

# **ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**№ 1 (32) 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 материалобработки  
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 27.03.2020. Заказ 127. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 1 (32) 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 27.03.2020. Order 127. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>4</b>
Бунеева Е.А., Мошкунев В.В., Столяров А.М., Потапова М.В. <b>О ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ МЕСТА ПРИЛОЖЕНИЯ МЯГКОГО ОБЖАТИЯ СЛЯБОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ ТРУБНОЙ СТАЛИ .....</b>	<b>4</b>
Агарков А.Ю., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Бабин Г.В., Кириличев М.В., Морозов В.В. <b>ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ ОБРАЗУЮЩИХСЯ «НАРОСТОВ» НА ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ РАЗЛИВОЧНОГО СТАКАНА ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ МАРКИ С45Е .....</b>	<b>11</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>18</b>
Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Михалкина И.В., Горленко Д.А., Норец А.И. <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРОКАТНОГО ВАЛКА ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ .....</b>	<b>18</b>
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ .....</b>	<b>26</b>
Кальченко А.А., Пашченко К.Г., Кургузов С.А. <b>ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ В РЕЖИМЕ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ .....</b>	<b>26</b>
Арзамасцева В.А., Железков О.С., Лактюшин А.А. <b>ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВНЕКОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ДВУХОПОРНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ГИБКЕ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАГОТОВОК .....</b>	<b>31</b>
Дрягун Э.П., Белан А.К., Белан О.А. <b>РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ САМОНАРЕЗАЮЩИХ ВИНТОВ В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ».....</b>	<b>35</b>
Румянцев М.И., Завалишин А.Н. <b>РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В ЛИНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ.....</b>	<b>41</b>
Тютеряков Н.Ш., Савинов А.С., Андросенко М.В., Рудь К.И., Залилов Р.В. <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАНТЮЩИЕ РОЛИКИ ВАЛКОВОЙ АРМАТУРЫ RTC СОРТОВЫХ СТАНОВ ПАО «ММК», В ПРОЦЕССЕ СКРУЧИВАНИЯ ПОЛОСЫ.....</b>	<b>47</b>
<b>МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>50</b>
Зотов С.В., Лимарев А.С., Мезин И.Ю., Гун И.Г., Понурко И.В. <b>АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ПРИ ВОСТАНОВЛЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ.....</b>	<b>50</b>

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS.....</b>	<b>4</b>
Buneyeva Y.A., Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V. <b>ABOUT THE POSSIBILITY OF CORRECTION THE LOCATION OF THE SOFT REDUCTION FOR THE CONTINUOUSLY CASTED SLABS .....</b>	<b>4</b>
Agarkov A.Yu., Rutsikii D.V., Zuyban N.A., Babin G.V., Kirilichev M.V., Morozov V.V. <b>IDENTIFICATION OF THE NATURE OF THE FORMED "GROWTHS" ON THE INNER WALL OF THE POURING CUP DURING CONTINUOUS CASTING OF C45E STEEL .....</b>	<b>16</b>
<b>FOUNDRY .....</b>	<b>18</b>
Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Mihalkina I.V., Gorlenko D.A., Noretch A.I. <b>CRYSTALLIZATION AND STRUCTURE FORMATION PROCESSES MODELING OF ROLL FROM ZAEUTEKTOID STEEL .....</b>	<b>18</b>
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....</b>	<b>26</b>
Kal'chenko A.A., Pashchenko K.G., Kurguzov S.A. <b>LIQUID FRICTION WIRE DRAWING TOOL .....</b>	<b>26</b>
Arzamastseva V. A., Zhelezkov O. S, Laktyushin A. A..... <b>GEOMETRICAL PARAMETERS OF NON-CONTACT ZONE DOUBLE-SEAT FLEXIBLE PLASTIC ROUND BARS .....</b>	<b>34</b>
Dryagun E.P., Belan A.K., Belan O.A. <b>DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF WIRES FOR SELF-TAPING SCREWS IN THE CONDITIONS OF OJSC "MMK-METIZ" .....</b>	<b>35</b>
Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N. <b>IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR STRIP TEMPERATURE CHANGE PREDICTION IN THE HOT STRIP ROLLING MILL .....</b>	<b>46</b>
Tyuteryakov N. Sh., Savinov A.S., Androsenko M.V., Rud K.I., Zalilov R.V. <b>CALCULATION OF FORCES ON THE TWIST ROLLERS OF RTC GUIDE FITTINGS OF PAO "MMK" SECTION ROLLING MILLS IN THE PROCESS OF STRIP COILING .....</b>	<b>47</b>
<b>MATERIAL SCIENCE AND THERMAL TREATMENT OF METALS AND ALLOYS .....</b>	<b>40</b>
Zotov S.V., Limarev A.S., Mezin I.Yu., Gun I.G., Ponurko I.V. <b>ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE PROCESSES OF FORMING COATINGS BASED ON NICKEL .....</b>	<b>54</b>

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.74.047

Бунеева Е.А., Мошкунов В.В., Столяров А.М., Потапова М.В.

## О ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ МЕСТА ПРИЛОЖЕНИЯ МЯГКОГО ОБЖАТИЯ СЛЯБОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ ТРУБНОЙ СТАЛИ

**Аннотация:** В работе изучена возможность корректировки места приложения мягкого обжатия путем регулирования длины лунки жидкого металла в слябах из трубной стали изменением интенсивности охлаждения в ЗВО МНЛЗ. Методика работы заключается в многовариантных расчетах по алгоритму, используемому в автоматизированной системе промышленной МНЛЗ. Для исследования выбрана низкоуглеродистая сталь класса прочности К60. Отливаются слябы с размерами поперечного сечения 350×2600 мм. Скорость вытягивания сляба равна 0,75 м/мин при трех значениях перегрева металла в промежуточном ковше над температурой ликвидуса, равных 14, 19 и 24 °С. Минимальное значение удельного расхода воды принято за единицу и является базовым значением. Относительные расходы воды увеличивались от 2 до 33 % (отн.) по сравнению с базовым значением. Всего проведен 21 расчет. Установлены линейные убывающие зависимости длины лунки жидкого металла в слябах от относительного расхода воды на вторичное охлаждение при различном перегреве металла. Выявлены возрастающие линейные зависимости величины коэффициента затвердевания стали от интенсивности вторичного охлаждения для разного перегрева металла. Следует отметить, при отливке непрерывнолитых слябов толщиной 350 мм из трубной стали со скоростью 0,75 м/мин возможна корректировка места приложения мягкого обжатия путем регулирования длины лунки жидкого металла. Для получения длины лунки в границах последнего 15-го сегмента необходимо при перегреве металла 19 °С иметь расход воды на вторичное охлаждение заготовки не менее чем на 25 % (отн.) выше базового, а при перегреве 14 °С – на 15 % (отн.). Предложено также более равномерное распределение воды по ширине отливаемой заготовки.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, трубная сталь, мягкое обжатие, сляб, длина лунки, регулирование, вторичное охлаждение.

В ККЦ ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» трубная сталь разливается на одноручьевой слябовой МНЛЗ криволинейного типа с базовым радиусом 11 м и вертикальным участком длиной около 2,7 м [1, 2]. Зона вторичного охлаждения машины состоит из 15 роликовых сегментов и оснащена оборудованием для мягкого обжатия отливаемой заготовки [3-5]. Место приложения мягкого обжатия на технологическом канале МНЛЗ выбирается следующим образом. Автоматизированная система машины по конкретным данным о разливке металла определяет номер сегмента, в котором закончилось затвердевание сляба, и назначает мягкое обжатие в двух предыдущих сегментах. В соответствии с мировой тенденцией увеличения толщины слябов из трубной стали, позволяющей увеличить степень обжатия заготовки непосредственно в процессе прокатки и обеспечить более высокое качество толстого горячекатаного листа для изготовления труб большого диаметра газопроводов, в цехе осуществлен переход от отливки слябов толщиной 300 мм к заготовкам толщиной 350 мм. Для этого проведена модернизация оборудования МНЛЗ [6], которая не коснулась изменения протяженности зоны вторичного охлаждения машины. Усовершенствование алгоритмов автоматизированной системы МНЛЗ позволило производить мягкое обжатие головной части отливаемой заготовки, а также

увеличить интенсивность обжатия в конечном сегменте. Увеличение толщины заготовки привело к росту протяженности лунки жидкого металла внутри сляба. При рекомендованном максимальном значении скорости вытягивания сляба из кристаллизатора длина лунки оказывалась за пределами зоны вторичного охлаждения. Автоматизированная система выдавала сообщение об ошибке и назначала обжатие не в 14-м и 15-м сегментах, а в 13-м и 14-м сегментах. На лунку в 15-м сегменте внешнего воздействия не оказывалось вообще, что делало мягкое обжатие практически бесполезным. Для эффективного воздействия на макроструктуру непрерывнолитых слябов толщиной 350 мм из трубной стали необходимо иметь лунку жидкого металла, не выходящую за пределы зоны вторичного охлаждения [7]. Регулировать протяженность лунки можно разными способами [8]. Наиболее действенным способом является изменение скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора. Однако уменьшение скорости разливки на одноручьевой МНЛЗ ведет к снижению ее производительности и неприемлемо. Известно, что на длину лунки оказывает влияние продолжительность затвердевания сляба, зависящая от режима вторичного охлаждения отливаемой заготовки [9, 10]. В работе изучена возможность корректировки места приложения мягкого обжатия путем регулирования длины лунки жидкого металла в слябах из трубной стали изменением интенсивности охлаждения в ЗВО МНЛЗ.

Методика работы заключается в многовариантных расчетах по алгоритму, используемому в автоматизированной системе промышленной МНЛЗ.

Исходные данные

Химический состав трубной стали класса прочности К60 (% по массе):

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N	Mo	Ti	Nb
0,07	0,24	1,62	0,002	0,008	0,09	0,20	0,13	0,04	0,006	0,003	0,019	0,049

Температура ликвидус стали данного состава равна 1517°C.

Сляб имел размеры поперечного сечения 350×2600 мм.

На рис. 1 приведены параметры температурно-скоростного режима разливки трубной стали на заготовке выбранного сечения.

Из рис. 1 видно, что максимально допустимая скорость вытягивания сляба для перегрева металла не выше 25°C равна 0,75 м/мин. Поэтому для расчетов была принята скорость вытягивания сляба 0,75 м/мин при трех значениях перегрева, равных 14, 19 и 24°C. В трех начальных вариантах расчета для каждого выбранного перегрева металла расходы воды по зонам ЗВО соответствовали нормативным. При этом для перегрева металла 14°C удельный расход воды на вторичное охлаждение сляба имел минимальную величину и его фактическое значение было условно принято за единицу относительного расхода воды – базовое значение. Пример результатов одного начального варианта расчета автоматизированной системы МНЛЗ представлен на рис. 2. На нем показана схема внут-

реннего строения сляба толщиной 350 мм на различном удалении от поверхности металла в кристаллизаторе. При базовом значении относительного расхода воды протяженность лунки жидкого металла внутри заготовки составила 34,19 м (рис. 2).

По аналогии были проведены расчеты длины лунки жидкого металла для трех значений перегрева металла и относительных расходов воды, увеличенных по сравнению с базовым значением на разную величину – в диапазоне от 2 до 33% (отн.). Результаты 21 расчета представлены на рис. 3 в виде зависимости длины лунки жидкого металла в слябах ( $L_{жс}$ , м) от относительного расхода воды на вторичное охлаждение ( $g_B$ ) при различном перегреве металла ( $\Delta t$ , °C) в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус.

Убывающие линейные зависимости описываются следующими уравнениями:

$$\Delta t = 14^\circ\text{C} \quad L_{жс} = 36,60 - 2,46g_B ; \quad (1)$$

$$\Delta t = 19^\circ\text{C} \quad L_{жс} = 36,53 - 2,19g_B ; \quad (2)$$

$$\Delta t = 24^\circ\text{C} \quad L_{жс} = 36,60 - 2,05g_B . \quad (3)$$

Анализ рис. 2 показывает, что при отливке сляба толщиной 350 мм со скоростью 0,75 м/мин для получения лунки жидкого металла в заготовке около 33,8 м (в границах 15-го сегмента ЗВО) необходимо при перегреве металла 19°C иметь расход воды на вторичное охлаждение заготовки не менее чем на 25% (отн.) выше базового, а при перегреве 14 °C – на 15% (отн.).

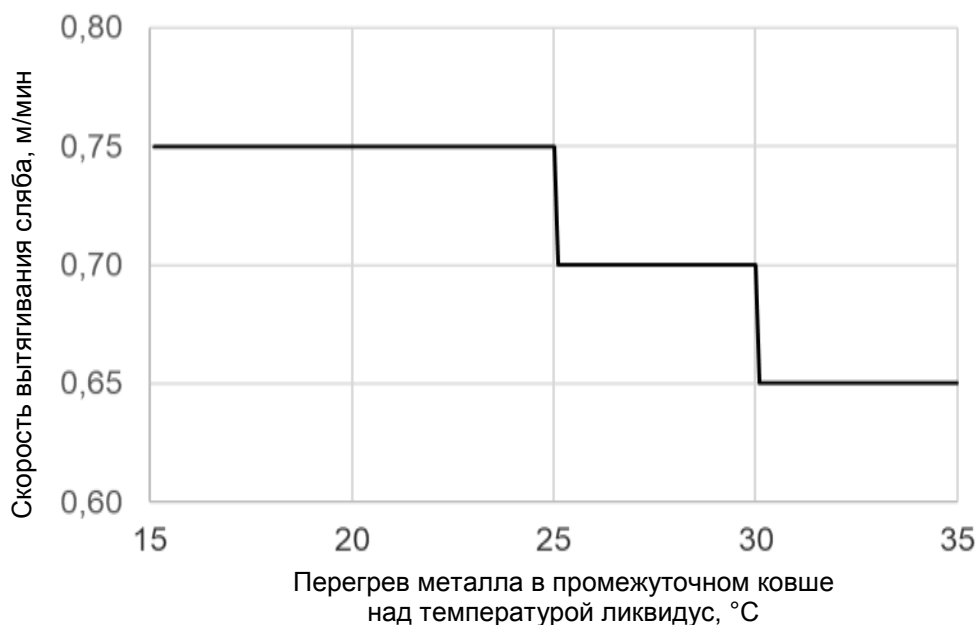


Рис. 1. Зависимость скорости вытягивания сляба толщиной 350 мм из низкоуглеродистой трубной стали от величины перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус

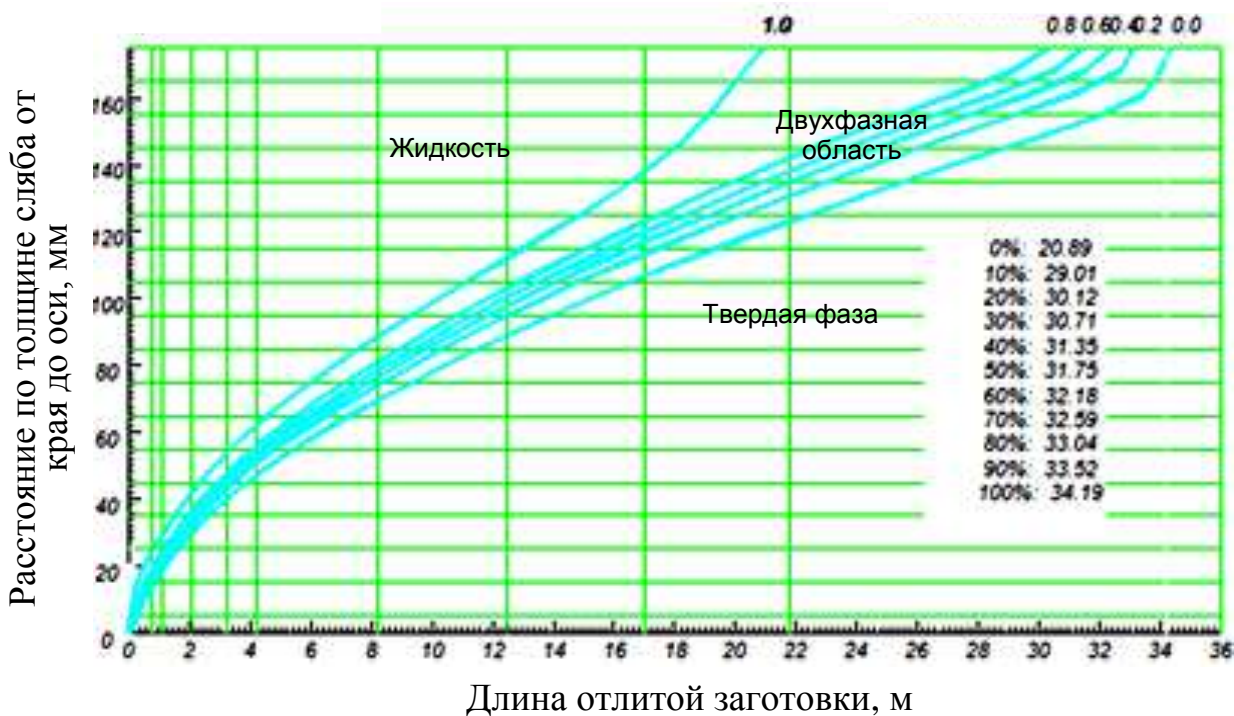


Рис. 2. Схема внутреннего строения сляба толщиной 350 мм при перегреве металла 14 °С на различном удалении от поверхности металла в кристаллизаторе при относительном расходе воды, равном единице: цифры у линий вверху – относительное содержание жидкости в двухфазной области на оси заготовки

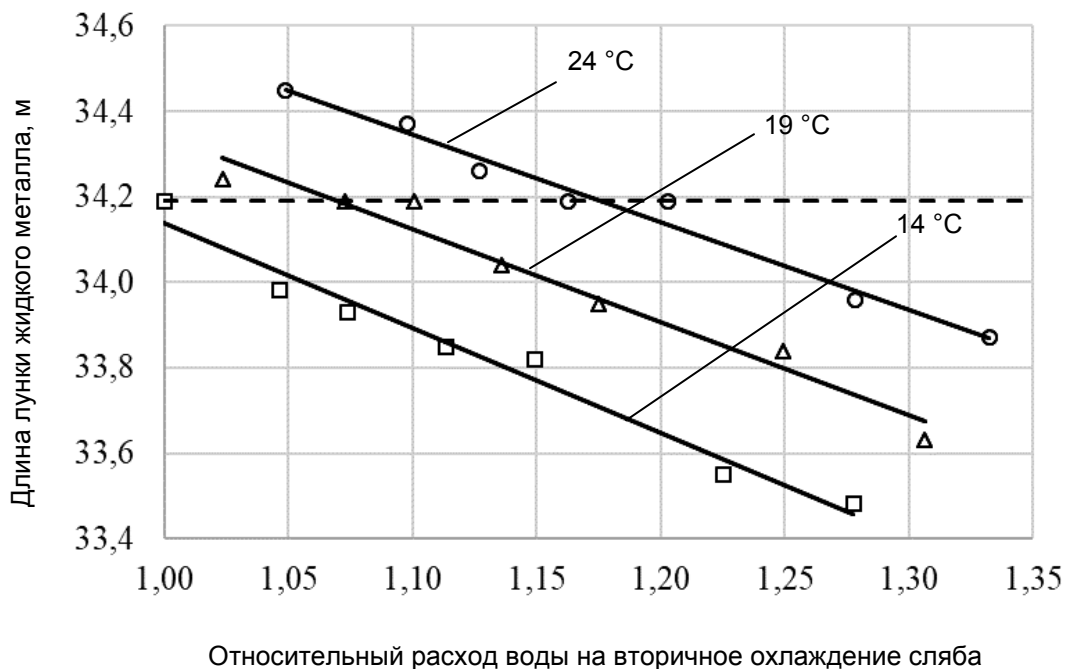


Рис. 3. Зависимость длины лунки жидкого металла в слябах от относительного расхода воды на вторичное охлаждение при различном перегреве металла (цифры у линий), пунктир – окончание ЗВО

Характер зависимостей (1) – (3) можно объяснить влиянием интенсивности вторичного охлаждения заготовки на процесс затвердевания стали.

Так как длина лунки жидкого металла зависит от продолжительности затвердевания непрерывнолитой заготовки [11], можно вычислить значение коэффициента затвердевания металла по формуле

$$k_3 = \frac{a}{2} \cdot \sqrt{\frac{w}{L_{жс}}}, \quad (4)$$

где  $k_3$  – коэффициент затвердевания стали, мм/мин<sup>0,5</sup>;

$a$  – толщина отливаемой заготовки, мм;

$w$  – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин;

$L_{жс}$  – длина лунки жидкого металла, м.

Результаты расчетов приведены на рис. 4. С увеличением относительного расхода воды ( $g_B$ ) величина коэффициента затвердевания стали ( $k_3$ , мм/мин<sup>0,5</sup>) линейно возрастает согласно зависимостям:

$$\Delta t = 14^\circ\text{C} \quad k_3 = 24,99 + 0,95g_B; \quad (5)$$

$$\Delta t = 19^\circ\text{C} \quad k_3 = 25,02 + 0,84g_B; \quad (6)$$

$$\Delta t = 24^\circ\text{C} \quad k_3 = 25,00 + 0,78g_B. \quad (7)$$

Следует отметить, что интервал изменения коэффициента затвердевания стали является сравнительно небольшим – от 25,82 до 26,19 мм/мин<sup>0,5</sup>.

Известно, что увеличение расхода охладителя в ЗВО может негативно сказаться на качестве отливаемого сляба. Поэтому в работе предложено изменить распределение воды по ширине заготовки. На рис. 5 и 6 показано относительное распределение воды в различных зонах ЗВО по существующему и предлагаемому вариантам.

Из рисунков видно, что в предлагаемом варианте рассматривается более равномерная подача воды по ширине сляба.

Таким образом, при отливке непрерывнолитых слябов толщиной 350 мм из трубной стали со скоростью 0,75 м/мин возможна корректировка места приложения мягкого обжатия путем регулирования длины лунки жидкого металла в заготовках. Для получения длины лунки в границах последнего 15-го сегмента необходимо при перегреве металла 19°C иметь расход воды на вторичное охлаждение заготовки не менее чем на 25% (отн.) выше базового, а при перегреве 14°C – на 15% (отн.). Предложено также более равномерное распределение воды по ширине отливаемой заготовки.

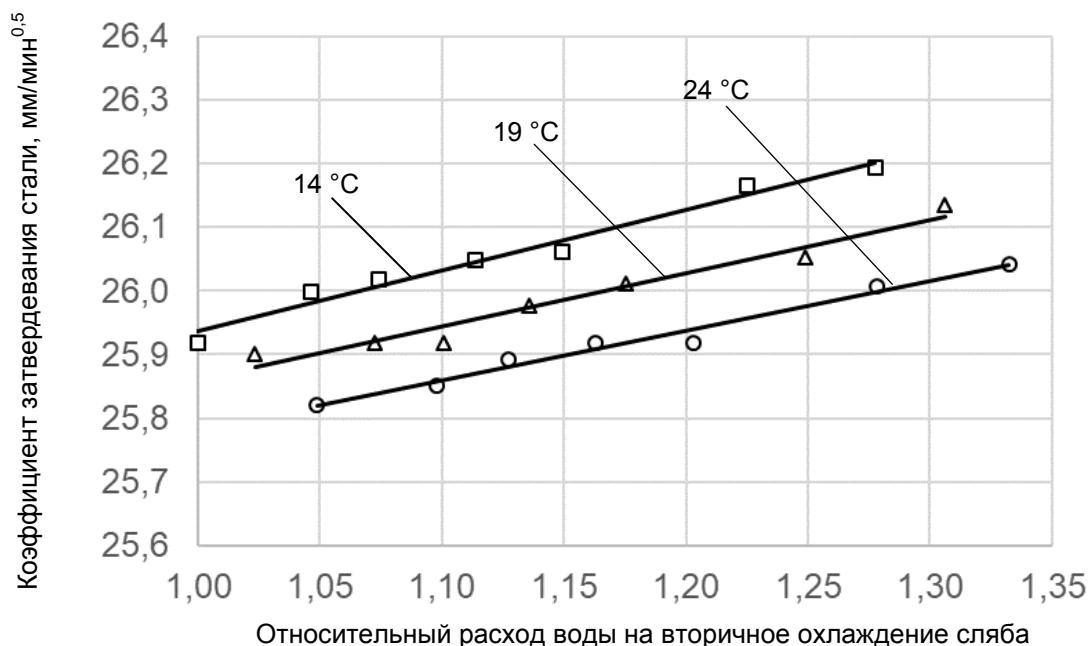


Рис. 4. Зависимость коэффициента затвердевания стали от относительного расхода воды на вторичное охлаждение при различном перегреве металла (цифры у линий)

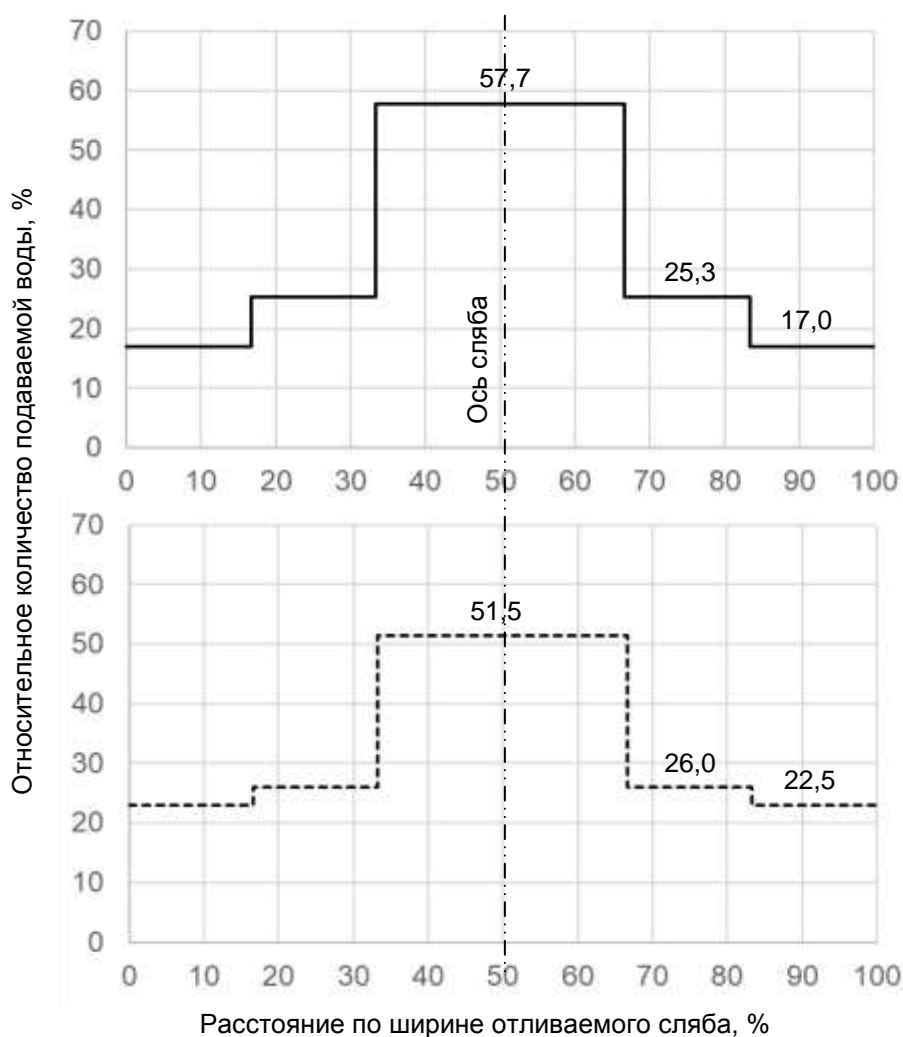


Рис. 5. Информация о распределении воды по ширине сляба по существующему (вверху) и предлагаемому (внизу) вариантам в 3-5 зонах ЗВО МНЛЗ

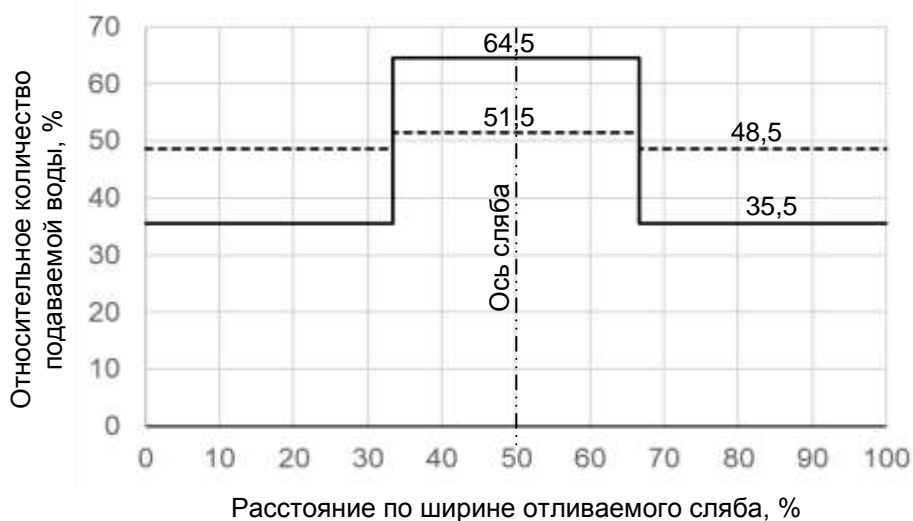


Рис. 6. Распределение воды по ширине сляба по существующему (сплошная линия) и предлагаемому (пунктирная линия) вариантам в 6, 8, 10 и 12 зонах ЗВО МНЛЗ по малому радиусу



## Список литературы

1. 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.
2. Столяров А.М., Мошкунов В.В., Казаков А.С. Мягкое обжатие слябов при разливке трубной стали на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 116 с.
3. Опыт эксплуатации новой одноручевой слябовой МНЛЗ с вертикальным участком / Прохоров С.В., Сарычев Б.А., Казаков А.С. и др. // Сталь. 2012. №7. С. 9-11.
4. Математическое моделирование процесса мягкого обжатия слябов при непрерывной разливке трубной стали / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров, А.С. Казаков и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №2 (42). С. 69 – 72.
5. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / А.М. Столяров, Сомнат Басу, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 24 – 27.
6. Модификация оборудования МНЛЗ №6 с целью освоения разливки сляба толщиной 350 мм / Д.В. Рабаджи, М.В. Злов, В.А. Авраменко и др. // Сборник трудов XV международного Конгресса сталеплавильщиков и производителей металла: Межрегиональная общественная организация «Ассоциация сталеплавильщиков», Москва – Тула, 15–19 октября 2018. М., 2018. С. 409–412.
7. Непрерывная разливка конвертерной трубной стали / Столяров А.М., Бунеева Е.А., Мошкунов В.В., Потапова М.В. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. №7 (230). С. 46-50.
8. Расчетно-экспериментальное определение границ зоны мягкого обжатия слябовой заготовки / С.В. Прохоров, В.В. Мошкунов, Д.В. Юречко и др. // Неделя металлов в Москве 13-16 ноября 2012 г. Сборник трудов конференций: ВНИИМЕТМАШ. М., 2013. С. 337 – 350.
9. Усовершенствование режима вторичного охлаждения непрерывнолитых слябов / Селиванов В.Н., Столяров А.М., Буданов Б.А. и др. // Труды V конгресса сталеплавильщиков. 1998. С. 411-412.
10. Определение оптимальных режимов вторичного охлаждения непрерывнолитых слябов / Тахаудинов Р.С., Бодяев Ю.А., Селиванов В.Н. и др. // Труды VII Международного конгресса сталеплавильщиков. 2003. С. 564-566.
11. Паршин В.М., Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. Липецк: ОАО «НЛМК». 2011. 221 с.

## Сведения об авторах

**Бунеева Евгения Александровна** – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Мошкунов Владимир Викторович** – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [mchm@magtu.ru](mailto:mchm@magtu.ru)

**Столяров Александр Михайлович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра металлургии и химических технологий Института металлургии, машиностроения и материалообработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [sam52.52@mail.ru](mailto:sam52.52@mail.ru)

**Потапова Марина Васильевна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**ABOUT THE POSSIBILITY OF CORRECTION THE LOCATION OF THE SOFT REDUCTION FOR THE CONTINUOUSLY CASTED SLABS**

**Yevgeniya A. Buneyeva** – PhD Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [mcm@magtu.ru](mailto:mcm@magtu.ru)

**Alexander M. Stolyarov** – Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [sam52.52@mail.ru](mailto:sam52.52@mail.ru)

**Vladimir V. Moshkunov** – Ph.D. (Eng.), engineer-technologist "SMS-Group", Magnitogorsk, Russia. E-mail: [mcm@magtu.ru](mailto:mcm@magtu.ru)

**Marina V. Potapova** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [marina\\_potapova8@mail.ru](mailto:marina_potapova8@mail.ru)

**Abstract:** *The possibility of correction the application place of soft reduction by adjusting the depth of liquid metal sump in pipe steel slabs by changing the cooling intensity in the secondary cooling zone of the CCM is studied in the work. The research method consists in multivariate calculations according to the algorithm used in the automated system of industrial CCM. Mild steel of strength class K60 was selected for the study (slabs with a cross section of 350 × 2600 mm). The draw speed of casted slab is equaled to 0.75 m per min with three values of metal overheating in the tundish above the liquidus temperature of 14, 19 and 24°C. Relative water consumption have increased from 2 to 33% (rel.) in comparison to the initial meaning. 21 calculations were performed. Linear decreasing dependences of the length of sump in slabs on the relative water consumption for secondary cooling at various overheating of the metal were established. Linear decreasing dependences of the length of sump in slabs on the relative water consumption for secondary cooling at various overheating of the metal were established. The increasing linear dependences of the steel solidification coefficient on the intensity of the secondary cooling for different overheating of the metal are revealed. It should be noted that in the course of 350 mm slabs casting at a speed of 0.75 m / min, it is possible to adjust the location of soft reduction application by correction the length of molten metal sump. For getting the sump length within the zone of the last 15th segment, when the metal overheats is equaled to 19°C, it is necessary to supply water consumption for secondary cooling not less than 25% higher than initial one, for conditions when overheating of metal is 14-15°C% (rel.). The more uniform distribution of water over the width of the casted billet is also recommended.*

**Keywords:** *continuous casting, pipe steel, soft reduction, slab, depth of sump, regulation, secondary cooling.*

---

Ссылка на статью:

Бунеева Е.А., Мошкунув В.В., Столяров А.М., Потапова М.В. О возможности корректировки места приложения мягкого обжатия слябовой непрерывнолитой заготовки из трубной стали // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 4-10.

Buneyeva Y.A., Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V. About the possibility of correction the location of the soft reduction for the continuously casted slabs. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 4-10.

УДК 669-147

Агарков А.Ю., Рущкий Д.В., Зюбан Н.А., Бабин Г.В., Кириличев М.В., Морозов В.В.

**ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ ОБРАЗУЮЩИХСЯ «НАРОСТОВ» НА ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ РАЗЛИВОЧНОГО СТАКАНА ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ МАРКИ С45Е**

**Аннотация.** *Предъявление особых требований по обрабатываемости резанием сталей на металлорежущих станках обуславливает потребность в получении сталей с нормируемым содержанием серы. Непрерывная разливка таких сталей приводит к ухудшению разливаемости, что снижает производительность и ухудшает качество металла из-за загрязнённости неметаллическими включениями. В работе на примере получения стали марки С45Е проведены исследования особенностей строения «нароста», извлеченного из внутренней полости погружного стакана. Исследованием методами оптической (Leica 8 C) и электронной (FEI Versa 3d) микроскопии, а также рентгеноструктурным анализом (Диффрактометр BrukerD8 Advance) установлено, что «нарост» имеет неоднородное строение. Поверхностные слои «нароста» содержат в составе тугоплавкие отложения корунда  $Al_2O_3$  толщиной от 2 до 8 мкм. Промежуточный слой, примыкающий к поверхностному, содержит отложения включений алюмомагнезильной шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  и включений сульфида кальция  $CaS$ , толщина слоя от 0,8 до 10 мкм. Отложения по толщине «нароста» располагаются послойно, чередуясь с металлом. Внутренний слой представляет собой коралловые слои отложений из сульфида кальция  $CaS$ , легкоплавких и тугоплавких алюминатов кальция типа  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $T_{пл} = 1535$  °С) и  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  ( $T_{пл} = 1745$  °С). Исследованием установлено, что основной причиной затягивания сталеразливочных каналов при разливке стали марки С45Е является образование отложений  $CaS$  и  $MgO \cdot Al_2O_3$  на внутренних слоях «нароста».*

**Ключевые слова:** непрерывнолитая заготовка, разливка, нормированное содержание серы, погружной стакан, нарост, разливаемость.

**Введение**

Повышение спроса на стали с нормируемым содержанием серы для нужд машиностроения обуславливает необходимость в получении сталей с особыми требованиями по обработке на металлорежущих станках, при одновременном сохранении высоких свойств металлопродукции, обеспечивающихся чистотой стали по неметаллическим включениям, химической, физической и структурной однородностью металла. В условиях ЭСПЦ АО «ВТЗ» получают сталь марки С45Е, которая производится согласно требованиям стандарта EN10083-2:2006. Для улучшения процесса образования короткой и ломкой стружки содержание серы в данной марке по стандарту EN10083-2:2006 должно составлять 0,020–0,035%, алюминия 0,015–0,050%. При выплавке и непрерывной разливке сталей с нормируемым содержанием серы образуются тугоплавкие неметаллические включения сложного химического состава, которые, откладываясь на внутренней поверхности стенок погружного стакана, приводят к частичному или полному закупориванию струи металла, что значительно ухудшает разливаемость стали на МНЛЗ. Исследованиями в работах [1-3] показано, что причинами зарастания полости погружного стакана являются отложения крупных комплексных неметаллических включений сложного химического состава, содержащих тугоплавкие алюминаты кальция типа ( $mCaO \cdot nAl_2O_3$ ), включения корунда ( $Al_2O_3$ ), шпинели и др. Зарастание погружного стакана вызывает преждевременное прекращение процесса разливки. Кроме того, затягивание дозаторов и неравномерная подача металла в кристаллизатор приводят к повышенной отбраковке непрерывнолитой заготовки по дефектам наружной поверхности и макроструктуры.

Исследованиями, проведенными в работах [4-6], показано, что основными причинами зарастания внутренней полости погружных стаканов являются:

- загрязненность стали твердыми тугоплавкими неметаллическими включениями;
- вторичное окисление стали в канале погружного стакана;
- затягивание неметаллических включений из шлака сталеразливочного ковша;
- размытие и быстрый износ огнеупорных материалов.

Перечисленные причины зарастания стаканов приводятся в большинстве своем для низкоуглеродистых сталей, в настоящее время разработано достаточно много эффективных способов, позволяющих увеличить их разливаемость. Однако при непрерывной разливке стали марки С45Е проблема повышения разливаемости сталей в настоящее время является актуальной.

Целью настоящей работы являлось выявление природы и причин образования наростов при непрерывной разливке стали марки С45Е с нормируемым содержанием серы.

**Материал и методика проведения исследований**

Технология производства стали марки С45Е в условиях АО «ВТЗ» состоит из следующих этапов: получение полупродукта в ДСП с заданным содержанием углерода и фосфора, легирование и десульфурация стали (содержание серы после внепечной обработки должно быть в пределах 0,017–0,028%); вакуумирование и обработка металла кальцийсодержащей проволокой, присадка серосодержащей проволоки для доведения концентрации серы до марочного состава; непрерывная разливка стали в квадратную заготовку 360 x 360 мм. Для теплоизоляции в промежуточный ковш добавляли теплоизолирующую смесь марки ECOSIV SAC10 производства ф.«DEREF». Непрерывная разливка осуществлялась закрытой струей на 4-ручьевого МНЛЗ.

© Агарков А.Ю., Рущкий Д.В., Зюбан Н.А., Бабин Г.В., Кириличев М.В., Морозов В.В., 2020

Характеристики МНЛЗ:

- тип установки – криволинейная, с переменным радиусом кривизны;
  - расстояние между ручьями – 1900 мм;
  - количество ручьев на установку – 4;
  - базовый радиус – 14 м;
  - количество точек разгиба слитка – 3 ( $K=14\ 000$  мм,  $K=19\ 000$  мм,  $K=34\ 000$  мм);
  - масса разливаемой плавки – 0 150 т;
  - кристаллизаторы конструкции ITALIMPIANTI, длина плит – 700 мм
  - скорость извлечения заготовки квадратного сечения  $360 \times 360$  мм – 0,45 м/мин;
  - машины газокислородной резки производства ф. «Gega»;
  - длина ходовых рельс – 3,5м;
  - $T_L+(18-30\ ^\circ\text{C})$ .
- Вес погонного метра заготовок, принятый для расчета расхода воды на ЗВО, составляет 1018 кг/м.  
Расход воды в кристаллизатор –  $3000 \pm 60$  л/мин.

Технологическое давление ТПК: №1 –  $10\ \text{кг/см}^2$ ; №2 –  $15\ \text{кг/см}^2$ ; №3 –  $20\ \text{кг/см}^2$ ; №4 –  $22\ \text{кг/см}^2$ ; №5 –  $23\ \text{кг/см}^2$ . Допускается корректировка технологического давления.

При использовании указанной технологии во время непрерывной разливки стали марки С45Е с нормируемым содержанием серы происходит затягивание полости погружного стакана, при этом максимальное количество разлитых плавков в серию составляет не более трех. Полное зарастание погружного стакана приводит к прекращению плавки и ее возврату на повторную внепечную обработку, что вызывает нерегламентированные простои и повышение энерго- и трудозатрат.

Для установления причин затягивания погружных стаканов проведено исследование состава нароста (рис. 1), извлеченного из верхней части стакана, после проведения серии из трех плавков стали марки С45Е.

Окончательный плавочный состав приведен в табл. 1.

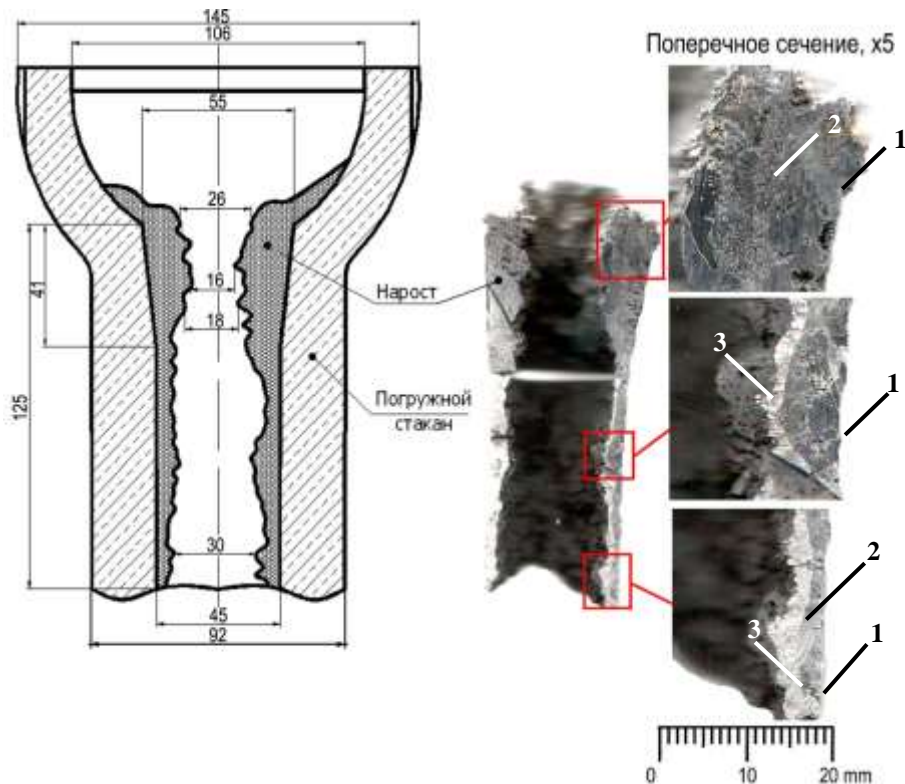


Рис. 1. Макротемплет нароста с внутренней поверхности погружного стакана

Таблица 1

Окончательный плавочный состав стали марки С45Е

Содержание элементов, %														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Sn	Ca	Al	Nb
Плавка № 291938														
0,46	0,29	0,75	0,014	0,0232	0,14	0,09	0,013	0,20	0,016	0,018	0,009	0,0021	0,0225	0,0016
Плавка № 291937														
0,48	0,28	0,74	0,010	0,0257	0,12	0,10	0,016	0,12	0,002	0,018	0,008	0,0022	0,0271	0,0015
Плавка № 291936														
0,47	0,28	0,73	0,009	0,0242	0,13	0,11	0,013	0,17	0,0014	0,018	0,095	0,0020	0,0220	0,0012

Элементный химический состав структурных составляющих определяли методом EDS анализа в режиме вторичных электронов с помощью электронного микроскопа FEI Versa 3D при увеличениях от 150 до 10000 крат.

Качественный и количественный рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре «BrukerD8 Advance» в излучении медного анода.

Анализ дифрактограмм и расшифровка фазового состава проводили с помощью программного обеспечения к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием лицензионной базы данных Powder-DiffractionFile-2 (The International Center for Diffraction Data).

### Результаты исследования

Исследование макроструктуры продольного темплата показало, что «нарост» имеет неоднородное

строение. По толщине «нароста» выявлены три характерных слоя:

1 – наружный слой, прилегающий к внутренней полости стакана (рис. 1, поз. 1);

2 – промежуточный слой (рис. 1, поз. 2);

3 – внутренний слой серого матового цвета имеющий вид коралловых отложений (рис. 1, поз. 3).

Исследование особенностей строения наружного слоя (см. рис. 1, поз. 1) показало, что поверхностный слой содержит отложения включений корунда  $Al_2O_3$ , при этом расположение включений носит послойный характер, чередуясь с металлом (рис. 2, а, табл. 2).

Промежуточный слоя «нароста» (рис. 1, поз. 2) содержит отложения включений алюмомагнезиальной шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  и включений сульфида кальция (CaS). Отложения в «наросте» имеют слоевое расположение, чередуясь с металлом (рис. 2, б, табл. 2).

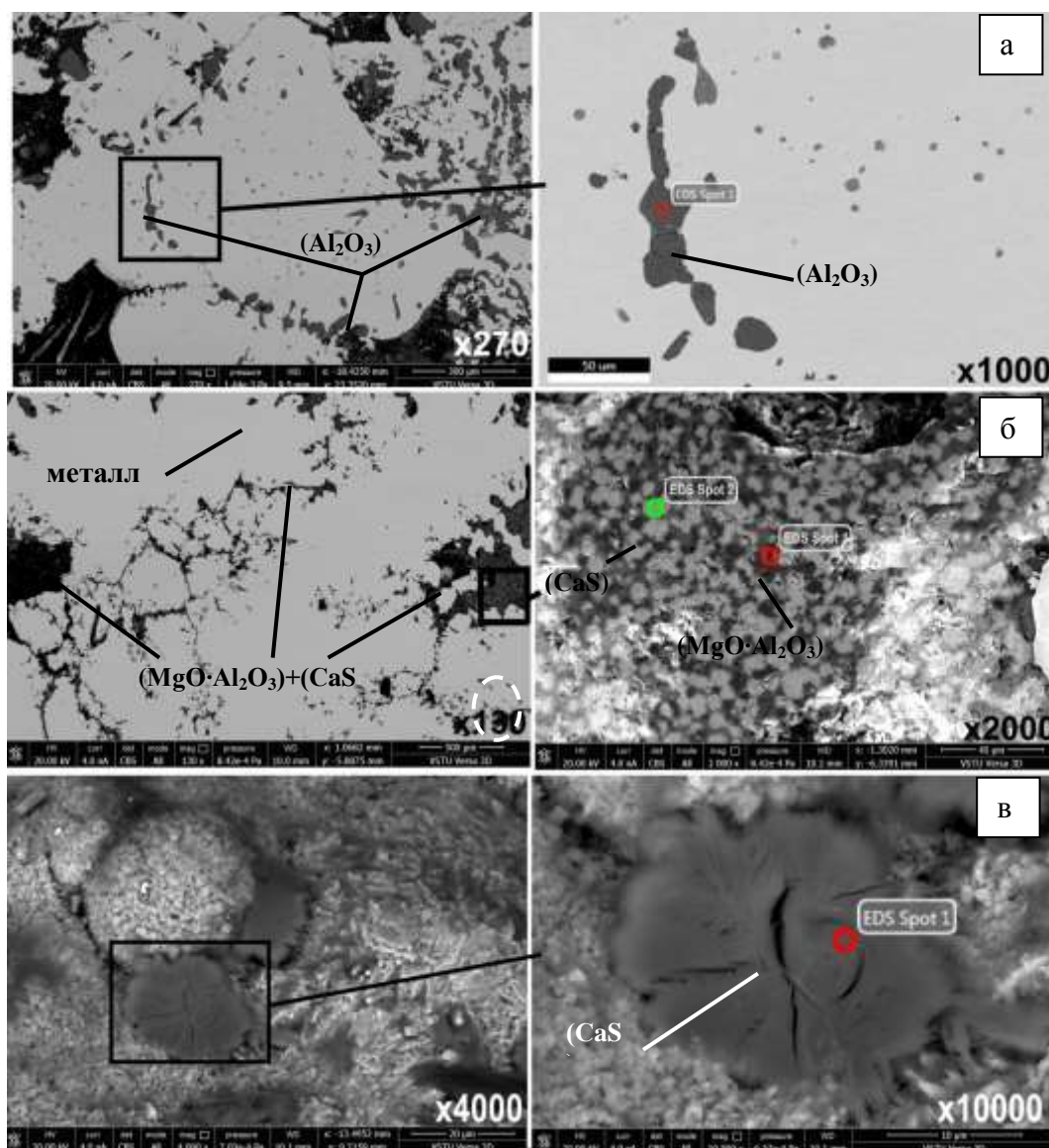


Рис. 2. Особенности строения нароста: а – наружный слой; б – переходный слой; в – внутренний слой

Химический состав составляющих нароста

Точка замера	Al	Mg	O	Ca	S	Fe
% вес.						
Spot 1 (см. рис. 2, а)	31,29	1,54	20,67	-	-	25,89
Spot 1 (см. рис. 2, б)	34,10	15,1	47,36	2,83	0,61	-
Spot 2 (см. рис. 2, б)	-	-	-	56,16	43,84	-
Spot 1 (см. рис. 2, в)			33,97	36,98	24,01	5,05

Внутренний слой нароста (рис. 1, поз. 3) имеет коралловые отложения, состоящие из сульфида кальция (CaS) и алюминатов кальция типа  $nAl_2O_3 \cdot mCaO$  (см. табл. 2).

Качественный и количественный рентгеноструктурный анализ (РСА) внутреннего слоя нароста показал, что он состоит из следующих составляющих (рис. 3):

- сульфид кальция CaS – олдамит в количестве 30%;
- алюминат кальция типа  $(3CaO \cdot Al_2O_3)$  в количестве 15%;
- алюминат кальция типа  $(CaO \cdot 2Al_2O_3)$  в количестве 8%;
- магнетит  $Fe_3O_4$  в количестве 47%.

Наличие магнетита связано с окислением внутренних стенок «нароста» во время контакта с атмосферой во время его извлечения из погружного стакана, а также во время пробоподготовки для проведения исследований.

В результате определения толщины слоев, а также идентификации структурных составляющих по высоте и сечению «нароста» получены данные об особенностях развития различных слоев на внутренней поверхности погружного стакана (рис. 4).

Толщина «нароста» на внутренней поверхности погружного стакана по его высоте изменяется неравномерно. Максимальная толщина слоя отложений находится в верхней части полости погружного стакана, общая толщина слоя достигает 20 мм, по мере продвижения к нижней части стакана толщина слоя «нароста» уменьшается до 7,5–3,0 мм. Наружный слой нароста, состоящий преимущественно из отложений корунда (см. рис. 2, а), имеет максимальное развитие в верхней части полости погружного стакана (рис. 4, а), в которой протяженность этого слоя составляет ~ 8,0 мм. В нижней части стакана протяженность слоя с отложениями корунда уменьшается в среднем до 3,5 мм, при этом его максимальная толщина не превышает 5 мм.

К поверхностному слою, состоящему из отложений корунда  $Al_2O_3$ , примыкает промежуточный слой, содержащий отложения алюмомагнезиальной шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  и включений сульфида кальция CaS (рис. 2, б). Толщина промежуточного слоя по высоте и сечению «нароста» изменяется аналогично поверхностному слою (рис. 4, а). Максимальная толщина в верхней части «нароста» (до 10 мм) в нижней части уменьшается до 2,0 мм. В среднем толщина промежуточного слоя «нароста», содержащего отложения  $MgO \cdot Al_2O_3 + CaS$ , составляет 4,5 мм.

Внутренний слой «нароста» находится на поверхности полости заросшего канала, состоит из отложений сульфида кальция CaS, а также алюминатов кальция типа  $3CaO \cdot Al_2O_3$  и  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  (рис. 2, в, табл. 2). Внутренний слой имеет небольшую протяженность по сравнению с поверхностным и промежуточными слоями. Толщина в верхней части «нароста» минимальная 0,5 мм в нижней части увеличивается до 5 мм. В среднем толщина промежуточного слоя «нароста», содержащего отложения  $CaS + mCaO \cdot nAl_2O_3$ , составляет 4,5–5,0 мм (рис. 4, а). Уменьшение толщины внутреннего слоя в его верхней части связано с его размывом поступающими порциями металлического расплава во время непрерывной разливки и как следствие попаданием отложений, содержащих сульфиды типа (CaS), алюминатов ( $mCaO \cdot nAl_2O_3$ ), алюмомагнезиальной шпинели ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) в затвердевающую непрерывнолитую заготовку, что также подтверждается работами [7, 8].

Относительная величина развития слоев «нароста» составляет (рис. 4, б):

- 36% с отложениями ( $Al_2O_3$ ) – поверхностный слой;
- 50% с отложениями (CaS) и  $(MgO \cdot Al_2O_3)$  – промежуточный слой;
- 14% с отложениями (CaS) и алюминатов кальция типа  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $T_{пл}=1535$  °C) и  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  ( $T_{пл}=1745$  °C) – внутренний слой.

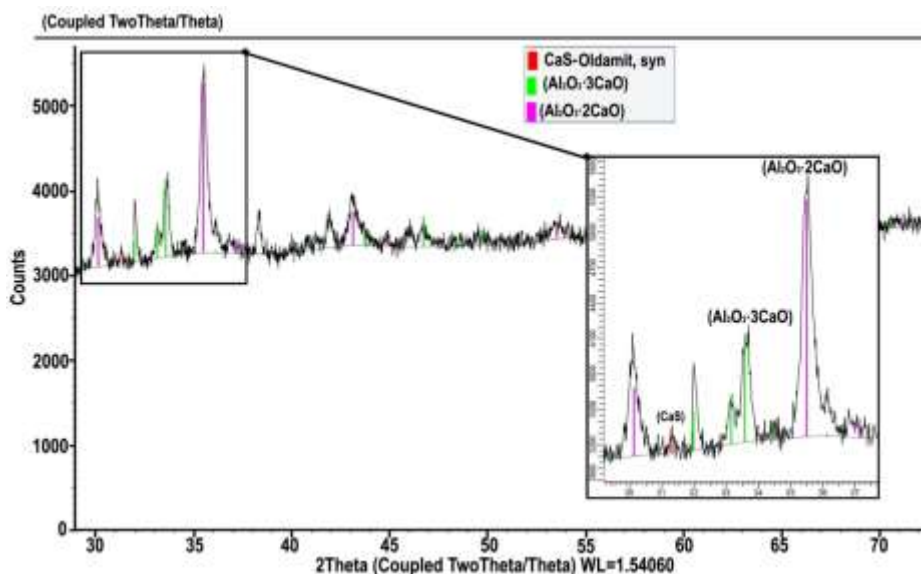


Рис. 3. Результаты рентгеноструктурного анализа внутреннего слоя

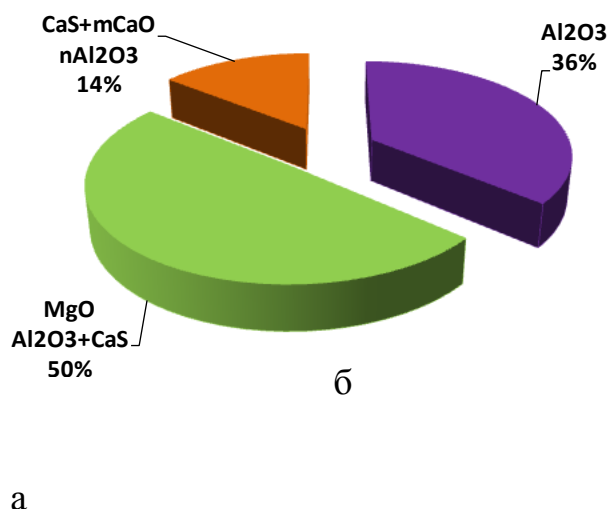
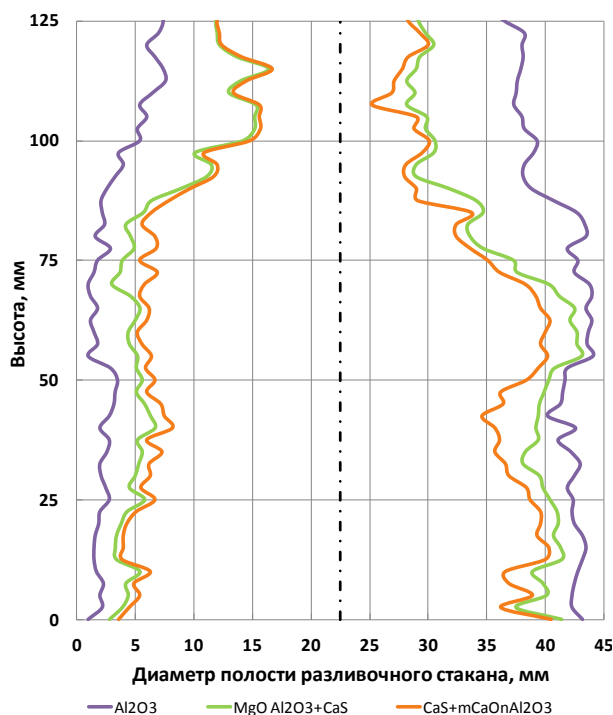


Рис. 4. Развитие структурных зон в «наросте»: а – изменение толщины слоев в «наросте» по высоте и сечению внутренней полости разливочного канала; б – относительное развитие слоев «нароста»

### Заключение

Исследование особенностей строения нароста, извлеченного из погружного стакана, показало, что основной причиной затягивания внутренней полости канала стакана является образование отложений CaS и MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхностных слоях «нароста», образовавшихся за счет налипания частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на внутренние стенки погружного стакана. Кроме частиц CaS причиной зарастания полости погружного стакана является отложение тугоплавких алюминатов кальция типа CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, являющихся продуктом

модифицирования неметаллических включений корунда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при обработке металлического расплава SiCa и Al.

### Список литературы

1. Information on [http://steelcast.ru/metal\\_quality\\_and\\_castability](http://steelcast.ru/metal_quality_and_castability)
2. Луковая М.С. Анализ процесса затягивания погружных стаканов при непрерывной разливке стали // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». Вып. 7. 2006. №10. С. 69–83.

3. Предоотращение зарастания каналов сталеразливочных ковшей / С.А. Горобовский, С.В. Казаков, С.В. Ефимов и др. // Сталь. 2003. №12. С. 16-18
4. Влияние некоторых технологических факторов на разливаемость раскисленной алюминием стали на сортовой МНЛЗ / А.А. Алексеенко, Е.В. Байбекова, С.Н. Кузнецов и др. // Электрометаллургия. 2007. №2. С. 16-20.
5. Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали / Л.М. Аксельрод, В.М. Паршин, Е.Ф. Мазуров // Сталь. 2007. №4. С. 30-33.
6. Применение стаканов-дозаторов с продувкой аргоном для повышения уровня разливаемости сталей / А.Н. Божесков, В.В. Казаков, А.А. Коростелев и др. // Сталь. 2015. №7. С. 3-15.
7. Formation mechanism of oxide-sulfide complex inclusions in high-sulfur-containing steel melts / Jae Hong and Joo Hyun Park // Metallurgical and materials transaction B. 2018. Vol. 49B. P. 311-324.
8. Металлургический эффект, достигаемый при обработке кальцием стали на МНЛЗ/ Г.К. Тенсхоф, В.Кестнер, Р. Шнайт // Черные металлы. 2007. №8. С. 28-35.

#### Сведения об авторах

**Агарков Артем Юрьевич** – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Руцкий Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Зюбан Николай Александрович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [tecmat49@vstu.ru](mailto:tecmat49@vstu.ru)

**Бабин Георгий Викторович** – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [babingv@mail.ru](mailto:babingv@mail.ru)

**Кириличев Михаил Владимирович** – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [misha\\_1992@mail.ru](mailto:misha_1992@mail.ru)

**Морозов Вадим Валерьевич** – начальник лаборатории выплавки и разливки стали ЦЗЛ АО «ВТЗ», Волжский, Россия. E-mail: [MorozovVV@vtz.ru](mailto:MorozovVV@vtz.ru)

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### IDENTIFICATION OF THE NATURE OF THE FORMED "GROWTHS" ON THE INNER WALL OF THE POURING CUP DURING CONTINUOUS CASTING OF C45E STEEL

**Artem Yu. Agarkov** – Postgraduate, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Dmitry V. Rutsikii** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Nikolay A. Zyuban** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief of department «Technology of Materials», Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: [tecmat49@vstu.ru](mailto:tecmat49@vstu.ru)

**Gorgiy V. Babin** – Postgraduate, Volgograd State Technical University Volgograd, Russia. E-mail: [babingv@mail.ru](mailto:babingv@mail.ru)

**Michail V. Kirilichev** – Postgraduate, Volgograd State Technical University Volgograd, Russia. E-mail: [misha\\_1992@mail.ru](mailto:misha_1992@mail.ru)

**Vadim V. Morozov** – Head of the laboratory of smelting and casting of steel, JSC "VTZ", Volzhsky, Russia. E-mail: [MorozovVV@vtz.ru](mailto:MorozovVV@vtz.ru)



**Abstract.** Presentation of special requirements for the machinability of cutting steels on metal-cutting machines causes the need to obtain steels with a normalized sulfur content. Continuous casting of such steels leads to a deterioration in spillability, which leads to a decrease in productivity and deterioration of the quality of the metal, due to contamination with non-metallic inclusions. In this paper, using THE example of obtaining C45E steel, the study of the structural features of the "build-up" extracted from the inner cavity of the immersion Cup was carried out. The study of optical (Leica 8C) and electronic (FEI Versa 3d) microscopy methods, as well as x-ray diffraction analysis (brukerd8 Advance diffractometer) found that the "growth" has a non-uniform structure. The study of the features of the structure of the "growths" on the inner cavity of the pouring cup found that the "growths" has a non-uniform structure. The surface layers of the "growths" contain refractory corundum deposits  $Al_2O_3$  with a thickness of 2 to 8 mm. the Intermediate layer adjacent to the surface contains deposits of inclusions of alumomagnesian spinel  $MgO \cdot Al_2O_3$  and inclusions of calcium sulfide CaS, the thickness of the layer is from 0.8 to 10 mm, respectively. The location of the secretions in the surface and intermediate layers is layered, alternating with metal. The inner layer is coral layers of calcium sulfide CaS deposits, fusible and refractory calcium aluminates of type  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $T_L=1535^\circ C$ ) and  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  ( $T_L = 1745^\circ C$ ). The main reason for the tightening of steel channels during casting of steel C45E is the formation of deposits CaS and  $MgO \cdot Al_2O_3$  on the inner layers of the "growths»

**Keywords:** continuously cast billet, casting, regulated sulfur content, macrostructure, surface, growth, castability.

---

Ссылка на статью:

Агарков А.Ю., Рудкий Д.В., Зюбан Н.А., Бабин Г.В., Кириличев М.В., Морозов В.В. Выявление природы образующихся «наростов» на внутренней стенке разливочного стакана при непрерывной разливке стали марки C45E // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 11-17.

Agarkov A.Yu., Rutskii D.V., Zuyban N.A., Babin G.V., Kirilichev M.V., Morozov V.V. Identification of the nature of the formed "growths" on the inner wall of the pouring cup during continuous casting of C45E steel. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 11-17.

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Михалкина И.В., Горленко Д.А., Норец А.И.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРОКАТНОГО ВАЛКА ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

**Аннотация.** Целью работы являлось изучение процессов кристаллизации отливки прокатного валка, описание закономерностей формирования микроструктуры валковой стали, выполненной на базе химического состава марки 150ХНМ. Работа логически состоит из двух частей – компьютерного моделирования литейных процессов при изготовлении прокатного валка, а также компьютерного моделирования структурообразования отливки из различных модификаций указанной марки стали.

В первой части статьи рассмотрены вопросы кристаллизации прокатных валков в комбинированной литейной форме, которые изучены посредством компьютерного моделирования в программном обеспечении «ПолигонСофт». Представлены температурно-временные кривые процесса кристаллизации бочки прокатного валка на различном удалении от поверхности раздела отливка-форма. Определены скорости охлаждения, при которых происходит структурообразование стальных прокатных валков.

Процесс выделения твёрдой фазы в отливке смоделирован посредством программного комплекса Thermo Calc. Полученные данные объясняют процесс формирования микроструктуры в бочке прокатного валка, а также дают широкое представление о влиянии химического состава сплава на процессы графитизации валковой стали. Представленные данные могут быть полезны промышленным предприятиям, производящим прокатные валки, а также для исследователей, занимающихся валковой тематикой.

**Ключевые слова:** прокатный валок, компьютерное моделирование, скорость охлаждения, аустенит, химические элементы, литейная форма.

Механические и эксплуатационные свойства литой продукции зависят не только от химического состава сплава. Их определяет совокупность факторов, так или иначе влияющих на технологический процесс на разных его стадиях [1].

На стадии выплавки механические и эксплуатационные свойства определяют технологией выплавки, которая обеспечивает или не обеспечивает заданный химический состав, а также необходимое содержание неметаллических включений в сплаве [2–4].

Литейная форма влияет на свойства посредством теплообмена с литой заготовкой, который с той или иной интенсивностью протекает при кристаллизации и охлаждении отливки. Тем самым при этом могут изменяться количественные показатели структуры сплава, химический состав фаз и структурных составляющих, а также меняться соотношение между фазами, образующимися в микроструктуре изделия.

Следует отметить, что параметры литой структуры определяют её параметры после термической обработки.

Однако проведение исследований, нацеленных на изучение процессов структурообразования на реальном объекте и тем более в условиях промышленного производства, является затруднительным, а главное – экономически необоснованным. Особенно если речь идёт об экспериментах на крупных изделиях [5, 6].

Именно по этой причине для исследования процессов кристаллизации отливки а форме, структурообразования в настоящее время применяют компью-

терное моделирование, которое позволяет в кратчайшие сроки и с минимальными экономическими затратами исследовать процессы получения изделия, скорректировать технологию производства ещё на стадии её разработки, а также снизить количества брака [7].

Изучение процессов кристаллизации осуществляли в специализированном программном обеспечении СКМ ЛП «ПолигонСофт». Решение задач теплообмена в этой программе осуществляется методом конечных элементов.

Для получения корректных результатов на начальном этапе сгенерировали конечно-элементную модель отливки. При подготовке к расчёту были заданы следующие входные данные: материал формы для шейки валка – холодно-твердеющая смесь ( $\alpha$  – set процесс); материал формы для бочки валка – сталь 45Л; материал отливки – сталь 150ХНМ, базовый химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали марки 150ХНМ

Марка стали	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
150ХНМ	1,5	0,4	0,8	0,02	0,04	1,1	1,1	0,35

На первоначальном этапе компьютерного моделирования была рассчитана скорость охлаждения сплава в бочке прокатного валка диаметром 920 мм. Для этого в бочку на этапе моделирования кристаллизационного процесса было установлено 5 датчиков от поверхности раздела отливка-форма к центру бочки валка. Расстояние между датчиками составляло

92 мм, что позволило поделить половину сечения валка на равные участки.

На рис. 1 представлены трёхмерные модели процесса кристаллизации валка в разные промежутки времени.

Полная кристаллизация отливки «Прокатный валок» наступает спустя 260 мин с момента окончания заливки. При этом посредством компьютерного моделирования установили, что в сечении бочки валка, а

также его шеек отсутствуют дефекты усадочного происхождения, что является индикатором качественной технологии.

Для оценки температурно-временных показателей кристаллизации бочки валка сняли показания датчиков температуры, установленных в бочке при моделировании. Кривые охлаждения слоёв отливки на определённом расстоянии друг от друга представлены на графике рис. 2.

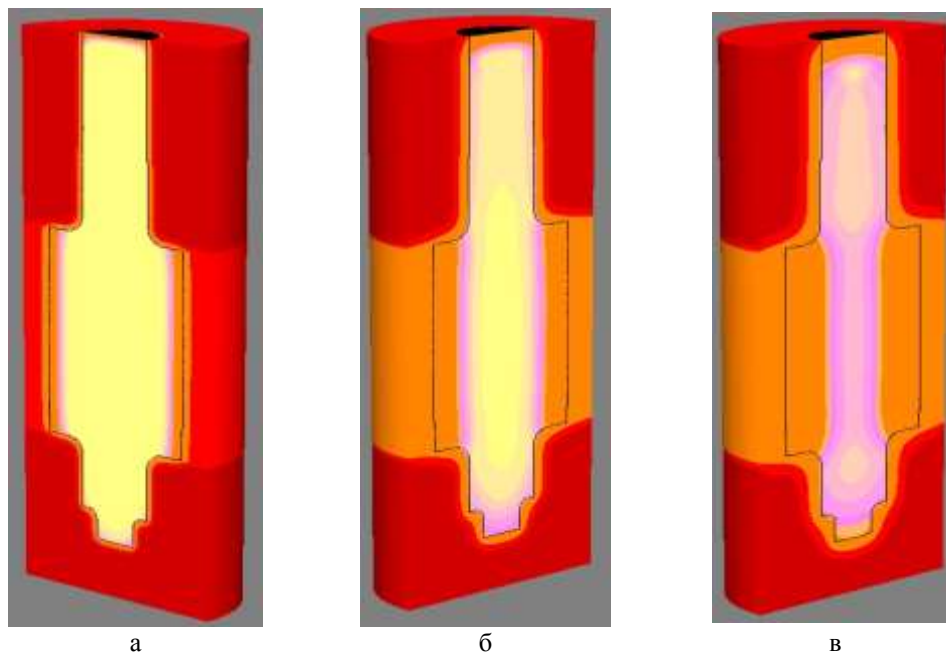


Рис. 1. Визуализация процесса кристаллизации валка:  
а – через 10 мин; б – через 40 мин; в – через 80 мин

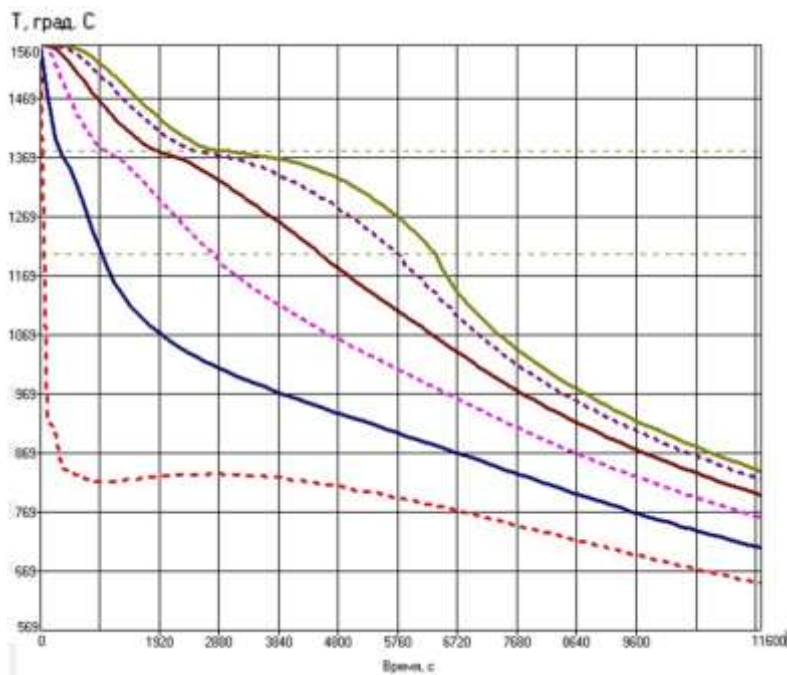


Рис. 2. Кривые охлаждения слоёв бочки валка на расстоянии (мм) от поверхности раздела отливка-форма:  
1 – 5; 2 – 97; 3 – 189; 4 – 281; 5 – 373; 465

При помощи проведённого компьютерного моделирования установили, что разница в скоростях охлаждения слоёв металла бочки вала, расположенных на расстоянии 460 мм от поверхности контакта с формой до центра отливки, составляет почти 400 °С/мин.

Слой расплава, расположенные в непосредственной близости к форме (менее 5 мм), кристаллизуются со скоростью охлаждения 395,4 °С/мин, в то время как слои, находящиеся на осевой линии прокатного вала, кристаллизуются со скоростью 2,82 °С/мин.

Данные по скоростям охлаждения в точке, удалённой на определённое расстояние от поверхности раздела отливка-форма, представлены на графике (рис. 3).

Сплав, имея одинаковый химический состав, но охлаждаясь в литейной форме с разными скоростями, может кардинально отличаться по микроструктуре [8–10].

Для определения влияния скорости охлаждения стали марки 150XHM на микроструктуру сплава было проведено термодинамическое моделирование в программе Thermo Calc, а также физические эксперименты в литейной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Общий процесс образования твёрдой фазы, а также выделения из неё избыточной фазы показаны на графике рис. 4.

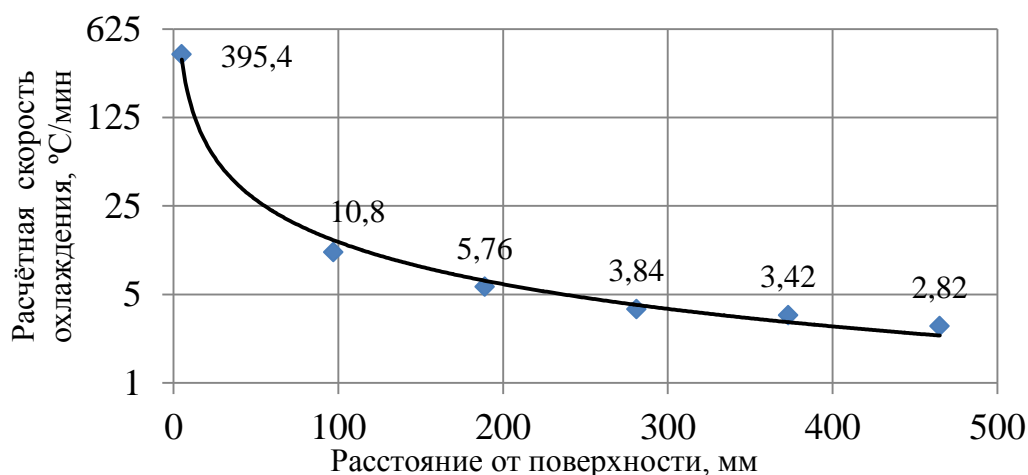


Рис. 3. Изменение скорости охлаждения слоёв расплава по мере удаления от поверхности раздела металл-отливка

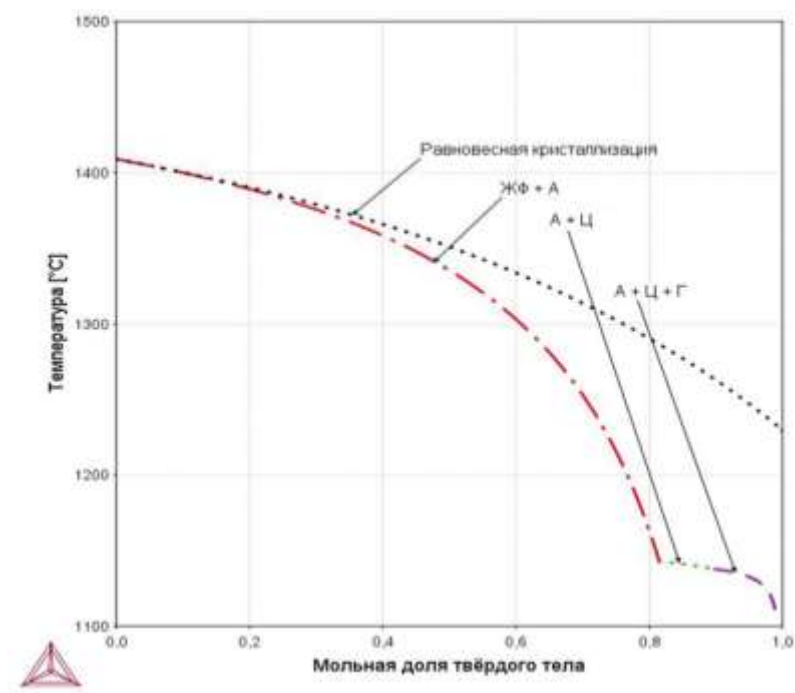


Рис. 4. Температурная зависимость изменения твёрдой фазы, а также выделения из неё избыточной при кристаллизации и охлаждении стали марки 150XHM

Модель Шайля, заложенная в расчёт процессов кристаллизации, позволила исследовать температурные интервалы образования фаз, существования двухфазной области, а также процесс выделения избыточной фазы [11, 12].

В процессе структурообразования при понижении температуры происходит выделение аустенита из жидкой фазы.

Следующим этапом в образовании микроструктуры прокатного валка из стали марки 150ХНМ является выделение цементита по границам аустенитного зерна, а также внутри него.

Заканчивается процесс выделением графита, который протекает при более низких температурах, близких к 1100 °С.

Графит является желательной фазой в микроструктуре прокатных валков, так как он способствует предотвращению налипания проката на валок в производственном процессе [13–15].

Известно, что разные элементы по-разному влияют на процесс выделения графита. Другими словами говоря, некоторые элементы способствуют процессу графитизации – С, Si, Ni и др., а другие элементы, которые связывают углерод в карбиды – Cr, Mo, Ti и т.д. – препятствуют.

Химический состав исследуемой валковой стали в промышленности обычно несколько изменяется, преследуя те или иные цели. Например, концентрация углерода может изменяться от 1,3 до 2,0%, а хрома – от 0,9 до 1,5%. Следовательно, изменяя концентрацию того или иного элемента, можно регулировать количественные характеристики этой фазы.

Для оценки влияния различных элементов на процесс графитизации, а также уточнения концентрационных интервалов элементов, находясь в которых этот элемент не будет препятствовать выделению графита, провели моделирование в Thermo Calc.

Условия моделирования были таковы, что в целом химический состав сплава оставался неизменным, менялась лишь концентрация отдельных элементов в разумных пределах.

На рис. 5 показаны графики влияния хрома и никеля на количество графита в структуре заэвтектидной стали. Известно, что хром является элементом, который препятствует графитизации, а никель способствует выделению графита. Это подтверждено графиками, показанными на рис. 5.

Для оценки влияния химических элементов на объёмную долю карбидной фазы, провели моделирование фазового равновесия в ПО Thermo Calc. При этом меняли концентрацию какого-либо одного элемента, оставляя неизменным содержание других на уровне, указанном в табл. 1. Полученные результаты представлены в табл. 2.

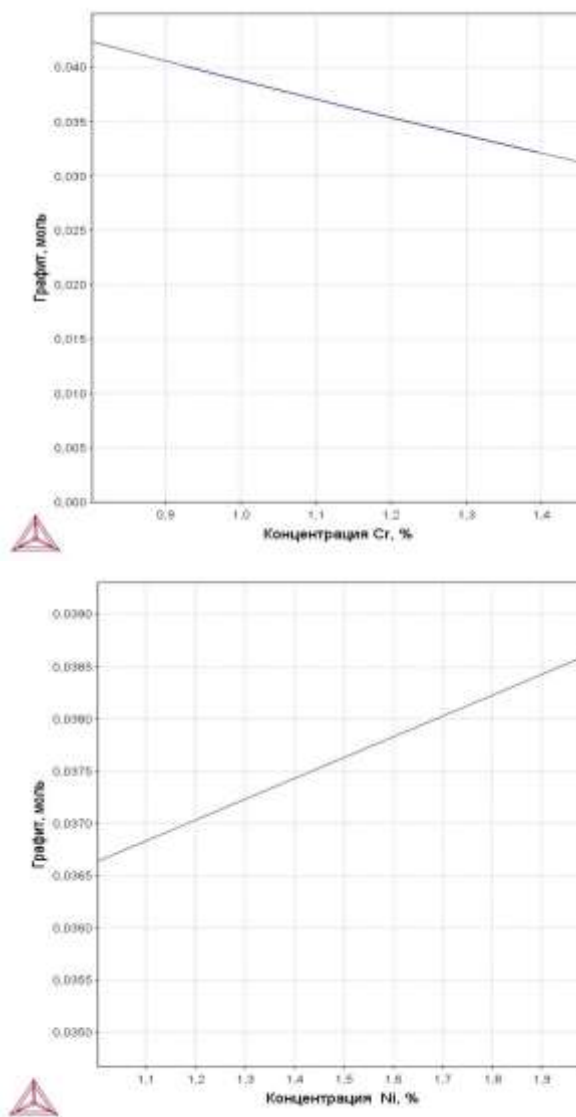


Рис. 5. Влияние хрома и никеля на мольную долю графитовой фазы

Таблица 2

Обобщённые данные по влиянию химических элементов на объёмную долю (V<sub>Г</sub>) графитовой фазы

№	Концентрация элемента, %	V <sub>Г</sub> , %
1	C = 1,3	0,03508
	C = 1,8	0,05171
2	Si = 0,4	0,04178
	Si = 0,8	0,04178
3	Mn = 0,5	0,04183
	Mn = 1,0	0,04175
4	Cr = 0,9	0,04336
	Cr = 1,5	0,03862
5	Ni = 0,8	0,04145
	Ni = 1,4	0,04146
6	Mo = 0,1	0,04243
	Mo = 0,4	0,04146

Анализ полученных данных показал, что существенное влияние на объёмную долю графита при прочих равных условиях оказывает углерод, а также хром. При этом, углерод способствует увеличению объёмной доли графитовой фазы на 47%, а хром снижает на 11%.

Следует отметить, что повышение концентрации элементов, способствующих графитизации (Ni, Si), не приводит к существенному увеличению объёмной доли графита без увеличения углерода.

В реальных условиях на процесс структурообразования оказывает влияние скорость охлаждения изделия. Кроме того, модель Шайля не учитывает структурных превращений, которые протекают в реальных литых изделиях.

Для изучения процесса были проведены лабораторные эксперименты по изучению процессов структурообразования валковой стали. Также были исследованы образцы, вырезанные из бочки прокатного валка на различном расстоянии от поверхности «отливка-форма».

В лабораторных условиях изготовили экспериментальные образцы, имеющие химический состав, представленный в табл. 1. Формирование литой

структуры экспериментальных отливок протекало при различных скоростях охлаждения в температурном интервале кристаллизации: от 60,6 до 402 °С/мин.

При высоких скоростях охлаждения расплава в форме, достигнутых при получении лабораторных экспериментов, а также в поверхностных слоях бочки валка, аустенит претерпевает мартенситное превращение. Также наблюдали выделение цементита по границам действительного зерна (рис. 6, а, б).

При более низких скоростях охлаждения расплава (менее 10,8 °С/мин) литая структура представлена различными формами перлита – пластинчатым и зернистым. По границам действительного зерна, как и при более высоких скоростях охлаждения, также выделяется цементитная сетка (рис. 6, в, г). Нежелательная мартенситная структура для прокатного валка, которая образуется в поверхностных слоях его бочки, устраняется посредством термической обработки [16 - 18]. Таким образом, после термической обработки микроструктура сплава состоит из перлита и карбидной фазы.

При исследовании образцов, вырезанных из бочки валка, был обнаружен графит (рис. 7).

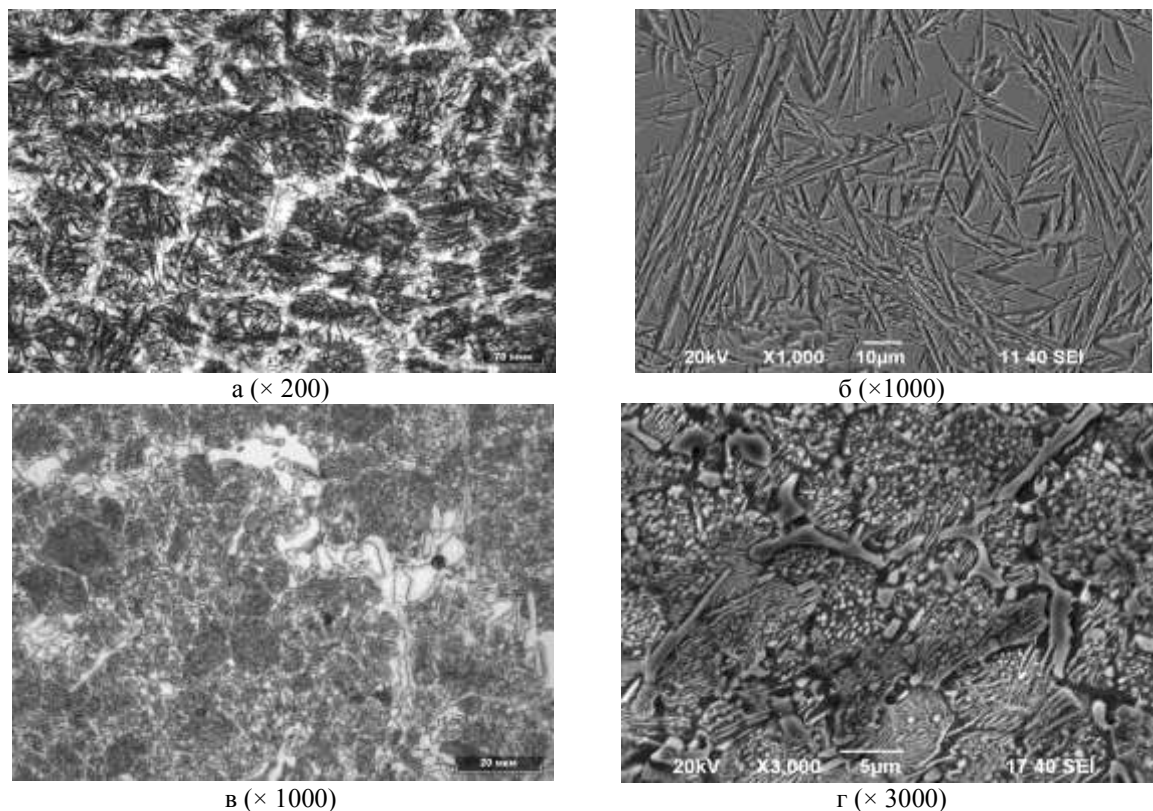


Рис. 6. Литая структура, сформировавшаяся при скоростях охлаждения:  
а, б – 60,6 °С/мин; в, г – 10,8 °С/мин

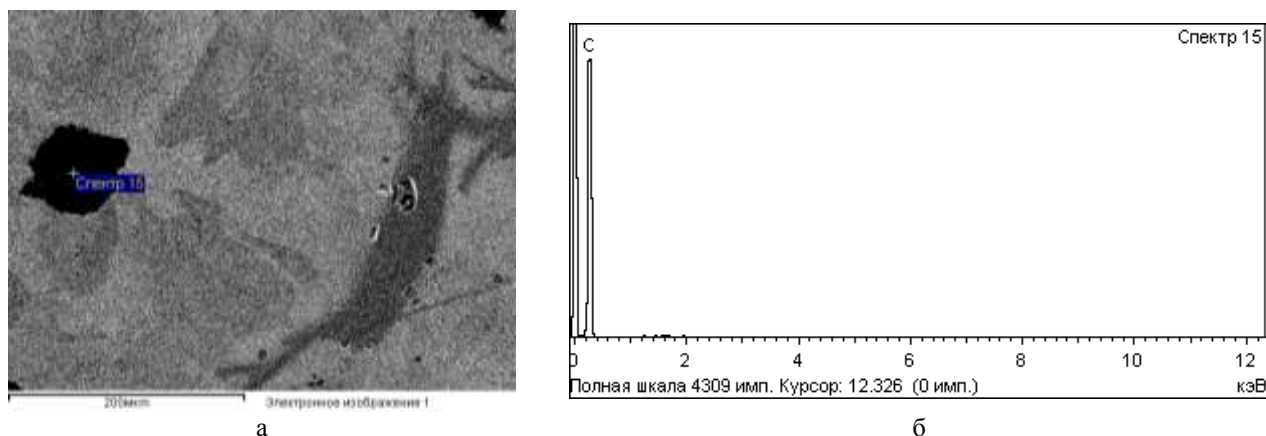


Рис. 7. Включение графита в микроструктуре бочки прокатного валка

Процесс его выделения в литом изделии требует проведения дополнительных исследований.

Подводя итог всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

– формирование литой структуры по сечению бочки прокатного валка осуществляется при различных скоростях охлаждения, которые могут отличаться более чем в 200 раз;

– литая структура состоит из мартенсита, перлита и цементитной сетки, выделяющейся по границам действительного зерна;

– согласно полученным расчётным данным на процесс выделения графита существенное влияние оказывает концентрация углерода. Изменение её с 1,3 до 1,8% приводит к увеличению объёмной доли графита примерно на 50%. Также значительное влияние оказывает хром, увеличение которого в составе стали с 0,9 до 1,5% приводит к снижению количества графита на 11%. Увеличение концентрации элементов, способствующих графитизации, без увеличения содержания углерода не приводит к повышению объёмной доли графитовой фазы.

#### Список литературы

1. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г. Исследование физических свойств углеродистой стали для крупных отливок // *Сталь*. 2014. № 4. С. 34–36.
2. Чайкин В.А., Чайкин А.В., Феоктистов Н.А. Повышение эффективности диффузионного раскисления при выплавке стали в кислых и основных дуговых электропечах // *Литейщик России*. 2012. № 8. С. 40–42.
3. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Влияние обработки стали 25Л силикокальцием на содержание неметаллических включений и механические свойства литой заготовки // *Технология металлов*. 2012. № 2. С. 21–26.
4. Вдовин К.Н. Феоктистов Н.А. Влияние серы, кальция и алюминия на пластические свойства металла // *Теория и технология металлургического производства*. 2010. № 10. С. 107–103.
5. Вдовин К.Н., Савинов А.С., Феоктистов Н.А. Технологические особенности производства крупного стального литья: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 195 с.
6. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Технология изготовления шлаковых чаш // *Вестник Магнитогорского государственного технического им. Г.И. Носова*. 2010. № 2 (30). С. 27–30.
7. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Modeling of slag chalice's potting and crystallization process // *Литейщик России*. 2012. № 3. С. 12–15.
8. Изучение влияние скорости охлаждения на механические и эксплуатационные свойства стали 110Г13Л / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, И.Б. Хренов и др. // *Литейщик России*. 2015. № 12. С. 23–24.
9. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Влияние энергии дефектов упаковки на абразивную износостойкость отливок из стали FE – 12MN – 1,2C, охлаждённых с различными скоростями // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 9. С. 603–609.
10. Исследование влияния скорости охлаждения при кристаллизации на размер аустенитного зерна литой стали 110Г13Л / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, Н.А. Феоктистов, О.А. Никитенко // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 10 – 2 (41). С. 28–31.
11. Chekmyshev, K.E., Ovcharenko, P.G. Numerical simulation of bimetallic casting cooling during the process of lost foam casting // *Journal of Crystal Growth*. 2019. P. 527. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125243.
12. Hao, Y., Li, J., Li, X., Liu, W., Cao, G., Li, C., Liu, Z. Influences of cooling rates on solidification and segregation characteristics of Fe-Cr-Ni-Mo-N super austenitic stainless steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. P. 275. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116326
13. Современные технологии производства рабочих валков для толстолистовых прокатных станов / Ю.Крюгер, П. фон Швайнихен, А. Майр и др. // *Черные металлы*. 2017. № 7. С. 31–35.

14. Оптимизация валковых станов горячей прокатки с целью снижения общих затрат / М. Брандер, Л. Элизандо, Т. Триколь и др. // Черные металлы. 2017. № 7. С. 24-30.
15. Применение сталей заэвтектидных марок дляковки валков горячей прокатки / А.И. Потапов, Е.Н. Шестаков, Т.А. Орлов и др. // Черные металлы. 2015. № 2 (998). С. 33-37.
16. Development of abrasion-resistant Ni-hard 4 cast irons / Liu Jinzhu, Man Yongfa. // Wear. 1993. V. 162–164. Pp. 833–836.
17. Correlation of microstructure and thermal fatigue property of three work rolls / Sunghak Lee, Do Hyung Kim, Jae Hwa Ryu, Keesam Shin // Metallurgical and Materials Transactions A. 1997. V. 28. Pp. 2595–2608.
18. Wear resistance of Ni-hard 4 and high-chromium cast iron re-evaluated / Liu Jinzhu, Li Shizhuo, Man Yongfa // Wear. 1993. V. 166. Pp. 37–40.

#### Сведения об авторах

**Вдовин Константин Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [kn.vdovin@gmail.com](mailto:kn.vdovin@gmail.com).

**Феоктистов Николай Александрович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [fna87@mail.ru](mailto:fna87@mail.ru).

**Горленко Дмитрий Александрович** – канд. техн. наук, ст. преп., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [gorldima@yandex.ru](mailto:gorldima@yandex.ru).

**Михалкина Ирина Владимировна** – канд. техн. наук, ст. преп., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [miv.mgtu@mail.ru](mailto:miv.mgtu@mail.ru).

**Норец Александр Иванович** – канд. пед. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [norets\\_a@mail.ru](mailto:norets_a@mail.ru).

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### CRYSTALLIZATION AND STRUCTURE FORMATION PROCESSES MODELING OF ROLL FROM ZAEUTEKTOID STEEL

**Konstantin N. Vdovin** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [kn.vdovin@gmail.com](mailto:kn.vdovin@gmail.com).

**Nikolay A. Feoktistov** – PhD (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [fna87@mail.ru](mailto:fna87@mail.ru).

**Dmitry A. Gorlenko** – PhD (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [gorldima@yandex.ru](mailto:gorldima@yandex.ru).

**Irina V. Mikhalkina** – PhD (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [miv.mgtu@mail.ru](mailto:miv.mgtu@mail.ru).

**Alexander I. Norets** – PhD, Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [norets\\_a@mail.ru](mailto:norets_a@mail.ru).



**Abstract:** *studying of casting roll's crystallization processes and description of roll steel consistent pattern microstructure formation, which is made on steel 150XHM basis, are purpose of the work. The work logically consists of two parts – casting processes computer simulation during rolls manufacturing, and computer simulation of casting formation from various modifications of the specified steel grade.*

*In the first part of the article questions of the rolls crystallization in a combined casting mold are considered, it were studied by computer simulation in the PolygonSoft software. The temperature-time curves of a roll barrel' crystallization process at different distances from the interface of casting-mold are presented.*

*The cooling rates, at which the steel rolls structure formation are carried out, are determined.*

*The solid phase emissions process in the casting has modeled using the Thermo Calc software package. Received data explain the process of microstructure formation in a roll barrel, also give a broad picture of the chemical composition influence on the roll steel graphitization processes. Presented data can be useful for industrial enterprises, which produced rolls, as well as for researchers studied rolls.*

**Keywords:** *roll, computer simulation, cooling rate, austenite, chemical elements, mold.*

---

Ссылка на статью:

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Михалкина И.В., Горленко Д.А., Норец А.И. Моделирование процессов кристаллизации и структурообразования прокатного валка из заэвтектоидной стали // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 18-25.  
Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Mihalkina I.V., Gorlenko D.A., Noretch A.I. Crystallization and structure formation processes modeling of roll from zaeutektoid steel. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 18-25.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77

Кальченко А.А., Пащенко К.Г., Кургузов С.А.

## ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ В РЕЖИМЕ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

**Аннотация.** Основным способом производства проволоки является волочение заготовки (катанки) в монолитной волоке. Существующие конструкции волочильного инструмента обеспечивают волочение проволоки в режиме граничного трения, что вызывает ряд негативных явлений. Повышение деформационного разогрева проволоки и инструмента до 200-300°C снижает эксплуатационную стойкость волок, ухудшает качество готовой проволоки и реологические свойства технологической смазки.

Рациональным является такой процесс волочения, при котором давление смазки будет равняться сопротивлению металла деформации, т.е. когда волочение будет осуществляться в режиме жидкостного трения.

Получение столь высокого давления обеспечивается конструкцией волочильного инструмента, состоящего из обоймы, волоки и трубки – насадки.

В работе представлена аналитическая модель, определяющая давление смазки от геометрических параметров конструкции трубки насадки и свойств самой смазки.

При многократном волочении для каждой протяжки, из-за увеличения сопротивления деформации проволоки за счет наклепа металла, потребуется свой волочильный инструмент с конкретными геометрическими параметрами, что приведет к увеличению парка инструмента.

На основе проведенных исследований разработана универсальная конструкция волочильного инструмента, позволяющего автоматически обеспечивать режим жидкостного трения при волочении проволоки из различных марок сталей и цветных металлов. Предлагаемая конструкция, состоящая из обоймы, рабочей и опорной волок, отличается от известных тем, что напорная волока устанавливается в обойме с возможностью осевого перемещения.

Величина перемещения напорной волоки при установившемся процессе волочения пропорциональна давлению смазки в очаге деформации, которая хорошо коррелирует с аналитической моделью, приведенной в данной работе.

**Ключевые слова:** волочение проволоки, трение, волочильный инструмент, смазочный материал, пластичность, твердость, временное сопротивление разрыву, бесфиллерное волочение, волока, проволока, катанка, удаление окалины, обжатие, вытяжка.

Основным способом производства проволоки является волочение заготовки (катанки) через монолитную волоку.

При волочении значительная часть энергии превращается в тепло, которое нагревает деформируемый металл, волоку и смазку. Нагрев протягиваемого металла (>150-250°C) ухудшает условия волочения из-за выгорания смазки, а у стальной проволоки может вызвать деформационное старение металла. Также отрицательное влияние оказывает высокая температура на стойкость волочильного инструмента, который нагревается значительно выше, чем проволока.

В современной науке и практике внешнее трение условно делится на сухое, граничное, жидкостное и пластогидродинамическое. Граничное трение предполагает наличие пленки смазочного вещества между трущимися поверхностями. Граничный слой смазки состоит из нескольких молекул и характеризуется ярко выраженной ориентированной структурой и слоистым строением. Эффективность применения смазок определяется их адгезионными и прочностными свойствами. Известно, что прочность граничной пленки смазки иногда является недостаточной из-за высоких напряжений и температур при волочении, чтобы полностью разделить трущиеся поверхности. Жидкостное

и пластогидродинамическое трение имеет давление в слое смазки, способное разделить трущиеся тела. В этих условиях смазочный слой имеет толщину в десятки тысяч молекул и поэтому не лишен реологических свойств, присущих большому объему. Толщина пленки смазки превышает высоту шероховатости тела и надежно экранирует трущиеся поверхности от контакта между собой. Пластогидродинамическое трение имеет место, если смазка наряду с вязкими обладает и пластическими свойствами.

Трение при волочении требует дополнительных затрат энергии для его преодоления. Оно ограничивает единичные обжатия. На преодоление сил трения даже при условии применения удовлетворительной технологической смазки затрачивается 40-50% от общей силы волочения. Силы трения в очаге деформации вызывают износ инструмента, и тем больший, чем больше их величина; ухудшается качество поверхности изделия. Повышение обрывности металла также связано с трением в очаге деформации.

Силы трения, возникающие в очаге деформации между поверхностью протягиваемой проволоки и инструментом, оказывают значительное влияние на процесс волочения: усилие волочения, а следовательно, и удельный расход мощности на волочение, скорость волочения, надежность (безобрывность) процесса волочения, износ волочильного инструмента и

другие параметры во многом зависят от силы трения.

Процесс трения при волочении отличается от обычного трения скольжения, возникающего в традиционных трущихся парах, и значительно усложняется следующими причинами:

- весьма большие удельные давления, а поэтому подача смазки в зону деформации с целью создания условий жидкостного или даже полужидкостного трения весьма затруднена;
- значительные пластические деформации протягиваемого металла;
- деформационный разогрев проволоки и инструмента значительно ухудшает реологические свойства технологической смазки.

Все это вместе взятое предъявляет особые требования как к самим смазочным материалам, а также к методам их подачи в зону деформации. Снижение коэффициента трения при волочении в производственных условиях может быть достигнуто за счет:

- оптимальной геометрии и высокого качества обработки поверхности волочильного инструмента;
- применения волочения с противонапряжением;
- подачи смазки в зону деформации под большим давлением;
- нанесения на поверхность проволоки качественного подсмазочного слоя;
- интенсивного охлаждения проволоки и инструмента.

Простой способ создания давления на входе в волоку заключается в нагнетании смазки в очаг деформации самой проволоки за счет её прилипания (адгезий) к поверхности проволоки при прохождении её через мыльницу.

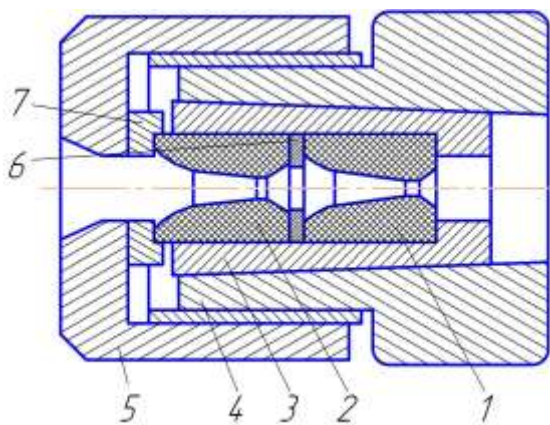


Рис. 1. Сборная волока для волочения проволоки в режиме гидродинамического трения:

- 1 – рабочий твердосплавный вкладыш; 2 – напорный вкладыш; 3 – зажимная втулка; 4 – корпус; 5 – гайка; 6 – уплотнение; 7 – упорная шайба

Сборные волоки были разработаны в начале 60-х годов прошлого века сотрудниками Уральского института черных металлов под руководством В.Л. Колмогорова. В работах В.Л. Колмогорова с сотрудниками достаточно полно освещены вопросы

применения сборных волок для создания условий гидродинамической смазки при сухом волочении проволоки.

Сборная волока, разработанная В.Л. Колмогоровым с сотрудниками, состоит из рабочей твердосплавной волоки и твердосплавного напорного элемента, свободно вставляемых в стальную коническую зажимную втулку, разрезанную по образующей. В качестве напорного элемента применяются твердосплавные волоки. Втулка с ними помещена в коническое отверстие стальной обоймы-корпуса и плотно впрессована в нее. При этом предварительное радиальное напряжение волок получается достаточным для обеспечения их нормальной работы (предотвращается их раскалывание). Твердосплавная напорная волока имеет внутренний диаметр, несколько больший, чем исходная проволока, что обеспечивает нагнетание смазки и повышенное давление перед рабочей волокой. Одно из преимуществ сборных волок состоит в возможности их применения на большинстве действующих проволочных машин без каких-либо существенных конструктивных изменений мыльниц и держателей волок [1].

К сожалению, эти системы имеют один главный конструктивный недостаток: отработанная сухая смазка накапливается между рабочей и напорной волоками, периодически просачивается в корпус и затем выдавливается в мыльницу. Только один этот эффект вызывает три главные проблемы, которые значительно снижают эффективность всей системы давления.

Первая проблема связана с повторным использованием смазки, подвергнутой воздействию высоких температур и давлению. Размельчение и добавление такой смазки к свежему порошку вызывает снижение смазочной способности смазки и увеличение абразивного износа волок. Вторая главная проблема состоит в снижении диссипации тепла из-за образования барьера на пути поглощения тепла стенками инструмента в виде отработанной перегретой смазки, сжатой между волоками и их обоймами. При этом повышение уровня нагрева вызывает уменьшение содержания жиров в смазке, что снижает смазочную способность и вязкость смазки. Далее, в результате повышения нагрева самого твердосплавного инструмента возникает эрозия частиц вольфрама, что увеличивает износ волок, возрастают работа упрочнения проволоки и тепловая кристаллизация смазки, вызывающая образование «туннеля» и ухудшение смазывания проволоки при проходе. Третья главная проблема – низкое давление и отсутствие управления им, что вызывает непостоянное неоптимальное функционирование таких систем нагнетания смазки.

Данные системы, создавая повышенное давление смазки перед рабочей волокой, не решали главной задачи создания режима жидкостного трения при волочении проволоки [3,4].

Более широкие возможности по получению режима жидкостного трения обеспечивает конструкция

волоочильного инструмента, состоящего из обоймы, волокна трубки-насадки (рис. 2). При движении проволоки через мыльницу к волоочильному инструменту на слой смазки, захваченной поверхностью проволоки при входе в очаг деформации, действует препятствующее дальнейшему движению смазки удельное давление  $P$ . С другой стороны, обратному току смазки препятствует сила сопротивления трубы, которая из гидродинамики определяется как [2]

$$R = 2\pi(d + h)l\tau_{см}, \quad (1)$$

где  $\tau_{см}$  – напряжение сдвига смазки;

$l$  – длина трубы;

$d$  – диаметр проволоки.

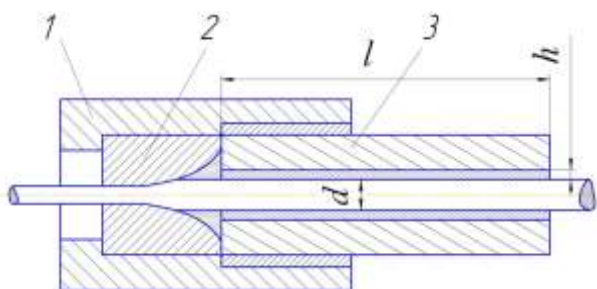


Рис. 2. Конструкция волоочильного инструмента: 1 – обойма; 2 – волокна; 3 – трубка-насадка

Для достижения условия волочения в режиме жидкостного трения необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$P = R / F,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения смазки в трубе-насадке, равная:

$$F = 2\pi(d + h). \quad (2)$$

$$\text{Тогда } P = 2l\tau_{см} / h. \quad (3)$$

Откуда длина трубки насадки, необходимая для получения давления  $P$  при зазоре  $h$ :

$$l = Ph / (2\tau_{см}). \quad (4)$$

Из уравнения (3) видно, при  $\tau_{см} = \text{const}$ , установленном процессе волочения, давление смазки, создаваемое данным инструментом, зависит только от длины трубки-насадки и зазора  $h$ .

Оптимальным является такой процесс волочения, при котором давление смазки перед входом металла в очаг деформации достигает величины сопротивления его деформированию. Следовательно, при многократном волочении для каждой протяжки потребуется свой волоочильный инструмент с конкретными геометрическими параметрами ( $l$ ,  $h$ ), что приводит к увеличению парка инструмента.

Частично данную проблему решает волоочильный

инструмент с регулируемым давлением смазки в очаге деформации [5]. Однако данная конструкция волоочильного инструмента требует настраивать регулятор давления для каждого конкретного технологического режима волочения, что является существенным его недостатком.

На рис. 3 представлена более универсальная конструкция волоочильного инструмента, позволяющего автоматически обеспечить режим жидкостного трения при волочении проволоки из различных марок сталей и цветных металлов. Предлагаемая конструкция отличается от известных тем, что напорная волока устанавливается в корпусе волоочильного инструмента с возможностью ее осевого перемещения [6].

При установленном процессе волочения напорная волока отходит от рабочей на расстояние  $l$  (рис. 3,б), обеспечивающее давление смазки  $P$ , равное сопротивлению металла деформации согласно уравнению (3). Применение данной конструкции позволяет изменить величину давления в очаге деформации в широком диапазоне, которое определяется условиями волочения (сопротивления металла деформации, скоростью волочения и т.д.).

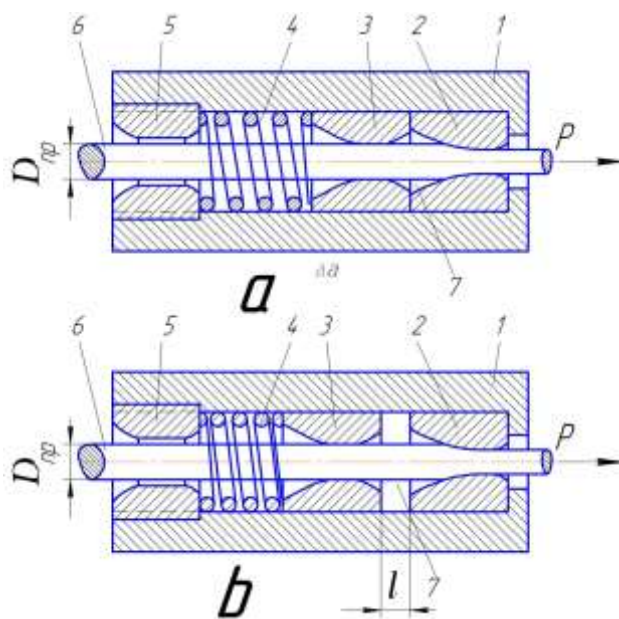


Рис. 3. Конструкция волоочильного инструмента: 1 – корпус; 2 – рабочая волока; 3 – напорная волока; 4 – пружина; 5 – гайка; 6 – проволока; 7 – полость; а – работа в режиме граничного трения; б – работа в режиме жидкостного трения

В таблице показаны результаты эксперимента по выявлению зависимости напорного давления от длины напорного участка  $l$  и величины зазора  $h$  (по рис. 2), давление сдвига смазки  $\tau_{см}$  соответствует 0.75 МПа.

Напорное давление  $P$ , МПа

Зазор $h$ , мм	Длина трубки насадки $l$ , мм		
	70	100	130
0.2	420	620	730
0.3	310	440	540
0.4	240	380	480

Экспериментальные точки возможно аппроксимировать прямой  $\frac{P}{\tau_{см}} = 2 \frac{l}{h}$  (рис. 4).

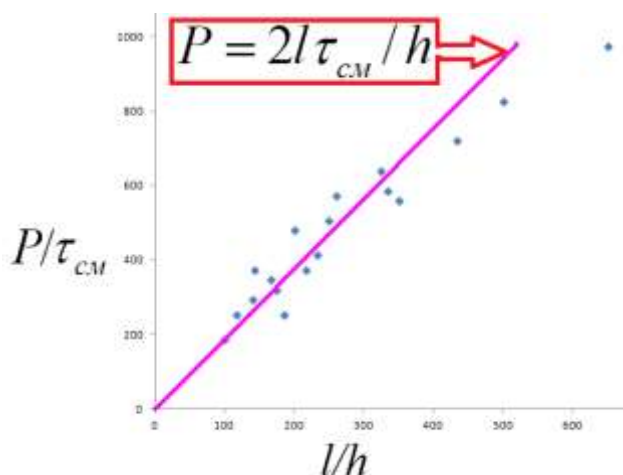


Рис. 4. Зависимость относительного напорного давления от относительной длины напорной трубки

#### Сведения об авторах

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

**Пашченко Константин Георгиевич** – ст. преп. кафедры «Процессы и машины обработки давлением и машиностроения», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pashhenko-k-g@ya.ru

**Кургузов Сергей Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и машины обработки давлением и машиностроения», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ksaask@mail.ru

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### LIQUID FRICTION WIRE DRAWING TOOL

**Alexander A Kal'chenko** – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kalchenko1945@yandex.ru

**Konstantin G. Pashchenko** – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pashhenko-k-g@ya.ru

**Sergey A. Kurguzov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ksaask@mail.ru

**Abstract:** *The main method of wire production is drawing the billet (wire rod) in a monolithic die. Existing designs of the drawing tool provide wire drawing in the boundary friction mode, which causes a number of negative phenomena. An increase in the deformational heating of the wire and tool to 200-3000C, which leads to a decrease in the operational resistance of the dies, a decrease in the quality of the finished wire and a deterioration in the rheological properties of the technological lubricant.*

*A rational drawing process is one in which the lubricant pressure equals the resistance of the metal to deformation, i.e. when the drawing will be carried out in liquid friction mode.*

*Obtaining such a high pressure is ensured by the design of the drawing tool, consisting of a holder, die and tube - nozzles.*

*The paper presents an analytical model that determines the pressure of the lubricant from the geometric parameters of the design of the nozzle tube and the properties of the lubricant itself.*

*With multiple drawing for each broach, due to an increase in wire deformation resistance due to metal hardening, you will need your own drawing tool with specific geometric parameters, which leads to an increase in the tool park.*

*Based on the studies, a universal design of a drawing tool has been developed, which allows to automatically ensure liquid friction during wire drawing of various grades of steel and non-ferrous metals. The proposed design, consisting of a cage, a working and a support die, differs from the known ones in that the pressure die is mounted in the cage with the possibility of axial movement.*

*The magnitude of the displacement of the pressure die, with the steady-state drawing process, is proportional to the pressure of the lubricant in the deformation zone, which correlates well with the analytical model presented in this paper.*

**Keywords:** *drawing of a wire, friction, drawing tool, lubricant, hardness, tensile strength, drawing mill, wire, rod, descaling, compression, ductility, die plates, drawing out,*

---

Ссылка на статью:

Кальченко А.А., Пашченко К.Г., Кургузов С.А. Волочение проволоки в режиме жидкостного трения // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 26-30.

Kal'chenko A.A., Pashchenko K.G., Kurguzov S.A. Liquid friction wire drawing tool. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 26-30.

---

**Теория и технология металлургического производства**

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВНЕКОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ДВУХОПОРНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ГИБКЕ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАГОТОВОК

**Аннотация.** В статье изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса двухопорной пластической гибки. Рассматривался процесс деформирования заготовки круглого сечения, которая располагалась на двух неподвижных опорах, и деформировалась пуансоном с цилиндрической рабочей поверхностью. Пуансон располагался посередине между опорами и перемещался перпендикулярно продольной оси недеформированной заготовки. Используя программный комплекс «Mathcad», установлена аналитическая зависимость угла гибки от хода пуансона и соответствующих размеров заготовки и инструмента. При компьютерном моделировании процесса двухопорной гибки применялся программный комплекс «Deform - 3D». Используемая в расчетах кривая упрочнения калиброванной стали марки 40С2А строилась по результатам испытаний на сжатие образцов с торцевыми буртиками. В расчетах варьировались геометрические параметры процесса гибки: диаметр заготовки 11,0÷17,0 мм, радиус рабочей поверхности пуансона 15,0÷20,0 мм, радиус опор 15,0÷20,0 мм и расстояние между осями опор 90,0÷100,0 мм. Установлено, что в процессе двухопорной пластической гибки стержневой заготовки возникает зона потери контакта между деформируемой заготовкой и инструментом, то есть образуется внеконтактная зона. Проведенные эксперименты по пластической гибке заготовок диаметром 11,0 мм из стали марки 40С2А с использованием универсальной испытательной машины ИР 5082-100 и соответствующей оснасткой подтвердили образование внеконтактной зоны. Для обобщения результатов исследования вводились относительная максимальная высота  $\delta$  и центральный угол  $\beta$  внеконтактной зоны и построены графики зависимостей этих параметров от угла гибки, размеров заготовки и гибочного инструмента.

**Ключевые слова:** пластическая гибка, стержневая заготовка, двухопорная гибка, внеконтактная зона, угол гибки, ход инструмента, метод конечных элементов.

Процессы пластической гибки стержневых заготовок связаны с изменением кривизны оси стержня [1]. При этом пластической деформации подвержена только часть заготовки (очаг деформации), а остальные части деформируются упруго [2]. Пластическая гибка стержневых заготовок широко используется при изготовлении изделий типа пружин, пружинных клемм рельсовых скреплений, грузоподъемных скоб и т.п.

Один из распространенных способов стержневой гибки – двухопорная гибка (рис. 1), при которой заготовка располагается на двух неподвижных опорах, у которых рабочие цилиндрические поверхности имеют радиуса  $R_1$ , а деформация осуществляется пуансоном, рабочая поверхность которого выполнена в виде цилиндра с радиусом  $R$ . При этом рабочий пуансон расположен посередине опор и перемещается вниз на величину  $h$  (ход пуансона).

В работе [3] получено уравнение, описывающее зависимость хода пуансона  $h$  от соответствующих размеров заготовки и инструмента

$$h = [L - (R_1 + r) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}] \operatorname{tg} \alpha - (R + r) \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол гибки;

$r$  – радиус поперечного сечения заготовки;

$L$  – расстояние между опорами.

Используя программный комплекс «Mathcad», выполнены преобразования уравнения (1) и установлена зависимость угла гибки  $\alpha$  от перемещения пуансона  $h$  и соответствующих размеров

$$\alpha = 2 \cdot a \operatorname{tan} \left( \frac{L - \sqrt{L^2 + h^2 - 4rh - 2h(R_1 + R)}}{4r - h + 2(R_1 + R)} \right). \quad (2)$$

При компьютерном моделировании процесса двухопорной гибки применялся программный комплекс «Deform - 3D», который базируется на методе конечных элементов [4]. Используемая в расчетах кривая упрочнения калиброванной стали марки 40С2А, которая широко применяется при изготовлении пружинных клемм рельсовых скреплений, строилась по результатам испытаний на сжатие образцов с торцевыми буртиками [5,6]. В расчетах варьировались геометрические параметры процесса гибки: диаметр заготовки  $d=11,0 \div 17,0$  мм, радиус рабочей поверхности пуансона  $R=15,0 \div 20,0$  мм, радиус опор  $R_1=15,0 \div 20,0$  мм, расстояние между осями опор  $L=90,0 \div 100,0$  мм.

Результаты конечно-элементного моделирования [7] показывают, что в процессе двухопорной пластической гибки стержневых изделий возникает зона потери контакта между деформируемой заготовкой и инструментом, то есть образуется внеконтактная зона (рис. 2, а).

Используя универсальную испытательную машину ИР 5082-100, проведена серия экспериментов [8], в ходе которых осуществлялась двухопорная пластическая гибка круглых заготовок из стали марки 40С2А диаметром  $d=11,0$  мм пуансоном с радиусом рабочей поверхности  $R=15,0$  мм, радиус опор  $R_1=15,0$  мм, расстояние между осями опор  $L=90,0$  мм. Эксперименты подтвердили возникновение внеконтактной зоны (рис. 2, б).

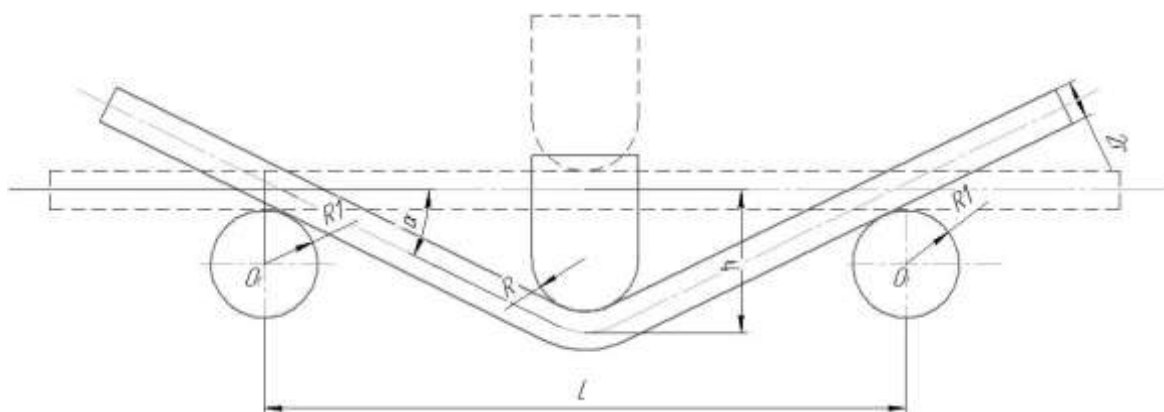


Рис. 1. Схема двухопорной гибки заготовки круглого сечения

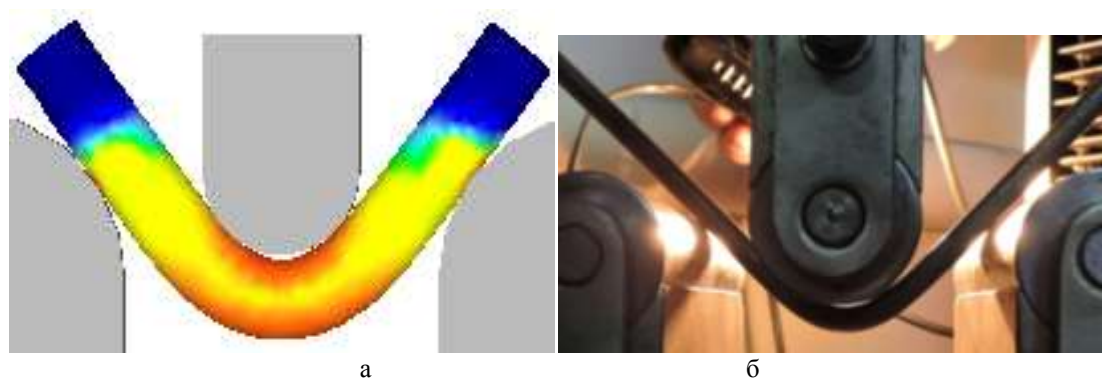


Рис. 2. Внеконтактная зона: а – при моделировании процесса пластической гибки с использованием ПК «Deform - 3D»; б – при экспериментальных исследованиях

По результатам конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований определялись основные геометрические параметры внеконтактной зоны и их изменение в процессе гибки в зависимости от режимов деформирования и размеров заготовки и инструмента.

На рис. 3 представлены основные параметры внеконтактной зоны:  $\Delta$  – максимальный зазор между пуансоном и деформируемой заготовкой на некотором этапе деформирования;  $\beta$  – центральный угол между радиусами, которые ограничивают внеконтактную зону.

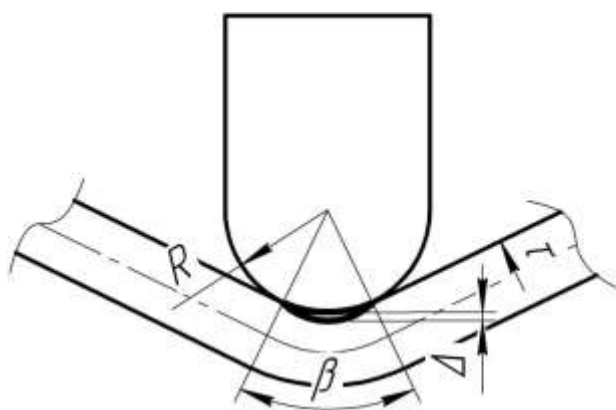


Рис. 3. Параметры внеконтактной зоны

С целью обобщения результатов исследования вводились безразмерные параметры: относительная максимальная высота внеконтактной зоны  $\delta = \Delta/r$  и относительный радиус пуансона  $\rho = R/r$ . По результатам выполненных расчетов построены графики  $\delta = f(\alpha; \rho)$  (рис. 4) и  $\beta = f(\alpha; \rho)$  (рис. 5).

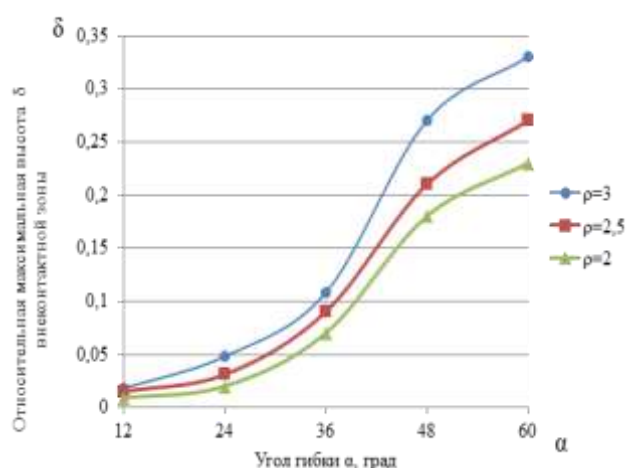


Рис. 4. Зависимость максимальной относительной высоты  $\delta$  внеконтактной зоны от угла гибки  $\alpha$



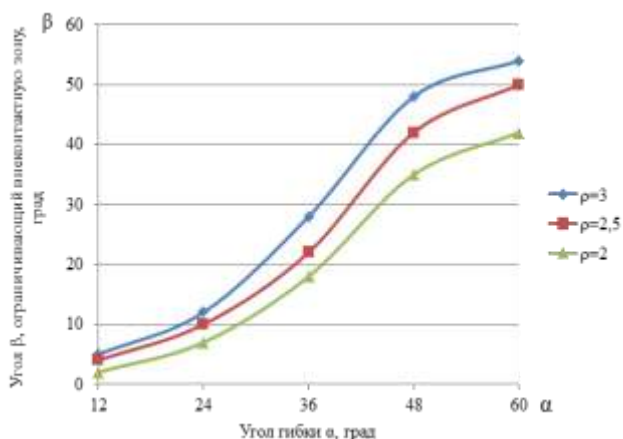


Рис. 5. Зависимость центрального угла  $\beta$  между радиусами, ограничивающими внеконтактную зону, от угла гибки  $\alpha$

#### Выводы

1. По результатам конечно-элементного и натурального моделирования установлено, что при двухопорной пластической гибке стержневых изделий возникает зона потери контакта между заготовкой и инструментом (внеконтактная зона).

2. Установлена зависимость изменения максимальной высоты и центрального угла внеконтактной зоны от угла гибки  $\alpha$  и размеров заготовки и гибочного инструмента.

#### Список литературы

1. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. Л.: Машиностроение, 1971. 236 с.
2. Вдовин С.И., Петров Н.В. Инженерные расчеты операций гибки // Кузнечно-штамповочное произ-

водство // Обработка материалов давлением. 2004. № 12. С. 26-28.

3. Исследование процесса гибки пружинных клемм ЖБР с использованием метода конечных элементов / А.Г.Виноградов, О.С. Железков, К.Ю. Морозов, В.А. Ханафина (Арзамасцева) // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. Вып. 36. С. 68-70.
4. Norrie D.H., de Vries G. The Finite Element Method Fundamentals and Applications. Academic Press. New York, 1973. 322 p.
5. Растегаев М.В. Новый метод равномерного осаживания образцов для определения истинного сопротивления деформации и коэффициента внешнего трения // Заводская лаборатория. 1940. № 3. С. 354-355.
6. 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.
7. Железков О.С., Арзамасцева В.А., Малаканов С.А. Определение упругого пружинения при двухопорной пластической гибке стержней круглого сечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 247-252.
8. Экспериментальное исследование процесса двухопорной гибки прутковой заготовки круглого сечения / О.С. Железков, В.А. Арзамасцева, Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: международ. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. №4. С. 33-38.

#### Сведения об авторах

**Арзамасцева Вероника Айваровна** – аспирант кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: arzamasceva\_1990@mail.ru

**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

**Лактюшин Алексей Андреевич** – технический директор ООО «Холдинг АРС», Москва, Россия. E-mail: Lotos77707@inbox.ru

## GEOMETRICAL PARAMETERS OF NON-CONTACT ZONE DOUBLE-SEAT FLEXIBLE PLASTIC ROUND BARS

**Veronika A. Arzamastseva** – Graduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: arzamasceva\_1990@mail.ru

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

**Aleksey A. Laktyushin** – Chief technology officer, LLC «Holding APC », Moscow, Russia. E-mail: Lotos77707@inbox.ru

**Abstract.** *The article presents the results of theoretical and experimental studies of the process of two-support plastic bending. The process of deforming a round-section blank that was located on two fixed supports and deformed by a punch with a cylindrical working surface was considered. The punch was located in the middle between the supports and moved perpendicular to the longitudinal axis of the undeformed workpiece. Using the software package "Mathcad", the analytical dependence of the bending angle on the stroke of the punch and the corresponding dimensions of the workpiece and tool is established. The "Deform-3D" software package was used for computer modeling of the two-support bending process. The hardening curve of calibrated 40C2A steel used in the calculations was based on the results of compression tests of samples with end flanges. The calculations varied the geometric parameters of the bending process: the diameter of the workpiece 11.0÷17.0 mm, the radius of the working surface of the punch 15.0÷20.0 mm, the radius of the supports 15.0÷20.0 mm and the distance between the axes of the supports 90.0÷100.0 mm. It is established that in the process of two-support plastic bending of a rod blank, a zone of contact loss occurs between the deformed blank and the tool, that is, a non-contact zone is formed. Experiments on plastic bending of workpieces with a diameter of 11.0 mm made of 40C2A steel using a universal testing machine ИП 5082-100 and the corresponding equipment confirmed the formation of a non-contact zone. To summarize the results of the study introduced the relative maximum height of the Central angle and non-contact zones and plotted these parameters from bending angle, the size of the workpiece and the bending tool.*

**Keywords:** *Plastic two-tools bending process, finite element modeling, round bar, non-contact zone, bending angle, bending tool.*

---

Ссылка на статью:

Арзамасцева В.А., Железков О.С., Лактюшин А.А. Геометрические параметры внеконтактной зоны при двухопорной пластической гибке стержневых заготовок // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 31-34.

Arzamastseva V. A., Zhelezkov O. S., Laktyushin A. A. Geometrical parameters of non-contact zone double-seat flexible plastic round bars. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 31-34.

**Теория и технология металлургического производства**

УДК 621.7.016.3

Дрягун Э.П., Белан А.К., Белан О.А.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ САМОНАРЕЗАЮЩИХ ВИНТОВ В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»

**Аннотация.** Самонарезающие винты в настоящее время являются очень востребованными крепежными изделиями. Они нашли свое применение для соединения металла, дерева и пластика. Конструкция самонарезающих винтов многообразна. Наибольшее влияние на качество винтов оказывает качество применяемого металла, поэтому для выполнения требований по геометрическим параметрам и механическим свойствам, необходимо качественное сырье. Изготовление качественной проволоки для дальнейшей штамповки самонарезающих винтов является актуальной задачей в условиях современного рынка. В статье приведены марки стали, применяемые за рубежом и в России. Рассмотрен технологический процесс волочения проволоки для штамповки самонарезающих винтов. Представлены особенности технологии изготовления проволоки для последующей холодной штамповки самонарезающих винтов в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». Приведены рекомендуемые механические свойства катанки и готовой проволоки для получения головок винтов при высадке и качественной резьбы при накатке. Легированные элементы в металле обеспечат получение механических свойств на готовых винтах после термической обработки. В результате проведенных исследований даны рекомендации по выбору сухих волочильных смазок, позволяющих улучшить качество поверхности готовой проволоки. Представлена новая технология изготовления проволоки с фосфатированием и последующим мокрым волочением.

**Ключевые слова:** проволока, самонарезающие винты, волочение, холодная объемная штамповка, степень деформации, обжатие.

Самонарезающие винты – это крепежные изделия, применяемые при строительных, кровельных и отделочных работах в качестве крепления деталей к металлическим, пластиковым, деревянным профилям и другим плотным основам. Процесс изготовления самонарезающих винтов (рис. 1) достаточно сложный и включает ряд операций, каждая из которых вносит свое влияние на конечное качество продукции.



Рис. 1. Винты самонарезающие

Наибольшее влияние на качество винтов оказывает качество применяемого металла. Поэтому изготовление качественной проволоки для дальнейшей штамповки самонарезающих винтов является актуальной задачей в условиях современного рынка.

Потребителями проволоки являются заводы-производители самонарезающих винтов. Ежемесячная потребность – в проволоке 500–600 т. Производители самонарезающих винтов чаще всего закупают готовую проволоку за рубежом, из импортных марок сталей, так как в настоящее время изготавливаемая на территории РФ проволока не удовлетворяет высоким требованиям, предъявляемым потребителями. Металл должен иметь высокую технологическую деформиру-

емость и стабильность механических свойств. Кроме того, недопустимы поверхностные дефекты, так как в результате штамповки они приводят к трещинам на головке и к обрыву буравчика. Низкая пластичность и поверхностные дефекты – основные причины низкого качества крепежных изделий.

Целью работы является разработка технологии изготовления легированной проволоки под холодную высадку самонарезающих винтов, обеспечивающей импортозамещение и высокое качество продукции при снижении затрат на производство.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбрать материал для изготовления проволоки.
2. Разработать технологию подготовки металла перед волочением.
3. Разработать маршрут волочения проволоки и режимы промежуточного отжига.
4. Произвести подбор технологической смазки для волочения, обеспечивающей требуемую чистоту поверхности.
5. Выбрать оборудование для волочения.
6. Установить механические свойства готовой проволоки.

За рубежом для производства самонарезающих винтов применяют сталь SAE 1018 или SAE 1022 [1–3]. Химический состав сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сталей марок SAE 1018 и SAE 1022, %

Сталь	C	Si	Mn	P max	S max	Al max
SAE 1018	0,15-0,20	0,10	0,60-0,90	0,030	0,050	0,020
SAE 1022	0,18-0,23	0,10	0,70-0,90	0,030	0,050	0,020

© Дрягун Э.П., Белан А.К., Белан О.А., 2020

Рекомендуется волооченная термообработанная и слегка калиброванная после термообработки проволока из марок стали C15F2C по DIN 1654 или EN 10263. Поверхность проволоки должна быть фосфатированная, с хорошо нанесенным закрытым сцепляющимся слоем толщиной 3-7 г/м<sup>2</sup>. Химический состав стали марки C15F2C приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав стали марки C15F2C, %

C	Si	Mn	P	S
0,12-0,18	0,15-0,35	0,25-0,50	0,035	0,035

Механические свойства проволоки:  
 предел прочности  $\sigma_b = 470-500$  Н/мм<sup>2</sup>;  
 предел текучести  $\sigma_T = 400$  Н/мм<sup>2</sup>;  
 относительное удлинение  $\delta - \min 15\%$ ;  
 относительное сужение  $\psi - \min 60\%$ .

В России отсутствуют аналоги зарубежных марок сталей под холодную объемную штамповку. Наиболее близкими по химическому составу являются стали 15Г и 20Г по ГОСТ 10702-78 (химический состав по ГОСТ 4543-71, табл. 3).

Таблица 3

Химический состав сталей марок 15Г и 20Г, %

Марка стали	C	Si	Mn	S	P
				Не более	
15Г	0,12-0,19	0,17-0,37	0,70-0,10	0,035	-
20Г	0,17-0,24				

Данные марки стали не обеспечивают качественной штамповки из-за повышенной доли кремния, который влияет на трещинообразование. Специально для производства самонарезающих винтов было разработано техническое соглашение ТС 14-101-679-2007 между ОАО «ММК-МЕТИЗ» и ПАО «ММК» на поставку катанки из стали марки 15Г(М) или 20Г(М) с дополнительными требованиями. Данная марка стали по химическому составу (табл. 4), механическим свойствам наиболее близка к зарубежным аналогам [4-6].

Таблица 4

Химический состав сталей марок 15Г(М) и 20Г(М), %

Марка стали	C	Si	Mn	S	P
				Не более	
15Г(М)	0,12-0,19	Не более 0,07	0,70-1,00	0,030	0,025
20Г(М)	0,17-0,24				

Механические свойства катанки:  
 предел прочности  $\sigma_b - \text{не более } 500$  Н/мм<sup>2</sup>;  
 относительное удлинение  $\delta - \text{не менее } 25\%$ ;  
 относительное сужение  $\psi - \text{не менее } 60\%$ .

Отличительной особенностью данных марок является снижение доли кремния до 0,07% и регламентированная доля фосфора до 0,025%, это позволило уменьшить трещинообразование на головке винтов при штамповке.

Особенностью технологии изготовления проволоки для самонарезающих винтов является получение максимально пластичной проволоки перед штамповкой с хорошей прокаливаемостью при последующей химико-термической обработке. Проволока должна иметь высокую пластичность (заниженный предел прочности и повышенное удлинение и сужение). Это обеспечивает технологичность металла при штамповке.

Особенностью марок сталей 15Г(М) и 20Г(М) является сильное упрочнение даже при небольшой степени деформации. В среднем деформация на 10% дает упрочнение на 100-150 МПа. Поэтому технология изготовления проволоки должна обеспечивать требуемую пластичность для штамповки и дальнейшей накатки резьбы, а все необходимые прочностные свойства крепежных изделий достигались бы за счет последующей термообработки [3, 6, 7].

Технология изготовления проволоки включает следующие операции:

- 1) Травление катанки и известкование.
- 2) Волочение катанки на промежуточный размер.
- 3) Отжиг передельной заготовки.
- 4) Волочение проволоки на готовый размер.

Одну из важнейших ролей в технологической цепочке играет отжиг металла. Возможность проведения штамповки металла определяется микроструктурой металла и размером зерен. Наиболее благоприятной является структура 100% зернистого перлита с размером зерна 1-3 балла. Современные колпаковые печи EBNER (рис. 2), использующие водород в качестве защитного газа, обеспечивают равномерность температуры в бунтах даже при больших садках. Это дает возможность получения термически обработанной проволоки с равномерными механическими свойствами и качественной структурой, без прироста по величине обезуглероженного слоя.



Рис. 2. Колпаковая печь фирмы EBNER

Свойства передельной заготовки после отжига приведены в табл. 5.

Таблица 5

Свойства передельной заготовки после отжига

Марка стали	Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup> , не более	Относительное сужение, %, не менее	Относительное удлинение $\delta_{100}$ , %, не менее
15Г(М)	450	50	20

После отжига передельной проволоки-заготовки, степень деформации при последнем волочении должна быть 5-10%. Данное обжатие обеспечивает получение максимально пластичной проволоки.

Таким образом, качественный отжиг, хорошая подготовка поверхности и степень деформации не более 10% при волочении на готовый размер обеспечивают получение качественной проволоки для дальнейшей штамповки самонарезающих винтов [1, 6, 7]. Рекомендуемые механические свойства готовой проволоки приведены в табл. 6.

Таблица 6

Механические свойства проволоки для самонарезающих винтов

Марка стали	Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup> , не более	Относительное сужение, %, не менее	Относительное удлинение $\delta_{100}$ , %, не менее
15Г(М)	490	50	20

Для производимого в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» сортамента самонарезающих винтов изготавливается проволока диаметром от 2,58 до 3,79 мм.

Допуск по диаметру составляет -0,01 мм, это обеспечивает высокую точность проволоки и облегчает процесс настройки холодновысадочного оборудования.

Недостатками данной технологии является качество поверхности готовой проволоки, не удовлетворяющей требованиям потребителя. При волочении проволоки на готовый размер применялись сухие смазки СВСУ и СМС-М28. Качество поверхности проволоки показано на рис. 3.

В результате проведенной работы по подбору сухой волочильной смазки были выделены две смазки Lubrifil VA 1520 и PANLUBE S 2800 V. Волочение с их применением позволило значительно снизить количество остаточной смазки на поверхности и значительно улучшить качество поверхности готовой проволоки (рис. 4).

Процесс волочения проходил стабильно, без обрывов. Поверхность проволоки имела однородный темно-серый цвет. Обе смазки равномерно распределялись по поверхности проволоки и не оставляли на поверхности остаточную смазку в виде пылеобразных хлопьев.

СВСУ



СМС-М28 (мыльная стружка)



Рис. 3. Поверхность проволоки при использовании сухих смазок СВСУ и СМС-М28

Lubrifil VA 1520



PANLUBE S 2800 V



Рис. 4. Поверхность проволоки при использовании сухих смазок Lubrifil VA 1520 и PANLUBE S 2800 V

Для анализа результатов количества остаточной волоочильной смазки были отобраны образцы готовой проволоки диаметром 2,83 мм после волоочения с применением различных смазок. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты определения количества остаточной волоочильной смазки

Диаметр проволоки, мм	Волоочильная смазка	Тип стана	Количество остаточной смазки	
			%	г/м <sup>2</sup>
2,83	CBCU	АЗТМ 1/550	0,100	5,20-5,40
	Lubrifiil VA 1520		0,035	1,80-1,92
	PANLUBE S 2800 V		0,010	0,53-0,55

По данным табл. 7, наиболее хороший результат показала смазка PANLUBE S 2800 V. Дальнейшая переработка проволоки, волооченной на новых смазках, под штамповку заготовок самонарезающих винтов и накатку резьбы осуществлялась без замечаний, забивания инструмента и пылеобразования. Современные сухие смазки Lubrifiil VA 1520 и PANLUBE S 2800 V позволили получить качественную поверхность.

Отсутствие фосфатного покрытия на проволоке не позволяет поставлять данную проволоку потребителям, требующим проволоку с фосфатированием поверхности. Существующая в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» технология фосфатирования окунанием в ванны не обеспечивает равномерной толщины слоя, а разброс по толщине фосфата также негативно отражается на штамповке.

Разработана новая технология получения качественной проволоки диаметром 2,58-3,79 мм с фосфатированием и последующим мокрым волоочением. В условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» технология мокрого волоочения применялась только для проволоки нулевых диаметров, изготавливаемой на современных волоочильных станах.

Новая технология изготовления проволоки включает следующие операции:

1. Травление катанки и известкование.
2. Волочение катанки на промежуточный размер.
3. Отжиг передельной заготовки.
4. Фосфатирование в нитку на термотравильном агрегате ТТА.

5. Мокрое волочение проволоки на готовый размер.

После фосфатирования проволока имела на поверхности равномерный и ровный слой фосфатного покрытия, в отличие от фосфатирования в ваннах. Установленные концентрации ванн и время прохождения проволоки обеспечивают плотность фосфатного покрытия – 3,5-3,6 г/м<sup>2</sup>.

Последующий процесс мокрого волочения фосфатированной проволоки-заготовки был организован на стане АЗТМ 1/650. Для этого была проведена реконструкция стана с целью подачи эмульсии. Волочение проводилось с эмульсией Sintek F1 22, разведенной до требуемой концентрации, при подаче ее в волокодержатель (рис. 5).



Рис. 5. Реконструкция стана АЗТМ 1/650 и подача эмульсии

Процесс волочения проходил стабильно, без обрывов. Использовалась волока, применяемая для сухого волочения. Поверхность готовой проволоки имела однородный блестящий темно-серый цвет, без следов сухой смазки (рис. 6).

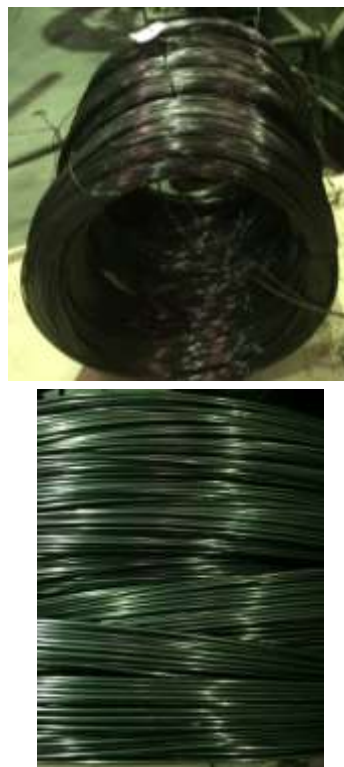


Рис. 6. Качество поверхности готовой проволоки

Теория и технология металлургического производства

Таким образом, применение современных смазочных материалов и технологических процессов фосфатирования и мокрого волочения проволоки позволяют получать качественную проволоку для дальнейшей штамповки самонарезающих винтов.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Установлено, что материалом исходной катанки могут быть отечественные марки стали 15Г(М), 20Г(М), обладающие следующими механическими свойствами: предел прочности  $\sigma_b$  – не более 500 Н/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $\delta$  – не менее 25%; относительное сужение  $\psi$  – не менее 60%.

2. Волочение катанки на промежуточный размер проводить с обжатием 60-80%.

3. Сфероидизирующий отжиг промежуточной проволоки-заготовки, должен обеспечивать получение структуры 100% зернистый перлит.

4. При отсутствии требований к фосфатному покрытию рекомендуется осуществлять волочение готовой проволоки с применением смазки PANLUBE S 2800 V, показавшей наиболее хороший результат по стоимости, процессу волочения и обеспечению качества поверхности.

5. В случае изготовления проволоки с фосфатированием рекомендуется применение фосфатирования в нитку с последующим мокрым волочением. Представленная технология не требует дополнительных затрат на оборудование и обеспечивает выполнение требований, предъявляемых потребителями.

6. Волочение готовой проволоки на готовый размер проводить с обжатием 5-10% и допуском по диаметру -0,01 мм.

7. Установлены следующие механические свойства готовой проволоки: предел прочности  $\sigma_b$  – не более 490 Н/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $\delta$  – не менее 20%; относительное сужение  $\psi$  – не менее 50%, позволяющие стабильно производить высадку головки винтов и накатку резьбы.

Внедрение новых решений в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» позволило изготавливать проволоку не только для собственного производства самонарезающих винтов, но и поставлять ее другим

производителям. Отлаженная технология и высокопроизводительное холодновысадочное, термическое и испытательное оборудование позволяют получать продукцию высокого качества, удовлетворяющую требованиям потребителей.

#### Список литературы

1. Белан А.К., Белан О.А. Конструкция самонарезающих винтов и технология их производства // КШП. ОМД. 2015. №9. С. 20-25.
2. Особенности проектирования и изготовления резьбонакатного инструмента для самонарезающих винтов в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» / Белан А.К., Белан О.А., Юркова Е.В., Сидоренко В.В., Овчинников Д.А. // Крепёж, клеи, инструмент. 2015. №3. С. 42-43.
3. Белан А.К., Белан О.А. Особенности технологии изготовления проволоки и калиброванного проката для холодной штамповки // КШП. ОМД. 2014. №10. С. 28 – 31.
4. Проектирование и изготовление технологического инструмента для кузнечно-штамповочных машин при производстве самонарезающих винтов / Белан А.К., Белан О.А., Юркова Е.В., Сидоренко В.В., Овчинников Д.А. // КШП. ОМД. 2014. №12. С. 28–31.
5. Белан А.К., Белан О.А. Оборудование и технологии изготовления крепёжных изделий в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» // Механическое оборудование металлургических заводов. 2015. №2. С. 36-41.
6. Картунов А.Д., Белан А.К., Белан О.А. Оборудование и технологии подготовки горячекатаного проката под холодную штамповку крепёжных изделий // Калибровочное бюро. Электронный научный журнал. 2016. Вып. 8. С. 37-41.
7. Картунов А.Д., Белан А.К., Белан О.А. Разработка конструкции и технологии производства самонарезающих винтов повышенной прочности в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2016. Вып. 22. С. 150-157.

#### Сведения об авторах

**Дрягун Эдуард Павлович** – начальник центральной заводской лаборатории, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: [dryagun.ep@mmk-metiz.ru](mailto:dryagun.ep@mmk-metiz.ru)

**Белан Анатолий Кириллович** – канд. техн. наук, профессор кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [akbelan@yandex.ru](mailto:akbelan@yandex.ru)

**Белан Ольга Анатольевна** – канд. техн. наук, ведущий специалист, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: [belan.oa@mmk-metiz.ru](mailto:belan.oa@mmk-metiz.ru)

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF WIRES FOR SELF-TAPING SCREWS IN THE CONDITIONS OF OJSC “MMK-METIZ”**

**Eduard P. Dryagun** – Chief of the Central Plant Laboratory, OJSC "Magnitogorsk Hardware and calibration plant "MMK-Metiz", Magnitogorsk, Russia. E-mail: [dryagun.ep@mmk-metiz.ru](mailto:dryagun.ep@mmk-metiz.ru)

**Anatoliy K. Belan** – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [akbelan@yandex.ru](mailto:akbelan@yandex.ru)

**Olga A. Belan** – Ph.D. (Eng.), Leading Specialist, OJSC "Magnitogorsk Hardware and calibration plant "MMK-Metiz", Magnitogorsk, Russia. E-mail: [belan.oa@mmk-metiz.ru](mailto:belan.oa@mmk-metiz.ru)

**Abstract.** *Self-tapping screws are currently very popular fasteners. They found their application for joining metal, wood and plastic. The design of self-tapping screws is diverse. The quality of the applied metal has the greatest impact on the quality of the screws. To fulfill the requirements for geometric parameters and mechanical properties, high-quality raw materials are required. Production of high-quality wire for the further stamping of self-tapping screws is an urgent task in the conditions of the modern market. The article presents the grades of steel used abroad and in Russia. The technological process of wire drawing for stamping self-tapping screws is considered. The features of wire manufacturing technology for subsequent cold stamping of self-tapping screws in the conditions of OJSC “MMK-METIZ” are presented. Recommended mechanical properties of wire rod and finished wire are given for obtaining screw heads during upsetting and high-quality thread during knurling. Alloying elements in the metal will provide mechanical properties on the finished screws after heat treatment. Recommendations are given on the selection of dry drawing lubricants, allowing to improve the surface quality of the finished wire. A new technology of manufacturing of wire with phosphating and subsequent wet drawing is presented.*

**Keywords:** *wire, self-tapping screws, drawing, cold forging, the degree of deformation, compression.*

---

Ссылка на статью:

Дрягун Э.П., Белан А.К., Белан О.А. Разработка технологии изготовления проволоки для самонарезающих винтов в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 35-40.

Dryagun E.P., Belan A.K., Belan O.A. Development of technology of wires for self-taping screws in the conditions of OJSC “MMK-METIZ”. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 35-40.

---

**Теория и технология металлургического производства**



УДК 621.771

Румянцев М.И., Завалищин А.Н.

## РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В ЛИНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

**Аннотация.** Разработана модель изменения температуры полос из углеродистой и низколегированной стали в линии широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП). С целью повышения точности прогнозирования температуры металла на контрольных участках модель составлена из известных формул, которые выбираются в зависимости от значений существенных факторов процесса. Качество модели оценивали для случайно выбранных вариантов из массива данных о прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК». При этом, наряду с абсолютными отклонениями и относительными погрешностями, применили показатель «действенность модели». Погрешность прогноза температуры конца прокатки в черновой группе составила от -2,1 до +3,0 %, что означает абсолютные отклонения от -23 до +31 °С. По температуре конца прокатки в чистовой группе качество модели характеризуется относительной ошибкой от -4,8 до +9,1 % и единичными абсолютными отклонениями от -40 до +80 °С. В то же время оценка действенности модели показала, что 82,2 % расчетных значений температуры конца черновой прокатки и 84,9 % расчетных значений температуры конца чистовой прокатки находятся в диапазоне  $\pm 20$  °С относительно фактических значений.

**Ключевые слова:** широкополосный стан горячей прокатки, углеродистая сталь, низколегированная сталь, температура металла, математическая модель, погрешность модели, действенность модели.

### Введение

Прогнозирование температуры металла в линии широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) имеет важное значение как для разработки новых, так и для совершенствования действующих режимов прокатки, а также при выборе начальной настройки стана в АСУ ТП [1]. Поэтому изучению и моделированию изменения температуры листового металла при горячей прокатке уже давно уделяют много внимания как отечественные, так и зарубежные исследователи [2-11]. Изучаются и уточняются закономерности отдельных явлений, создаются комплексные модели.

Некоторые из таких моделей базируются на статистическом анализе результатов экспериментов и применимы лишь для тех условий, в которых построены соответствующие зависимости. Другие содержат аналитические выражения, полученные при определенных допущениях, которые могут не в полной мере соответствовать особенностям реального процесса прокатки на станах с различным составом оборудования. Вместе с тем очевидна потребность в получении моделей достаточной точности, что при проектировании технологий прокатки и настройке стана будет способствовать обеспечению заданных структуры и механических свойств проката.

Ранее [12] было установлено, что точность прогнозирования температуры металла на контрольных участках в линии ШСГП может быть повышена за счет применения модели, составленной из известных формул, которые выбираются в зависимости от значений существенных факторов процесса. Известен положительный опыт построения и применения таких моделей для случаев прокатки тонких полос из малоуглеродистой [12] и толстых полос из низколегированной [13] стали. В данной статье представлены результаты разработки модели изменения в линии

ШСГП температуры полос и нелегированной, и низколегированной стали.

### Методика исследования

Чтобы создать модель изменения в линии ШСГП температуры и нелегированной, и низколегированной стали, как и в работах [13, 14], изучали прокатку полос толщиной 1,5 – 2,0 мм из сталей 006/IF, 08пс,08Ю, SAE 1006, Ст3пс, SPCC, SPCE и толщиной 4,6 – 16 мм из сталей марок X42(M), 09ГСФ, 10Г2ФБ, 12ГСБ, 13Г1С–У, 17Г1С–У (всего 1001 наблюдение). Рассматривали следующую схему изменения температуры металла. До входа в очаг деформации температура начала охлаждения  $t_{но}$  снижается в результате излучения  $\Delta t_r$  и конвективного теплообмена с окружающим воздухом  $\Delta t_e$ , водой  $\Delta t_w$  либо в гидросбиве ( $\Delta t'_w$ ), либо от воды на участках межклетевого охлаждения ( $\Delta t''_w$ ). В очаге деформации происходит охлаждение за счет теплопередачи рабочим валкам  $\Delta t_R$  и разогрев в результате пластического деформирования  $\Delta t_n$ . Таким образом:

$$t_{kn} = t_{но} - \Delta t_r - \Delta t_e - \Delta t_w - \Delta t_R + \Delta t_n. \quad (1)$$

Составляющие, отображающие снижение температуры под воздействием воды во всех случаях рассчитывали по формулам [15]:

$$\Delta t'_w = 0,185 \frac{(t_0 - 20)n_k}{v_n h}; \quad (2)$$

$$\Delta t''_w = \frac{V_{\Sigma w}}{0,212 v_n h b_{\max}}, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина охлаждаемой полосы, мм;  $v_n$  – скорость полосы, м/с;  $n_k$  – число включенных коллекто-

ров гидросбыва;  $b_{\max}$  – максимальная ширина, прокатываемая на стане, м;  $V_{\Sigma w}$  – расход воды на межклеточное охлаждение, м<sup>3</sup>/ч.

Для расчета остальных составляющих изменения температуры рассмотрели 33 зависимости, описанные в работе [15]. Исходя из особенностей физики процессов, с учетом ранее выполненных исследований [12-14], в качестве существенных факторов выбрали следующие: для изменений температуры излучением и конвекцией – отношение времени охлаждения к толщине полосы ( $\tau/h$ ), при контакте с рабочими валками – произведение скорости и толщины полосы на выходе из очага ( $v_n h_1$ ), для разогрева в результате пластической деформации – среднее контактное давление  $p_{cp}$ .

В отличие от ранее выполненного исследования для определения интервалов аккомодации по каждому из факторов применили метод, аналогичный методу построения интервального вариационного ряда. Соответствующий фактору  $X_j$  диапазон его варьирования

$\{x_{j.\min}; x_{j.\max}\}$  разбивали на интервалы длиной  $\Delta_j = (x_{j.\max} - x_{j.\min}) / (k - 1)$ , где  $k = 1 + 3,3221g(n)$

– число интервалов;  $n$  – число наблюдений. Для каждой составляющей температурного баланса  $\Delta t_Y$  ( $Y$  есть вид воздействия на металл, вызывающий изменение его температуры – т.е. конвекция воздуха, излучение в окружающую среду, теплопередача валкам и деформационный разогрев) в каждом наблюдении ( $i = 1, \dots, n$ ) расчетами по нескольким формулам ( $\varphi = 1, \dots, m$ ) получали выборки  $\{\Delta t_{Y\varphi i}\}_m$  и находили среднее значение

$\bar{\Delta t}_{Yi} = (1/m) \sum_{\varphi=1}^m \Delta t_{Y\varphi i}$ . Предпочтительной формулой для расчета  $\Delta t_Y$  в  $i$ -м наблюдении считали ту, результат применения которой отвечает условию  $|\Delta t_{Y\varphi i} - \bar{\Delta t}_{Yi}| \rightarrow \min$ . Для интервала  $\Delta_j$  предпочтительной считали формулу, которая в данном интервале обеспечивала указанное условие наиболее часто.

### Результаты исследования

Применительно к изменению температуры излучением в случаях, когда значения фактора  $\tau_{re}/h$  не превышают 0,3 с/мм, лучший результат показала формула Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича, которая в работе [15] имеет обозначение (II.20). При рекомендуемом авторами значении приведенного коэффициента излучения  $C = 4,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  формула принимает следующий вид:

$$\Delta t_r = \frac{8,74}{\rho c} \left( \frac{t_{ore} + 273}{100} \right)^4 \frac{\tau_{re}}{h}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, кДж/(кг·К);  $t_{ore}$  – температура начала охлаждения на воздухе, °С;  $\tau_{re}$  – продолжительность охлаждения на воздухе, с;  $h$  – толщина полосы, мм.

В диапазоне значений  $0,3 < \tau_{re}/h \leq 1,3$  с/мм предпочтительно применять формулу А. Лаваяля и Г. Кройлича [15, II.18]. При указанного выше значении  $C$ , а также с учетом того, что время должно быть выражено в часах, а толщина в метрах, формула принимает следующий вид:

$$\Delta t_r = (t_{ore} + 273) - \sqrt[3]{\frac{\rho c h \cdot 10^{-3}}{0,0276 \cdot 10^{-8} \tau_{re} + \frac{c \rho h \cdot 10^{-3}}{(t_{ore} + 273)^3}}}. \quad (5)$$

При  $\tau_{re}/h > 1,3$  с/мм лучшие результаты обнаружил формула В.А. Тягунова [15, II.8] (отношение 1/600 заменено его значением с точностью до 4 знака)

$$\Delta t_r = 0,0017 \left( \frac{t_{ore} + 273}{100} \right)^4 \frac{\tau_{re}}{h}. \quad (6)$$

Снижение температуры полосы при ее контакте с валками в случае  $v_n h_1 \leq 0,44 \text{ м}^2/\text{с}$  лучше отображает формула Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича [15, II.54]. С учетом того, что  $\arccos[1 - (h_0 - h_1)/(2R)]$  есть угол захвата  $\alpha$ , формулу представляем в следующем виде:

$$\Delta t_R = 1,83 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{R\alpha}}{h_0 + h_1} (t_{0n} - 60) \sqrt{\frac{1-s}{v_n}}, \quad (7)$$

где  $s$  – опережение;  $R$  – радиус валка, мм;  $v_n$  – скорость прокатки, м/с.

Если  $v_n h_1 > 0,44 \text{ м}^2/\text{с}$ , предпочтительной является формула Ш. Гелеи [15, II.49]

$$\Delta t_R = 4(t_{0n} - t_R) \frac{\alpha_R}{\rho c} \frac{\tau_R}{(h_0 + h_1) \cdot 10^{-3}}, \quad (8)$$

где  $t_{0n}$  и  $t_R$  – температура металла в сечении входа в очаг деформации и рабочего валка, °С;  $\alpha_R = (6-12) \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$  – коэффициент теплоотдачи (значение принималось в указанных пределах как случайное число);  $\tau_R$  – время контакта точки валка с полосой, с. В соответствии с [15] значение  $c$  должно быть выражено в Дж/кг·К.

Для прогнозирования снижения температуры полосы в результате конвективного теплообмена с воздухом во всем диапазоне фактора  $\tau_{re}/h$  (от 0,058 до 2,221 с/мм) в качестве предпочтительной прояви-

**Теория и технология металлургического производства**

лась формула Н.Н. Крейдлина [15, П.41]. В оригинале записи данной формулы первым множителем стоит число 2, а время должно быть выражено в часах. Тогда получим  $2/3600=5,55 \cdot 10^{-4}$ , и формула принимает следующий вид:

$$\Delta t_e = 5,55 \cdot 10^{-4} \frac{A}{c\rho} \sqrt[3]{(t_{0re} - t_e)^4} \frac{\tau_{re}}{h \cdot 10^{-3}}, \quad (9)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент. На основании [15, рис. 73] получили парную аппроксимацию  $A = 2,5993 - 0,305 \ln[(t_{0re} + t_e)/2]$  ( $R^2=0,998$ ).

Во всем диапазоне значений среднего контактного давления (45-800 МПа) деформационный разогрев рекомендуется определять по формуле В.И. Зюзина, М.Я. Бровмана и А.Ф. Мельникова [15, П.97]

$$\Delta t_{\eta} = 0,502 p_{cp} \lg(h_0/h_1), \quad (10)$$

Для расчета теплоемкости и плотности при различной температуре на основании данных работы [16] построили линейные кусочные аппроксимации

$$c(\rho) = b_0 + b_1 \cdot t/1000. \quad (11)$$

Коэффициенты аппроксимации (11) для теплоемкости представлены в табл. 1, а для плотности – в табл. 2. При этом использованы следующие условные обозначения типов стали: МУ – малоуглеродистая; СУ – среднеуглеродистая; НЛ – низколегированная.

#### Оценивание качества модели

Качество модели оценивали для 220 случайно выбранных вариантов из массива данных о прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК» 4080 полос из углеродистых и 4030 полос из низколегированных марок стали. При прокатке углеродистых марок температура конца черновой прокатки наблюдалась, в основном, в пределах 1040-1100°C (рис. 1, а), а конца чистовой – преимуще-

ственно в диапазоне от 830 до 920°C (рис. 1, б). Черновая прокатка низколегированных марок завершалась, в основном, при температуре 1040-1090°C (рис. 1, в), а чистовая – в диапазоне от 760 до 860°C (рис. 1, з).

При тестировании модели актуальные значения параметров, которые трудно идентифицировать, принимали как случайные значения из известных интервалов их варьирования:  $x = \bar{x} + s \cdot Rnd(-3;3)$ , где  $\bar{x}$  и  $s$  – среднее выборочное и выборочное стандартное отклонение параметра  $X$ . Например, известно, что температура технической воды находится в пределах от 15 до 35 °С. В таком случае  $\bar{x} \approx (15+35)/2=20$  °С;  $s \approx (35-15)/4=5$  °С и  $t_w = 20 + 5 \cdot Rnd(-3;3)$ .

Для температуры нагрева сляба в интервале от 1170 до 1280°C выборочное стандартное отклонение фактической температуры от номинального значения  $s = 0,0173t_{cl}^{\circ} - 15,5$  °С. Следовательно,  $t_{cl} = t_{cl}^{\circ} + (0,0173t_{cl}^{\circ} - 15,5) Rnd(-3;3)$ .

На промежуточном рольганге ШСГП 2000 ПАО «ММК» установлена система теплозащитных экранов «Enkorpanel», разработанная фирмой Davu McKee, которая применяется при прокатке относительно тонких полос. Для экранированного участка характерна скорость охлаждения 0,3-0,7 °С/с [17]. В таком случае  $\bar{x} = 0,5$  °С/с и  $s \approx 0,03$  °С/с, а снижение температуры на экранированном участке длиной  $L_{EN}$  при скорости транспортирования  $v_{mp}$  составит  $\Delta t_{EN} = [0,5 + 0,03 Rnd(-3;3)] \cdot L_{EN} / v_{mp}$ .

Характеристики вариации температуры рабочих валков приведены в табл. 3.

Диаграммы соответствия прогнозируемых значений температуры конца черновой ( $t_{кнR}$ ) и чистовой ( $t_{кнF}$ ) прокатки представлены на рис. 2.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимаций зависимости теплоемкости от температуры, кДж/кг·К

Тип стали	Температура, °С											
	не более 700		701-750		751-800		801-900		900-1000		свыше 1000	
	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$
МУ	0,27	0,83	-2,67	5,05	4,71	-4,79	1,46	-0,73	2,01	-1,34	0,66	0,01
СУ	0,31	0,74	-9,51	14,76	14,52	-17,3	1,37	-0,84	0,48	0,16	0,48	0,16
НЛ	0,28	0,80	-7,72	12,22	12,90	-15,3	1,70	-1,26	0,35	0,24	0,35	0,24

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимаций зависимости плотности от температуры, кг/м<sup>3</sup>

Тип стали	Температура, °С											
	не более 700		701-750		751-800		801-900		900-1000		свыше 1000	
	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$
МУ	7,89	-0,39	7,88	-0,37	7,78	-0,24	7,53	-0,08	8,06	-0,52	8,07	-0,52
СУ	7,89	-0,39	7,52	0,14	7,51	0,15	7,91	-0,35	8,06	-0,52	8,06	-0,52
НЛ	7,88	-0,39	7,34	0,38	7,59	0,04	7,91	-0,36	8,06	-0,53	8,06	-0,53

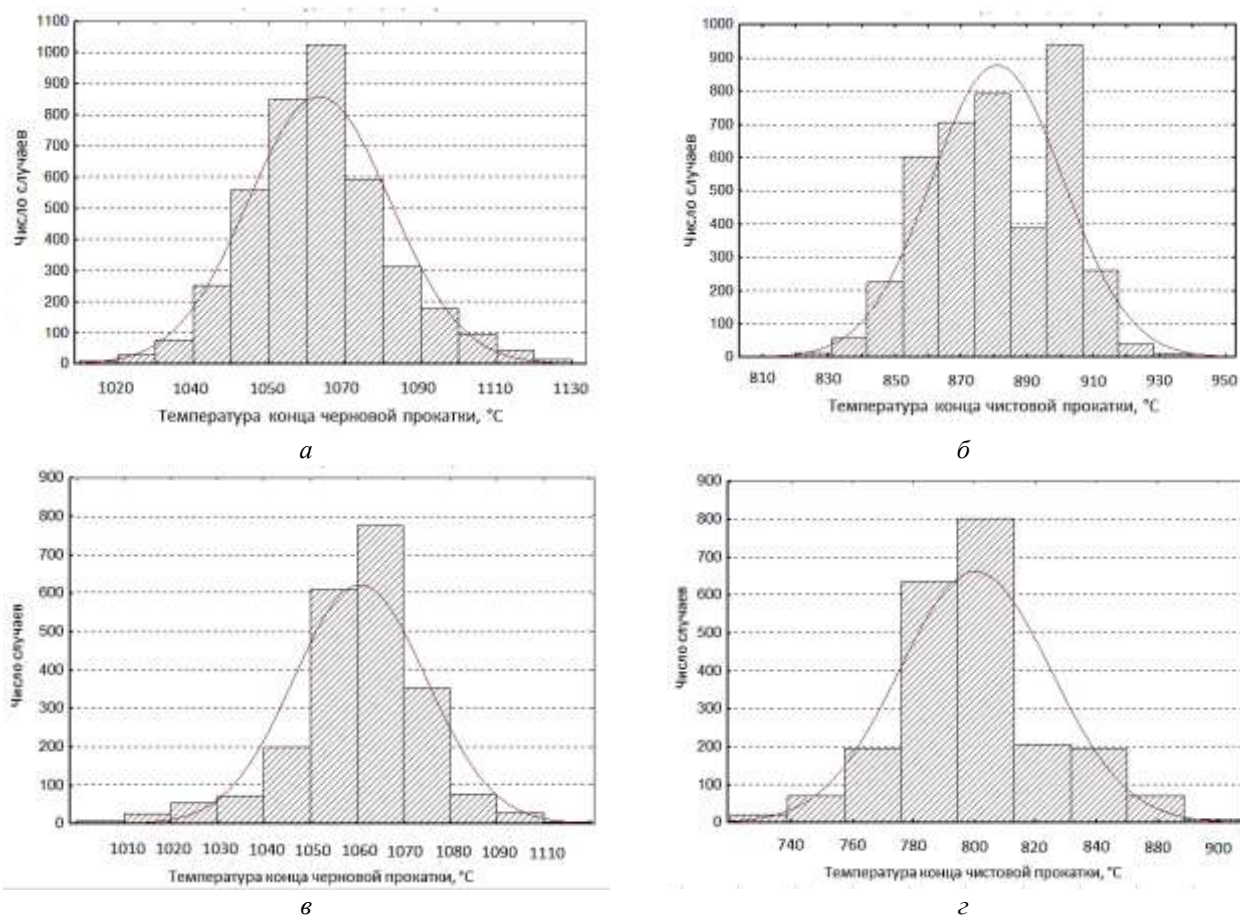


Рис. 1. Вариация температуры конца черновой и чистовой прокатки для углеродистых (а-б) и низколегированных (в-г) марок стали на ШСГП 2000 ОАО «ММК»

Таблица 3

Характеристики вариации температуры рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки

$t_R, ^\circ\text{C}$	Клетки черновой группы						Клетки чистовой группы						
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
$\bar{x}$	79	75	71	66	60	57	81	81	76	75	70	70	66
$s$	0,7	0,8	1,0	0,8	0,7	0,7	0,83	0,83	0,83	0,67	0,83	0,83	0,83

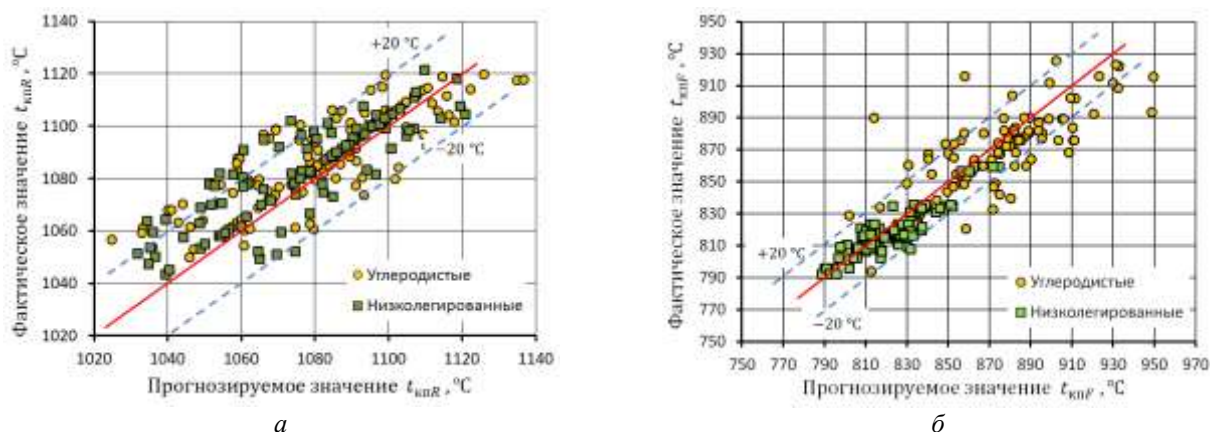


Рис. 2. Диаграммы соответствия прогнозируемых и фактических значений температуры конца черновой (а) и чистовой (б) прокатки на ШСГП

Погрешность прогноза  $t_{knR}$  (рис. 2, а) составила от -2,1 до +3,0 %. Однако в области температур 1030-1120 °С такая, относительно малая, погрешность означает абсолютные отклонения от -23 до +31 °С. Рассмотрели также характеристику «действенность модели»:  $E_{\delta} = 100 \cdot m_{\delta} / n$  (%), где  $n$  – число испытанных модели;  $m_{\delta}$  – число прогнозируемых значений моделируемого параметра, которые отличаются от фактических значений не более чем на величину  $\delta$  [18]. При  $\delta = \pm 20$  °С действенность модели составила 82,2 %. Это означает, что в 82,2 % случаев обеспечивается условие  $t_{knR} \leq |\pm 20|$  °С.

По температуре конца чистовой прокатки качество модели характеризуется относительной ошибкой от -4,8 до +9,1 % и единичными абсолютными отклонениями от -40 до +80 °С (рис. 2, б). При этом действенность модели по условию  $t_{knF} \leq |\pm 20|$  °С составляет 84,9 %.

### Заключение

Необходимая точность прогнозирования температуры металла на контрольных участках в линии ШСГП может быть обеспечена за счет применения модели, составленной из известных формул, которые выбираются в зависимости от значений существенных факторов процесса.

Для излучения и конвекции при охлаждении на воздухе существенным фактором является отношение времени охлаждения к толщине полосы  $\tau_{re}/h$ . Снижение температуры излучением рекомендуется определять по формулам Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича [15, П.20] ( $\tau_{re}/h < 0,3$  с/мм), А. Лавайля и Г. Кройлича [15, П.18] ( $0,3 < \tau_{re}/h \leq 1,3$  с/мм), а также В.А. Тягунова [15, П.8] ( $\tau_{re}/h > 1,3$  с/мм). Снижение температуры полосы в результате конвективного теплообмена с воздухом во всем диапазоне фактора  $\tau_{re}/h$  (от 0,058 до 2,221 с/мм) оценивается формулой Н.Н. Крейдлина [15, П.41].

Для охлаждения полосы в результате контакта с рабочими валками существенным фактором является секундный объем металла  $v_n h_1$ . При  $v_n h_1 \leq 0,44$  м<sup>2</sup>/с рекомендуется использовать формулу Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича [15, П.54]. Если  $v_n h_1 > 0,44$  м<sup>2</sup>/с, предпочтительной является формула Ш. Гелеи [15, П.49].

Для деформационного разогрева существенным фактором является среднее контактное давление. В диапазоне значений среднего контактного давления 45-800 МПа деформационный разогрев рекомендуется определять по формуле В.И. Зюзина, М.Я. Бровмана и А.Ф. Мельникова [15, П.97].

Оценка действенности разработанной модели показала, что 82,2 % расчетных значения температуры конца черновой прокатки и 84,9 % расчетных значений температуры конца чистовой прокатки нахо-

дятся в диапазоне  $\pm 20$  °С относительно фактических значений.

### Список литературы

1. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Автоматизация процесса горячей прокатки плоского металла. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 256 с.
2. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л. Температурный режим широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1974. 175 с.
3. Kiuchi M. (I), Yanagimoto J., Wakamatsu E. Overall Thermal Analysis of Hot Plate/Sheet Rolling // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2000. 49(1). Pp. 209-212. <https://www.researchgate.net/publication/239376029>
4. Kim J., Lee J., Hwang S. M. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling // International journal of heat mass transfer. 2009. № 52. Pp. 1864-1874. <https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931008005966>
5. Analysis of Temperature loss of Hot Metal during Hot Rolling Process at Steel Plant / Kirthan K. K. A., Mourian S. S., Vignesh M., Nisanth A. // International Journal of Modern Engineering Research. Vol. 4. Iss.8. Aug. 2014. Pp. 23 – 29. <https://www.academia.edu/15843488>
6. Анализ и экспериментальная верификация модели тепловыделения при фазовых превращениях / А.Р. Гареев, С.А. Муриков, С.И. Платов и др. // Производство проката. 2015. № 2. С. 30 – 34.
7. Velay V., Michrafy A. An analytical model for the prediction of hot roll temperatures in a hot rolling process // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2016. 47(12). P. 1202-1215. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01609107/document>
8. Heat Transfer Technology for Steel Rolling Process / Serizawa Y., Yamamoto R., Takamachi Y. and others // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. No. 111. March 2016. Pp. 92 – 100. <http://nssmc.com/en/tech/report/nssmc/pdf/111-14.pdf>
9. Математическая модель для расчета температуры полосы при горячей прокатке на стане 2000 ПАО «Северсталь» / С. Ф. Соколов, А. А. Огольцов, Д. Ф. Соколов, А. А. Васильев // Сталь. 2017. № 2. С. 35-41.
10. The study of the thermal state of the metal in the production of the hot rolled strips in «Deform 3D» / A.G. Levykina, A.A. Chabonenko, V.V. Shkatov, I.P. Mazur // FNM 2018. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1134 (2018) 012034. 8 p. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1134/1/012034>
11. Кухарь В.В., Курпе А.Г. Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки // Обработка материалов давлением. 2018. № 1 (46). С. 159-166. [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/omd/omd1\(46\)\\_2018/article/26.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd1(46)_2018/article/26.pdf)
12. К вопросу построения модели для расчета составляющих температурного режима металла в линии

- широкополосного стана горячей прокатки / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, Д.Ю. Загузов, О.С. Носенко // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. С. 26 - 34.
13. Синтез модели для расчета температуры тонких полос из малоуглеродистых сталей в линии широкополосного стана горячей прокатки / Р.А. Исмагилов, М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, и др. // Производство проката. 2007. № 5. С. 5-9.
14. Моделирование изменения температуры металла при горячей прокатке толстых полос из низколегированных сталей на широкополосных станах с целью повышения результативности процесса / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, О.Ю. Сергеева и др. // Производство проката. 2009. № 9. С. 7-11.
15. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. М.: Металлургия, 1986. 430 с.
16. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / под ред. Б.Е. Неймарк. М.; Л.: Энергия, 1967. 240 с.
17. Стариков А.И. Современный листопрокатный комплекс для производства листовой стали высокого качества. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 1996. 128 с.
18. Rumyantsev M. I., Tulupov O. N. Further developments in simulation of metal forming processes // CIS Iron and Steel Review. Vol. 16 (2018). Pp. 21-24.

#### Сведения об авторах

**Румянцев Михаил Игоревич** – профессор кафедры технологий обработки материалов, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mir@magtu.ru.

**Завалищин Александр Николаевич** – профессор кафедры литейного производства и материаловедения, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaval1313@mail.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR STRIP TEMPERATURE CHANGE PREDICTION IN THE HOT STRIP ROLLING MILL

**Mikhail I. Rumyantsev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mir@magtu.ru.

**Aleksandr N. Zavalishchin** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaval1313@mail.ru.

**Abstracts.** A model of temperature change of strips made of carbon and low-alloy steel in the line of hot-rolling strip mill (HSRM) has been developed. In order to improve the accuracy of metal temperature forecasting at the control sites, the model is made up of known equations, which are selected depending on the values of significant factors of the process. The quality of the model was assessed for randomly selected variants from the practical data set at HSRM 2000 of Magnitogorsk Iron and Steel Works. At that, along with absolute deviations and relative errors, the indicator "model effectiveness" was applied. The relative error of the prediction of the end-rolling temperature in the roughing stands ranged from -2.1 to +3.0 %, which means absolute deviations from -23 to +31 °C. The relative error of the prediction of the end-rolling temperature in the finishing stands ranged from -4.8 to +9.1 %, which means absolute deviations from -40 to +80 °C. At the same time, an model effectiveness evaluation showed that 82.2% of the predicted end-rolling temperature in the roughing stands and 84.9% of the predicted end-rolling temperature in the finishing stands are in the  $\pm 20$  °C range relative to the actual values.

**Keywords:** hot strip rolling mill, carbon steel, low-alloy steel, metal temperature, mathematical model, model error, model effectiveness

Ссылка на статью:

Румянцев М.И., Завалищин А.Н. Развитие модели прогноза температуры металла в линии широкополосного стана горячей прокатки // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1 (32). С. 41-46.

Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N. Improvement of the mathematical model for strip temperature change prediction in the hot strip rolling mill. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp.41-46.

УДК 621.771

Тютряков Н.Ш., Савинов А.С., Андросенко М.В., Рудь К.И., Залилов Р.В.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАНТУЮЩИЕ РОЛИКИ ВАЛКОВОЙ АРМАТУРЫ RTC СОРТОВЫХ СТАНОВ ПАО «ММК», В ПРОЦЕССЕ СКРУЧИВАНИЯ ПОЛОСЫ

**Аннотация.** Разработка надежных и долговечных конструкций валковой арматуры зачастую представляет значительные трудности, поскольку требуется знание особенностей нагружения ее рабочих деталей и величины усилий, действующих на эти детали. Для изучения износостойкости изнашиваемых деталей валковой арматуры качения именно силовые параметры являются исходными величинами, поэтому в данной работе основное внимание было уделено определению усилий, возникающих при скручивании полос в кантующей арматуре RTC, установленной на сортовых станах ПАО «ММК».

**Ключевые слова:** сортовая прокатка, валковая арматура, кантующие ролики, скручивание полос, усилия кантования.

### Введение

В последнее десятилетие структура спроса на металлопродукцию и требования к ней претерпевают существенные изменения. Конкурентоспособность изделий из черных металлов в значительной степени определяется уровнем применяемых технологий и уникальностью оборудования для обработки давлением, в частности, прокатных и литейно-прокатных комплексов.

Эксплуатация в ПАО «ММК» сортовых станов 450, 370, 170, изготовленных фирмой DANIELI (Италия), потребовало пристального внимания к валковой арматуре.

Валковая арматура, образуя с прокатными валками единый комплекс технологического инструмента, является неотъемлемой частью основных агрегатов сортовых станов – рабочих клетей [1]. Она включает в себя детали, работающие длительное время и не требующие замены, регулярного восстановления – арматурные брусья, коробки, крепежные элементы и др. В то же время валковая арматура содержит сменные детали, подвергающиеся изнашиванию. Эти детали требуют периодической замены или восстановления [1].

Износостойкость роликов валковой арматуры во многом определяет качество готового проката, ритмичность работы стана, что, в конечном счете, определяет конкурентоспособность выпускаемой продукции как на внешнем, так и на внутреннем рынках [2].

Арматура для скручивания раската RTC (рис. 1) состоит из корпуса 1, приемной воронки 2, кантующих роликов 3, механизма регулировки межосевого расстояния роликов 4 и раструба 5 для направления проката в калибр валков.

Применена симметричная и одновременная регулировка межцентрового расстояния роликов с помощью единой точки настройки. Червяк приводит в действие червячное колесо, вращение цапфы эксцентриков роликов. Такая настройка обеспечивает более точный контролируемый режим скручивания. Консольный принцип монтажа роликов (до проводок се-

рии RTC10) позволяет быстро провести монтаж роликов. Для выполнения этой же операции на проводках до серии RTC18 необходимо снять 4 болта.

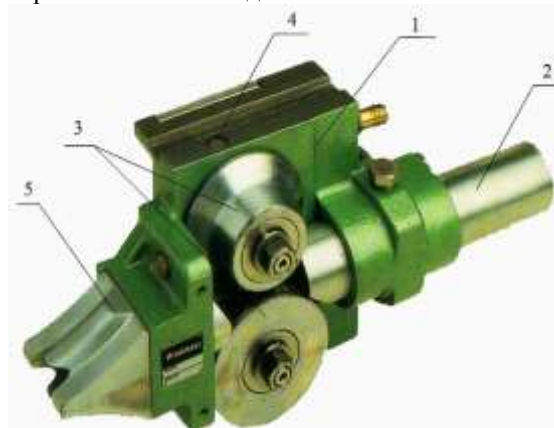


Рис. 1. Арматура RTC с кручением

При расчете усилий, возникающих в арматуре при скручивании полос, используется гипотеза А. Надаи [3]. При расчете усилий считается, что кантование раскатов осуществляется при постоянной величине крутящего момента.

Величина полного усилия кантования (рис. 2) и его составляющих с достаточной точностью определяется следующими уравнениями [4]:

$$N = \frac{M_{н.к.}}{l}; \quad (1)$$

$$N_x = N \cdot \cos \varphi_{п.р.}; \quad (2)$$

$$N_y = N \cdot \sin \varphi_{п.р.}, \quad (3)$$

где  $N$  – полное усилие кантования, кН;  
 $N_x$  и  $N_y$  – радиальная и осевая составляющие полного усилия кантования;

$l$  – плечо сил, скручивающих полосу;

$\varphi_{п.р.}$  – угол профилировки ролика.

Определим плечо сил, скручивающих полосу, имеющую форму поперечного сечения эллипс.

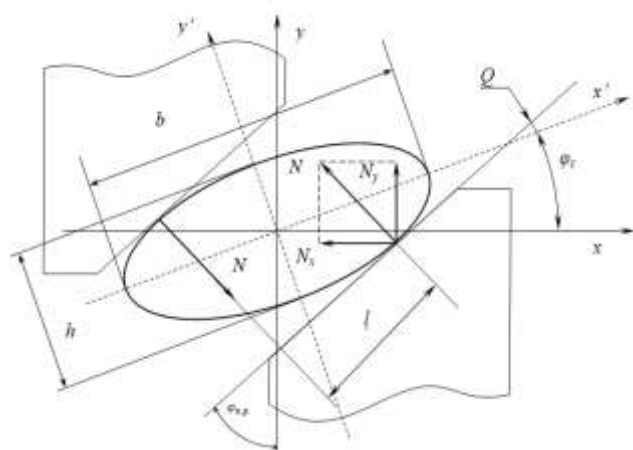


Рис. 2. Схема к определению усилий кантования

Уравнение касательной (в нашем случае поверхности вала) к эллипсу [5]

$$\frac{xx_0}{a^2} + \frac{yy_0}{c^2} = 1, \quad (4)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты точки контакта раската с кантующим валком;  
 $x, y$  – координаты произвольной точки, находящейся на эллипсе;  
 $a, c$  – полуоси эллипса ( $a=b/2; c=h/2$ ).

Тангенс угла наклона поверхности вала определим как производную уравнения касательной [5]

$$\operatorname{tg} Q = -\frac{x_0 b^2}{y_0 a^2}. \quad (5)$$

Из уравнения (4) выразим  $y$ , принимая  $x=x_0, y=y_0$ :

$$y_0 = \sqrt{c^2 - \frac{x_0^2 c^2}{a^2}}. \quad (6)$$

Из уравнения (5) выразим  $y$

$$y_0 = -\frac{x_0 \cdot c^2}{\operatorname{tg} Q \cdot a^2}. \quad (7)$$

Приравняв (6) и (7), получим абсциссу точки В [5]:

$$x_0 = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 Q \cdot a^4}{\operatorname{tg}^2 Q c \cdot a^2 + c^2}}.$$

Плечо сил, скручивающих полосу:

$$l = 2(x_0 \cos Q - y_0 \cdot \sin Q). \quad (8)$$

$$Q = \varphi_{n.p.} + \varphi_c.$$

Результаты расчета усилий, действующих в кантующей арматуре, установленной на стане 170, представлены в таблице и на рис. 3 [4, 5].

Расчеты показали, что для увеличения ресурса кантующих роликов и оптимизации процесса кантования требуется профилировка роликов, обеспечивающая максимальное плечо и, как следствие, минимальное усилие на ролики при кантовании.

Номер клетки	RTS	$\varphi_{п.р.}$ , град	$b$ , мм	$h$ , мм	$l$ , м	$N$ , кН	$N_x$ , кН	$N_y$ , кН
2	15	45	123,86	77	0,102	460,27	325,73	325,73
4	12	45	98,5	55,7	0,077	325,55	229,71	229,71
6	10	45	74,74	41,6	0,059	184,79	130,06	130,06
8	7	40	59,43	29,7	0,048	148,09	113,05	95,68
10	5	35	46,03	22,9	0,038	90,88	74,17	52,75

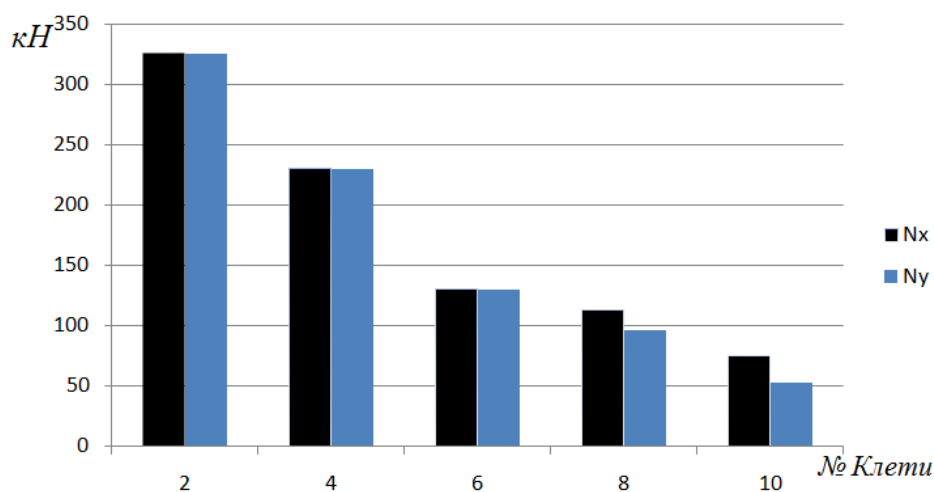


Рис. 3. Составляющие усилия кантования



## Список литературы

1. Моделирование условий эксплуатации роликов валковой арматуры сортовых станов / Новицкий Р.В., Остапчук А.М., Оншин Н.В., Тютеряков Н.Ш., Коковихин А.В. // Горный журнал. 2012. № S3. С. 64-67.
2. Тютеряков Н.Ш., Оншин Н.В., Кандауров Л.Е. Влияние высоких температур на изнашивание материалов при абразивном износе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 1 (13). С. 50-53.
3. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел: пер. с англ. М.: ИЛ, 1954. 647 с.
4. Оншин Н.В., Тютеряков Н.Ш., Трофимова А.Л. Методика оценки ресурса роликов валковой арматуры // Механическое оборудование металлургических заводов. 2012. № 1 (1). С. 34-39.
5. Оншин Н.В., Тютеряков Н.Ш., Пантелеев В.С. Определение усилий, возникающих в роликах кантующей валковой арматуры RTS сортового стана 170 ПАО «ММК» при скручивании полос // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2013. № 19. С. 41-45.

## Сведения об авторах

**Тютеряков Наиль Шаукатович** – канд. техн. наук, доцент кафедры ПиЭММО, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [n.tyuteryakov@magtu.ru](mailto:n.tyuteryakov@magtu.ru).

**Савинов Александр Сергеевич** – д-р техн. наук, зав. кафедрой механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [savinov\\_nis@mail.ru](mailto:savinov_nis@mail.ru).

**Андросенко Мария Владимировна** – ст. преп. кафедры ПиЭММО, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», E-mail: [manechka.05@mail.ru](mailto:manechka.05@mail.ru).

**Рудь Ксения Игоревна** – старший лаборант кафедры механика, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [ttmp@magtu.ru](mailto:ttmp@magtu.ru).

**Залилов Рустем Венирович** – ст. преп. кафедры ПиЭММО, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [zalilow74@ya.ru](mailto:zalilow74@ya.ru).

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## CALCULATION OF FORCES ON THE TWIST ROLLERS OF RTC GUIDE FITTINGS OF PAO “MMK” SECTION ROLLING MILLS IN THE PROCESS OF STRIP COILING

**Nail Sh. Tyuteryakov** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [n.tyuteryakov@magtu.ru](mailto:n.tyuteryakov@magtu.ru).

**Alexander S. Savinov** – Dr. Sci. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [savinov\\_nis@mail.ru](mailto:savinov_nis@mail.ru).

**Maria V. Androsenko** – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [manechka.05@mail.ru](mailto:manechka.05@mail.ru).

**Ksenia I. Rud** – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [ttmp@magtu.ru](mailto:ttmp@magtu.ru).

**Rustem V. Zalilov** – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [zalilow74@ya.ru](mailto:zalilow74@ya.ru).

**Abstract.** Design of a reliable and durable construction of roll fittings is usually a complicated task as such information as particularity of loads and forces applied to the working parts is required. The force parameters are the initial values when studying the wear resistance of the wearing parts of the roll fittings. Therefore, in this work, the main attention was paid to determining the forces arising in the process of strips coiling in the RTC twist guide installed on the section rolling mills of PAO “MMK”.

**Keywords:** bar production, guide fittings, twist rollers, strip coiling, canting forces.

## Ссылка на статью:

Тютеряков Н.Ш., Савинов А.С., Андросенко М.В., Рудь К.И., Залилов Р.В. Определение усилий, действующих на кантующие ролики валковой арматуры RTC сортовых станов ПАО «ММК», в процессе скручивания полосы // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1 (32). С. 47-49.

Tyuteryakov N. Sh., Savinov A.S., Androsenko M.V., Rud K.I., Zalilov R.V. Calculation of forces on the twist rollers of RTC guide fittings of PAO “MMK” section rolling mills in the process of strip coiling. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 47-49.

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 669.15-196

Зотов С.В., Лимарев А.С., Мезин И.Ю., Гун И.Г., Понурко И.В.

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ПРИ ВОСТАНОВЛЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

***Аннотация.** Работа посвящена анализу параметров самофлюсующихся покрытий на основе никеля, которые применяются при восстановлении изношенных поверхностей автомобильных деталей. Был рассмотрен фактор толщины и его влияние на износостойкость, пористость и твердость. Выявлены толщины покрытий разного химического состава, определяющие оптимальные технологические параметры, а также причины изменения этих параметров. Анализ покрытий разного химического состава позволил сделать вывод о влиянии технологии нанесения покрытий на дефектность поверхности автомобильных деталей. Покрытия из порошковых сплавов марки ПР-Н77Х15С3Р2 являются наиболее эффективными при восстановлении деталей с износом до 1 мм.*

***Ключевые слова:** покрытие, износостойкость, твердость, пористость, микроструктура, толщина, сплав, наплавка, поверхность.*

Ремонт автомобильных деталей представляет собой восстановление всех геометрических размеров детали, ее формы и расположения поверхностей, а также обеспечение физико-механических свойств в сравнении с новой деталью. Кроме этого, при ремонте решается задача повышения долговечности и работоспособности детали [1-3].

При ремонте автомобилей широко используют газовую наплавку с присадкой прутков или проволоки, газопорошковую наплавку и газопламенное напыление с последующим оплавлением [4]. Предпочтительное применение получила газопорошковая наплавка, так как порошки позволяют в более широких пределах, чем проволока, регулировать состав наносимых покрытий, что способствует повышению прочности их сцепления с основой. Этот способ позволяет упрочнять детали сложной конфигурации слоем минимальной толщины (от 0,1 до 0,3 мм) без разбавления основным металлом, так как зона перехода составляет всего 100-120 мкм [5,6].

Для наплавки используют сплавы самых разнообразных составов. Требования, предъявляемые к свойствам металлов наплавки, зависят от условий эксплуатации деталей. В настоящее время существует достаточно большой спектр порошковых материалов для наплавки и напыления: порошки металлов (вольфрама, алюминия, молибдена, цинка), сплавов (свинцово-медных, кобальтовых, никелевых), порошки различных соединений и др. Среди различных наплавочных материалов особое место занимают износостойкие материалы, обладающие высокой твердостью и сохраняющие ее при высоких температурах в процессе работы.

В процессе восстановления автомобильных компонентов активно могут применяться самофлюсующиеся порошковые сплавы на основе никеля. Наиболее распространены порошковые сплавы следующих марок: ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПР-Н77Х15С3Р2.

Износостойкие покрытия из порошковых сплавов системы Ni – Cr – В – Si – С, полученные методом газопламенного напыления с последующим оплавлением, имеют достаточно сложную структуру, состоящую из твердого раствора на основе никеля, многокомпонентной эвтектики, боридов, карбидов и силицидов [7].

Одним из главных технологических факторов, влияющих на процесс формирования покрытий и их эксплуатационных свойств, является толщина нанесенного слоя материала [8].

Результаты исследования относительной износостойкости ( $K_{и}$ ), твердости, дефектности в зависимости от толщины наплавленного слоя покрытия представлена на рис. 1, 2, 3 и 4.

Анализ кривых на рис. 1 свидетельствует, что покрытие марки ПГ-12Н-02 обладает наибольшей твердостью. Это объясняется большим количеством легирующих элементов данного сплава и наибольшим количеством твердой составляющей в этом сплаве (рис. 2).

Твердость в покрытиях марок ПГ-12Н-01 и ПГ-12Н-02 достигает максимальных значений на расстоянии 0,5-0,75 мкм от границы основа – покрытие, затем происходит снижение твердости.

В сплаве ПГ-12Н-01 твердость не зависит от толщины покрытия и меньше, чем в других сплавах. Поверхностная твердость в зависимости от толщины покрытия изменяется по-другому. При увеличении толщины покрытия происходит повышение значений твердости покрытия. При этом в покрытиях увеличивается количество твердых составляющих.

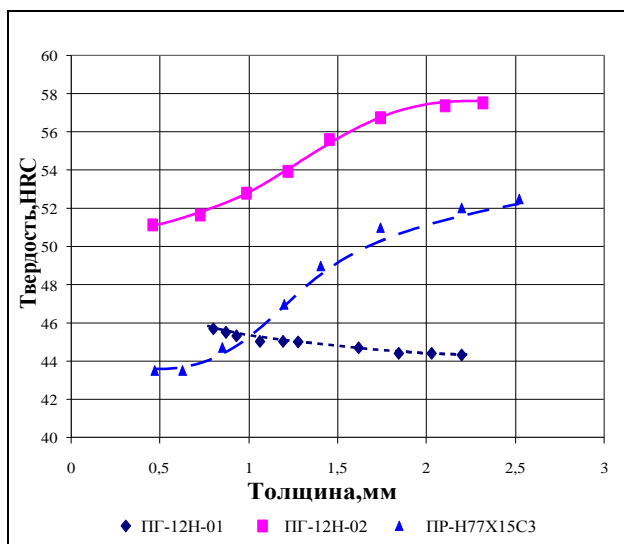


Рис. 1. Зависимость твердости разных марок сплавов от толщины покрытия

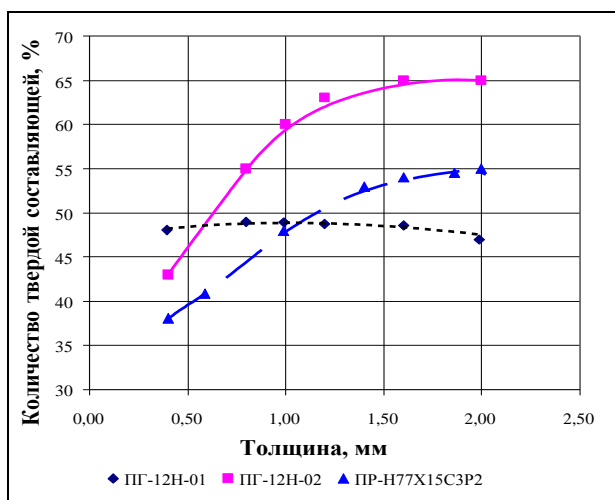


Рис. 2. Зависимость количества твердой составляющей разных марок сплавов от толщины покрытия

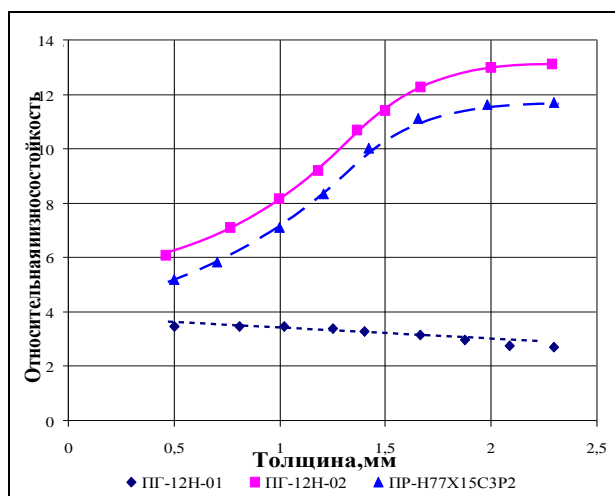


Рис. 3. Зависимость относительной износостойкости ( $K_{и}$ ) разных марок сплавов от толщины покрытия

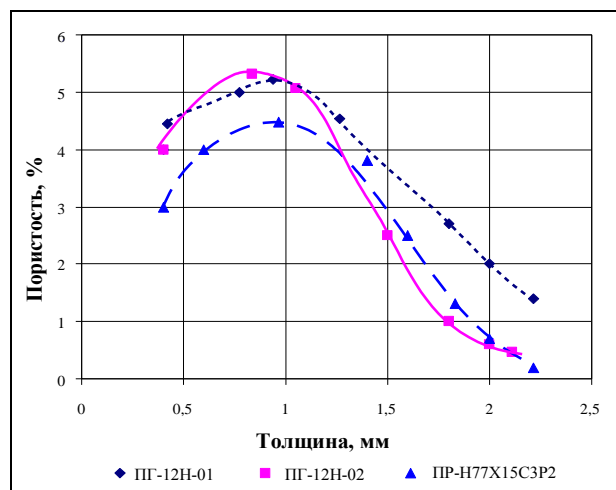


Рис. 4. Зависимость дефектности (пористости) разных марок сплавов от толщины покрытия

Такие зависимости объясняются особенностями технологии нанесения покрытий. [9]. Если толщина небольшая, при нанесении каждого последующего слоя происходит более полное и глубокое проплавление нанесенного материала вследствие его повторно-го разогрева. Количество жидкой фазы увеличивается, поэтому при последующей кристаллизации во время охлаждения происходит увеличение количества эвтектики. Твердость соответственно также возрастает. Начиная с толщины 1,5 мм. происходит слияние твердых частиц внутри покрытия, при этом увеличение количества эвтектик не наблюдается. Таким образом, начиная с этой толщины покрытия, поверхностная твердость остается неизменной.

Для сплавов ПГ-12Н-2 и ПР-Н77Х15С3Р2 вышеописанный характер зависимости твердости и количества твердой структурной составляющей от толщины покрытия проявляется более явно (см. рис. 1, 2). В покрытиях марки ПГ-12Н-01 содержание хрома является более высоким по сравнению со сплавами ПГ-12Н-2 и ПР-Н77Х15С3Р2, и его теплопроводность выше [10]. Это и обеспечивает более полное проплавление при любой из исследованных толщин нанесенного слоя, что дает практически одинаковую структуру на поверхности покрытия ПГ-12Н-01 разной толщины (рис. 5, а, б), поэтому твердость поверхности меньше, чем в других сплавах, и практически не меняется при увеличении толщины покрытия.

Технология нанесения покрытия определяет характер изменения количества твердой составляющей по толщине покрытия: покрытие наносится послойно с последующим оплавлением каждого слоя до тех пор, пока не получится заданная толщина покрытия (от 0,05 до 2,6 мм). Пока количество слоев мало, нанесенный слой материала успевает остыть, и последующий слой наносится на холодный металл, скорость охлаждения возрастает, а следовательно, возрастает и количество твердой составляющей – эвтектики [11].

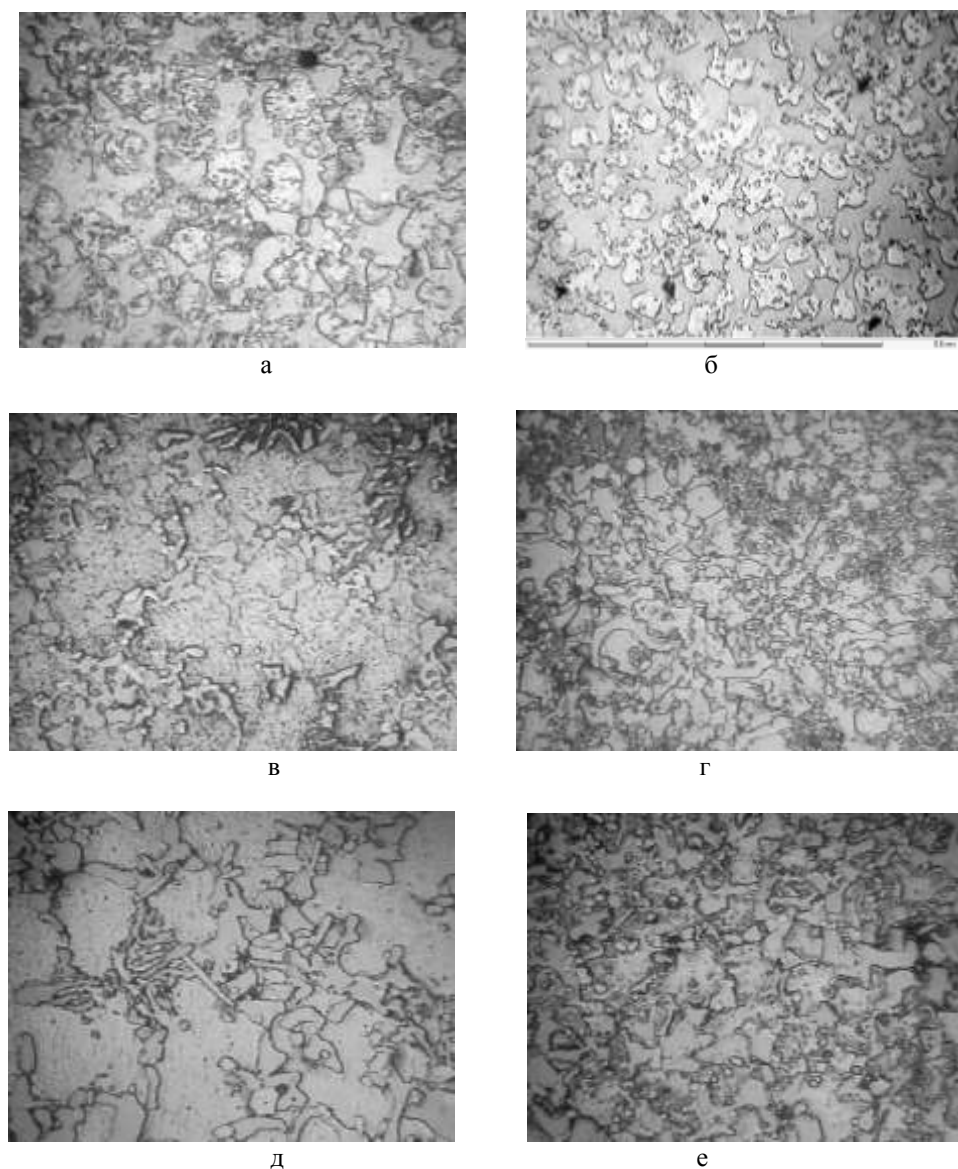


Рис. 5. Микроструктура поверхности покрытий разных марок и разной толщины:  
 а – ПГ-12Н-01 (толщина 0,5 мм); б – ПГ-12Н-01 (толщина 2,5 мм);  
 в – ПГ-12Н-02 (толщина 0,5 мм); г – ПГ-12Н-02 (толщина 2,5 мм);  
 д – ПР-Н77Х15С3Р2 (толщина 0,5 мм); е – ПР-Н77Х15С3Р2 (толщина 2,5 мм), x1000

Изменение относительной износостойкости поверхности покрытий Ки, приведенная на рис. 3, хорошо соотносится с изменением твердой составляющей [12]. При небольшой толщине покрытия жидкая фаза с поверхности при оплавлении проникает в более глубокие слои и происходит более полное и глубокое проплавление. В связи с этим на поверхности покрытия происходит некоторое возрастание пористости (~0,5%). При большей толщине слоя оплавление происходит преимущественно с поверхности, а более глубокие слои проплавляются хуже, в результате на поверхности наблюдается снижение пористости и образуется материал практически без пор.

Наименьшую износостойкость показал сплав ПГ-12Н-01 для всех толщин покрытий. При этом от-

носительная износостойкость, как и твердость, и количество твердой составляющей, при увеличении толщины покрытия изменяется очень незначительно. Это связано с наименьшим количеством твердой составляющей и наибольшим уровнем пористости (рис. 4) по сравнению с покрытиями марок ПГ-12Н-02 и ПР-Н77Х1С3Р2.

Твердость поверхности не является единственным фактором, определяющим износостойкость покрытий. Так, покрытия марок ПГ-12Н-02 и ПР-Н77Х15С3Р2 имеют приблизительно одинаковый уровень значений износостойкости, причем и характер изменения износостойкости при увеличении толщины слоя у данных покрытий отличается незначительно.

*Теория и технология металлургического производства*

При анализе кривых относительной износостойкости  $K_{и}$  и пористости (см. рис. 3 и 4) можно сделать вывод, что пористость структуры также вносит существенный вклад в обеспечение износостойкости.

Так, покрытие марки ПР-Н77Х15С3Р2 имеет в микроструктуре меньшее количество твердой составляющей, чем покрытие марки ПГ-12Н-02, и соответственно меньшую твердость (см. рис. 1 и 2). Однако если уровень пористости низок, как в покрытиях ПР-Н77Х15С3Р2, износостойкость покрытия такая же, как износостойкость покрытия марки ПГ-12Н-02 (см. рис. 3 и 4).

Такие особенности порошковых сплавов объясняются характером изменения пористости, а именно: по мере увеличения количества нанесенных слоев пористость очень сильно возрастает и достигает в сплавах ПГ-12Н-01 и ПГ-12Н-02 значений в 17 и 9% на расстоянии 1,5 и 1,7 мм соответственно. Повышение пористости микроструктуры является одной из причин снижения твердости по мере удаления от основного металла на расстояние больше, чем 0,7–0,9 мм. Однако в сплаве ПР-Н77Х15С3Р2 характер распределения пористости по сечению покрытия примерно такой же, как и в сплаве ПГ-12Н-01: пористость достигает максимума около 15% на расстоянии примерно 1,7 мм. Но при этом твердость не уменьшается, а даже непрерывно (хоть и незначительно) возрастает. Поэтому характер распределения твердости не связан однозначно с характером распределения пористости.

При уменьшении количества твердой фазы в сплавах ПГ-12Н-01 и ПГ-12Н-02 (см. рис. 5) происходит снижение твердости при увеличении расстояния от границы с основой. При этом снижение твердости и уменьшения количества твердых фаз в сплаве ПГ-12Н-02 происходит значительно более интенсивно, чем в сплаве марки ПГ-12Н-01, что можно объяснить большей однородностью структуры ПГ-12Н-01 (см. рис. 5, а, б), особенно в покрытиях большей толщины.

Таким образом, при восстановлении автомобильных деталей наиболее эффективным является покрытие марки ПР-Н77Х15С3Р2 толщиной 0,5-0,75 мм. При этом дефектность (пористость) в данном покрытии является минимальным при минимальном количестве твердой фазы. Данная марка порошковых покрытий имеет меньшую твердость, что позволяет более широко использовать слесарно-механическую обработку покрытий после нанесения.

#### Список литературы

1. Быков В.И., Юрченко Ю.Д., Куликов А.С. Износостойкость газотермических покрытий, работающих в условиях трения со смазкой // Трение и износ. 1992. Т. 13. №3. С. 64 – 70
2. Лимарев А.С., Селиванов Р.А. Совершенствование методов диагностики легковых автомобилей // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 77-й междунар. науч.-техн. конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 10.
3. Анализ и совершенствование систем диагностирования двигателей внутреннего сгорания легковых автомобилей / Мезин И.Ю., Зотов С.В., Лимарев А.С., Коваленко А.О. // Автотранспортное предприятие. 2016. № 12. С. 38-41.
4. Влияние условий нанесения на структуру и свойства порошковых сплавов системы Ni – Cr – B – Si – C / Копцева Н.В., Зотов С.В., Чукин М.В., Барышников М.П. //Современные технологии и материаловедение. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2003. С. 34 – 38.
5. Зотов С.В. Совершенствование технологии инструмента для экструзии керамических масс путем применения износостойких покрытий системы Ni-Cr-B-Si-C // Сб. рефератов НИР аспирантов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. 111 с.
6. Мезин И.Ю., Лимарев А.С., Касаткина Е.Г. Формирование свойств машиностроительных материалов холодной пластической деформацией пористых порошковых заготовок // Качество в обработке материалов. 2018. № 2 (10). С. 40-45.
7. Копцева Н.В., Чукин М.В., Зотов С.В. Твердость, пористость и износостойкость системы Ni-Cr-B-Si-C // Новые материалы и технологии в машиностроении: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Тюмень: ТЮМГНГУ, 2000. С. 107–111.
8. Исследование поверхности при абразивном изнашивании геотермических покрытий системы Ni – Cr – B – Si – C / Копцева Н.В., Барышников М.П., Ефимова Ю.Ю., Зотов С.В. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2005. №39. С. 172-174.
9. Применение холодной пластической деформации для формирования порошкового материала / Кузнецов М.Г., Ульянов В.А., Мезин И.Ю., Гимазетдинов Р.Ф., Шишкова С.Г. // Сталь. 2007. № 7. С. 102–103.
10. Рентгеноструктурный анализ  $\gamma$ -фазы износостойких сплавов на основе никеля // Порошковая металлургия. 1987. №1. С. 89 – 92.
11. Износостойкие покрытия системы Ni-Cr-B-Si-C / Копцева Н.В., Чукин М.В., Емелюшин А.Н., Зотов С.В. // Металлургия на пороге XXI века: достижения и прогнозы: Всерос. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2000. С. 247–251.
12. Исследование свойств покрытий системы Ni-Cr-B-Si-C / Копцева Н.В., Чукин М.В., Емелюшин А.Н., Зотов С.В. // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Волжский: ВИСИ, 2000. С. 76 – 78.

**Сведения об авторах**

**Зотов Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zotov\_tssa@mail.ru.

**Лимарев Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: aslimarev@mail.ru.

**Мезин Игорь Юрьевич** – д-р техн. наук, зав. кафедры технологий сертификации и сервиса автомобилей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: meziniy1@mail.ru.

**Гун Игорь Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: goun@belmag.ru.

**Понурко Ирина Витальевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: iponurko@mail.ru.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE PROCESSES OF FORMING COATINGS BASED ON NICKEL**

**Sergey V. Zotov** – Ph. D. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [zotov\\_tssa@mail.ru](mailto:zotov_tssa@mail.ru).

**Aleksandr S. Limarev** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University Magnitogorsk, Russia. E-mail: aslimarev@mail.ru.

**Igor Yu. Mezin** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: meziniy1@mail.ru.

**Igor G. Gun** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: goun@belmag.ru.

**Irina V. Ponurko** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: iponurko@mail.ru.

***Abstracts.** The work is devoted to the analysis of the parameters of self-fluxing coatings based on nickel, which are used in the restoration of worn surfaces of automotive parts. The thickness factor and its effect on wear resistance, porosity and hardness were considered. The thicknesses of coatings of different chemical composition are determined, which determine the optimal technological parameters, as well as the reasons for the change in these parameters. Analysis of coatings of different chemical composition allowed us to conclude that the coating technology affects the surface imperfection of automotive parts. Coatings from powder alloys of the brand ПП-Н77Х15С3Р2 are most effective in the restoration of parts with wear up to 1 mm.*

***Keywords:** coating, wear resistance, hardness, porosity, microstructure, thickness, alloy, surfacing, surface.*

---

Ссылка на статью:

Зотов С.В., Лимарев А.С., Мезин И.Ю., Гун И.Г., Понурко И.В. Анализ особенностей применения порошковых покрытий на основе никеля при восстановлении автомобильных деталей // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1 (32). С. 50-54.  
Zotov S.V., Limarev A.S., Mezin I.Yu., Gun I.G., Ponurko I.V. Analysis of the influence of technological parameters on the processes of forming coatings based on nickel. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp.50-54.

## 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