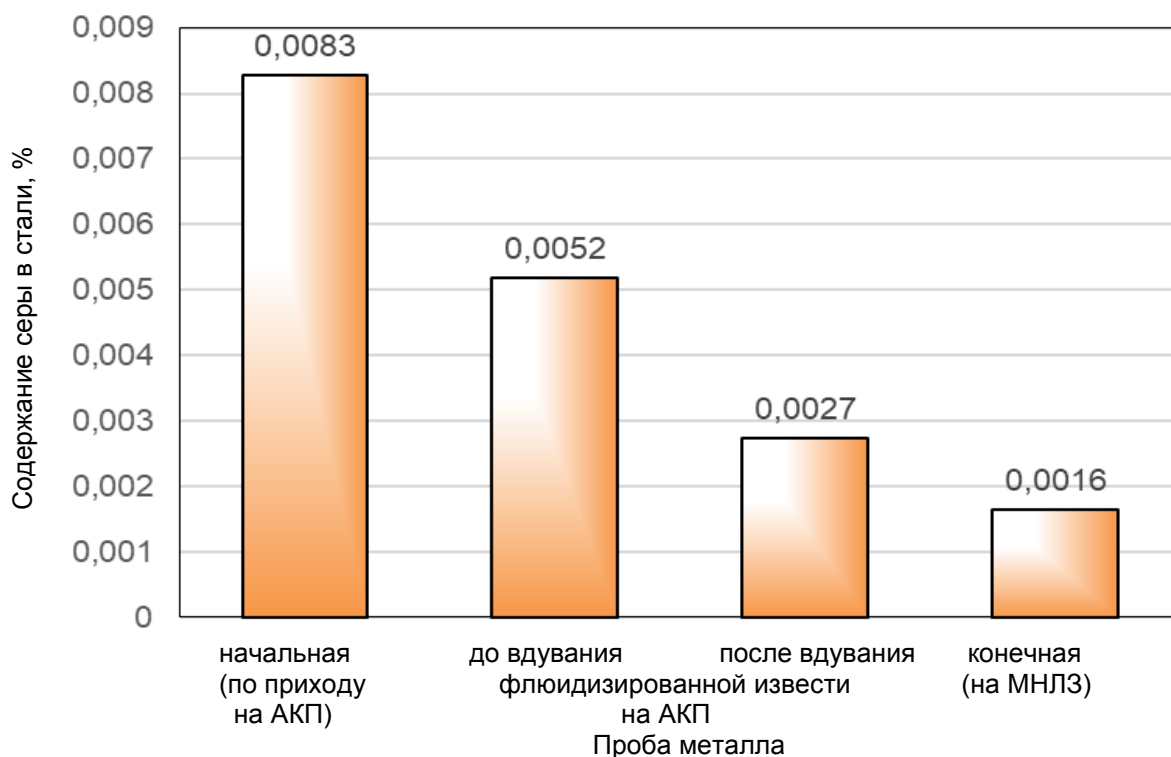


Рис. 1. Изменение содержания серы в металле

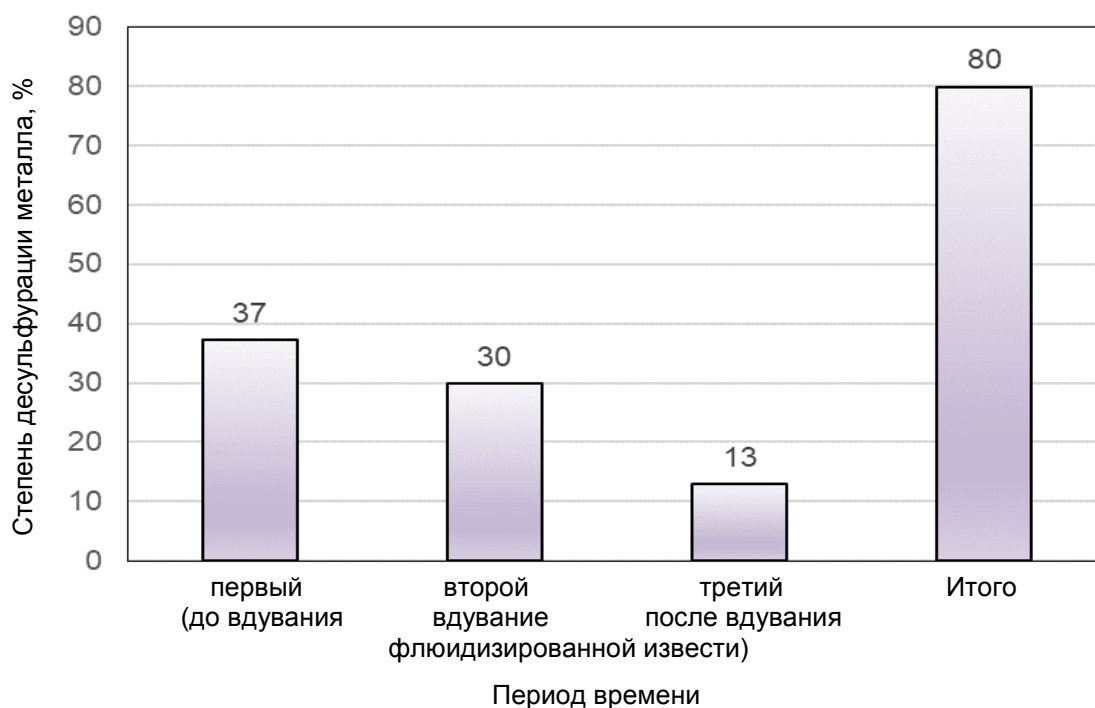


Рис. 2. Средняя степень десульфурации металла

Информация об относительном количестве удаленной из металла серы приведено на рис. 3. Из него следует, что наибольшее количество серы (46,6 %) было удалено в первый период времени до вдувания флюидизированной извести, в результате вдувания извести – 37,3 % и до начала разливки – 16,1 %.

На рис. 4 показана зависимость содержания серы

в маркировочной пробе металла ( $[S]$ , %) от удельного расхода флюидизированной извести ( $g_{y\partial}$ , кг/т) на АКП. Данная зависимость описывается уравнением

$$[S] = 0,0031 - 0,0008 \cdot g_{y\partial}, \quad r = 0,637, \quad r_{0,001} = 0,597. \quad (1)$$

Зависимость (1) является статистически значимой с вероятностью 99,9 %.

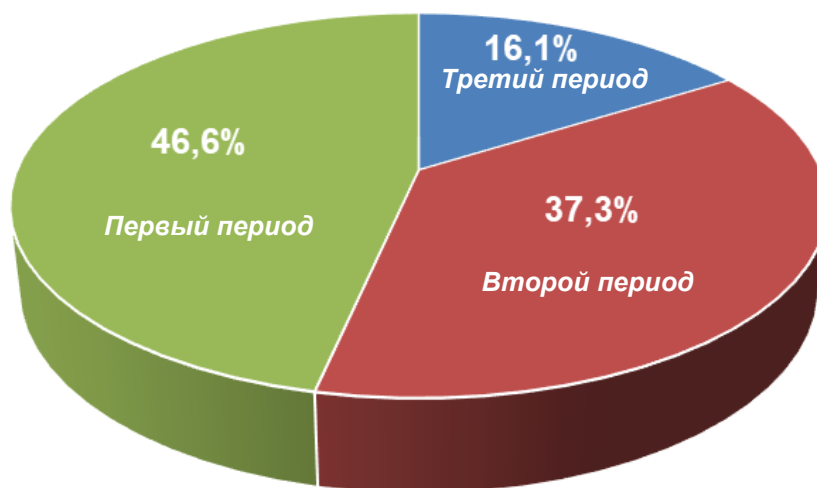


Рис. 3. Относительное количество удаленной серы в различные периоды времени

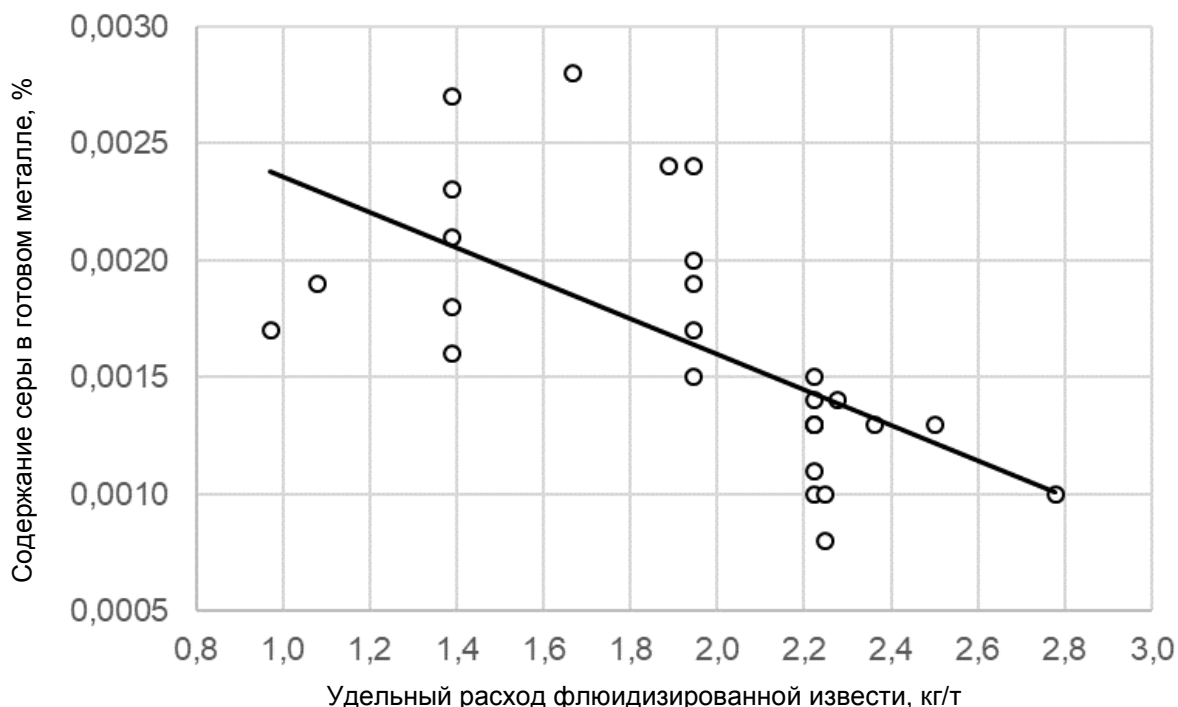


Рис. 4. Зависимость содержания серы в маркировочной пробе металла от удельного расхода флюидизированной извести на АКП

Из рис. 4 видно, что для получения содержания серы в стали марки DNV SAWL 485 FD не более 0,0015 % удельный расход флюидизированной извести должен быть в основном не менее 2,2 кг/т, или около 800 кг на ковш.

Удаленная в процессе ковшевой обработки сера из металла переходит в шлак, что приводит к изменению перераспределения ее между шлаком и металлом, а значит – к изменению значения коэффициента распределения этого элемента. Усредненные значения коэффициента распределения серы в различные периоды времени представлены на рис. 5.

В процессе исследования были отобраны всего две пробы шлака: перед вдуванием флюидизированной извести и в конце ковшевой обработки на АКП. Для периода времени, когда производилась разливка металла, значение итогового коэффициента рассчитывалось как отношение содержания серы в шлаке для конца обработки на АКП к маркировочному содержанию серы в металле. Поэтому полученное значение коэффициента получилось несколько заниженным. Из

рис. 5 видно, что в результате вдувания флюидизированной извести и дораскисления шлака до требуемой окисленности среднее значение коэффициента распределения серы возрастает втрое – с 43 до 123, а с учетом времени до разливки металла – уже до 198 (примерно в пять раз).

При анализе данных выявлены зависимости итогового коэффициента распределения серы ( $L_s$ ) от содержания оксида алюминия в шлаке ( $(Al_2O_3)$ , %) первого периода времени (до вдувания извести) и от удельного расхода флюидизированной извести ( $g_{yd}$ , кг/т):

$$L_s = 12,05 \cdot (Al_2O_3) + 5,44, \quad r = 0,608; \quad (2)$$

$$L_s = 89,72 \cdot g_{yd} + 24,51, \quad r = 0,556; \quad r_{0,01} = 0,487. \quad (3)$$

Линейные зависимости (2) и (3) существуют с вероятностью 99,9 и 99,0 % соответственно. Графические изображения найденных зависимостей приведены на рис. 6 и 7.

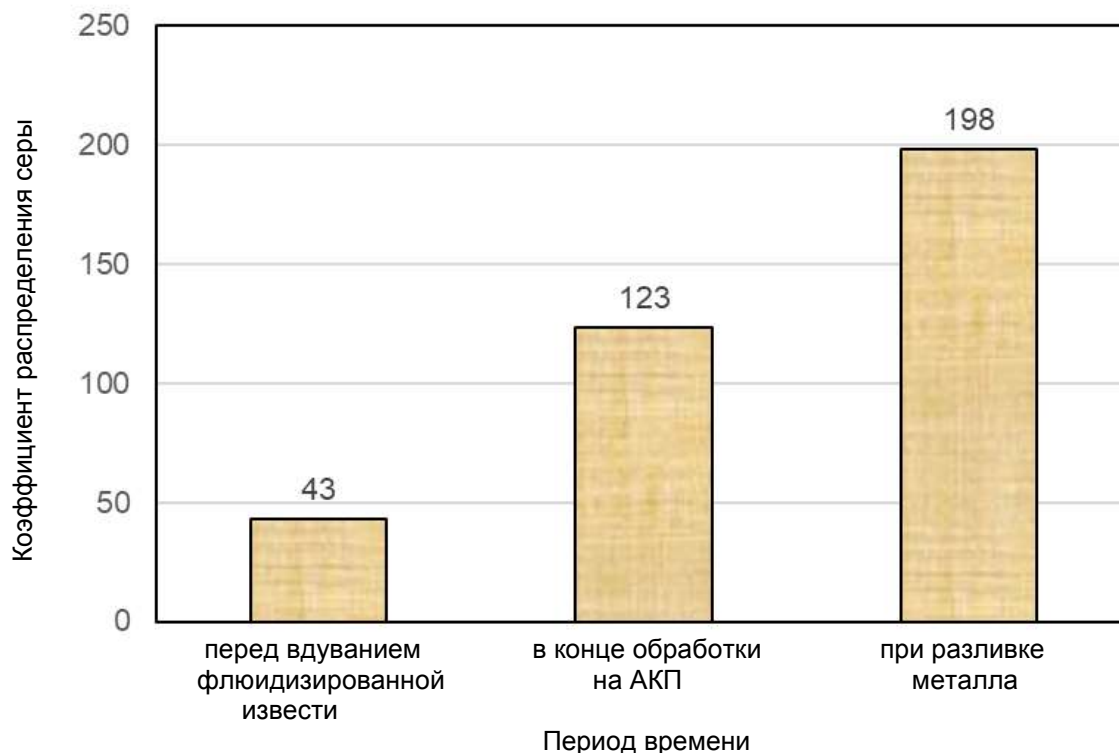


Рис. 5. Усредненные значения коэффициента распределения серы между шлаком и металлом

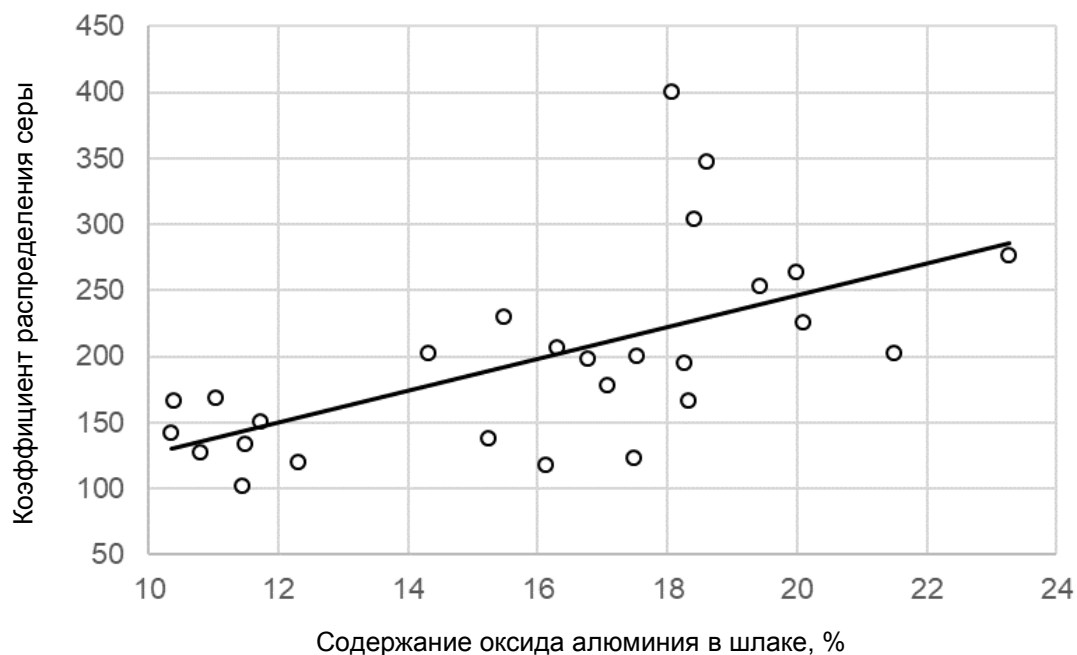


Рис. 6. Зависимость итогового коэффициента распределения серы от содержания оксида алюминия в предварительно раскисленном шлаке первого периода обработки

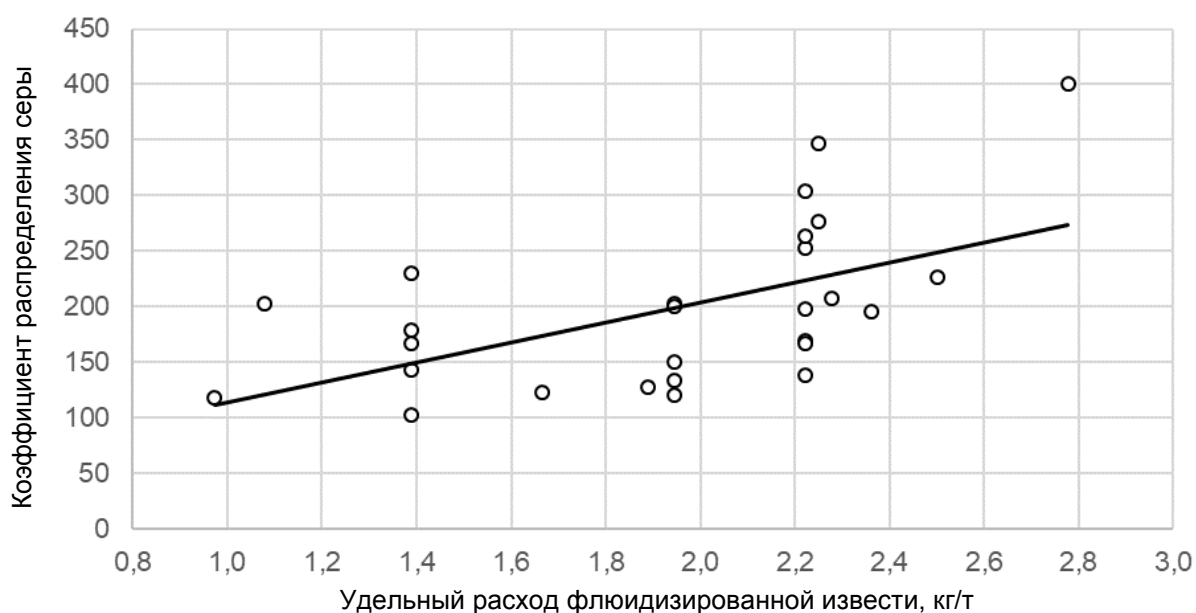


Рис. 7. Зависимость итогового коэффициента распределения серы от удельного расхода флюидизированной извести

Из рисунков следует, что итоговый коэффициент распределения серы между шлаком и металлом изменялся в очень широком интервале: от 100 до 400. Для повышения эффективности ковшевой десульфурации трубной стали необходимо увеличивать содержание оксида алюминия в шлаке перед вдуванием флюидизированной извести, что благоприятно сказывается на

снижении окисленности и вязкости шлака первого периода обработки, а также вдувать флюидизированную известь в количестве 2,2–2,8 кг/т.

В результате проведенного исследования десульфурации трубной стали на агрегате «ковш-печь» установлено, что в первый период времени обработки до вдувания флюидизированной извести необходимо



снижать содержание серы в металле примерно до 0,005 %, при этом удаляется чуть меньше половины (около 47 %) всей выводимой серы. В результате вдувания флюидизированной извести удаляется примерно 37 % серы и остальные 16 % – в процессе дальнейшего нахождения металла под «белым» шлаком. Средняя степень десульфурации металла составляет 80 %. Выявлена убывающая линейная зависимость содержания серы в разливаемом металле от удельного расхода флюидизированной извести. Для получения содержания серы в стали марки DNV SAWL 485 FD не более 0,0015% удельный расход флюидизированной извести должен быть в основном не менее 2,2 кг/т, или около 800 кг на ковш. В результате вдувания флюидизированной извести и дораскисления шлака до требуемой окисленности среднее значение коэффициента распределения серы возрастает втрое – с 43 до 123, а с учетом времени до разливки металла – уже до 198 (примерно в пять раз). Установлены зависимости итогового коэффициента распределения серы от содержания оксида алюминия в шлаке первого периода времени (до вдувания извести) и от удельного расхода флюидизированной извести. Итоговый коэффициент распределения серы между шлаком и металлом изменялся в очень широком интервале: от 100 до 400. Для повышения эффективности ковшевой десульфурации трубной стали необходимо увеличивать содержание оксида алюминия в шлаке перед вдуванием флюидизированной извести, что благоприятно сказывается на снижении окисленности и вязкости шлака первого периода обработки, а также вдувать флюидизированную известь в количестве 2,2–2,8 кг/т.

#### Список литературы

1. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / Колпаков С.В., Старов Р.В., Смоктий В.В. и др. М.: Машиностроение, 1991. 464 с.

2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. М.: Теплотехник, 2007. 528 с.
3. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали. М.: Теплотехник, 2008. 528 с.
4. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали. М.: Теплотехник, 2008. 544 с.
5. Производство стали на агрегате «ковш-печь» / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др.; под науч. ред. Д.А. Дюдкина. Донецк: ООО «Юго-Восток», 2003. 300 с.
6. Ковшечная обработка стали с вдуванием флюидизированной извести / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, В.В. Мошкунов // Теория и технология металлургического производства. 2016. №2 (19). С. 26–29.
7. Технология производства трубной ультранизкосернистой стали / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // Черные металлы. 2019. №12 (1056). С. 26–31.
8. Ковшовая десульфурация конвертерной трубной низкосернистой стали / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // Металлург. 2018. №7. С. 50-53.
9. Освоение комплекса внепечной обработки стали и МНЛЗ №6 ОАО «ММК» / Б.А. Сарычев, Ю.А. Чайковский, О.А. Николаев и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2011. №2. С. 42–45.
10. Колесников Ю.А., Буданов Б.А., Столяров А.М. Металлургические технологии в высокопроизводительном конвертерном цехе: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 379 с.

#### Сведения об авторах

**Ушаков Сергей Николаевич** – заместитель генерального директора ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия. E-mail: infommk@mmk.ru

## DESULFURATION OF PIPE STEEL IN THE LADLE-FURNACE UNIT

**Sergey N. Ushakov** – Vice-General Director of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519) 24-40-09. E-mail: infommk@mmk.ru

**Abstract:** The processing of pipe metal in the ladle-furnace unit for the conditions of BOF shop, PJSC MMK is presented in the paper. It was established that in the first period of processing before the injection of fluidized lime, it is necessary to reduce the sulfur content in the metal till 0.005%. As a result of the injection of fluidized lime, approximately 37% of sulfur is removed and the remaining 16% is removed during further treatment of metal with a “white” slag. The average degree of metal desulfurization is 80%. A decreasing linear dependence of the sulfur content in the cast metal on the specific consumption of fluidized lime was revealed. For obtaining a sulfur content of DNV SAWL 485 FD steel of not more than 0.0015%, the specific consumption of fluidized lime should be basically not less than 2.2 kg per tone. As a result of the fluidized lime injection and the reduction of slag, the average value of the sulfur distribution coefficient increases from 43 to 123 (taking into account the time before casting the metal - up to 198 (about five times)). The dependences of the final sulfur distribution coefficient on the content of aluminum oxide in the slag of the first period (before the injection of lime) and on the specific consumption of fluidized lime are established. The final coefficient of sulfur distribution between the slag and the metal was varied in a very wide range: from 100 to 400. To increase the efficiency of ladle desulfurization of pipe steel, it is necessary to increase the content of aluminum oxide in the slag before blowing fluidized lime/ It favorably affects the reduction of oxidation and viscosity of the slag of the first processing period, as well as injection of fluidized lime in an amount of 2.2–2.8 kg per tone.

**Keywords:** pipe steel, ladle-furnace unit, slag, fluidized lime, desulfurization.

---

Ссылка на статью:

Ушаков С.Н. Десульфурация трубной стали на агрегате «ковш-печь»// Теория и технология металлургического производства. 2020. №2(33). С. 4-10.

Ushakov S.N. Desulfuration of pipe steel in the ladle-furnace unit. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 4-10.

УДК 669.162.24

Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Малиханов Ю.С., Игликова У.Ж., Семенюк М.А., Бегинюк В.А.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ПРОМЫВКЕ ГОРНА КРЕМНЕЗЁМО-МАРГАНЦОВИСТЫМ МАТЕРИАЛОМ**

***Аннотация.** На доменной печи полезным объёмом 1370 м<sup>3</sup> ПАО «ММК» исследовали параметры доменной плавки, в том числе показатели дренажной способности коксовой насадки в горне, при использовании в составе шихты промывочного материала. В специальном периоде загружали кремнезёмо-марганцовистый материал, содержащий 15,8% марганца и 45 % SiO<sub>2</sub>, в локальную зону, соответствующую станциям № 6-7 углового положения лотка БЗУ, для промывки горна печи в зоне, соответствующей рудному гребню. Применение его в количестве 36 кг/т чугуна на период длительностью 6 сут обеспечило улучшение дренажной способности коксовой насадки в горне печи по ряду показателей: снижение количества шлака, остающегося в нём после выпуска продуктов плавки, на 4,46%; индекса DMI на 13,07%; перепада температур охлаждающей воды холодильников горна на 0,92%; среднеквадратического отклонения количества шлака между лотками на 0,92% при увеличении растворимости углерода в чугуне на 1,63%. Улучшение дренажной способности горна печи обеспечило повышение технико-экономических показателей плавки. Уменьшение удельного расхода кокса составило 4,4 кг/чугуна, повышение производительности – 10 т/сут.*

***Ключевые слова:** доменная печь, чугун, шлак, промывка горна, кремнезёмо-марганцовистый материал, кокс.*

**Введение**

Промывка горна доменной печи является составляющей технологии производства чугуна на предприятиях РФ. Имеются различные варианты её осуществления [1-11]. В ПАО «ММК» ранее исследована промывка специально произведенным высокозакисным агломератом на двух доменных печах полезным объёмом 1370 м<sup>3</sup> [12]. На одной из них проплавили 495 т агломерата с содержанием FeO 29,3%, а на другой – 460 т с содержанием FeO 27,6%. При этом в железорудной части шихты печей содержание FeO повысилось с 7,9 до 27,5 и с 9,3 до 21,3% соответственно. Улучшение показателей промывающего действия высокозакисного агломерата свидетельствовало о достижении цели на обеих печах. Использование высокозакисного агломерата, произведенного на агломашине с однослойной загрузкой без тракта укладки постели, получили в среднем по двум печам снижение удельного расхода топлива-восстановителя на 7,7 кг/т чугуна и рост производительности на 0,23%.

На одной из печей комбината изучали возможность использования шлака от выплавки ферромарганца [13]. Проплавили 757 т шлака доменного производства ферромарганца. Получено 22995 т чугуна. Расход шлака составил 33 кг/т чугуна. Приход марганца возрос в 1,95 раза, содержание его в чугуне увеличилось с 0,198 до 0,396%. Содержание MnO в шлаке возросло с 0,197 до 0,339%. Коэффициент перехода марганца в чугун составил в базовом периоде 0,77, в промывочном – 0,67. Для промывки оказалось достаточно 5 сут. Тепловые нагрузки на третий ряд горновых холодильников увеличились на 16%. Рост производительности печи составил 20 т/сут, снижение удельного расхода кокс – 0,6 кг/т чугуна.

Опробовали применение брикетов, произведен-

ных из окалины со связующими [14]. Перед загрузкой подач с брикетами за предшествующие ей 5 сут устанавливали основность шлака по  $(CaO+MgO)/SiO_2$  в пределах 0,90-0,95 от средней величины основности и содержание кремния в чугуне в пределах 1,15-1,25 от средней величины его содержания в чугуне. Загрузку брикетов осуществляли в циклическом режиме по станциям вращающегося распределителя шихты конусного загрузочного устройства или по угловым положениям лотка лоткового устройства. При этом заменяли 30-100% железорудного сырья брикетами в 2-10% загруженных подач. Загрузку брикетов производили до уменьшения отношения нижнего перепада давления газов в печи в первой половине периода работы между выпусками чугуна и шлака к величине нижнего перепада давления газов во второй половине этого периода до 0,8-0,95. Проявилась целесообразность увеличения прочности брикетов в соответствии с условиями, при которых они перемещаются от ковшника до горна.

Исследовали способ промывки доменной печи, включающий загрузку основных компонентов шихты и периодическую загрузку доз промывочного материала в виде металлофлюса, содержащего CaO, MnO, FeO, и SiO<sub>2</sub>, совместно с кварцитом [15]. Результаты исследований использовали при внедрении режима загрузки кремнезёмо-марганцовистого материала в локальную зону, соответствующую станциям №6-7 углового положения лотка БЗУ, для промывки горна печи в зоне, соответствующей рудному гребню.

В варианте промывки загрузкой в печь ферросилиция совместно с коксом [16] выделяется дополнительное тепло от окисления кремния и железа в зоне горения. Количество выделяющегося тепла на 1 кг кремния составляет 30700 кДж, на 1 кг железа – 4700 кДж, на 1 кг ферросилиция марки ФС – 65:  $30700 \times 0,65 \times 0,35 \times 4700 = 21600$  кДж. Из зоны горения в горн печи поступают перегретые SiO<sub>2</sub> и FeO.

© Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Малиханов Ю.С., Игликова У.Ж., Семенюк М.А., Бегинюк В.А., 2020

Оксид железа, потребляя углерод на восстановление, обеспечивает очистку горна от коксового мусора и спели. Кремнезём, взаимодействуя с высокоосновными силикатами, переводит их в низкоосновные ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) с уменьшением температуры плавления и вязкости. Поступление  $\text{SiO}_2$  и  $\text{FeO}$  в перегретом виде сопровождается повышением температур в горне, что обеспечивает дополнительное снижение вязкости шлака, а также чугуна, вывод из печи масс, находящихся до этого в непрогретом вязком состоянии. Чем выше содержание кремния в ферросилицие, тем больше тепла выделяется на 1 кг этого сплава. Выделение тепла в зоне горения от окисления кремния и железа повышает температуру газов, образующихся в ней и поднимающихся в последующем вверх. Это улучшает теплопередачу в нижней части печи, создаёт благоприятные условия для восстановления трудновосстановимых элементов, снижает температуру газов на колошнике. Способ может быть эффективным, но требует дорогостоящего промывочного материала.

Использование неофлюсованных окатышей в промывочном режиме, наряду с очисткой горна, сопровождается ускоренным разрушением футеровки низа шахты, запечиков и распара [17].

Промывочный эффект достигался при снижении реакционной способности кокса с повышением горячей прочности [18]. Однако возможности реализации этого направления в ПАО «ММК» отсутствуют.

Некоторого улучшения дренажной способности кокса в горне удавалось обеспечить технологическими мероприятиями доменной плавки [19 – 31].

В связи с изложенным разработали и внедрили в ПАО «ММК» режим промывки горна загрузкой кремнезёмо-марганцовистого материала в локальную зону колошникового пространства печи. Основанием для определения технологических параметров доменной плавки послужили физическое и математическое моделирование с испытанием отдельных составляющих [32, 33].

### Материалы исследования

Средний химический состав поступающего компонента шихты для промывки приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав кремнезёмо-марганцовистого материала, %

Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	S
12,3	45,0	3,76	0,45	4,44	0,036	15,78	0,038

Характеризующие его основные соотношения следующие:  $\text{Fe}/\text{Mn} = 0,78$ ;  $\text{SiO}_2/\text{Fe} = 3,66$ ;  $\text{SiO}_2/\text{Mn} = 2,85$ ;  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,08$ ;  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 10,14$ ;  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2 = 0,09$ ;  $\text{CaO}/\text{MgO} = 8,36$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO} = 9,87$ . Содержание  $\text{SiO}_2$ , превышающее  $\text{CaO}$  на 41,24 %, участвовало в промывке. Повышенное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  было допустимым вследствие приемлемой концентрации его

в остальных компонентах шихты. Содержание серы меньше, чем в использованном агломерате. Содержание фосфора выше на 0,01 %, но это было допустимо. Содержание  $\text{SiO}_2$  с избытком покрывает расход его на образование силикатов железа и марганца.

Действие промывки оценили сравнением трёх периодов работы доменной печи. Первый период был исходным базовым. Во втором периоде загружали промывочный материал специальным режимом. По третьему периоду, который следовал непосредственно после завершения промывки, оценивали работу печи в условиях очищенного горна.

Условия в исследованные периоды по составу и свойствам угольной шихты, использованной для коксования, представлены в табл. 2–4.

Таблица 2

Результаты технического анализа угольной шихты

Период	W <sup>r</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	V <sup>daf</sup> , %	S <sup>d</sup> , %	X, мм	У, мм	Помол, %
Базовый	8,7	10,2	26,2	0,48	33,3	19,5	77,0
Специальный	8,8	9,9	26,2	0,48	33,7	19,7	77,5
Эксплуатационный	8,5	9,7	26,6	0,50	32,7	19,7	77,0

Таблица 3

Ситовый состав угольной шихты, %

Период	Крупность, мм					
	>10	10-6	6-3	3-1	1-0,5	0-0,5
Базовый	3,6	6,0	12,3	23,4	21,7	33,0
Специальный	3,9	5,5	12,2	23,9	20,5	34,0
Эксплуатационный	2,7	5,4	14,1	24,0	24,2	29,7

Таблица 4

Расчетные характеристики угольной шихты

Период	Насыпная плотность, т/м <sup>3</sup>	C, %	ΣOK, %	Ro	σR
Базовый	0,792	80,47	30	1,010	0,231
Специальный	0,794	79,13	29	0,990	0,238
Эксплуатационный	0,782	81,88	29	0,970	0,196

Условия по свойствам кокса даны в табл. 5 – 7.

Таблица 5

Результаты технического анализа кокса, %

Период	W <sup>r</sup>	A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>
Базовый	3,7	13,0	1,4
Специальный	3,8	12,9	1,5
Эксплуатационный	3,6	12,7	1,5

Таблица 6

Гранулометрический состав кокса, %

Период	Крупность, мм				
	+80	80-60	60-40	40-25	-25
Базовый	15,2	44,2	30,8	7,2	2,8
Специальный	12,5	36,6	39,6	8,6	2,6
Эксплуатационный	12,2	40,2	36,7	8,6	2,4

Таблица 7

Показатели горячей и холодной прочности кокса

Период	Холодная прочность кокса по показателям, %		Горячая прочность кокса по CSR, %	Реакционная способность (CRI), %
	M10	M25		
Базовый	8,5	86,4	41,4	38,3
Специальный	8,4	86,2	38,9	39,2
Эксплуатационный	8,0	86,7	38,5	39,1

Таблица 10

Матрица загрузки

Вид материала	К	К	Р	Р	К	К	Р	Р	К	К	К	Р	Р
Номер станции	1												
	2						2					2	
	3		1				1						
	4		1		1						1		
	5		1		1				1		1		1
	6	1			1	1			1	1	1		1
	7	1				1			1	1			1
	8	1		1		1			1				1
	9			1					1				1
	10			1					1				1
	11												

Компоненты, входящие в состав сырья (ЖРС), расходовали в соответствии с табл. 8. Их химический состав дан в табл. 9.

Таблица 8

Удельные расходы составляющих сырья, кг/т чугуна

Период	Наименование материала						
	AA №3	АН	ОМ	ОС	К	КММ	КФ
Базовый	1015	145	567	-	3,0	-	20,3
Специальный	1093	125	501	-	1,4	36	15,8
Эксплуатационный	1016	135	572	8,8	9,8	-	20,4

Примечание. AA № 3 – агломерат аглофабрики №3, АН – агломерат неочищенный, ОМ – окатыши Михайловские, ОС – окатыши ССГПО, К – кварцит, КММ – кремнеземо-марганцовистый материал, КФ – коксовая фракция

Таблица 9

Химический состав сырьевых материалов, %

Периоды	Компоненты шихты	Содержание элементов, %										
		Fe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	S	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P	Zn	Cr
Базовый	AA №3	54,4	11,0	12,3	6,79	0,066	1,97	1,67	0,25	0,029	0,043	0,028
	ОМ	63,1	-	0,57	8,73	0,01	0,24	0,15	0	0,012	-	-
Специальный	AA №3	54,1	11,2	12,5	6,8	0,1	2,1	1,6	0,2	-	-	-
	ОМ	63,1	-	0,7	8,7	-	0,3	0,2	-	-	-	-
Эксплуатационный	AA №3	54,1	11,7	12,4	6,8	0,1	2,2	1,7	0,3	-	-	-
	ОМ	63,2	-	0,7	8,8	-	0,3	0,2	-	-	-	-

Примечание. AA № 3 – агломерат аглофабрики №3, ОМ – окатыши Михайловские

### Результаты исследования

Исследования охватывали три смежных периода, длительность которых определена по времени пребывания материалов в печи, в том числе в зоне мало подвижного состояния их (ЗММ) [10].

В базовом периоде кремнеземо-марганцовистый материал в составе шихты не использовали. В специальном периоде его загрузку осуществляли в локальную зону, соответствующую станциям №6-7 углового положения лотка БЗУ, для промывки горна печи в зоне, соответствующей рудному гребню. Матрица загрузки представлена в табл. 10.

Примечание. К – кокс, Р – сырьевые материалы, цифры – номера станций и количество оборотов лотка

Использование кремнеземо-марганцовистого материала в специальном режиме в количестве 36 кг/т чугуна обеспечило увеличение содержания марганца в чугуне от 0,23 до 0,57 % (табл. 11) и MnO в шлаке от 0,19 до 0,41 % (табл. 12).

Таблица 11

Химический состав чугуна в исследуемых периодах, %

Наименование компонента	Период		
	Базовый	Специальный	Эксплуатационный
Si	0,66	0,73	0,73
Mn	0,23	0,57	0,25
S	0,016	0,014	0,016
Ti	0,045	0,050	0,052
P	0,058	0,062	0,065
Cr	0,038	0,041	0,041
C	4,63	4,71	4,67
V	0,072	0,070	0,075
Ni	0,011	0,011	0,012
Cu	0,014	0,014	0,014

В период промывки горна печи по сравнению с базовым наблюдали улучшение дренажной способности горна по ряду показателей. Уменьшилось количество шлака, остающегося в горне после выпуска продуктов плавки, на 4,46%; индекса DMI на 13,07%; перепада температур охлаждающей воды холодильников горна на 0,92%; среднеквадратического отклонения количества шлака между летками на 0,92% при увеличении растворимости углерода в чугуне на 1,63% (табл. 13).

Очистка горна в специальном режиме происходила под действием ряда факторов:

- поступление в него монооксидов железа и марганца; участие их ионов в процессах удаления мелочного кокса и спели, в преобразовании высокоосновных минералов;
- участие в процессах очистки горна кремнекислородных комплексов;
- увеличение растворимости углерода в чугуне;

– уменьшение температуры плавления группировок в составе шлаке;  
 – уменьшение вязкости шлака, обеспечивающего механический вынос из печи мелочи кокса и спели.

Рассматриваемый материал при расходе 36 кг/т чугуна на печи производительностью 3484 т/сут может превратить в СО за сутки 2195 кг спели и углерод 4264 кг мелочи кокса. Её кремнезём может преобразовать в однокальциевый силикат 18 т группировки ранкинита или 13 т вида  $2CaO \cdot SiO_2$ . На увеличение количества углерода, переходящего в чугун, приходится 30 кг/сут.

Таблица 12

Химический состав шлака в исследуемых периодах, %

Наименование компонента	Период		
	Базовый	Специальный	Эксплуатационный
SiO <sub>2</sub>	39,8	39,5	39,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,49	9,39	9,43
TiO <sub>2</sub>	0,65	0,62	0,70
CaO	40,3	40,3	39,5
MgO	7,44	7,62	8,14
S	0,7	0,7	0,7
FeO	0,3	0,3	0,3
MnO	0,19	0,41	0,21
NaO	0,73	0,72	0,73
K <sub>2</sub> O	0,82	0,83	0,86

Таблица 13

Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне по периодам

Наименование компонента	Период		
	Базовый	Специальный	Эксплуатационный
Количество шлака, остающегося в горне после выпуска продуктов плавки через лётки, т	22,4	21,4	19,1
Характеристика растворимости углерода в чугуне, %	94,58	96,12	94,61
Индекс DMI	199	173	202
Перепад температур охлаждающей воды холодильников горна, °С	1,09	1,08	1,07
Среднеквадратическое отклонение ковшей шлака между летками	1,09	1,08	1,07

Основные технологические показатели работы доменной печи представлены в табл. 14. Улучшение условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса в горне обеспечило уменьшение удельного расхода кокса на 4,4 кг/т чугуна и повышение производительности на 10 т/сут. При этом параметры дутья соответствовали табл. 15. Колошниковый газ имел

характеристики, представленные в табл. 16 – 20.

Таблица 14

Основные технологические показатели работы печи в исследуемые периоды

Наименование компонента	Период		
	Базовый	Специальный	Эксплуатационный
Удельный расход кокса, кг/т чугуна: фактический	431,5	438,1	417,0
приведенный к базовому	431,5	427,1	418,3
Расход коксовой фракции, кг/т чугуна	19,9	15,6	19,8
Производительность, т/сут: по фактическому количеству загруженных подач приведенная к базовому периоду	3474	3483	3568
	3474	3484	3497
Расход, кг/т чугуна: сырьевых материалов в том числе марганцево-кремнезёмистого материала	1694	1734	1696
	-	36	-
Доля окатышей от ЖРС, %	32,7	30,6	33,6
Интенсивность хода: по дутью, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> мин)	2,129	2,096	2,093
по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> сут	1,145	1,153	1,137
Давление горячего дутья, кПа	371	372	372

Таблица 15

Параметры дутья в исследуемых периодах

Период	Температура горячего дутья, °С	Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна
Базовый	1126	25,12	154,6
Специальный	1126	26,35	148,8
Эксплуатационный	1126	27,15	147,4

Таблица 16

Параметры колошникового газа в исследуемых периодах

Период	Содержание в колошниковом газе, %			Степень использования CO, %	Давление колошникового газа, кПа	Вынос пыли	
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>			кг/т чугуна	кг/т шихты
Базовый	17,1	25,0	9,1	40,62	242,7	14,33	8,5
Специальный	17,4	25,4	9,2	40,33	242,2	14,83	8,5
Эксплуатационный	17,6	24,9	9,2	41,35	241,5	15,17	8,8

Таблица 17

Температура колошникового газа, °С

Период	Номер газоотвода				Пылеуловитель
	1	2	3	4	
Базовый	245,7	215,3	219,5	220,7	206,6
Специальный	239,2	213,1	211,0	214,8	201,8
Эксплуатационный	227,0	205,2	200,7	206,6	193,2

Таблица 18

Температура периферийных газов в верху шахты по секторам, °С

Период	Номер сектора					
	1	2	3	4	5	6
Базовый	413,4	275,7	236,5	369,4	444,2	359,8
Специальный	421,2	274,7	227,8	362,4	444,2	344,5
Эксплуатационный	399,3	279,1	224,7	372,5	444,3	349,5

Таблица 19

Температура периферийных газов под газоотводами, °С

Период	Номер газоотвода			
	1	2	3	4
Базовый	259,8	209,7	203,0	204,1
Специальный	259,6	210,3	195,4	212,7
Эксплуатационный	242,7	204,7	201,1	197,5

Таблица 20

Температура газа по радиусу, °С

Период	Номер места расположения термопары											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Базовый	199	183	177	158	259	405	440	368	254	242	290	305
Специальный	195	180	175	158	252	385	420	353	243	234	271	276
Эксплуатационный	192	175	169	148	236	383	433	350	226	223	276	287

### Заключение

На доменной печи полезным объемом 1370 м<sup>3</sup> ПАО «ММК» в специальном периоде загружали кремнеземо-марганцовистый материал в локальную зону, соответствующую станциям №6-7 углового положения лотка БЗУ, для промывки горна печи в зоне, соответствующей рудному гребню. Применение его в количестве 36 кг/т чугуна на период длительностью 6 сут обеспечило улучшение дренажной способности горна по ряду показателей: снижение количество шлака, остающегося в нём после выпуска продуктов плавки, на 4,46%; индекса DMI на 13,07%; перепада температур охлаждающей воды холодильников горна на 0,92%; среднеквадратического отклонения количества шлака между летками на 0,92% при увеличении растворимости углерода в чугуне на 1,63%. Уменьшение удельного расхода кокса составило 4,4 кг/чугуна, повышение производительности – 10 т/сут.

### Список литературы

1. Дашевский В.Я., Жучков В.И., Леонтьев Л.И. Марганец Российской Федерации // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых. 2018. С. 56-66.
2. Промышленные материалы для доменной плавки / В.А. Кобелев, А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, И.А. Сергиенко // Доменное производство – XXI век: труды Международного конгресса доменщиков, Москва, 12-16 апреля. М., 2010. С. 137-140.
3. Крячко Г.Ю., Авдеев Р.В. К вопросу о поведении марганца в доменной печи // Теория и практика производства чугуна: труды Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», Кривой Рог, 24-27 мая. Кривой Рог, 2004. С. 341-343.
4. Особенности доменной плавки при работе на железорудном сырье сложного состава месторождений центрального Казахстана / А.А. Ванак, Ю.К. Абраменко, А.М. Печеркин, Н.Е. Султанов // Сталь. 2007. № 8. С. 5-7.
5. Восстановительная плавка комплексного железорудного сырья / С.М. Тлеугабулов, С.Б. Абикиев, Д.Х. Алтыбаева, Ю.Д. Исупов, Б.С. Тлеугабулов // Сталь. 2015. № 5. С. 20-24.
6. Улучшение дренажной способности шлака доменной плавки / В.А. Долинский, Л.Д. Никитин, Л.В. Портнов, С.Ф. Бугаев, К.И. Домнин // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. 2008. № 22. С. 41-50.
7. Влияние расхода конвертерного шлака на показатели работы доменных печей / А.А. Полинов, А.В. Павлов, Г.Н. Логачёв, О.П. Онорин, Н.А. Спириин // Металлург. 2017. № 4. С. 41-47.
8. Еремеев Н.А., Лысюк А.Ж. Опыт промышленного использования конвертерного шлака Южно-Уральского никелевого комбината в качестве раскислителя в ДЦ ПАО ЧМК // Сталь. 2018. № 3. С. 7.
9. Зоря В.Н., Волынкина Е.П., Протопопов Е.В. Оценка металлургической ценности конвертерного шлака // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. № 10. С.29-34
10. Непрерывная добавка конвертерного шлака в шихту доменной печи / А.А. Полинов, А.В. Павлов, Н.А. Спириин, Г. Логачев и др. // AISTech Conference Proceedings, Philadelphia, Tenn., 7-10 May, 2017. С. 317-322.
11. Пат. 2067998 РФ, С21В 3/00 (1995.01). Способ промывки доменной печи / Г.Н. Мулько, Г.М. Гуляев, А.А. Бондарь, М.В. Рогов, В.Г. Подпорин, В.А. Зайцев, В.А. Кобелев, В.В. Павлов, А.И. Истеев.

12. Воздействие промывочных материалов на ход доменных процессов / Терентьев В.Л., Гибадуллин М.Ф., Мавров А.Л., Сибатуллин С.К., Гостенин В.А. // *Сталь*. 2004. № 12. С. 16 – 17.
13. Промывка горна доменной печи шлаком от выплавки ферромарганца / Терентьев В.Л., Нефёдов С.Н., Сибатуллин С.К., Пишнограев С.Н., Прохоров И.Е., Фадеев А.М. // *Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. Вып. 3. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 29 – 33.*
14. Пат. 2360974 РФ, МПК С21В5/00. Способ промывки доменной печи / Ю.А. Бодяев, В.А. Гостенин, С.К. Сибатуллин, М.Ф. Гибадуллин, В.Л. Терентьев, А.Л. Мавров, В.М. Колокольцев. Заявл. 28.06.2007; Оpubл. 10.07.2009. Бюл. № 19. С. 646.
15. Пат. 224400 РФ, МПК<sup>7</sup> С 21В 3/00. Способ промывки доменной печи / И.М. Шатохин, С.К. Сибатуллин. Заявл. 16.02.2004; Оpubл. 20.03.2005. Бюл. № 8. С. 439.
16. Пат. 2150510 РФ, МПК С21В5/00. Способ промывки доменной печи / В.Л. Терентьев, К.Н.Вдовин, С.К. Сибатуллин, С.Г. Краснов, Е.В. Карпов, В.Н. Котий. Заявл. 12.04.1999; Оpubл. 10.06.2000. Бюл. № 16. С. 348.
17. Влияние загруженности пристеночной зоны доменных печей железорудным сырьем на тепловые нагрузки системы охлаждения / А.С. Харченко, Е.О. Харченко, М.В. Сидоров и др. // *Теория и технология металлургического производства*. 2015. № 2 (17). С. 15-18.
18. Сибатуллин С.К., Харченко А.С. Рациональное использование металлургического кокса в доменной плавке: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 162 с.
19. Улучшение работы доменной печи кратковременным уменьшением расхода природного газа / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Харченко Е.О., Сибатуллина М.И., Минакаев С.Р., Бегинюк В.А. // *Черная металлургия*. 2017. № 2 (1406). С. 16-20.
20. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Полинов А.А., Павлов А.В., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 1 (14). С. 23 – 25.
21. Опыт промывки горна доменных печей брикетами из окалины / И.Ф. Курунов, Э.М. Щеглов, В.Л. Емельянов, В.Н. Титов, О.Г. Болшакова // *Металлург*. 2007. №6. С. 36-39.
22. Курунов И.Ф., Болшакова О.Г. Брикетты для промывки горна доменных печей // *Металлург*. 2007. № 5. С. 46-50.
23. Промывка доменных печей специальными промывочными брикетами / А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобелев, Е.А. Терентьев, В.В. Бабанакоев // *Черная металлургия*. 2010. №11. С. 19-21.
24. Регулирование работы горна доменной печи / А.М. Коверзин, Л.В. Портнов, Л.Д. Никитин, В.Г. Шипицын // *Сталь*. 2014. № 7. С. 14-16.
25. Высокозакисный металлургический брикет для промывки горна доменной печи / Ф.Ф. Очеретнюк, С.В. Юдина, Н.П. Сысоев, М.А. Шерстобитов, А.Г. Валуев // *Теория и технология металлургического производства*. 2005. №5. С. 64-67.
26. Опыт применения технологии промывки горна / В.П. Русских, Д.И. Гаврилоглу, В.П. Лялюк, А.П. Витязь, М.Я. Васкевич, А.Н. Батищев // *Черная металлургия*. 2011. № 10. С. 41-45.
27. Моделирование влияния MnO на характеристики шлака, а также распределение Mn, Si и S в доменной печи / С. Chun-lin, Z. Ling, W. Steven и др. // *Chin. Soc. Metals*. 2009. P. 1120-1124.
28. Фильтруемость доменных шлаков через коксовую насадку горна доменных печей / Г.А. Нечкин, В.А. Кобелев, А.Ю. Чернавин, Д.А. Чернавин // *Черная металлургия*. 2012. №9. С. 15-19.
29. Тлеугабулов Б.С. Совершенствование шлакового режима доменной плавки за счет использования добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2010. 24 с.
30. Разработка специальных промывочных материалов и технологии промывки доменных печей / А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобелев // *Новые технологии и материалы в металлургии: сборник научных трудов Уральского института металлургии*. 2015. С. 186-191.
31. Пат. 2238329 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Способ промывки доменной печи / И.Ф. Курунов, И.С. Яриков, С.С. Ляпин, Д.Д. Иванов, В.Л. Емельянов, В.Н. Титов, Д.Н. Тихонов.
32. Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Колосов А.В. Использование нейросетевого моделирования для изучения газодинамического режима в нижней части доменной печи в условиях ее работы с коксовым орешком // *Изв. вузов. Чёрная металлургия*. 2011. № 8. С. 18 – 19.
33. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. Екатеринбург: УРО РАН, 2011. 162 с.

#### Сведения об авторах

**Сибатуллин Салават Камилевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-84-30. E-mail: 10tks@mail.ru.



**Харченко Александр Сергеевич** – зав. кафедрой металлургии и химических технологий, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-84-30. E-mail: as.mgtu@mail.ru.

**Малиханов Юрий Сергеевич** – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: limp.m.yu@yandex.ru.

**Игликова Ульяна Мужасейтовна** – студент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: iglikovau75@gmail.com.

**Семенюк Михаил Александрович** – старший мастер участка загрузки, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия.

**Бегинюк Виталий Александрович** – ведущий специалист технологической группы доменного цеха, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF BLAST FURNACE WITH LOCAL FLUSHING HORN OF SILICA-MANGANESE MATERIAL**

**Salavat K. Sibagatullin** – D. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: 10tks@mail.ru.

**Alexander S. Kharchenko** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: as.mgtu@mail.ru.

**Yury S. Malikhanov** – Postgraduate, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: limp.m.yu@yandex.ru.

**Juliana M. Iglíkova** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: iglikovau75@gmail.com.

**Mikhail A. Semenyuk** – Senior Master of the loading section, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia.

**Vitaliy A. Beginyuk** – Leading specialist of the technological group of the blast furnace shop, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** Blast furnace useful volume of 1370 cubic meters, Public Joint Stock Company “Magnitogorsk Iron and Steel Works” have explored the parameters of the blast furnace, including indicators drainage capacity of the coke nozzles in the furnace, using the charge composition of the wash material. In the special period of the loaded silica-manganese material containing 15,8 % of manganese, and 45 % silicon dioxide, the local area corresponding to the stations No. 6-7 angular position of the tray bell-less charging Device for flushing horn of the furnace in the appropriate zone of the ore ridge. Use it in an amount of 36 kg per ton of pig iron for a period of 6 days improved drainage capacity of the coke nozzles in the furnace is a furnace for a number of indicators: decrease the amount of slag remaining in it after the release of fusion products by 4,46 %; DMI index by 13,07 %; the temperature difference of the cooling water refrigerators horn by 0,92 %; the standard deviation of the amount of slag tap holes between 0,92 % and increased the solubility of carbon in iron by 1,63 %. Improvement of the drainage ability of the furnace horn increased technical and economic indicators of milting. Reducing the specific coke consumption was 4.4 kg per ton of pig iron, increasing productivity – 10 ton per day.

**Keywords:** Blast furnace, pig iron, slag, flushing horn, silica-manganese material, coke.

---

Ссылка на статью:

Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Малиханов Ю.С., Игликова У.Ж., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. Технологические параметры доменной плавки при локальной промывке горна кремнезёмо-марганцовистым материалом // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2(33). С. 11-17.

Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Malikhanov Yu.S., Iglíkova Ju.M., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. Technological parameters of blast furnace with local flushing horn of silica-manganese material. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 11-17.

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77

Огарков Н.Н., Шеметова Е.С., Платов С.И., Терентьев Д.В., Кальченко А.А.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ, ИСКЛЮЧАЮЩИХ ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧКИ

**Аннотация.** В работе представлены результаты теоретического анализа процесса волочения биметаллической проволоки. Получены теоретические зависимости по определению толщины оболочки, при которой ее материал теряет устойчивость, что, в свою очередь, приводит к разрушению покрытия из цветного металла при волочении. Полученные зависимости являются новыми и позволяют расчетным путем определить сочетание показателей, характеризующих параметры волочения без потери устойчивости, а соответственно, и нарушения целостности материала лакирующей оболочки. Проведенные исследования позволяют определить значения полууглов волоки, при которых происходит потеря устойчивости при деформировании оболочки. При этом учитываются степень деформации, условия трения на поверхностях контакта оболочки, волоки и сердечника, а также характер упрочнения материала оболочки. Установлено, что с увеличением степени обжатия, коэффициентов трения и склонности материала оболочки к упрочнению значения углов волоки, соответствующие потери устойчивости материала оболочки, возрастают и как следствие, увеличивается тенденция к вспучиванию оболочки при входе в рабочую часть волоки при волочении биметаллической проволоки.

Результаты проведенных исследований используются в дальнейшем при проектировании технологического процесса производства биметаллической проволоки.

**Ключевые слова:** биметаллическая проволока, лакирующая оболочка, устойчивость деформации, внеконтактная деформация, полуугол волоки.

Производство биметаллической проволоки требует соблюдения технических условий по толщине и качеству покрытий [1–3]. Известно, что для каждого материала, характеризующегося склонностью к упрочнению, требуются различные степени обжатия, углы наклона канала рабочей части волоки и определенные условия трения. Чаще всего металл, используемый для покрытий (медь, алюминий, цинк, латунь) мягче металла сердечника (например, стали), поэтому покрытие деформируется интенсивнее и может сопровождаться потерей устойчивости. В таких случаях наблюдается внеконтактная деформация, приводящая к вспучиванию лакирующей оболочки, запрессованию волоки и обрыву проволоки [4–7]. Для устранения этого явления обычно рекомендуют накладывать ограничения на величину обжатия, коэффициента трения и угла наклона конусной части волоки.

Существующие рекомендации по устранению вспучивания лакирующей оболочки являются неоднозначными, поскольку получены в различных условиях волочения и для материалов лакирующей оболочки, склонность к упрочнению которых различна, обобщающих экспериментальных и теоретических исследований до настоящего времени проводилось недостаточно. Имеются лишь единичные теоретические разработки, накладывающие ограничения на условия волочения биметаллической проволоки без вспучивания лакирующей оболочки и, как следствие, без образования внеконтактной деформации.

В настоящей работе предлагается расчетный метод определения допустимых соотношений между углом рабочей части волоки, условиями трения на контакте с волокой, а также размерами сечения биметал-

лической проволоки и склонностью материала оболочки к упрочнению для условия волочения без ее вспучивания. При решении этой задачи допускаем, что начало вспучивания оболочки соответствует потере устойчивости материала перед входом в волоку под действием продольных напряжений, действующих на оболочку. Предполагаем, что при достижении усилия, соответствующего потере устойчивости, лакирующая оболочка может свободно скользить по сердечнику проволоки. Эффект упрочнения материала оболочки в процессе деформации в зависимости от исходного предела напряжения текучести материала оболочки описываем зависимостью [8–11]

$$\bar{\sigma} = \sigma_{2H} (1 + a_2 \varepsilon)^{m_2}, \quad (1)$$

где  $\bar{\sigma}$  – текущие значения напряжения материала оболочки;

$\sigma_{2H}$  – напряжение текучести материала оболочки до начала пластической деформации;

$a_2$  – коэффициент;

$\varepsilon$  – относительная деформация;

$m_2$  – показатель степенной зависимости упрочнения материала оболочки.

Допускаем, что если средний радиус оболочки перед входом в рабочую часть волоки не изменяется, то  $d\varepsilon_\theta = 0$ ;  $\varepsilon_h = 0$ .

Из условия постоянства объема имеем  $d\varepsilon_l = d\varepsilon_h$

или  $\varepsilon_l = \varepsilon_h$ .

Согласно уравнениям Леви – Мизеса [8]

$$\frac{d\varepsilon_l}{\sigma_l - \sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_l}{\sigma_\theta} \quad \text{или} \quad \varepsilon_l = 2\varepsilon_\theta. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует  $\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_l$  и

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3} d\varepsilon_l = -\frac{2}{3} d\varepsilon_h.$$

Учитывая, что до входа в рабочую часть матрицы радиус сердечника является постоянным, продольное усилие, действующее на оболочку, определяется зависимостью

$$P = \pi(R_0^2 - r_0^2)\sigma_l, \quad (3)$$

где  $R_0, r_0$  – начальные наружный и внутренний радиусы оболочки;

$\sigma_l$  – осевое напряжение оболочки.

Потеря устойчивости материала оболочки возникает при условии, когда  $dP = 0$ , т.е.

$$\frac{d\sigma_l}{\sigma_l} = \frac{dh}{h} = -d\varepsilon_h = d\varepsilon_l. \quad (4)$$

В соответствии с условием (4) и зависимостью (1) эффективная деформация и напряжение текучести материала оболочки в момент потери устойчивости определяются зависимостями:

$$\bar{\varepsilon} = \left( \frac{2}{a_2\sqrt{3}} - m \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_i; \quad (5)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_{2H} \cdot a_2^m \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^m = \frac{\sqrt{3}}{2\sigma_h}.$$

Толщина оболочки в момент потери устойчивости, а соответственно в начале вспучивания, определяется как

$$h = (R_0 - r_0) \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2a_2} - m\right). \quad (6)$$

Значения  $h$ , соответствующие потери устойчивости материала оболочки, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения текущей толщины оболочки, соответствующие потери устойчивости для различных толщин оболочки и различных показателей упрочнения ее материала

$R_0 - r_{0i}$	$B=1/a_2$					
	$m$					
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,43
0,25	0,537	0,511	0,486	0,462	0,440	0,420
0,5	1,075	1,023	0,973	0,925	0,880	0,822
1,0	2,15	2,046	1,946	1,851	1,761	1,682
2,0	4,302	4,092	3,893	3,703	3,522	3,305

В графическом виде данные табл. 1 приведены на рис. 1.

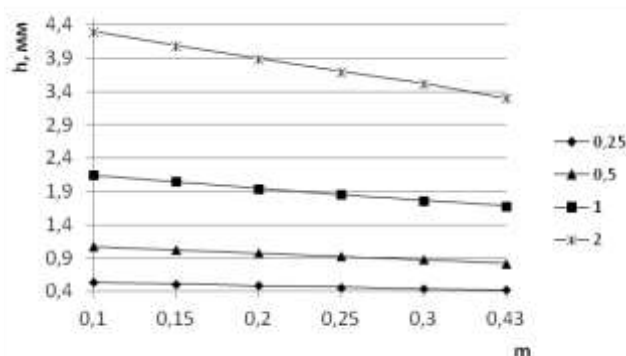


Рис. 1. Влияние показателей упрочнения на значения текущей толщины оболочки, соответствующие потери устойчивости при различных исходных толщинах оболочки

Анализ полученных значений показывает, что с увеличением коэффициента упрочнения материала оболочки текущее значение ее толщины, соответствующее потере устойчивости материала оболочки при входе в рабочую часть волоки, уменьшается.

Осевая нагрузка, действующая на оболочку, в момент потери устойчивости равна

$$P_0 = F_0 \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{2H} \cdot a_2^m \left( \frac{2}{\sqrt{3}} m \right)^m \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2a_2} - m\right), \quad (7)$$

где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения оболочки.

С учетом размеров поперечного сечения оболочки выражение (7) преобразуется к виду

$$P_0 = \pi(R_0^2 - R^2) \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2a_2} - m\right) \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{2H} \cdot a_2^m \left( \frac{2}{\sqrt{3}} m \right)^m. \quad (8)$$

Поведение материала оболочки в очаге деформации и его взаимодействие с сердечником проволоки можно представить как деформацию трубы при волочении с движущейся оправкой. Усилие волочения трубы  $P_1$  с движущейся оправкой равно [3]

$$P_1 = 2\pi R \bar{\sigma} (R - r) \left( 1 + \frac{tg\beta + f_1}{tg\alpha - tg\beta} \right) \ln\left(\frac{R_0 - r_0}{R - r}\right), \quad (9)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения материала оболочки о рабочую поверхность волоки;

$\beta$  – полуугол наклона внутренней поверхности оболочки при деформации в волоке;

$\bar{\sigma}$  – текущие значения напряжения материала оболочки;

$R, r$  – соответственно наружный и внутренний радиусы оболочки после волочения.

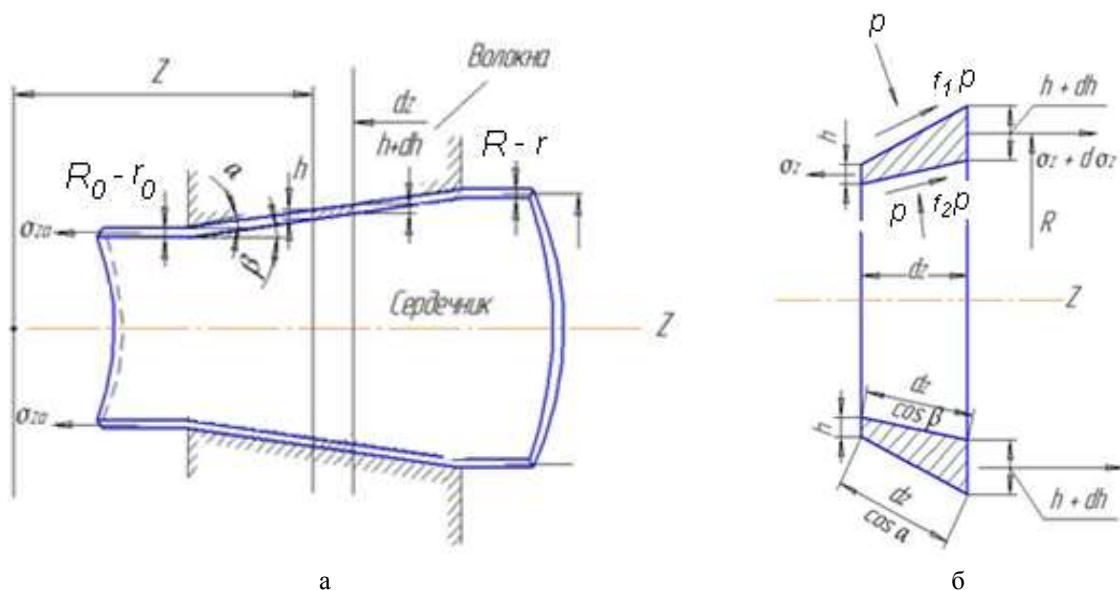


Рис. 2. Схема деформации плакирующей оболочки при волочении биметаллической проволоки: а – схема волочения оболочки; б – схема сил, действующих на элемент оболочки

В формуле (9) значение  $tg\beta$  согласно схеме деформации определяется зависимостью

$$tg\beta = \left[ \left( \frac{d_0 - d}{D_0 - D} \right) \cdot tg\alpha \right]. \quad (10)$$

Допуская, что усилие, приходящееся на оболочку, равно усилию волочения трубы из материала оболочки, приравняем усилия по зависимостям (8) и (10) и решим относительно полуугла волюки  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctg \frac{f_1 \sigma_{2H} \cdot a_2^m \left( \frac{2m}{\sqrt{3}} \right)^m \left( \frac{R_0 - r_0}{R - r} \right) \exp \left( \frac{2}{a_2 \sqrt{3}} - m \right)}{\sigma_{2H} \cdot a_2^m \left( \frac{2m}{\sqrt{3}} \right)^m \left( \frac{R_0 - r_0}{R - r} \right) \exp \left( \frac{\sqrt{3}}{2a_2} - m \right) - \bar{\sigma} \ln \left( \frac{R_0 - r_0}{R - r} \right) \left( m + \frac{2r_0 - r}{2R_0 - R} \right)}. \quad (11)$$

Или с учетом уравнения (5) и соотношения  $\frac{R_0 - r_0}{R - r} = \mu \frac{D_{cp}}{D_{0cp}}$  получим

$$\alpha = \arctg \frac{f_1 \left( \mu \frac{D_{cp}}{D_{0cp}} \right)^m \exp \left( \frac{2}{a_2 \sqrt{3}} - m \right)}{\left( \mu \frac{D_{cp}}{D_{0cp}} \right)^m \exp \left( \frac{\sqrt{3}}{2a_2} - m \right) - \ln \left( \mu \frac{D_{cp}}{D_{0cp}} \right) \left( m + \frac{d_0 - d}{D_0 - D} \right)}. \quad (12)$$

Значения полуугла волюки, которые соответствуют потере устойчивости материала оболочки при входе в рабочую часть волюки, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения полууглов волокна для различных толщин оболочки и различных показателей упрочнения ее материала

$R_0 - r_0$	$f = 0,05$							
	$m$							
$R - r$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,43
1,1	3,08	3,11	3,13	3,15	3,17	3,19	3,21	3,24
1,2	3,27	3,31	3,36	3,4	3,44	3,48	3,51	3,55
1,3	3,41	3,48	3,55	3,61	3,66	3,72	3,77	3,82
1,4	3,54	3,62	3,7	3,78	3,85	3,92	3,98	4,04
$f = 0,1$								
$m$								
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,43
1,1	6,15	6,20	6,25	6,29	6,33	6,37	6,40	6,43
1,2	6,51	6,60	6,69	6,78	6,85	6,93	7,0	7,07
1,3	6,81	6,94	7,07	7,18	7,30	7,40	7,50	7,55
1,4	7,05	7,22	7,37	7,52	7,67	7,80	7,92	7,98
$f = 0,15$								
$m$								
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,43
1,1	9,18	9,25	9,32	9,39	9,45	9,50	9,56	10,0
1,2	9,71	9,85	9,98	10,10	10,22	10,33	10,43	10,49
1,3	10,15	10,35	10,53	10,71	10,87	11,03	10,17	10,24
1,4	10,51	10,75	10,99	11,21	11,41	11,61	11,79	11,85
$f = 0,2$								
$m$								
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,43
1,1	12,16	12,26	12,35	12,43	12,51	12,58	12,65	12,69
1,2	12,86	13,04	13,21	13,37	13,52	13,66	13,79	13,85
1,3	13,43	13,68	13,92	14,15	14,36	14,57	14,75	14,81
1,4	13,89	14,21	14,51	14,80	15,06	15,32	15,56	15,62

В графическом виде данные табл. 2 приведена на рис. 3–6.

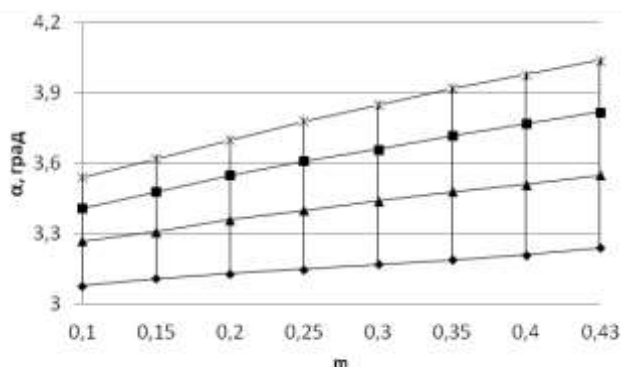


Рис. 3. Влияние показателей упрочнения на значения полууглов волокна при различных толщинах оболочки:  $\blacklozenge$  – 1,1 мкм;  $\blacktriangle$  – 1,2 мкм;  $\blacksquare$  – 1,3 мкм;  $\times$  – 1,4 мкм; при  $f = 0,05$

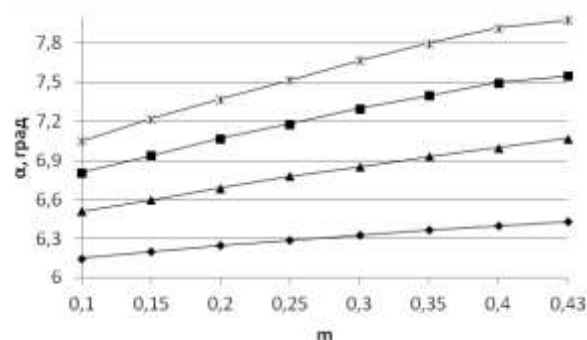


Рис. 4. Влияние показателей упрочнения на значения полууглов волокна при различных толщинах оболочки:  $\blacklozenge$  – 1,1 мкм;  $\blacktriangle$  – 1,2 мкм;  $\blacksquare$  – 1,3 мкм;  $\times$  – 1,4 мкм; при  $f = 0,10$

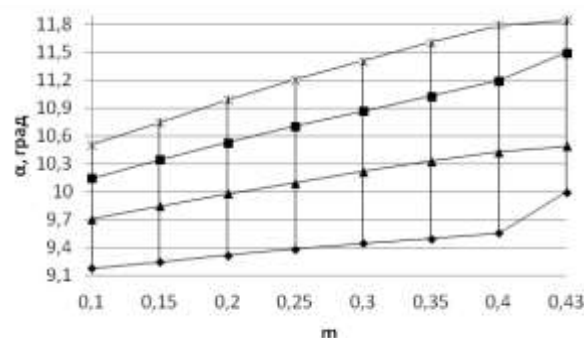


Рис. 5. Влияние показателей упрочнения на значения полууглов волокна при различных толщинах оболочки:  $\blacklozenge$  – 1,1 мкм;  $\blacktriangle$  – 1,2 мкм;  $\blacksquare$  – 1,3 мкм;  $\times$  – 1,4 мкм; при  $f = 0,15$

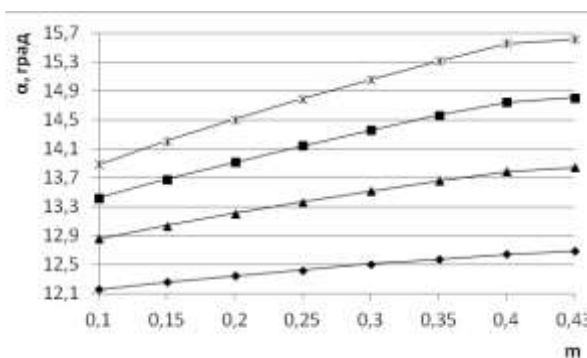


Рис. 6. Влияние показателей упрочнения на значения полууглов волокна при различных толщинах оболочки:  $\blacklozenge$  – 1,1 мкм;  $\blacktriangle$  – 1,2 мкм;  $\blacksquare$  – 1,3 мкм;  $\times$  – 1,4 мкм; при  $f = 0,20$

Значения полууглов волокна в табл. 2 рассчитаны с учетом уравнения (12), в котором параметр  $a_2 = 2,5$  и для коэффициентов трения  $f_1 = f_2 = f$ .

Анализ полученных значений показывает, что с увеличением степени обжатия, коэффициентов трения и склонности материала оболочки к упрочнению значения углов волокна, соответствующие потери устойчивости материала оболочки, возрастают и, как след-

ствие, увеличивается тенденция к вспучиванию оболочки при входе в рабочую часть волоки при волочении биметаллической проволоки.

Приведенные в таблице данные получены при равных значениях коэффициентов трения материала оболочки о поверхность волоки и сердечника, однако, из формулы (12) следует, что влияние коэффициентов трения  $f_1$  и  $f_2$  на изменение угла  $\alpha$  различно. Более интенсивное влияние на изменение угла  $\alpha$  оказывает коэффициент трения материала лакирующей оболочки о рабочую поверхность волоки.

### Выводы

Выполнен расчет допустимых значений угла конусности волоки, исключаяющих вспучивание оболочки перед волокой с учетом степени ее упрочнения и коэффициента трения. Установлено, что с увеличением степени обжарки, коэффициентов трения и склонности материала оболочки к упрочнению значения углов волоки, соответствующие потери устойчивости материала оболочки, возрастают и, как следствие, увеличивается тенденция к вспучиванию оболочки при входе в рабочую часть волоки при волочении биметаллической проволоки.

Полученные авторами зависимости являются новыми и позволяют расчетным путем определить сочетание показателей, характеризующих процессы волочения без потери устойчивости, а соответственно, и вспучивания материала лакирующей оболочки. Представлены расчетные значения толщины лакирующей оболочки и полууглов волоки, соответствующие потере устойчивости при деформировании оболочки в виде таблиц.

Материалы могут быть использованы при проектировании волок и разработке технологических процессов волочения биметаллической проволоки.

### Список литературы

- Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Оценка устойчивости пластической деформации оболочки при волочении биметаллической проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1 (37). С. 34-37.
- Маслоемкость контактных поверхностей в процессах обработки металлов давлением / Огарков Н.Н., Платов С.И., Шеметова Е.С., Самодурова М.Н., Терентьев Д.В., Некит В.А. // *Металлург*. 2017. № 1. С. 79-82.
- Шеметова Е.С. Устойчивость пластической деформации во внеконтактной зоне при волочении биметаллической проволоки с учетом упрочнения материала оболочки и сердечника // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2011. № 1. С. 154-157.
- Внеконтактная деформация при волочении биметаллической проволоки с мягким покрытием. Сообщение 1 / Ю.И. Коковихин, М.Г. Поляков, И.Ш. Туктамышев, А.А. Кальченко // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1976. №2. С.80-83.
- Внеконтактная деформация при волочении биметаллической проволоки с мягким покрытием. Сообщение 2 / Ю.И. Коковихин, М.Г. Поляков, И.Ш. Туктамышев, А.А. Кальченко // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1976. №2. С.73-75.
- Шумилин И.М. Условия устойчивого волочения биметаллической проволоки // *Сталь*. 1977. № 12. С. 1124-1125.
- Огарков Н.Н., Налимова М.В. Определение условия обратного течения металла при волочении проволоки с покрытием // *Моделирование и развитие технологических параметров обработки металлов давлением*. 1988. С. 104 – 111
- Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
- Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
- Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / Смирнов О.М., Тулупов С.А., Цепин М.А. и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2008. №2. С 45-52.
- Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1968. 504 с.

### Сведения об авторах

**Огарков Николай Николаевич** – д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

**Шеметова Елена Сергеевна** – ст. преп. кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [hellensh88@list.ru](mailto:hellensh88@list.ru)

**Платов Сергей Иосифович** – д-р техн. наук, зав. кафедрой машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [psipsimail.ru](mailto:psipsimail.ru)

**Терентьев Дмитрий Вячеславович** – д-р техн. наук, директор института элитных программ и открытого образования в социальных сетях, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [ktnterentyev@mail.ru](mailto:ktnterentyev@mail.ru).

**Кальченко Александр Андреевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kalchenko1945@yandex.ru

---

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

**CALCULATION OF DRAWING PARAMETERS OF BIMETALLIC WIRE THAT EXCLUDE LOSS OF SHELL STABILITY**

**Nikolai N. Ogarkov** – D. Sci. (Eng.), Magnitogorsk, Russia.

**Elena S. Shemetova** – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [hellensh88@list.ru](mailto:hellensh88@list.ru)

**Sergey I. Platov** – D. Sci. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [psipsi@mail.ru](mailto:psipsi@mail.ru)

**Dmitry V. Terentyev** – D. Sci. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [ktnterentyev@mail.ru](mailto:ktnterentyev@mail.ru)

**Alexander A. Kalchenko** – Ph.D. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [kalchenko.alekxandr@gmail.com](mailto:kalchenko.alekxandr@gmail.com)

***Annotation.** A theoretical analysis of the process of drawing a bimetallic wire. Theoretical dependences are obtained for determining the thickness of the shell at which its material loses stability and, as a result, leads to its expansion during drawing. The obtained dependences are new and allow one to determine by calculating a combination of indicators characterizing drawing processes without loss of stability, and, accordingly, expansion of the material of the cladding shell. The values of the die half-angles corresponding to the loss of stability during shell deformation are presented, depending on the degree of deformation, the friction conditions of the shell on the contact surfaces with the wire and core, and on the hardening index of the shell material. It has been established that with an increase in the degree of compression, friction coefficients, and the tendency of the sheath material to harden, the values of the fiber angles, the corresponding loss of stability of the sheath material, increase and, as a result, the tendency to swell of the sheath at the entrance to the working part of the wire when drawing a bimetallic wire increases.*

***Keywords:** bimetal wire, cladding sheath, resistance to deformation, non-contact deformation, half-angle die.*

---

Ссылка на статью:

Огарков Н.Н., Шеметова Е.С., Платов С.И., Терентьев Д.В., Кальченко А.А. Расчет параметров волочения биметаллической проволоки, исключая потерю устойчивости оболочки // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2(33). С. 18-23.

Ogarkov N.N., Shemetova E.S., Platov S.I., Terentyev D.V., Kalchenko A.A. Calculation of drawing parameters of bimetallic wire that exclude loss of shell stability. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 18-23.

УДК 621.97

Железков О.С., Харченко М.В., Салганик В.М., Лизов С.Б.

## ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ГОЛОВОК СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ С ФЛАНЦЕМ

**Аннотация.** На основе вариационного метода разработана математическая модель и выполнены расчеты энергосиловых параметров процесса штамповки головок стержневых крепежных изделий с фланцем. Использовались соотношения деформационной теории пластичности. Реологические свойства деформируемого металла задавались в виде модели жесткопластической среды с нелинейным упрочнением. Кривая упрочнения описывалась экспоненциальной зависимостью, предложенной Г.А. Смирновым-Аляевым. Процесс штамповки рассматривался в цилиндрической системе осей координат  $r, z, \varphi$ . Объем головки разбивался на жесткую и пластическую области, граница раздела между которыми описывалась квадратичной параболой с варьируемым параметром  $a$ . Пластическая область разделялась на две зоны. Для каждой зоны задавались функции радиальных перемещений  $U_r$ , которые соответствовали граничным условиям и были близки к реальному течению металла. Используя соответствующие дифференциальные зависимости Коши и условие несжимаемости, определялись компоненты тензора деформации  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \gamma_{zr}$  и интенсивность деформации  $\varepsilon_i$ , используя которую находились работа внутренних сил, сил трения и сил среза. Поиск минимума полной работы деформации  $A^{\min}$  осуществлялся численными методами с использованием специально разработанной программы. По найденным значениям минимальной полной работы деформации  $A^{\min}$  находились усилия штамповки  $P$  и удельные усилия  $p = P/F_0$ , где  $F_0$  - площадь поперечного сечения стержня. По результатам расчетов построена номограмма, позволяющая определять удельные усилия  $p$  штамповки в зависимости от относительных размеров фланца головки для стержневых крепежных изделий из сталей 10, 20Г2Р, 30Г2Р, 30ХР и 40Х. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых из стали марки 10 штамповались головки с фланцем. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов составило 5,7 %.

**Ключевые слова:** стержневые крепежные изделия, головка с фланцем, вариационный метод, функции перемещений, работа внутренних сил, работа сил трения, энергосиловые параметры, усилия штамповки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011)

К крепежу прогрессивной конструкции относятся изделия, у которых на опорной поверхности выполняется фланец [1-2]. Применение болта и гайки с фланцами обеспечивает снижение контактных давлений на опорных поверхностях и более равномерное распределение нагрузки по виткам резьбы, что повышает надежность работы резьбовых соединений. Кроме того, такие изделия обладают повышенными конструкторскими свойствами и не требуют применения дополнительных стопорящих элементов для предотвращения самоотвинчивания.

На рис. 1 представлена типичная конструкция стержневых крепежных изделий с фланцевой головкой, которые широко применяются в машиностроении, на железнодорожном транспорте и в других отраслях.

При штамповке стержневых изделий с фланцевой головкой, по сравнению с изготовлением крепежа без фланцев, возрастают усилия деформирования, которые существенно зависят от формы и размеров фланца. Кроме того, следует отметить, что значительная часть фланцевого крепежа изготавливается в виде изделий повышенной прочности (класс прочности 8.8 и выше), для чего используются легированные марки стали типа 20Г2Р, 30ХР, 40Х и др. Поэтому разработка надежной методики определения энергосиловых

параметров процесса штамповки крепежных изделий повышенной прочности с фланцевыми головками имеет важное практическое значение, так как позволяет получить достоверную информацию об усилиях деформирования, которая необходима для выбора эффективного кузнечно-прессового оборудования и поиска рациональной конструкции штампового инструмента.

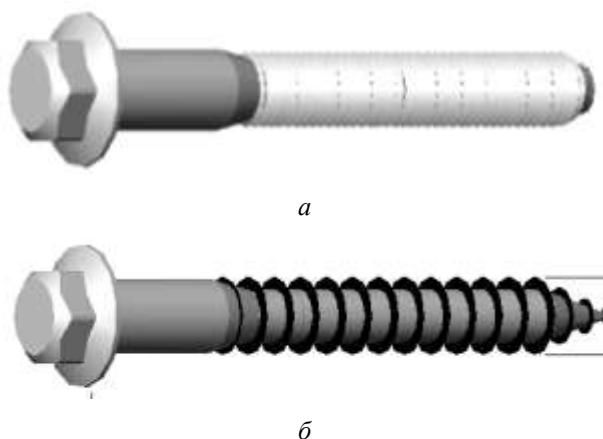


Рис. 1. Крепежные изделия с фланцевой головкой: а – болт; б – путевой шуруп



Цель работы – разработка математической модели и расчет энергосиловых параметров процесса штамповки стержневых крепежных изделий с фланцевыми головками.

Анализ известных методов и методик определения энергосиловых параметров (ЭСП) пластического деформирования [3] показал, что для расчета ЭСП процесса штамповки крепежных изделий с фланцевой головкой можно использовать вариационный метод [4] и, в частности, вариационный метод в дискретной постановке [5, 6]. Сущность метода заключается в том, что процесс деформирования условно разбивается на два этапа. При этом считается, что на начальном этапе деформации имеют конечную величину, а в деформируемом теле возникает неравномерность деформации, которая определяется либо экспериментально, либо аналитически. На конечном этапе штамповки деформации малы, что позволяет использовать соотношения деформационной теории пластичности.

В разработанной методике реологические свойства деформируемого металла задавались в виде модели жесткопластической среды с нелинейным упрочнением [7, 8]. Кривая упрочнения описывалась экспоненциальной зависимостью, предложенной Г.А.Смирновым-Аляевым [9]:

$$\sigma_s = M - Ce^{-e_i} - Be^{-Ne_i}, \quad (1)$$

где  $e_i$  – степень деформации;

$M, C, B, N$  – параметры, определяемые по экспериментальным данным из опытов на растяжение или сжатие.

Рассматривая конечный этап процесса штамповки головки (рис. 2), считается, что металл полностью заполняет полость пуансона и вытесняется в зазор между торцом матрицы 1 и торцом пуансона 2, образуя фланец.

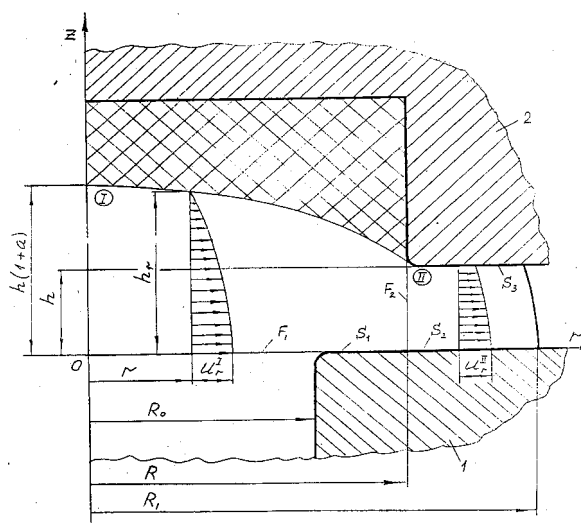


Рис. 2. Схема течения металла на конечном этапе штамповки головки с фланцем

Весь объем головки разбивался на жесткую и пластическую области, граница раздела между которыми описывалась уравнением

$$h_r = h + ah\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

где  $a$  – варьируемый параметр.

В свою очередь, пластическая область разбивалась на две зоны (I и II).

Процесс штамповки рассматривался в цилиндрической системе осей координат  $r, z, \varphi$ . В принятой системе координаты  $r$  и  $z$  для пластической I изменяются в диапазоне:  $r = 0 \div R, z = 0 \div h_r$ . Для пластической зоны II  $r = R \div R_1, z = 0 \div h$ .

Функция радиальных перемещений для пластической зоны I задавалась в виде

$$U_r^I = \frac{3\Delta h}{4h_r} r\left(1 - \frac{z^2}{h_r^2}\right). \quad (3)$$

Для пластической зоны II функция радиальных перемещений

$$U_r^{II} = a_2 r\left(\frac{r}{R} - 1\right) + a_3\left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right). \quad (4)$$

Выбранные функции  $U_r$  отвечают граничным условиям и близки к реальному течению металла на конечном этапе штамповки.

Используя соответствующие дифференциальные зависимости Коши и условие несжимаемости для случая деформирования в цилиндрической системе координат, определялись компоненты тензора деформации  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \gamma_{zr}$ .

По известным  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \gamma_{zr}$ , учитывая, что  $\varepsilon_z = -(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi)$  и  $\gamma_{r\varphi} = \gamma_{\varphi z} = 0$ , определялась интенсивность деформации на конечном этапе штамповки

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{zr}^2}. \quad (5)$$

Полная работа деформации находилась как сумма работ внутренних сил, сил трения и сил сдвига.

Работа внутренних сил для зон I и II

$$A_{b1} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{h_r} W r d\varphi dr dz; \quad A_{b2} = \int_0^{2\pi} \int_R^{R_1} \int_0^h W r d\varphi dr dz, \quad (6)$$

где  $W$  – удельная работа внутренних сил, которая с учетом уравнения (1) определялась по формуле

$$W = [M\varepsilon_i - Ce^{-\varepsilon_i} (1 - e^{-\varepsilon_i}) - \frac{B}{N} e^{-Ne_i} (1 - e^{-Ne_i})], \quad (7)$$

где  $e_i$  - степень деформации на начальном этапе штамповки, которая определялась методом измерения твердости;  
 $M, C, B, N$  – параметры кривой упрочнения (1), определяемые из опытов на сжатие образцов с торцевыми буртиками [10].

Работа сил трения на поверхностях  $S_1, S_2$  и  $S_3$  контакта металла с инструментом

$$A_{T_1} = \int_0^{2\pi} \int_{R_0}^R \tau U_{|S_1} r d\varphi dr, \quad A_{T_2} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \tau U_{|S_2} r d\varphi dr,$$

$$A_{T_{13}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_2} \tau U_{|S_3} r d\varphi dr. \quad (8)$$

Работа сил среза по поверхностях  $F_1$  и  $F_2$

$$A_{C_1} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \tau_s U_{|F_1} r d\varphi dr, \quad A_{C_2} = \int_0^{2\pi} \int_0^h \tau_s \Delta U_{|F_2} R d\varphi dz. \quad (9)$$

Полная работа деформации на конечном этапе штамповки определялась как сумма работ внутренних сил  $A_{b1}, A_{b2}$ , сил трения  $A_{T_1}, A_{T_2}, A_{T_3}$  и сил среза  $A_{C_1}, A_{C_2}$ . Поиск минимума полной работы деформации  $A^{\min}$  осуществлялся численными методами с использованием специально разработанной програм-

мы. При этом кратные интегралы в выражениях работ (8) вычислялись методом Гаусса с использованием четырех узловых точек. По найденным значениям минимальной полной работы деформации  $A^{\min}$  находились усилия штамповки  $P$  и удельные усилия  $p = P/F_0$ , где  $F_0 = \pi R_0^2$ . По результатам расчетов построена номограмма (рис. 3), позволяющая определять удельные усилия  $p$  штамповки в зависимости от относительных размеров фланца головок ( $R_1 / R_0$ ) и ( $h / R_0$ ) стержневых крепежных изделий из сталей 10, 20Г2Р, 30Г2Р, 30ХР, 40Х, которые широко применяются при штамповке изделий с фланцевыми головками.

Для оценки достоверности результатов расчетов проведена серия экспериментов, которые проводились с использованием прессы МС-2000 («Завод испытательных машин», г. Армавир) и инструмента в виде пуансона, матрицы и выталкивателя, которые размещались в специальном центрирующем корпусе. Штамповались фланцевые головки из цилиндрических заготовок диаметром 16 мм (сталь марки 10). Размеры отштампованных головок  $R_0 = 8$  мм,  $R = 12$  мм,  $R_1 = 15$  мм,  $h = 3$  мм. Экспериментальные усилия деформирования, найденные по результатам испытаний 10 образцов, изменялись в диапазоне 886÷941 кН. Среднее значение – 934,1 кН. Усилия, определенные теоретически – 883,6 кН. Погрешность 5,7%.

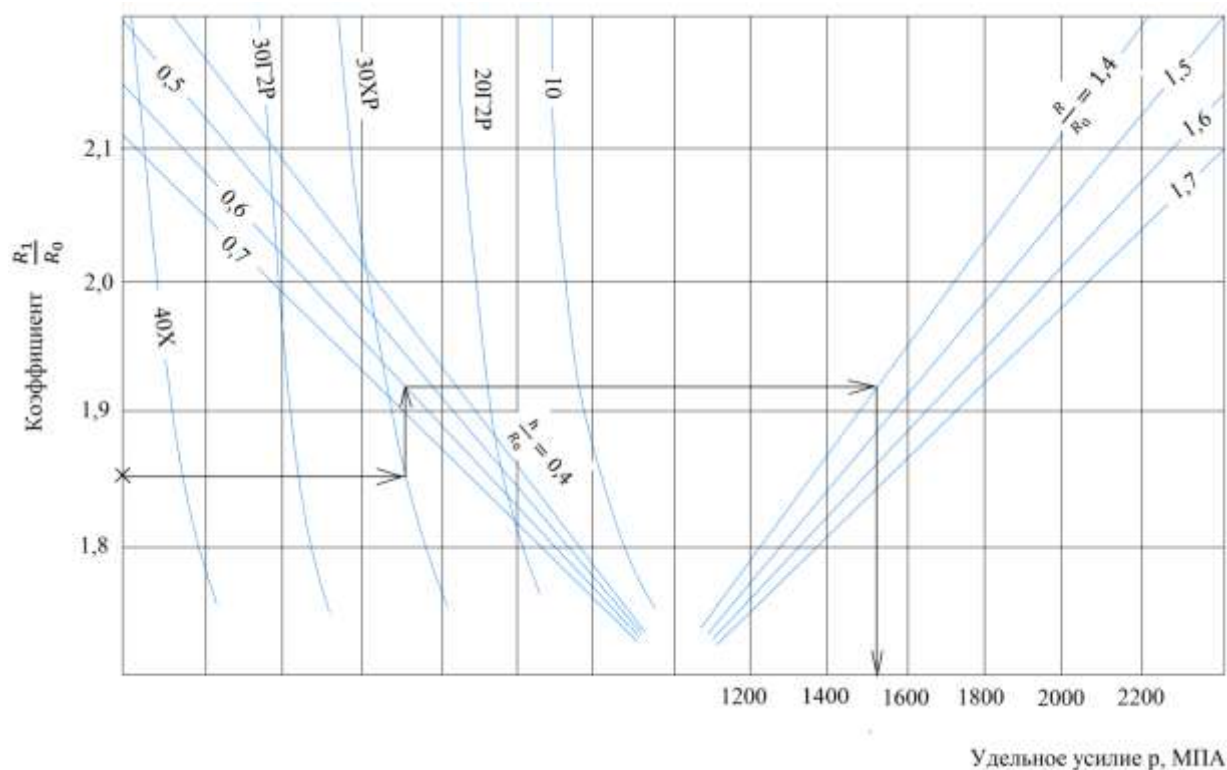


Рис. 3. Номограмма определения удельных усилий штамповки головок с фланцем

## Выводы

1. Используя вариационный метод в дискретной постановке, разработана математическая модель и выполнены расчеты энергосиловых параметров процесса штамповки головок стержневых крепежных изделий с фланцем.

2. Окончательные результаты выполненных расчетов представлены в виде номограммы, используя которую можно определять усилия деформирования в зависимости от соотношения размеров штампуемой головки для марок стали, широко применяемых при изготовлении стержневых крепежных изделий.

3. Результаты исследования использовались при разработке технологии холодной штамповки путевых шурупов с фланцевой головкой (ГОСТ 809-71) на многопозиционных автоматах-комбайнах в условиях ОАО «ММК-Метиз» (г. Магнитогорск).

## Список литературы

1. Крепежные изделия для современного машиностроения / И.А. Воробьев, С.В., Овчинников Г.В. Бунатян и др. Нижний Новгород: МПК-сервис, 2016. 520 с.
2. Мокринский В.И., Железков О.С. Новые прогрессивные виды и технологические процессы изготовления крепежных изделий. Сер. Метизное производство. Вып. 2. М.: Ин-т Черметинформация, 1990. 22 с.
3. Развитие теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 112-114.
4. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. М.: Металлургиздат, 1963. 672 с.
5. Паршин В.Г., Поляков М.Г., Железков О.С. Метод определения усилий холодной высадки головок болтов и винтов // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 1975. № 12. С. 48-49.
6. Паршин В.Г., Железков О.С. Определение усилий холодной объемной штамповки осесимметричных деталей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 3. С. 86-89.
7. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / О.М. Смирнов, С.А. Тулупов, М.А. Ценин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 2. С. 36-42.
8. Методы исследования механических характеристик металлов и сплавов в процессах обработки давлением с учетом неоднородности структуры / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4. С. 26-31
9. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968. 266 с.
10. Растегаев М.В. Новый метод равномерного осаждения образцов для определения истинного сопротивления деформации и коэффициента внешнего трения // Заводская лаборатория. 1940. № 3. С. 354-355.

## Сведения об авторах

**Железков Олег Сергеевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ferumoff@mail.ru

**Харченко Максим Викторович** – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kharchenko.mv@bk.ru.

**Салганик Виктор Матвеевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий обработки материалов. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: salganik@mail.ru.

**Лизов Салимжан Бурамбаевич** – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: salimzhan.1996@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## ENERGY-POWER PARAMETERS OF THE PROCESS OF STAMPING THE HEADS OF ROD PRODUCTS WITH A FLANGE

**Oleg S. Zhelezkov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ferumoff@mail.ru

**Maxim V. Kharchenko** – Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kharchenko.mv@bk.ru.

**Viktor M. Salganik** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: salganik@mail.ru.

**Salimgan B. Lizov** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: salimzhan.1996@mail.ru.

**Abstract.** *On the basis of the variational method, a mathematical model has been developed and calculations of energy-power parameters of the process of stamping the heads of rod fasteners with a flange have been performed. The relations of the deformation theory of plasticity were used. The rheological properties of the deformable metal were set as a model of a rigid-plastic medium with nonlinear hardening. The hardening curve was described by an exponential dependence proposed by G. A. Smirnov-Alyayev. The stamping process was considered in a cylindrical system of coordinate axes  $r, z, \varphi$ . The volume of the head was divided into rigid and plastic regions, the interface between which was described by a quadratic parabola with a variable parameter  $a$ . The plastic area was divided into two zones. For each zone were asked the functions of the radial displacements  $U_r$ , that are consistent with the boundary conditions and was very close to the actual metal flow. Using the corresponding Cauchy differential dependencies and the incompressibility condition, the components of the strain tensor  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \gamma_{zr}$  and the strain intensity  $\varepsilon_i$  were determined, using which the work of internal forces, friction forces, and shear forces was determined. The search for the minimum of complete deformation operation  $A^{\min}$  was performed by numerical methods using a specially developed program. According to the found values of the minimum total deformation work  $A^{\min}$ , the stamping forces  $P$  and the specific forces  $p = P/F_0$ , where  $F_0$  is the cross-sectional area of the rod, were determined. Based on the results of calculations, a nomogram was constructed that allows determining the specific forces  $p$  of stamping depending on the relative dimensions of the head flange for rod fasteners made of 10, 20Г2Р, 30Г2Р, 30ХР and 40Х steels. Experimental studies were carried out, during which heads with a flange were stamped out of grade 10 steel. The discrepancy between theoretical and experimental results was 5.7 %.*

**Keywords:** *rod fasteners, head with flange, variation method, displacement functions, work of internal forces, work of friction forces, power parameters, stamping forces.*

*This work is carried out within a framework of the government order (No. FZRU-2020-0011) of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation*

---

Ссылка на статью:

Железков О.С., Харченко М.В., Салганик В.М., Лизов С.Б. Энергосиловые параметры процесса штамповки головок стержневых изделий с фланцем // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2(33). С. 24-28.

Zhelezkov O.S., Kharchenko M.V., Salganik V.M., Lizov S.B. Energy-power parameters of the process of stamping the heads of rod products with a flange. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 24-28.

УДК 621.73.042.01

Пчельников А.В., Казадаева О.А.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ QFORM ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ПРУТКОВ

**Аннотация.** Исследованы процессы ковки прутка большого диаметра на гидравлическом прессе с помощью моделирования. В работе показаны результаты моделирования процессов ковки прутка в программе Qform. Приведены значения сопротивления деформации сплава Inconel 718, используемые при моделировании процессов. Показаны различия в деформации заготовки при ковке различным инструментом с различной подачей и величиной обжатия не только с точки зрения накопления деформации, но и с точки зрения вероятности возникновения дефектов в заготовке. Для прогнозирования появления возможных деформационных дефектов выполнен расчет накопления поврежденности при ковке. Для расчета поврежденности использована формула Кокрофта-Лэтэма.

**Ключевые слова:** ковка, сопротивление деформации, Inconel 718, поврежденность, Qform, критерий Кокрофта-Лэтэма.

Повышение качества изделий является важной задачей для каждого предприятия. Полуфабрикаты, получаемые штамповкой из деформируемых сплавов, должны обладать достаточно мелкой структурой и отсутствием дефектов, таких как поры, разрывы, трещины и др. Особенно для сплавов на основе никеля, используемых для изготовления дисков газотурбинных двигателей, работающих при высоких температурах, повышение накопленной степени деформации и уменьшение трещин, которые возникают из-за низкой пластичности сплавов, всегда является актуальной задачей. В направлении улучшения деформации прутка за счет изменения геометрии инструмента уже опубликовано много работ [1–4]. Одним из возможных путей улучшения структуры прутка может быть не только изменение геометрии рабочей части инструмента, но и выбор оптимальных режимов деформирования, которые обеспечили бы наилучшую деформацию во всем сечении прутка при минимальном образовании дефектов в виде трещин на поверхности.

В работах Алиева И.С., Жбанкова Е.Г. и других [1, 2, 4] представлены исследования накопления деформации за счет макросдвигов несимметричным инструментом. Однако описанный Алиевым И.С. и другими исследователями подход приводит к дополнительным сдвигающим нагрузкам и значительно усложняет инструмент и процесс ковки. Высокая склонность некоторых сплавов к образованию трещин на поверхности при деформации делает практически невозможным применение такой технологии ковки при низкой пластичности материала.

Увеличение степени деформации при ковке прутков и биллетов может не только улучшить структуру заготовки, но и ускорить процесс получения биллета. Таким образом, при определении технологии ковки биллетов производители стремятся увеличить степень деформации, что часто может привести к значительному увеличению количества дефектов на поверхности. Целью данной работы является исследование различных вариантов ковки не только с точки зрения равномерности и величины накопленной степени деформации, но и с точки зрения образования дефектов внутри и на поверхности заготовки.

Моделирование выполнено в программе Qform V8. В работе рассмотрено несколько вариантов геометрии бойков: плоские, вырезные бойки с углом выреза 100, 120 и 135°, комбинированные и круглым вырезом с углом охвата 120°. Заготовка для моделирования ковки на прессе взята диаметром 400 мм из никелевого сплава Inconel 718. Температура нагрева заготовки под деформацию 1040°C. Сопротивление деформации данного материала при моделировании задано с помощью уравнения [5]

$$\sigma = \sigma_p (1 - \exp(-C_\varepsilon))^{1/2} - (\sigma_p - \sigma_s) \left( 1 - \exp \left( - \ln 2 \left( \frac{\varepsilon - \beta_{ap}}{\varepsilon_p} \right)^m \right) \right);$$

$$\sigma_p = a_1 \bar{\varepsilon}^{b1} \exp \left( \frac{c_1 Q}{RT} \right),$$

$$\sigma_s = a_2 \bar{\varepsilon}^{b2} \exp \left( \frac{c_2 Q}{RT} \right),$$

$$C = a_3 \bar{\varepsilon}^{b3} \exp \left( \frac{c_3 Q}{RT} \right),$$

$$\varepsilon_p = a_4 \bar{\varepsilon}^{b4} \exp \left( \frac{c_4 Q}{RT} \right),$$

где  $\sigma$  – сопротивление деформации;  
 $\sigma_p$  – максимальное напряжение течения;  
 $\sigma_s$  – установившееся сопротивление деформации;  
 $\bar{\varepsilon}$  – скорость деформации;  
 $\varepsilon$  – степень деформации;  
 $T$  – температура;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная.  
 Энергия активации  $Q=400$  кДж/моль.

Коэффициенты для уравнения подобраны с целью получения хорошей сходимости результатов расчета сопротивления деформации с результатами эксперимента, приведенными в работе Yan-Xing Liu, Y.C. Lin и других [6].

Коэффициент	1	2	3	4
$a$	0,1	60	2	0,08
$b$	0,12	0,5	0,3	0,15
$c$	162	3	0,1	0,001

© Пчельников А.В., Казадаева О.А., 2020

Сравнение графиков сопротивления деформации в зависимости от температуры и скорости деформации, полученные расчетом и результатами эксперимента, приведены на рис. 1.

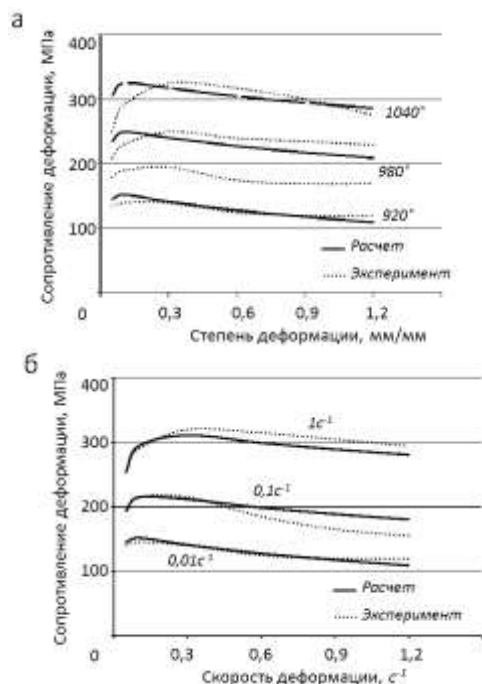


Рис. 1. Сопротивление деформации:  
а – при скорости деформации  $0,01\text{c}^{-1}$ ;  
б – при температуре  $1040^\circ\text{C}$

Проведено моделированиековки прутка протяжкой. При этом подача составляла 70, 120, 170 и 220 мм, что соответствует отношению подачи к диаметру заготовки 0,3, 0,4 и 0,5 соответственно. Скорость движения инструмента 30 мм/с. Ковка осуществлялась за 4 прохода с поворотами на угол 90, 45,  $90^\circ$  после каждого прохода.

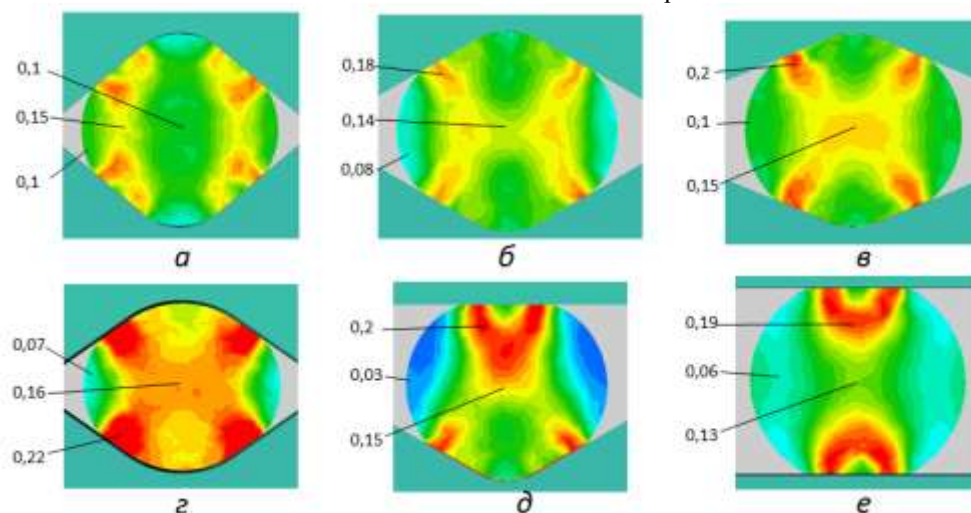


Рис. 2. Деформация, накопленная за одно обжатие прутка, при ковке:  
а – бойки с углом выреза  $100^\circ$ ; б –  $120^\circ$ ; в –  $135^\circ$ ; з – круглым вырезом; д – комбинированные бойки;  
е – плоские бойки

На рис. 2 приведены поля накопленной деформации после 1-го обжатия. Степень деформации приведена в логарифмическом виде. На рис. 2 хорошо видна форма очага деформации. При ковке бойками с углом выреза  $100^\circ$  (рис. 2, а) отчетливо видно, что очаг деформации не проходит через центр прутка. Середина прутка в таком случае остается менее деформированной, чем в остальных случаях. При ковке бойками с углом выреза более  $100^\circ$  деформация в осевой зоне становится больше (рис. 2, б, в). Наибольшую степень деформации центральной части заготовки обеспечивает ковка в бойках с круглым вырезом (рис. 2, г).

На рис. 3 показаны результаты, полученные при ковке с различной подачей и величиной обжатий. Результаты сведены в график зависимости деформации в центре (рис. 3, а) и на поверхности (рис. 3,б) от величины подачи. По графикам видно, что подача оказывает значительное влияние на величину накопленной деформации, как в центре, так и на поверхности, но в случаековки бойками с круглым вырезом влияние подачи на деформирование поверхности минимально. При увеличении подачи с 70 до 220 мм степень накопленной деформации в этом случае изменяется не более чем на 0,05.

Очевидно, что величина обжатий прутка при ковке оказывает большое влияние на накопление деформации, и гораздо большее, чем величина подачи. Увеличение обжатия прутка при ковке приводит к практически линейному увеличению деформации как в центре, так и на поверхности (рис. 4). Вариантковки бойками с углом выреза  $100^\circ$  имеет наименьшую величину деформации в центре, как и было показано на рис. 2, а, а при увеличении обжатия прирост осевой деформации значительно меньше, чем в других вариантахковки. Ковка на плоских бойках показала самую большую степень деформации поверхности среди остальных вариантовковки.

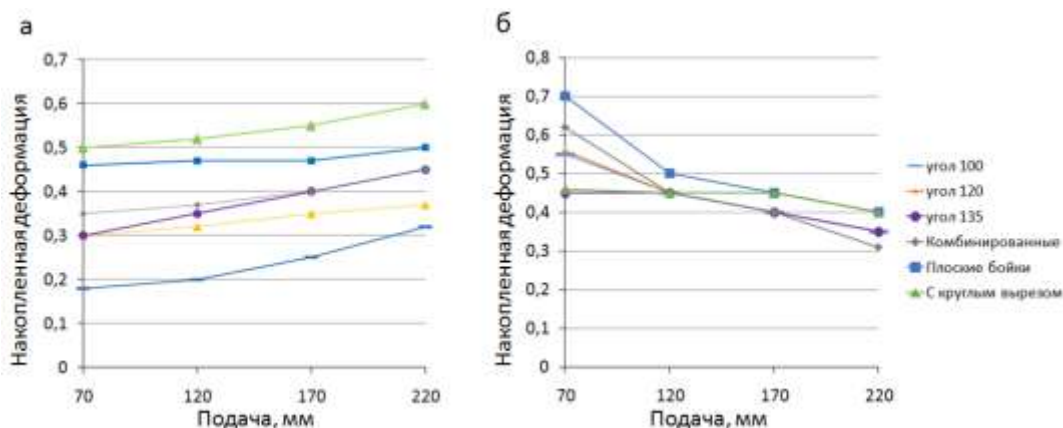


Рис. 3. Зависимость накопленной деформации прутка от подачи при величине обжатия 40 мм: а – в центре; б – на поверхности.

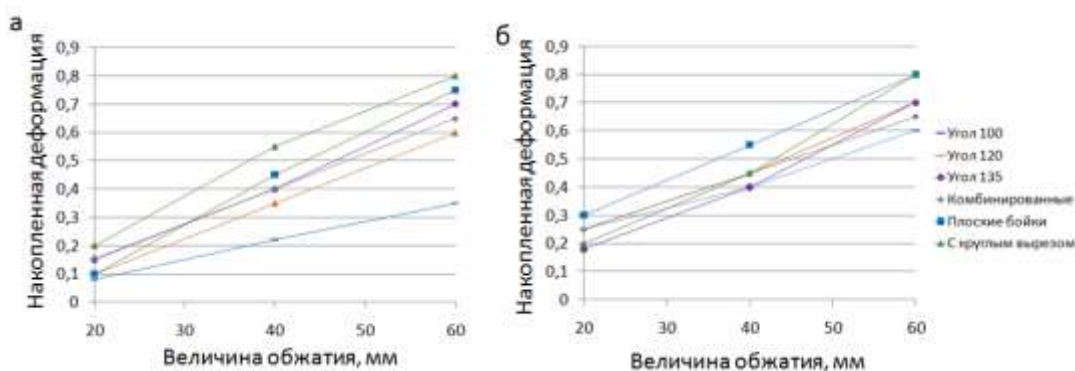


Рис. 4. Зависимость накопленной деформации прутка в зависимости от величины обжатия при подаче 220 мм: а – в центре; б – на поверхности

Величина накопленной степени деформации оказывает значительное влияние на структуру заготовки, но при увеличении величины обжатий, в значительной степени возникает вероятность появления трещин на ковальной поверхности и в центре прутка из-за низкой пластичности сплавов. Поэтому оценку оптимальности процесса необходимо проводить и с точки зрения появления внутренних дефектов, и трещин на поверхности. Для этого можно использовать величину накопленной поврежденности. Применение величины поврежденности для оптимизации процессов описано и в работах [7, 8]. Величина параметра поврежденности в данной работе была рассчитана по формуле Крокффта-Лэтэма

$$D = \int_0^{\varepsilon} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\varepsilon,$$

где  $\sigma^*$  – максимальные растягивающие напряжения;  
 $\sigma$  – напряжение течения;  
 $\varepsilon$  – степень деформации.

На рис. 5 показана величина накопленной поврежденности при подаче 220 мм в зависимости от величины обжатия. В случаековки на плоских бойках поврежденность значительно больше, чем при ковке любым другим вариантом инструмента (рис. 5,а), что говорит о высокой вероятности формирования дефектов на поверхности заготовки. При ковке бойками с круглым вырезом поврежденность имеет небольшую величину при небольших обжатиях, в сравнении с другими вариантами, что говорит о благоприятных условиях при деформации металла и низкой вероятности возникновения внутренних дефектов под воздействием растягивающих напряжений. Однако величина поврежденности значительно возрастает при увеличении обжатий (рис. 5, б).

На рис. 6 показана зависимость величины накопленной поврежденности от величины подачи протяжки. Значительно выражено увеличение поврежденности при снижении подачи ниже 120 мм во всех вариантахковки, кроме вариантаковки в вырезных бойках с углом выреза 100°. При увеличении подачи более 120 мм величина поврежденности как на поверхности, так и в центре прутка изменяется незначительно.

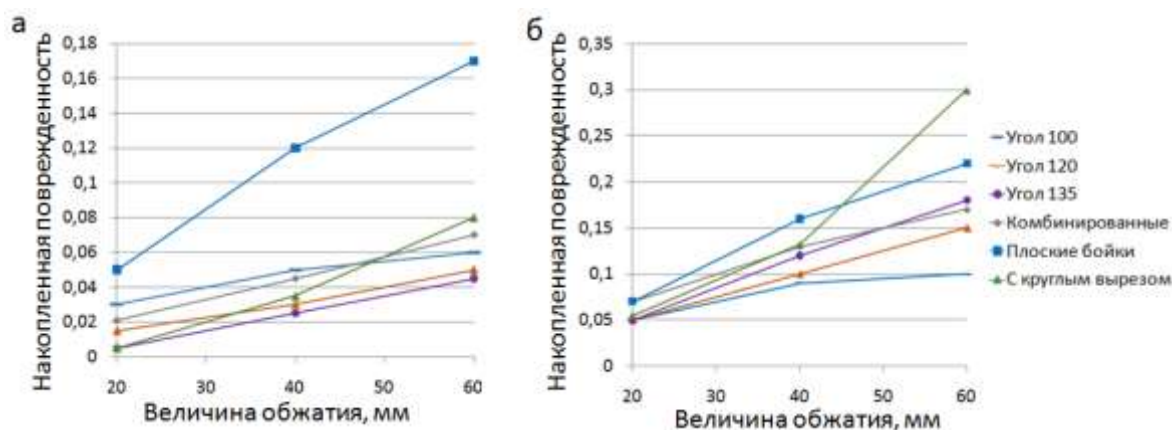


Рис. 5. Величина накопленной поврежденности от величины обжатий при подаче 220 мм: а – в центре; б – на поверхности

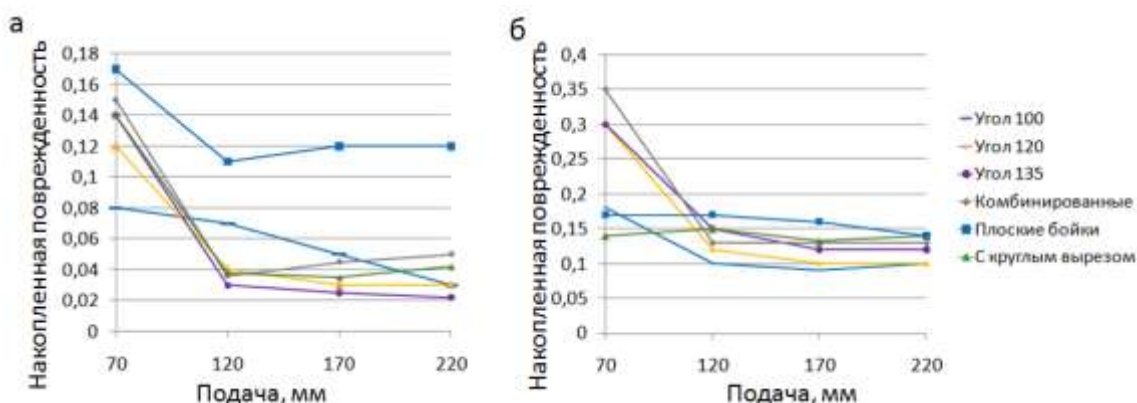


Рис. 6. Величина накопленной поврежденности от величины подачи протяжки при величине обжатий 40 мм: а – в центре; б – на поверхности

### Заключение

Из приведенных сравнений видно, что ковка вырезными бойками с углом выреза  $100^\circ$  приводит к низкой проработке центра прутка, судя по низкому значению параметра поврежденности на поверхности, хорошо подходит дляковки малопластичных сплавов. Ковка заготовок на плоских бойках позволяет добиться хорошей деформации в центре и особенно на поверхности заготовки, но количество дефектов, связанных с действием растягивающих напряжений при деформации, о чем говорит большая величина поврежденности, будет значительно больше, чем при ковке вырезными бойками. Круглый вырез бойков обеспечивает большую деформацию в центре прутка, не накапливается большая поврежденность при небольших обжатиях. Однако при значительной величине обжатий поврежденность поверхности резко возрастает (см. рис. 5, б), что негативно скажется на качестве поверхности прутка, и такой вариантковки не будет оптимальным. Ковка комбинированными бойками не имеет значительных преимуществ перед вырезными бойками с углом выреза  $120^\circ$  и  $135^\circ$  ни по накопленной деформации, ни по накопленной поврежденности.

### Список литературы

1. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Таган Л.В. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных-бойках несимметричной формы // Вестник НТУ «КПИ». Сер. Машиностроение. 2013. №3. С. 77-83.
2. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Таган Л.В. Направления совершенствования технологийковки крупных поковок на основе управления течением металла // Научный вестник ДГМА. 2012. №1. С. 7-25.
3. Марков О.Е. Исследование технологического процессаковки крупных поковок клиновыми бойками // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. №12. С. 24-27.
4. Алиева И.С., Жбанков Я.Г., Станков В.Ю. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками // Вестник НТУ «КПИ». Сер. Машиностроение. 2013. №43. С. 3-10.
5. Furre D., Goetz R., Shen G., Modeling and Simulation of Alloy 718 Microstructure and Mechanical Properties// 7<sup>th</sup> international Symposium on Superalloy 718 and Derivatives, TMS, 2010, pp. 663-677.
6. Yan-Xing Liu, Y.C. Lin, Hong-Bin Li, Dong-Xu Wen, Xiao-Min Chen, Ming-Song Chen. Study of dynamic recrystallisation in a Ni-based superalloy by ax-



- periments and cellular automaton model// Material Science & Engineering A 626, 2015, pp. 432-440.
7. Уманский А.А., Кадыков В.Н., Мартыянов Ю.А. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния металла при сортовой прокатке // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2013. № 4. С. 8.
8. Кинзин Д.И., Рычков С.С. Использование программного комплекса Deform-3D при моделировании процессов сортовой прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И. Носова. 2011. № 2. С. 45-48.

#### Сведения об авторах

**Пчельников Алексей Викторович** – начальник отдела проектирования технологических процессов, АО «Ступинская металлургическая компания», Ступино, Россия. E-mail: Pchelnikov@smk.ru.

**Казадаева Ольга Анатольевна** – инженер-технолог отдела проектирования технологических процессов АО «Ступинская металлургическая компания», Ступино, Россия. E-mail: Kazadaeva\_OA@smk.ru

---

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

---

#### QFORM PROGRAMM APPLICATION FOR BILLET FORGING SIMULATION

**Alexey V. Pchelnikov** – Head of technology development department of “SMK”, Stupino, Russia. E-mail: Pchelnikov@smk.ru.

**Olga A. Kazadaeva** – Engineer of technology development department of “SMK”, Stupino, Russia. E-mail: Kazadaeva\_OA@smk.ru.

***Abstracts.** The processes of forging of large-diameter billets on a hydraulic press are studied using simulation. This paper shows the results of process simulation of billets forging with the Qform program. There is values of the flow stress of Inconel 718 alloy used for forging simulation. The differences in the deformation of the billet during forging with different tools, with different feed and bites values are shown not only in terms of the accumulation of deformation, but also in terms of the probability of billet's defects. For prediction of the possible deformation defects appearance performed the calculation of damage accumulation during forging. The Cockcroft-Latham formula is used in damage calculation.*

***Keywords:** forging, flow stress, Inconel 718, damage, Qform, Cockcroft-Latham criterion.*

---

Ссылка на статью:

Пчельников А.В., Казадаева О.А. Применение программы Qform при моделировании процессовковки прутков // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2(33). С. 29-33.

Pchelnikov A.V., Kazadaeva O.A. Qform programm application for billet forging simulation. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 29-33.

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.74:669.1

Ефимов А.В., Чернов В.П.

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ 150ХНМ

**Аннотация.** Современное развитие машиностроительной отрасли связано с повышением качества готовых изделий и снижением затрат на их производство. В условиях современного литейного производства сталь с первоначальной структурой часто не удовлетворяет предъявляемым требованиям без дополнительной обработки или же каких-либо дополнительных воздействий на процессы при их изготовлении. В настоящее время на производстве применяется достаточно много способов улучшения качества металла, воздействуя на него на стадии кристаллизации. Регулировать свойства готового металла можно уже на начальных стадиях приготовления с помощью внешнего воздействия на расплав. Варьируя режимы и методы обработки расплава, можно в широких пределах изменять структуру и свойства металла. Введение легирующих и модифицирующих элементов в расплав зачастую приводит не только к положительным, но и отрицательным побочным эффектам, многие элементы оказывают негативное воздействие на металл. При этом происходит увеличение стоимости. Использование внешних физических и теплофизических воздействий на расплав позволяет в значительной степени улучшить свойства металла без попадания в него нежелательных примесей, как происходит при легировании и модифицировании.

Изучено влияние внешних комплексных воздействий на структуру и свойства отливок из стали марки 150ХНМ. Разработаны режимы высокотемпературной обработки, параметры наносекундного электромагнитного импульса в процессе кристаллизации, режимы термовременной выдержки. Выявлено влияние перегрева металла, наносекундного электромагнитного импульса, термовременной выдержки на структуру и механические свойства отливок. Приведены результаты изменения свойств изделий за счет применения оптимальных режимов внешних комплексных воздействий.

**Ключевые слова:** высокотемпературная обработка, структура, сталь, наносекундный электромагнитный импульс, твердость, износостойкость, ударная вязкость, прочность.

### Введение

Современное развитие машиностроительной отрасли связано с повышением качества готовых изделий и снижением затрат на их производство. В условиях современного литейного производства сталь с первоначальной структурой часто не удовлетворяет предъявляемым требованиям без дополнительной обработки или же каких-либо дополнительных воздействий на процессы при их изготовлении.

В настоящее время на производстве применяется достаточно много способов улучшения качества металла путем воздействия на него на стадии кристаллизации. Наиболее часто повышение качества металла достигается путем введения легирующих и модифицирующих компонентов. Введение легирующих и модифицирующих элементов в расплав зачастую приводит не только к положительным, но и отрицательным побочным эффектам, многие элементы оказывают негативное воздействие на металл. При этом происходит увеличение стоимости.

Регулировать свойства готового металла можно уже на начальных стадиях приготовления с помощью внешнего воздействия на расплав. Варьируя режимы и методы обработки расплава, можно в широких пределах изменять структуру и свойства металла.

Использование внешних физических и теплофизических воздействий на расплав позволяет в значительной степени улучшать свойства металла без внесения в него дополнительных элементов, что происходит при легировании и модифицировании. Внешние воздействия на данной стадии используются гораздо реже, но являются очень эффективными. Они не содержат элементов вредного воздействия и обладают невысокой себестоимостью.

Из известных методов внешнего теплового, физического и теплофизического воздействия находят применение такие, как высокотемпературная обработка расплава, обработка электромагнитным импульсом, а также термическое воздействие на твердый металл [2–4].

### Методика проведения исследований

Высокотемпературная обработка расплавов (ВТОР) заключается в нагреве металла до определенной температуры, выдержке при этой температуре в течение определенного времени, а затем охлаждении до температуры разливки. Происходит структурная гомогенизация стального расплава, что приводит к повышению целого ряда различных служебных характеристик и качества самих отливок [5, 6].

Определение температуры нагрева расплава основывается на изучении закономерностей изменения физических свойств жидких сплавов под тепловым

воздействием и взаимосвязи структурообразования и жидкого состояния расплава. Критической температурой является та величина температуры, при которой расплав стали находится в гомогенном состоянии. Гомогенное состояние обуславливает отсутствие явления гистерезиса в расплаве при измерении структурно чувствительных свойств, а также отсутствие крупных кластерных групп. Такая высокотемпературная структура расплава хорошо переохлаждается.

Определение критической температуры для стали марки 150XHM, при которой расплав находится в разупорядоченном состоянии, осуществляли путем анализа бинарных диаграмм состояния и термодинамических расчетов структурных составляющих металлических расплавов [7–9].

Доля разупорядоченной зоны определяется по уравнению

$$\Psi_{\text{раз}} = A \cdot \exp[-\Delta H_{\text{раз}}/(RT)], \quad (1)$$

где  $\Psi_{\text{раз}}$  – доля разупорядоченной зоны в расплаве;  $A$  – эмпирический коэффициент, индивидуальный для каждого сплава;  $\Delta H_{\text{раз}}$  – тепловой эффект полного термического разупорядочения кластеров в жидкости, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – фактическая температура, К.

Однако в этом уравнении неизвестны эмпирический коэффициент и теплота разупорядочения.

Теплота разупорядочения

$$\Delta H_{\text{раз}} = -1,26 + 2,95 \cdot 10^{-2} T_{\text{пл}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления стали, К.

Для определения доли разупорядоченной зоны коэффициент  $A$  имеет вид

$$A = \Psi_{\text{пл}} / \exp[-\Delta H_{\text{раз}}/(RT)]. \quad (3)$$

Исходя из приведенных данных [2] определилась доля разупорядоченной зоны при критической температуре. Доля разупорядоченной зоны составляет 0,5. Эта величина была взята как отправная точка при определении температуры нагрева стали.

Критическая температура нагрева

$$T_{\text{кр}} = \Delta H_{\text{раз}} / (R(\ln A - \ln \Psi_{\text{раз}})). \quad (4)$$

Критическая температура нагрева при степени разупорядочения равной 0,5 составляет  $T_{\text{кр}} = 1817$  °С для стали марки 150XHM.

Отработка технологии выплавки сплавов проводилась в литейной лаборатории кафедры ЛП и М ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова» с применением среднечастотной индукционной тигельной печи емкостью 60 кг с основной магнетитовой футеровкой. В данной печи выплавлялась марка стали 150XHM с химическим составом по ГОСТ 9487-80 масс. %: 1,4–1,6 С; 0,25–0,5 Si; 0,5–0,8 Mn; 0,8–1,25 Cr; 0,8–1,25 Ni; 0,1–0,3 Mo.

В процессе выплавки стали, после добавления и расплавления всех составляющих шихтовых компонентов, осуществлялся нагрев расплава до 1810–1820°С. Время выдержки при данных температурах во всех экспериментах составляло не более 2 мин, после чего охлаждали расплав до температуры заливки металла. Заливка осуществлялась в сухие песчано-глинистые формы.

Обработка НЭМИ стальных расплавов производилась непосредственно в самих ПГФ. После заливки расплава в форму непременно осуществлялась подача НЭМИ через графитовые электроды, контактирующие с жидким расплавом. Воздействие электромагнитного импульса происходило вплоть до полной кристаллизации металла в форме. Схема установки представлена на рис. 1.

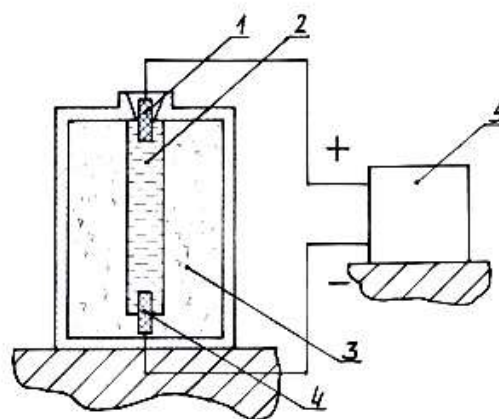


Рис. 1. Схема испытательной установки:  
1 – графитовый электрод с активным анодом;  
2 – отливка; 3 – ПГФ; 4 – графитовый электрод с пассивным катодом; 5 – источник НЭМИ

Параметры НЭМИ: длительность импульса – 0,5 нс; амплитуда – 10 кВ; частота наведения – 1000 Гц.

Термовременная выдержка (ТВВ) металла представляет собой термическую обработку, при которой осуществляется кратковременное тепловое воздействие на твердый металл, когда он находится в начальном состоянии образования новой фазы.

Термовременная выдержка основывается на перлитно-аустенитном фазовом превращении. Размеры перлитных зерен зависят от размеров зерен аустенита, из которых они образовались. Чем крупнее зерна аустенита, тем, как правило, большего размера перлитные зерна, образующиеся из них (рис. 2). Аустенитные зерна растут только при нагреве (при последующем охлаждении они не измельчаются), поэтому максимальная температура нагрева стали в аустенитном состоянии и ее наследственная зернистость определяют окончательный размер зерна. Задачей ТВВ является получение мелкодисперсной структуры за счет измельчения зерна в мелкозернистой аустенитной области [9].

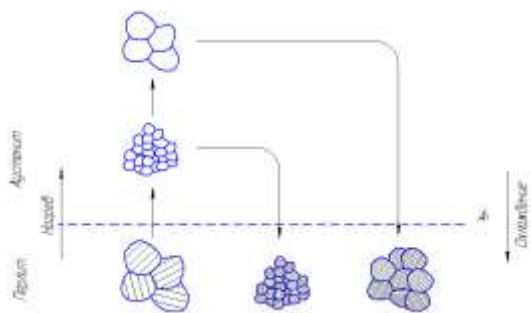


Рис. 2. Схема изменения размера зерна перлита в зависимости от нагрева в аустенитной области

Для определения и фиксирования температур начала фазовых переходов используется термический анализ, который представляет собой метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

В диапазоне температур от 750 до 780<sup>0</sup>С имеется область, которая характеризуется периодом зарождения новой фазы. При этом происходит растворение уже имеющихся карбидов и зарождение центров кристаллизации новой фазы (аустенита). Минимальный пик при 764<sup>0</sup>С характеризует максимальную скорость образования новых центров кристаллизации.

В предварительно нагретую печь до температуры 764<sup>0</sup>С помещали образцы стали. Расчет времени нагрева отливок производился способом, предложенным А. П. Гуляевым [10], для определения времени нагрева полного объема различных по форме изделий в различных средах, с учетом их расположения в печи. Время нагрева всех образцов составляет 20 мин. Охлаждение осуществлялось в воде. Количество цик-

лов обработки, равное двум при равных условиях, определено экспериментальным путем.

Производили сопоставление свойств и структуры экспериментальных образцов с литыми без всякой обработки.

#### Влияние комплексной обработки на сталь 150ХНМ

Структура литой стали марки 150ХНМ состоит из зернистого перлита и тонкой цементитной сетки, а также имеются вкрапления карбидов. Она состоит из перлитной матрицы и вторичного цементита, выделившегося по границам дендритных ветвей и первичных зерен аустенита в виде сетки и грубых пластин, растущих от пограничной сетки внутрь дендритных ветвей. В междуветвях дендритов образуются участки эвтектического карбида. Вдоль сетки и пластин вторичного карбида образуется ферритная оболочка. Карбиды находятся в виде сетки по границам перлитных колоний, также имеются карбиды компактной формы в объеме перлитных колоний. В зависимости от скорости охлаждения ниже точки А1 эвтектоидный аустенит превращается либо в пластинчатый, либо частично в пластинчатый, а частично в зернистый перлит. Величина аустенитного зерна соответствует 3–1 номеру по шкале ГОСТ 5639-82. Величина действительного зерна соответствует 5–3 номеру по шкале ГОСТ 5639-82. Дисперсность перлита соответствует 1–5 баллу по шкале ГОСТ 8233-56. Минимальные и максимальные размеры структурных составляющих для образцов литой стали составляют от 0,1 до 20 мкм (рис. 4).

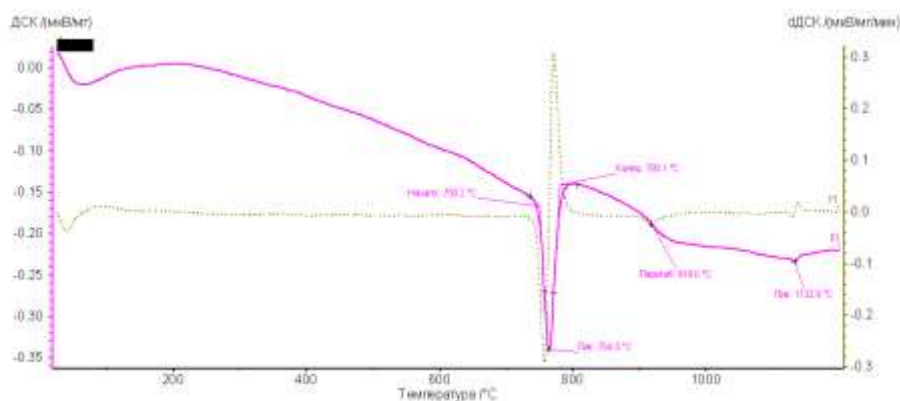


Рис. 3. Термограмма стали 150ХНМ

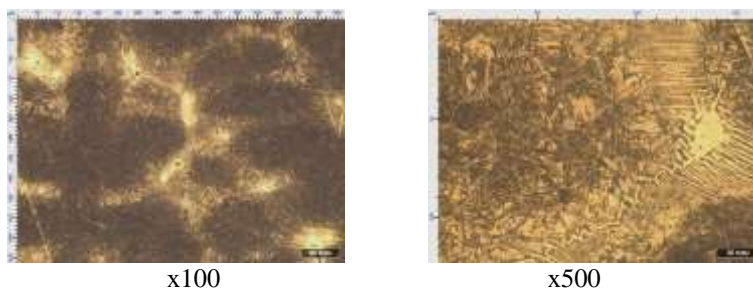


Рис. 4. Структура литой стали 150ХНМ

На рис. 5 представлена структура стали, прошедшая ВТОР. При перегреве количество цементита уменьшилось. Цементитная сетка почти вся растворилась (матрица разрушилась), стала тонкой и разорванной [11].

Перлит из зернистого перешел в пластинчатый 1–5 балл, межпластинчатое расстояние 0,20– 0,8 мкм. Размеры структурных включений уменьшились с 0,1–20 до 0,1–15 мкм. Изменение структуры способствует снижению твердости и прочности на 30%. Сталь, прошедшая (ВТОР), имеет более низкую износостойкость, которая понизилась также на 30%. Это происходит за счет растворения цементитной сетки и частичного растворения сетки карбидов по границам перлитных колоний. Упорядочение и измельчение структуры после (ВТОР) способствует повышению ударной вязкости на 50%. Номер зерна меняется с 5-3 на 7-5.

На рис. 6 представлена структура образца стали 150ХНМ прошедшего обработку НЭМИ.

Структура 150ХНМ после обработки НЭМИ состоит из пластинчатого перлита, тонкой цементитной сетки и карбидов. Имеется перлитная матрица и вторичный цементит, выделившийся по границам дендритных ветвей и первичных зерен аустенита в виде сетки и грубых пластин, растущих от пограничной сетки внутрь дендритных ветвей. Карбиды расположены в

виде сетки по границам перлитных колоний, здесь же имеются и карбиды компактной формы в виде отдельных включений по телу зёрен. Величина аустенитного зерна изменяется до 4–2 номера. Величина действительного зерна соответствует 6–4 номеру по шкале ГОСТ 5639–82. Дисперсность перлита составляет 1–4 балл по шкале ГОСТ 8233–56. Межпластинчатое расстояние 0,2–0,6 мкм. Минимальные и максимальные размеры структурных составляющих 0,1–12 мкм. Произошло упорядочение и измельчение структуры. Зерно стало более мелким и равномерным. Повысилась дисперсность перлита. Цементитная сетка частично растворилась, стала более тонкой и разорванной. Вдоль сетки и пластин вторичного карбида образуется ферритная оболочка. Карбиды находятся в виде сетки по границам перлитных колоний, также имеются карбиды компактной формы в объеме перлитных колоний. Происходит равномерное распределение карбидов Cr в структуре обработанного металла, средние размеры карбидов хрома составляют 10 мкм.

За счёт повышения дисперсности структуры и более равномерного распределения структурных составляющих происходит повышение твердости и прочности на 17%. В частности, повышается износостойкость на 27%.

На рис. 7 представлена структура образца, прошедшего термовременную выдержку.

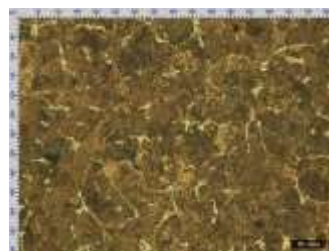


x100

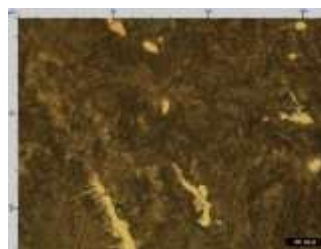


x500

Рис. 5. Структура стали 150ХНМ, прошедшей ВТОР

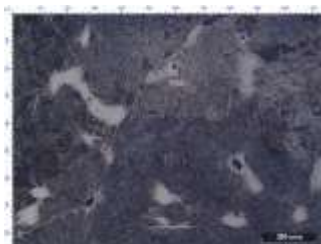


x100



x500

Рис. 6. Структура стали 150ХНМ, прошедшей обработку НЭМИ



x100



x500

Рис. 7. Структура после термовременной выдержки

Микроструктура образца состоит из пластинчатого перлита и карбидов. Карбиды также расположены как в виде сетки по границам аустенитных зерен, так и в виде отдельных включений по телу зерен. Величина действительного зерна соответствует 7–8 номеру по шкале ГОСТ 5639–82. Дисперсность перлита соответствует 4–5 баллу по шкале 1 ГОСТ 8233–56. Минимальные и максимальные размеры структурных составляющих для образца стали составляют от 0,1 до 5 мкм.

После второго цикла термовременной обработки твердость образца повысилась на 47%, износостойкость на 57%. Произошла рекристаллизация структуры стали. Выявилась новая мелкодисперсная фаза пластинчатого перлита.

На рис. 8 представлена структура образца, прошедшего совместную обработку ВТОР, НЭМИ и ТВВ.

Образец, прошедший НЭМИ + ВТОР+ТВВ, ха-

рактеризуется бейнитной структурой. Имеется верхний бейнит и бейнит зернистый, образованный в результате переохлажденного аустенита. Наблюдается полное отсутствие цементитной сетки. В структуре – цементитный видманштетт и карбиды компактной формы. Частично выделился троостит. Минимальные и максимальные размеры структурных составляющих 0,1–8 мкм. После комплексной обработки произошла значительная рекристаллизация стали. В значительной степени произошло измельчение, упорядочение структурных составляющих [12].

Новая бейнитная структура способствует понижению твердости и прочности на 20%, в то время как износостойкость повысилась на 92%, а ударная вязкость – на 50 %.

В табл. 1 представлены структурные соотношения образцов из стали 150ХНМ.

В табл. 2 представлены данные механических свойств.

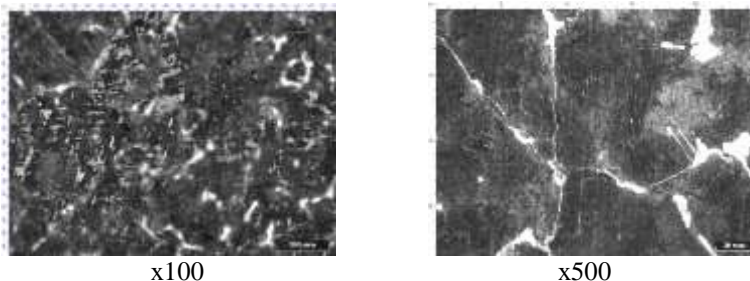


Рис. 8. Структура образца, прошедшего НЭМИ + ВТОР+ТВВ

Таблица 1

Структурное соотношение образцов из стали 150ХНМ

Образец	Величина аустенита	Балл перлита	Номер зерна	Межпластинчатое расстояние, мк	Размеры структурных включений, мкм
Литой	3 - 1	1 - 5	5 - 3	0,20 – 0,8	0,1 - 20
ВТОР	-	1 - 5	7 - 5	0,20 – 0,8	0,1 - 15
НЭМИ	4 - 2	1 - 4	6 - 4	0,20 – 0,6	0,1 - 12
ТВВ	3 - 1	4 - 5	7 - 8	0,6 – 0,8	0,1 – 5
ВТОР+НЭМИ+ТВВ	вер.бейнит троостит	-	дендр.	-	0,1 – 8

Таблица 2

Механические свойства образцов из стали 150ХНМ

Образец	Литой	ВТОР	НЭМИ	ТВВ	ВТОР+ НЭМИ+ТВВ
Твердость, НВ	428	290	498	670	280
Прочность $\sigma_b$ , МПа	1413	970	1715	2230	930
Износостойкость, Ки	1,18	0,81	1,5	0,69	1,45
Ударная вязкость, КСV	4	6	4	4	6

### Результаты исследований

Под влиянием внешних воздействий в структуре стали происходят значительные изменения. При ВТОР уменьшается количество цементита, почти полностью растворяется цементитная сетка, зернистый перлит переходит в пластинчатый, происходит измельчение зерна. При воздействии на низколегированную углеродистую сталь ВТОР снижает твердость и прочность, при этом повышает пластические свойства.

В структуре образцов из стали 150ХНМ, прошедших обработку НЭМИ, имеется перлитная матрица и вторичный цементит, выделившийся по границам дендритных ветвей и первичных зерен аустенита в виде сетки и грубых пластин. Величина аустенитного зерна изменяется до 4–2 номера. Величина действительного зерна соответствует 6–4 номеру. Повысилась дисперсность перлита. Цементитная сетка частично растворилась, стала более тонкой и разорванной. При обработке НЭМИ происходит повышение твердости, прочности и износостойкости.

Применение ТВВ приводит к появлению более мелкозернистой равномерной структуры, уменьшению размеров структурных составляющих. В значительной степени изменяется фазовый состав. Происходит повышение износостойкости стали.

Применение высокотемпературной обработки в процессе выплавки совместно с наносекундным электромагнитным импульсом при кристаллизации расплава и последующей термовременной выдержке способствует улучшению микроструктуры отливок в целом, что ведет за собой повышение качества отливок без введения дополнительных легирующих элементов и применения сложной высокотемпературной термической обработки в твердом виде.

### Выводы

В данной работе:

- определены основные параметры высокотемпературной обработки: критическая температура нагрева, время выдержки;
- рассмотрено влияние высокотемпературной обработки на структуру и свойства отливок из стали марки 150ХНМ и разработана технология ее применения;
- изучено влияние НЭМИ на структуру и свойства отливок, разработана технология его применения в процессе кристаллизации расплава в форме;
- установлены режимы термовременной выдержки: температура нагрева, время выдержки, количество циклов;
- наибольшее влияние на прочностные характеристики и структуру оказывает термовременная выдержка.

Применение внешних воздействий позволяет в значительной степени снизить неоднородность структуры, устранить шихтовую наследственность, из-

мельчить и упорядочить структурные составляющие, устранив грубую неравномерную наследственную структуру. Это способствует повышению механических прочностных свойств литых заготовок из данной марки стали, что, в свою очередь, способствует снижению энергетических и экономических затрат на легирование и дальнейшую термическую обработку.

### Список литературы

1. Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Шабурова Н.А. Облучение расплавов металлов мощными электромагнитными импульсами / Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург; Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, 1996. 5 с.
2. Михалкина И.В. Выбор и обоснование режима высокотемпературной обработки расплава литейной штамповой стали с целью улучшения ее структуры и свойств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2015. 23 с.
3. Спасский А.Г. Основы литейного производства: учеб. пособие. М.: Металлургиздат, 1950. 319 с.
4. Григорьев А.К., Коджаспиров Г.Е. Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве. Л.: Машиностроение, 1985. 143 с.
5. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов сплавов. М.: Металлургия, 1968. Т. 1. 1172 с.
6. Чернов В.П. Теория расплавов: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 79 с.
7. Чернов В.П. Теория расплавов: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 143 с.
8. Савина Л.Г. Влияние высокотемпературной обработки расплава на структуру и свойства высокоуглеродистых сплавов железа: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2003. 129 с.
9. Новохатский И.А., Архаров В.И. Определение относительных долей структурных составляющих металлических расплавов // ФММ. М.: Металлургия, 1971. Т. 31. №6. С. 1263-1267.
10. Гуляев А.А. Металловедение. Изд. 5-е перераб. М.: Металлургия, 1977. 647 с.
11. Ефимов А.В., Чернов В.П. Термовременная обработка отливок из стали марки 150ХНМ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. №1. С. 79–84.
12. Ефимов А.В., Чернов В.П. Влияние внешних воздействий на структуру и свойства стальных отливок // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сборник материалов 76-й международной научно-технической конференции / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2018. С. 11–17.

Сведения об авторах

**Ефимов Андрей Витальевич** – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [unspok@mail.ru](mailto:unspok@mail.ru).

**Чернов Виктор Петрович** – д-р техн. наук, проф., профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [tchernov42@mail.ru](mailto:tchernov42@mail.ru).

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**INFLUENCE OF EXTERNAL INFLUENCES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CASTINGS MADE OF 150XNM STEEL**

**Andrey V. Efimov** – Postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [unspok@mail.ru](mailto:unspok@mail.ru).

**Victor P. Chernov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [tchernov42@mail.ru](mailto:tchernov42@mail.ru).

**Abstract.** *Modern development of the machine-building industry is associated with improving the quality of finished products and reducing the cost of their production. In modern foundry production, steel with the original structure often does not meet the requirements without additional processing or any additional effects on the processes in their manufacture. Currently, there are quite a lot of ways to improve the quality of metal in production, affecting it at the stage of crystallization. You can adjust the properties of the finished metal already at the initial stages of preparation – by external influence on the melt. By varying the modes and methods of processing the melt, you can change the structure and properties of the metal in a wide range. The introduction of alloying and modifying elements in the melt often leads not only to positive, but also to negative side effects, many elements have a negative impact on the metal. When this occurs, the increase in the cost. The use of external physical and thermal effects on the melt allows to significantly improve the properties of the metal without getting into it undesirable impurities, as occurs during alloying and modification.*

*The influence of external complex effects on the structure and properties of castings made of steel grade 35L. Developed modes of high-temperature processing, the parameters of nanosecond electromagnetic pulse in the process of crystallization, the modes of thermal aging. The influence of metal overheating, nanosecond electromagnetic pulse, thermal aging on the structure and mechanical properties of castings is revealed. The results of changes in the properties of products through the use of optimal modes of external complex effects.*

**Keywords:** *high-temperature processing, structure, steel, nanosecond electromagnetic pulse, hardness, wear resistance, toughness, strength.*

---

Ссылка на статью:

Ефимов А.В., Чернов В.П. Влияние внешних воздействий на структуру и свойства отливок из стали 150XNM // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2 (33). С. 34-40.

Efimov A.V., Chernov V.P. Influence of external influences on the structure and properties of castings made of 150XNM steel. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp.34-40.



## 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. proizvodv.**) 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
- авторская справка

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

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

- формат страницы – А4 (210x297мм), отступы: слева, справа и сверху по 18 мм, снизу – 20 мм; нумерация страниц снизу по центру;
- шрифт основного текста – Times New Roman размера 12 пунктов;
- межстрочный интервал – одинарный;
- отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 5 знаков (примерно 10 мм);
- формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается; размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов;
- горизонтальные страницы допускается оформить отдельно от вертикальных страниц статьи, они должны быть также формата А4;
- рисунки должны быть вставлены в текст;
- не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу;
- статья должна включать: УДК, авторов, название, аннотацию, ключевые слова, текст, список литературы, сведения об авторах. 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