

# **ВЕСТНИК**

## **Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова**

**№1 (41) март 2013 г.**

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также входит в базы данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и ВИНТИИ. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

**Издается с марта 2003 года**

**Редакционный совет**

**Председатель редсовета:**

**В.М. Колокольцев** – ректор ФГБОУ ВПО «МГТУ»,  
проф., д-р техн. наук.

**Члены редсовета:**

**А.В. Дуб** – ген. директор ОАО НПО  
«ЦНИИТМАШ», д-р техн. наук;

**Д.Р. Каплунов** – член-кор. РАН, проф. ИПКОН  
РАН, д-р техн. наук;

**В.Ф. Рашиков** – Президент ООО «Управляющая  
компания ММК», проф., д-р техн. наук;

**В.М. Счастливцев** – зав. лабораторией ИФМ УрО  
РАН; академик РАН, д-р техн. наук;

**И. Горлач** – д-р наук в области машиностроения;  
руководитель отделения мехатроники университета  
им. Нельсона Мандэлы, Южная Африка;

**Мацей Питчек** – профессор горно-  
металлургической академии, г.Краков, Польша.

**Кен-Ихиро Мори** – профессор Технологического  
университета, г.Тойохаси, Япония;

**Хенрик Дыя** – проф., д-р техн. наук,  
директор Института обработки металлов  
давлением и инженерии безопасности,  
Польша.

**А.Б. Найзабеков** – академик, д-р техн. наук,  
проф., ректор Рудненского индустриального  
института, Казахстан.

**Главный редактор:**

**М.В. Чукин** – проф., д-р техн. наук.

**Первый зам. главного редактора:**

**Г.С. Гун** – проф., д-р техн. наук.

**Зам. главного редактора:**

**А.Г. Корчунов** – проф., д-р техн. наук.

**Ответственные секретари:**

**М.А. Полякова** – доц., канд. техн. наук;

**М.В. Шубина** – доц., канд. техн. наук.

**Редактор:** **Н.В. Кутекина.**

**Технический редактор:** **Г.Н. Латина.**

**© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013**

На журнал можно подписаться в отделениях связи либо приобрести непосредственно в редакции.  
Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС11-1157 от 18 апреля 2007 г.

Выдано Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Уральскому федеральному округу.

Учредитель – ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным Законом от 29.12.10. №436-ФЗ.

**Адрес редакции:**

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Тел.: (3519) 22-14-93

Факс (3519) 23-57-60

E-mail: [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru); [vestnik@mgtu.ru](mailto:vestnik@mgtu.ru)

Журнал подготовлен к печати Издательским центром  
МГТУ им. Г.И.Носова.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ.

Подписано к печати 21.03.2013.

Заказ 152. Тираж 500 экз. Цена свободная.



# *VESTNIK*

## Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov

№1 (41) March 2013

The magazine is included in the list of leading reviewed scientific journals and publications, in which shall be published by the basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of the doctor and candidate of sciences, as well as in the database Russian index of scientific citation (RISC) and All-Russian Institution of Scientific and Technical information. Internet versions of the journal can be found on the Scientific Electronic Library site in the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

### Editorial committee

#### Chairman of editorial committee:

**V.M. Kolokoltsev** – rector of FSBEI HPE «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov», D. Sc

#### Members of the editorial committee:

**A.V. Dub** – general director of JSC Research and Production Association of Central Scientific Research Institution of Technical Mechanic Engineering, D.Sc.

**D.R. Kaplunov** – corresponding member of Russian Academy of Science, D.Sc.

**V.Ph. Rashnikov** – President of LTd «Magnitogorsk Steel and Iron Works managing company», Prof., D. Sc.

**V.M. Schastlivtsev** – chief of laboratory in Russian Academy of Science , academician of Russian Academy of Science, D. Sc.

**I. Gorlach** – PhD in Mechanical Engineering, Head of Department of Mechatronics, Nelson Mandela Metropolitan University.

**Ken-ichiro Mori** – Professor Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan.

**Henrik Dyja** – prof. Dr. techn. Science, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Poland.

**A.B. Nayzabekov** – Member of the Academy of Sciences, Prof., D.Sc., rector of Rudnensk Industrial Institute, Republic of Kazakhstan.

#### Editor-in-chief:

**M.V. Chukin** – Prof., D.Sc.

#### First deputy chief editor:

**G.S. Gun** – Prof., D. Sc.

#### Deputy chief editor:

**A.G. Korchunov** – Prof., D.Sc.

#### Executive editors:

**M.A. Polyakova** – Assoc. Prof., Ph.D.

**M.V. Shubina** - Assoc. Prof., Ph.D.

**Editor:** N.V. Kutekina.

**Technical editor:** G.N. Lapina.

© Federal state budgetary institution of higher professional education  
«Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov», 2013

One can subscribe for the journal in the general publication catalogue of scientific-technical information, the subscription index of the journal 48603 in the common catalogue «Russian Press», vol. 1 or get the journal right in the editorial office.

Registration certificate PI № FS11-1157 on April 18, 2007

Issued by the Federal Service for Supervision of Legislation in Mass of Communication and Protection of Cultural Heritage in the Urals Federal District.

Founder – State Educational Institution «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov»  
(455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin Avenue, 38)

16+ in according to a Federal Law 29.12.10. №436-FL

#### Editorship address:

455000, city Magnitogorsk, Lenin Str. 38  
Phone number: (3519) 22-14-93  
Fax: (3519)23-57-60  
Email: rio\_mgtu@mail.ru; vestnik@magtlu.ru

Prepared for publication by publishing center of MSTU named after G.I. Nosov.

Printed in the Printing MSTU Area

Signed for press 2013.03.21.

Order 152. Circulation – 500 items. Free price.



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Разработка полезных ископаемых. Рациональное природопользование .....</b>	<b>5</b>
<b>Кузбаков Ж.И.</b> Определение нагрузок в распорной плите щековой дробилки с учетом ударного нагружения....	5
<b>Вохмин С.А., Загиров Н.Х., Требуш Ю.П., Курчин Г.С., Майоров Е.С.</b> Нормирование потерь и разубоживания как механизм рационального природопользования .....	7
<b>Першин Г.Д., Митин А.Н.</b> Геометрические характеристики модели контактной поверхности породоразрушающего алмазно-абразивного инструмента .....	10
<b>Константинова С.А., Аптуков В.Н., Мерзляков А.Ф.</b> Влияние геометрии образца на скорость кратковременной релаксации и ползучести сильвинита, карналлита и каменной соли.....	13
<b>Транспорт и транспортные перевозки .....</b>	<b>16</b>
<b>Осипцев Н.А., Рахмангулов А.Н.</b> Управление вагонопотоками в промышленных транспортных системах .....	16
<b>Металлургия черных, цветных и редких металлов .....</b>	<b>21</b>
<b>Каскин К.К.</b> Сравнительный анализ производства полупродукта коррозионностойкой стали в дуговой сталеплавильной и руднотермической печах.....	21
<b>Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Гельчинский Б.Р., Рыбалко О.Ф., Лозовский Е.П., Коротин А.В.</b> Изменение рабочего слоя футеровки промежуточного ковша МНЛЗ в процессе непрерывной разливки стали ....	23
<b>Шевченко Е.А., Столляр А.М., Шаповалов А.Н.</b> Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком .....	27
<b>Обработка металлов давлением .....</b>	<b>31</b>
<b>Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Чернова Т.В.</b> Условия улучшенного (смешанного) режима трения при волочении.....	31
<b>Харитонов В.А., Столляр А.Ю.</b> Влияние геометрических параметров очага деформации на разрушение проволоки при волочении.....	33
<b>Герасимов В.Я., Парышев Д.Н.</b> Закономерности атермического разупрочнения металла при волочении стальных прутков .....	39
<b>Козлов А.В., Бобылев А.В., Шеркунов В.Г.</b> Исследование температурных характеристик в зоне гиба .....	41
<b>Материаловедение и термическая обработка металлов .....</b>	<b>45</b>
<b>Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Дроздова Т.Н., Трифоненков Л.П., Ворошилов Д.С., Сидельников А.С.</b> Исследование структуры и оценка свойств литьих и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-P3M с различным содержанием никеля.....	45
<b>Управление качеством продукции.....</b>	<b>49</b>
<b>Федосеев С.А., Гитман М.Б., Столбов В.Ю.</b> Своевременность поставки как показатель качества продукции .....	49
<b>Суханцев С.С., Гитман М.Б., Елисеев А.С.</b> Статистический анализ факторов, влияющих на образование дефектов при производстве вагонных осей...	54
<b>Наноматериалы и нанотехнологии .....</b>	<b>57</b>
<b>Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Чигинцев П.А.</b> Моделирование в среде DEFORM микроструктуры металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации .....	57
<b>Моделирование технологических процессов.....</b>	<b>62</b>
<b>Найзабеков А.Б., Талмазан В.А., Ержанов А.С.</b> Математическое моделирование процесса выкытываемости поверхностных дефектов полос типа «вдав» при холодной прокатке .....	62
<b>Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Переходских А.А., Свердлик М.К.</b> Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки .....	65
<b>Платов С.И., Дема Р.Р., Зотов А.В.</b> Модель формирования толщины плакированного слоя на деталях пар трения технологического оборудования .....	69
<b>Жиркин Ю.В., Пузик Е.А.</b> Аналитически-экспериментальное определение температурного коэффициента режима ЭГД-смазки .....	73
<b>Энергетика и теплоэнергетика металлургической отрасли.....</b>	<b>76</b>
<b>Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю., Якимов И.А.</b> Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса .....	76
<b>Вигриянов П.Г.</b> Оценка пульсации электромагнитного момента управляемых девятифазных вентильных двигателей при отказах типа «короткое замыкание» .....	82
<b>Нешпоренко Е.Г., Карташев С.В., Сысуев Н.Е.</b> Обоснование эффективности регенерации теплоты через перфорированные ограждения высокотемпературных установок.....	86
<b>Строительные материалы и технологии.....</b>	<b>90</b>
<b>Кришан А.Л., Суровцов М.М.</b> Экспериментальные исследования прочности гибких трубобетонных колонн ..	90
<b>Экономика, управление и рынок продукции .....</b>	<b>93</b>
<b>Баскакова Н.Т., Песин И.А.</b> Концептуальные подходы в оптимизационном планировании ремонтов оборудования на металлургическом предприятии .....	93
<b>Разинкин Е.И.</b> Обеспечение интероперабельности в области электронной коммерции на основе программного модуля.....	96
<b>Горохова О.В.</b> Региональный подход к определению термина «конкурентоспособность».....	99
<b>Красносельская Д.Х.</b> Бенчмаркинг как инструмент совершенствования экономического профиля территорий .....	101
<b>Пиньковецкая Ю.С.</b> Использование производственных функций для оценки эффективности деятельности предпринимательских структур в регионах .....	104
<b>Педагогические науки. Образование .....</b>	<b>108</b>
<b>Варжапетян А.Г., Маркелова Н.В.</b> Управление рисками образовательных проектов в сфере дополнительного профессионального образования.....	108
<b>Сведения об авторах.....</b>	<b>112</b>

# CONTENT

<b>Mining. Rational Environmental Management .....</b>	<b>5</b>
<i>Kuzbakov ZH. I.</i> Determination of loads in the spacing plate of a jaw crusher taking into account the ramp loading.....	5
<i>Vokhmin S.A., Zagirov N.H., Trebush Yu.P., Kurchin G.S., Maiorov E.S.</i> Normalization of loss and dilution as a mechanism of rational use of natur .....	7
<i>Pershin G.D., Mitin A.N.</i> Geometric characteristics of the contact surface of the rock-breaking model of diamond abrasive tools .....	10
<i>Konstantinova S.A., Aptukov V.N., Merzlyakov A.F.</i> The specimen geometry effect on the short-term sylvinit, carnallite, rock salt relaxation and creep rate.....	13
<b>Vehicles and Transportation .....</b>	<b>16</b>
<i>Osintsev N.A., Rakhamangulov A.N.</i> Railcar flow management in industrial transport systems .....	16
<b>Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals .....</b>	<b>21</b>
<i>Kaskin K.K.</i> Comparative analysis of corrosion-resistant steel intermediates smelting and ore-smelting furnaces.....	21
<i>Djuldina E.V., Selivanov V.N., Gelchinski B.R., Ryalko O.F., Lozovsky E.P., Korotin A.V.</i> Changing the working layer of lining caster tundish during continuous casting of steel.....	23
<i>Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N.</i> The quality slab billet, casted on curved CCM with vertical section, in studied .....	27
<b>Pressure Treatment of Metals .....</b>	<b>31</b>
<i>Kholmogorov G.L., Trofimov V.N., Chernova T.V.</i> Improved (combined) friction rate conditions by drawing .....	31
<i>Haritonov V.A., Stolyarov A.Y.</i> Effect of geometric parameters of the deformation zone on destruction of the wire during drawing .....	33
<i>Gerasimov V.Y., Paryshev D.N.</i> Regularities of athermic metal weakening during dragging of steel rods .....	39
<i>Kozlov A.V., Bobylev A.V., Sherkunov V.G.</i> Research of temperature characteristics in a zone flaring .....	41
<b>Material Science and Thermal Metal Treatment.....</b>	<b>45</b>
<i>Dovjenko N.N., Sidelnikov S.B., Drozdova T.N., Trifonenkov L.P., Voroshilov D.S., Sidelnikov A.S.</i> Research of the structure of metal and estimation of properties cast and deformed semi-finished products from alloys of Al-REM system containing different amounts of nickel .....	45
<b>Quality Management product .....</b>	<b>49</b>
<i>Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Yu.</i> On-time delivery as a measure of the quality of products.....	49
<i>Sukhantsev S.S., Gitman M.B., Elyseev A.S.</i> Statistical analysis of the factors influencing the formation of defects in the process of car axles production .....	54
<b>Nanomaterials and Nanotechnology.....</b>	<b>57</b>
<i>Semashko M.Yu., Sherkunov V.G., Chigintsev P.A.</i> Modeling microstructure of metals, subjected to severe plastic deformation in the system DEFORM .....	57
<b>Modeling of Technological Processes .....</b>	<b>62</b>
<i>Naizabekov A.B., Talmazan V.A., Yerzhanov A.S.</i> Mathematical modeling of a burnishing of superficial defects of the «dent» type cold rolling.....	62
<i>Pustovoitov D.O., Pesin A.M., Perehogih A.A., Sverdlik M.K.</i> Modeling of shear deformation in the limiting case of asymmetric sheet rolling.....	65
<i>Platov S.I., Dema R.R., Zotov A.V.</i> Model of the formation thickness clad layer for friction pairs of process equipment ...	69
<i>Zhirkin Y.V., Puzik E.A.</i> Analytically and experimental method used for definition the temperature coefficient of the elasto-hydrodynamic lubrication .....	73
<b>Power Supply and Heat Power of Metallurgy .....</b>	<b>76</b>
<i>Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R., Vahitov T.Ju., Jakimov I.A.</i> Feature of the simulation the electric arc furnace as electro technical complex .....	76
<i>Vigriyanov P.G.</i> Electromagnetic torque pulsations are driven by motors nine-phase failure of the «shortcut circuit»..	82
<i>Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V., Sysuev N.E.</i> Evaluation of the effectiveness of heat recovery through the perforated fence high-temperature installations .....	86
<b>Construction Materials and Structural Engineering .....</b>	<b>90</b>
<i>Krishan A.L., Surovtsov M.M.</i> Experimental reserches of strength of flexible concrete-filled tube (CFT) columns.....	90
<b>Economics, Management and Production Market.....</b>	<b>93</b>
<i>Baskakova N.T., Pesin I.A.</i> Using the theory of constraints in planning repairing of equipment for metallurgical plants .....	93
<i>Razinkin E.I.</i> Providing the interoperability of electronic commerce on the basis of the module of xml data exchange .....	96
<i>Gorokhova O.V.</i> A regional approach to the definition of competitiveness .....	99
<i>Krasnoselskaya D.Kh.</i> Benchmarking as a tool for improving the economic profile of territories.....	101
<i>Pinkovetskaya J.S.</i> Using the production functions for evaluating the performance of business entrepreneurial structures in the regions .....	104
<b>Pedagogics science. Education .....</b>	<b>108</b>
<i>Varzhapetian A.G., Markelova N.V.</i> Risk management in the field of additional professional education projects .....	108
<b>The information about the authors .....</b>	<b>115</b>

# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 621.926.22

Кузбаков Ж.И.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК В РАСПОРНОЙ ПЛИТЕ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ С УЧЕТОМ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Аннотация.** На основании уравнения движения щековой дробилки с учетом ударного нагружения, при установившемся движении ведомой массы, определена максимальная нагрузка в распорной плите.

**Ключевые слова:** ударное нагружение, кинематическая цепь, разрыв, статическая нагрузка, зазор, ослабление, соударение, распорная плита.

Kuzbakov ZH. I.

### DETERMINATION OF LOADS IN THE SPACING PLATE OF A JAW CRUSHER TAKING INTO ACCOUNT THE RAMP LOADING

**Abstract.** The maximum load in the spacing plate was determined on the basis of equation of motion of a jaw crusher taking into account the ramp loading under fixed motion of driven mass

**Keywords:** ramp loading, kinematic chain, fraction, static load, clearance, slackening, collision, spacing plate.

Наиболее характерными условиями, при которых происходит ударное нагружение механизмов и машин, являются резкое приложение внешней нагрузки и временный разрыв кинематической цепи до величины, соответствующей статической нагрузке, и последующее нагружение упругого звена. Между соударямыми элементами в начале имеется зазор.

Привод щековой дробилки относится к неравновесным приводным системам, в которых при сохранении неразрывности кинематической цепи и отсутствии деформаций, часть элементов при установившемся равномерном движении ведущей массы движется неравномерно, подчиняясь определенному закону, обусловленному кинематическими параметрами.

Такие системы при отсутствии внешних сил и сил трения имеют ограниченное число равновесных положений.

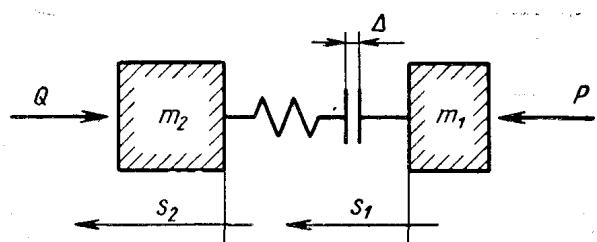
Распорная плита в приводе щековой дробилки с простым качанием щеки является основным элементом, передающим рабочую нагрузку от подвижной щеки к шатуну.

Распорная плита работает в условиях пульсирующего цикла нагружения и нередко мгновенно возрастающих нагрузок, близких к ударному, особенно при дроблении высокопрочных материалов [1].

Схему ударного нагружения щековой дробилки с простым качанием щеки представим в виде двухмассовой системы (см. **рисунок**).

На рисунке:  $m_1$  и  $m_2$  – приведенные массы ведущего и ведомого элементов машины;  $c$  – приведенная жесткость распорной плиты;  $Q$  – внешняя статическая нагрузка (сила разрушения материала);  $P$  – движущая сила, создаваемая электродвигателем;  $\Delta$  – зазор или ослабление, образовавшийся при разрыве кинемати-

ческой цепи (зазор между распорной плитой и сухарями подвижной и неподвижной щек);  $s_1$  и  $s_2$  – координаты ведущей и ведомой масс.



Приведенная схема ударного нагружения двухмассовой системы

Система движется с установленной скоростью  $v$ , в какой-то момент происходит разрыв кинематической цепи. После этого масса  $m$  продолжает двигаться с той же скоростью  $v$ , тогда координата  $s_1 = vt$ .

Процесс сближения и соударения ведущей и ведомой масс имеет три этапа: 1) сближение масс до перекрытия зазора; 2) нагружение упругого звена до величины, равной нагрузке  $Q$ ; 3) дальнейшее нагружение упругого звена [2].

Электродвигатель щековой дробилки после разгона обладает жесткой механической характеристикой, поэтому наихудшие условия ударного нагружения будут при сохранении наибольшей скорости движения эксцентрикового вала. Поэтому в последующих выводах будем предполагать наихудшие условия.

Предположим, что в момент начала сближения масс упругое звено не деформировано. Таким образом, фактический зазор равен  $\Delta - \frac{Q}{c}$ ; предположим,

что эта величина положительна  $\Delta > \frac{Q}{c}$ .

Для первого этапа уравнение движения ведомой массы

$$m_2 \frac{d^2 s_2}{dt^2} = -Q. \quad (1)$$

Решая его при начальных условиях ( $t=0, s_2=0$  и  $\frac{ds_2}{dt}=v$ ), получим

$$s_2 = vt - \frac{Qt^2}{2m_2}. \quad (2)$$

Окончанию первого этапа соответствует

$$s_1 - s_2 = \Delta - \frac{Q}{c} \text{ или } \frac{Q}{c} + \frac{Qt^2}{2m_2} = \Delta.$$

Отсюда время первого этапа

$$t_1 = \sqrt{\frac{2m_2}{Q}} \left( \Delta - \frac{Q}{c} \right). \quad (3)$$

Скорость движения ведомой массы при  $t=t_1$  равна

$$\left( \frac{ds_2}{dt} \right)_1 = v - \sqrt{\frac{2Q}{m_2}} \left( \Delta - \frac{Q}{c} \right). \quad (4)$$

Для второго этапа уравнение движения

$$m_2 \frac{d^2 s_2}{dt^2} - (s_1 - s_2)c = -Q. \quad (5)$$

Заменяя  $s_1 = vt$  решая, получаем

$$s_2 = A \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + B \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + vt - \frac{Q}{c}. \quad (6)$$

При новом отсчете времени начальные условия:  $t=0, s_2=0$ ,

$$\frac{ds_2}{dt} = \left( \frac{ds_2}{dt} \right)_1, \quad [\text{см. (4)}]. \text{ Тогда}$$

$$s_2 = -\sqrt{\frac{2Q}{c}} \left( \Delta - \frac{Q}{c} \right) \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{Q}{c} \times \\ \times \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + vt - \frac{Q}{c}. \quad (7)$$

В конце этапа  $s_1 - s_2 = \frac{Q}{c}$  или после подстановки значений  $s_1, s_2$  и преобразования получим

$$\sqrt{\frac{2Q}{c}} \left( \Delta - \frac{Q}{c} \right) \operatorname{tg} \sqrt{\frac{c}{m_2}} t = \frac{Q}{c}.$$

Отсюда время второго этапа

$$t_2 = \sqrt{\frac{m_2}{c}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{Q}{2(\Delta c - Q)}}, \quad (8)$$

а скорость ведомой массы при  $t=t_2$

$$\left( \frac{ds_2}{dt} \right)_2 = v - \sqrt{\frac{Q}{cm_2}} (2\Delta c - Q). \quad (9)$$

Предполагаем, что  $\left( \frac{ds_2}{dt} \right)_2 > 0$ .

Для третьего этапа уравнение движения ведомой массы выражается формулой (3). Новые начальные условия:  $t=0; s_1 - s_2 = \frac{Q}{c}; \frac{ds_2}{dt} = \left( \frac{ds_2}{dt} \right)_2$ .

Тогда

$$s_1 - s_2 = \frac{1}{c} \sqrt{Q(2\Delta c - Q)} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{Q}{c}. \quad (10)$$

Нагрузка упругого звена

$$F = (s_1 - s_2)c = \sqrt{Q(2\Delta c - Q)} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + Q; \quad (11)$$

$$F_{\max} = \sqrt{Q(2\Delta c - Q)} + Q. \quad (12)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. Пусть  $\left( \frac{ds_2}{dt} \right)_1 = 0$  или  $\left( \frac{ds_2}{dt} \right)_2 = 0$ . Тогда

начальными условиями общего решения (6) будут  $t=0, s_1 - s_2 = \frac{Q}{c}, \frac{ds_2}{dt} = 0$ . При этом

$$s_1 - s_2 = v \sqrt{\frac{m_2}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{Q}{c}, \text{ а} \\ F_{\max} = v \sqrt{m_2 c} + Q. \quad (13)$$

2. Для нашего случая  $\Delta = \frac{Q}{c}$ , т.е. имеется не разрыв, а ослабление упругого звена (распорной плиты) на величину статической деформации  $\frac{Q}{c}$ .

Если  $\left( \frac{ds_2}{dt} \right)_2 > 0$ , то

$$F_{\max} = 2Q. \quad (14)$$

3. Если ослабление  $\delta$  упругого звена меньше его статической деформации, то начальные условия для общего решения (6):

$$s_2 = \delta \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + vt - \frac{Q}{c}.$$

После окончания второго этапа  $s_1 - s_2 = \frac{Q}{s}$  или

$$\delta \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t = 0.$$

Время, соответствующее окончанию второго этапа:  $t_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_2}{c}}$ .

При этом скорость движения ведомой массы  $\left(\frac{ds_2}{dt}\right)_2 = v - \delta \sqrt{\frac{c}{m_2}}$ .

Для третьего этапа начальные условия:

$$t = 0; s_1 - s_2 = \frac{Q}{c} \text{ и } \frac{ds_2}{dt} = v - \delta \sqrt{\frac{c}{m_2}}.$$

$$\text{Тогда получим } s_1 - s_2 = \delta \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{Q}{c}.$$

Максимальная нагрузка упругого звена

$$F_{\max} = c \delta + Q. \quad (15)$$

Таким образом, для нашего случая, когда имеется не разрыв кинематической цепи, а ослабление распорной плиты, формула (14) при установившемся движении дробильной машины максимальная нагрузка в распорной плите будет два раза превышать усилие разрушения материала. Следовательно, коэффициент запаса прочности распорной плиты должен быть не менее двух,  $K_{z,p} \geq 2$ , т.е. когда распорная плита не является предохранительным элементом [3].

#### Список литературы

- Условия эксплуатации и характер нагружения щековых дробилок при дроблении особопрочных материалов // Комплексная переработка минерального сырья: материалы междунар. науч.-практ. конференции. Караганда, 2008. С. 220-228.
- Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. М.: Машиностроение, 1969. 295 с.
- Клужанцев В.Б., Косарев А.И., Музеймек В.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.

#### References

- The application conditions and loading condition of jaw crusher by crushing of extra-strong materials. Proceedings of International Scientific-Practical Conference: The complex processing of mineral raw. Karaganda, 2008. 25-26th September. P. 220-228.
- Komarov M.S. The dynamics of mechanisms and machines. Moscow: Mashinostroenie, 1969. 295 p.
- Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muzeimneek V.A. The crushers. Construction, calculation, application features. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 320 p.

УДК 622.272/275

Вохмин С.А., Загиров Н.Х., Требуш Ю.П., Курчин Г.С., Майоров Е.С.

## НОРМИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ И РАЗУБОЖИВАНИЯ КАК МЕХАНИЗМ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье рассмотрены методические основы нормирования потерь и разубоживания полезных ископаемых при добыче подземным способом. Предложен алгоритм выполнения действия для установления нормативных величин показателей извлечения при подземной добыче. Данная методика определения нормативных значений потерь и разубоживания легко адаптируется к конкретным условиям работы горных предприятий и нацеливает на повышение культуры горного производства.

**Ключевые слова:** потери, разубоживание, методика, классификация, нормирование, планирование, показатели извлечения.

Vokhmin S.A., Zagirov N.H., Trebush Yu.P., Kurchin G.S., Maiorov E.S.

## NORMALIZATION OF LOSS AND DILUTION AS A MECHANISM OF RATIONAL USE OF NATURE

**Abstract.** In the article the basic principles of rational nature use in underground mining of solid minerals and provides an overview of the method of normalization of loss and dilution of the mineral underground mining of solid minerals.

**Keywords:** losses, dilution, the technique, classification, rationing, planning, extraction indicators.

Организация Объединенных Наций (ООН) в декларации Конференции по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 г.) юридически закрепила два основных принципа правового подхода к охране природы. Государствам следует ввести эффективное законодательство в области охраны окружающей среды. Нормы, связанные с охраной окружающей среды, выдвигаемые задачи и приоритеты должны отражать реальную ситуацию в областях охраны окружающей среды и ее развития, в которой они будут реализовываться.

В 2005 г. на открытии Международного форума «Рациональное природопользование» в своем вступительном слове Президент ТПП РФ Е.М. Примаков отметил, что проблема рационального недропользования имеет огромное значение для нынешней России. Совершенно ясно, что система оптимального использования природных ресурсов определяет степень устойчивости не только экономики, но и нашего общества на долговременной основе, рассчитанной не на одно поколение россиян. Вместе с тем, происходит непредсказуемое по своим последствиям истощение

природных ресурсов в результате хищнического отношения к ним [1].

Установленная в то время концепция актуальна для России и сегодня. Поэтому в указе Президента РФ №899 от 7 июля 2011 года «рациональное природопользование» определено как одно из восьми приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

Само понятие «рациональное природопользование» подразумевает, в том числе, достаточно полное использование добываемых природных ресурсов. Однако рациональное природопользование необходимо также воспринимать, как и наиболее полное извлечение природных ресурсов из недр при добыче.

Регламентировать полноту и качество извлечения полезных ископаемых из недр призваны нормативы потерь и разубоживания. Научно обоснованные нормативы потерь и разубоживания позволяют соблюсти интересы как недропользователя в плане получения максимальной экономической выгоды от эксплуатации месторождения, так и государства – обеспечение наиболее полного использования природных ресурсов.

При этом необходимо учитывать, что нормативы потерь и разубоживания устанавливаются на паспортное исполнение системы разработки с учетом требований соответствующих правил безопасности и действующих инструкций, особенностей технологии ведения добычных работ на каждом горном предприятии [2]. Поэтому при изменении конструктивных параметров технологического процесса добычи, а также внедрения новых машин и механизмов на очистных работах необходимо пересматривать величины нормативов потерь и разубоживания по тем местам и источникам, на которые влияют эти изменения.

Авторским коллективом разработана методика нормирования потерь и разубоживания при подземной добыче, которая предусматривает выполнение работ в определенной последовательности:

1. Изучаются процессы очистной выемки и технологическая цепь движения добывого полезного ископаемого.

2. Выделяются конструктивные элементы системы разработки, в которых формируются потери и разубоживание и на условия отработки которых ведется расчет нормативных величин потерь и разубоживания.

3. Разрабатываются классификации эксплуатационных потерь и разубоживания по состоянию, местам и источникам их образования по выделенным конструктивным элементам системы разработки. Данные классификации составляются на условия паспортного исполнения системы разработки в целом и ее отдельных конструктивных элементов. Данный принцип предопределяет оставление в этом перечне потерь и разубоживания, присущих данной технологической схеме отработки запасов.

4. Выявляются причинно-следственные связи влияния процессов очистной выемки на формирование потерь и разубоживания полезного ископаемого. Например, для сплошных слоевых систем разработки на величину подработки закладки с борта влияет ис-

полнение буровзрывных работ – прямое влияние при отбойке руды за счет сейсмического воздействия взрыва на закладочный массив, опосредованное влияние на формирование поверхности закладочного массива за счет извилистости контуров бортов слоя по его длине и высоте, возникающие при отработке руды.

5. Исследуются технологические процессы добычи, влияющие на формирование потерь и разубоживания полезного ископаемого. На данном этапе определяются требования и условия обеспечения паспортного выполнения технологических процессов добычных работ.

6. На основе составленных классификаций потерь и разубоживания и принятого критерия оценки эффективности ведения горных работ определяются исходные данные для нормирования потерь и разубоживания полезных ископаемых. При этом конструктивные параметры элементов системы разработки принимаются по проектным данным, конфигурация рудных тел – по геологической документации, а экспериментальными работами устанавливаются величины потерь и разубоживания, зависящие от исполнения технологических процессов добычи. Например, для слоевых систем разработки экспериментально определяется уровень разубоживания теряемой отбитой руды на почве и в плинтусах слоев зависит от объема вовлекаемой в отработку разубоживающей массы.

7. Расчет уровней потерь и разубоживания сводится к выбору метода расчета, с учетом разделения потерь и разубоживания на взаимосвязанные и обособленные.

Взаимосвязанными являются, например, потери руды в массиве и разубоживание руды породой при ведении работ на геологических контактах – при изменении контура отработки запасов (высотного положения почвы слоя) изменяются величины данных потерь и разубоживания. Данные потери и разубоживание руды определяются варианто-аналитическим методом по критерию максимальной прибыли с 1 т погашенных балансовых запасов полезного ископаемого на основе сравнения экономических последствий выемки запасов руды по контурам отработки. Величины потерь и разубоживания, соответствующие контуру отработки с максимальным значением прибыли, принимаются как нормативные уровни [3-6].

Обособленные потери и разубоживание зависят от исполнения технологических процессов добычи и определяются статистическим методом. Например, величина потерь полезного ископаемого в отбитом виде на почве слоев устанавливается в зависимости от габаритов оборудования, применяемого на отгрузке полезного ископаемого.

8. Адаптация расчетных величин потерь и разубоживания к технологической схеме отработки запасов необходима для исключения рассогласованности существующего на горном предприятии технологического цикла ведения очистных работ, например, вследствие увеличения времени на выполнение отдельных процессов для обеспечения расчетных величин потерь и разубоживания руды. Это может негативно повлиять на производительность системы раз-

работки и горного предприятия в целом.

Обоснование технологических и технических условий по достижению нормативных уровней потерь и разубоживанию руды заключается в выявлении и использовании имеющихся резервов в технологической схеме добывающих работ, а также резервов в использовании технологического оборудования. Данные работы включают в себя поиск технологических и организационных решений или, при отсутствии таких резервов, обоснованную корректировку нормативных величин потерь и разубоживания под применяемую технологическую схему добывающих работ.

Последовательность и взаимосвязь этапов проведения исследований по изложенной методике приведены на схеме (см. **рисунок**). Данная методика опробована и успешно внедрена на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель», ОАО АК «АЛРОСА» и др.

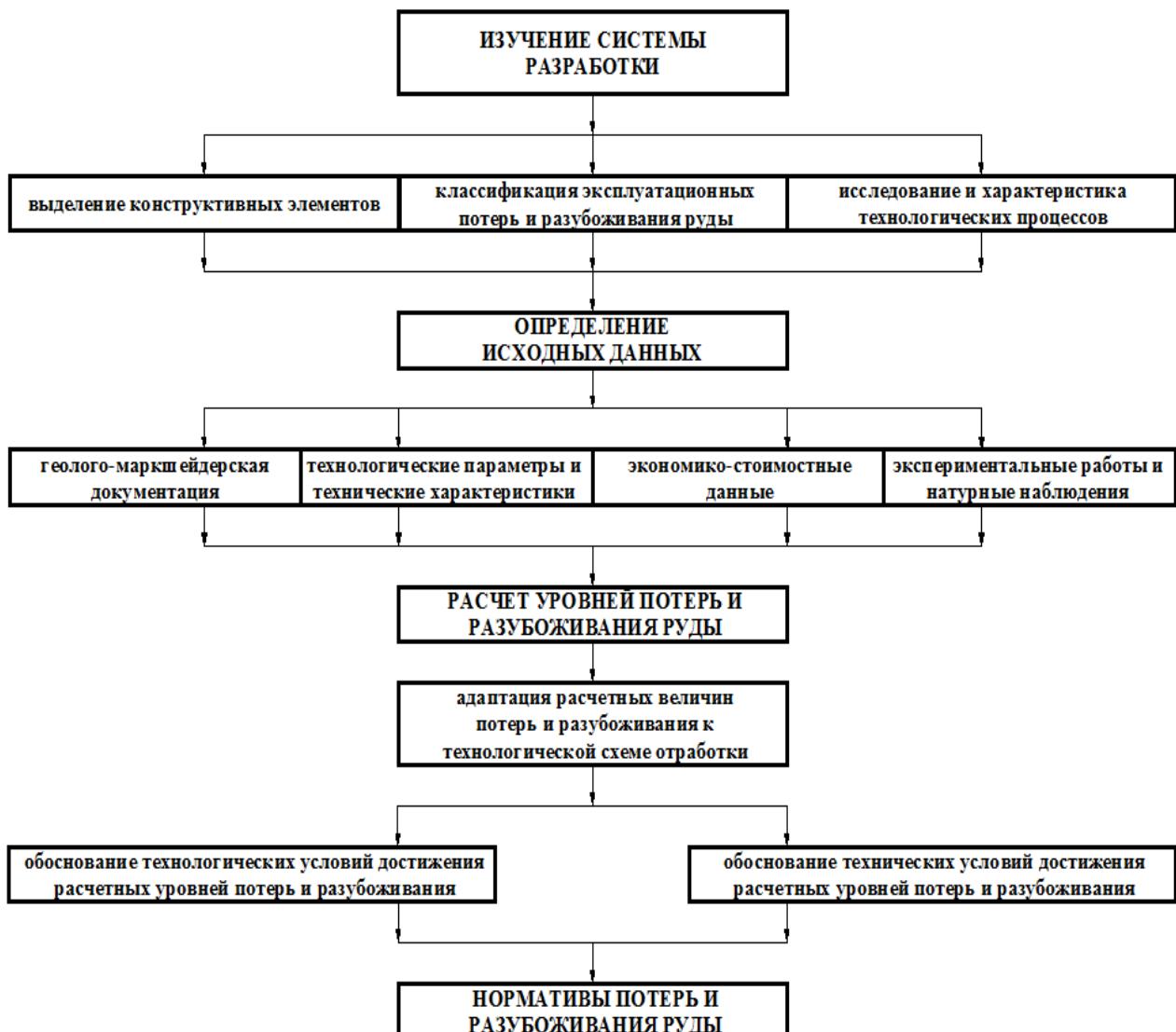
К сожалению, в настоящее время часть недропользователей без должного понимания относится к установлению нормативов потерь и разубоживания при добыче. Так, на некоторых предприятиях нормативы потерь и разубоживания, установленные на ста-

дии составления Технического проекта на отработку, продолжают применять и на стадии добывочных работ. Такой подход не только неверен, но и малоэффективен. Как показывает наш опыт работы с горными предприятиями, научно обоснованные нормативы потерь и разубоживания позволяют не только повысить экономическую эффективность освоения месторождения, но и снизить негативные последствия от ведения горных работ.

### Выводы:

1. Эффективное освоение недр должно основываться на принципах рационального природопользования. Поэтому введение научно обоснованных нормативов потерь и разубоживания при добыче должно стать обязательным для всех недропользователей.

2. Нормативы должны регулярно пересматриваться при внедрении нового оборудования, изменениях в технологиях очистной выемки, либо при существенном изменении горно-геологических условий добычи (в том числе и при изменениях содержания полезного компонента в балансовых запасах).



Общая методика нормирования потерь и разубоживания полезных ископаемых при подземной добыче

3. Предложенная методика определения нормативных значений потерь и разубоживания легко адаптируется к конкретным условиям работы горных предприятий и нацеливает на повышение культуры горного производства.

#### Список литературы

1. Сайт центра парламентских коммуникаций [Электронный ресурс]. URL: <http://www.parlcom.ru>.
2. Вохмин, С.А. Планирование показателей извлечения при подземной разработке месторождений полезных ископаемых: монография / С.А. Вохмин, Ю.П. Требуш, В.Л. Ермолаев. Красноярск: ГАЦМИЗ, 2002. 160 с.
3. Рыжов, В.П. Развитие основ технико-экономической оценки извлечения полезных ископаемых из недр в работах М.И. Агошкова // Повышение эффективности извлечения руд из недр при подземной разработке месторождений. М.: СФТГП АН СССР, 1975. С. 3-15.
4. Вохмин, С.А. Повышение полноты и качества отработки основных запасов богатых руд Талнахско-Октябрьского месторождения: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / Вохмин Сергей Антонович. Красноярск, 1982. 215 с.
5. Сборник руководящих материалов по охране недр. М.: Недра, 1973. 328 с.
6. Байков, Б.Н. Технико-экономическое нормирование потерь и разубоживания полезных ископаемых при добыче / Б.Н. Байков, В.С. Лучко. М.: Недра, 1974. 215 с.

#### References

1. The website of the centre of parliamentary communications. URL: <http://www.parlcom.ru>
2. Vokhmin S.A., Trebus J.P., Yermolaev V.L Planning of extraction indicators by underground mining of mineral deposits. Krasnoyarsk: KSAONFM&G, 2002. 160 p.
3. Ryzhov V.P. The development of technical-and-economic assessment of extraction useful minerals from the subsoil in the works M.I. Agoshkova. Increase of efficiency of the extraction of ores from the depths of the underground development of deposits. Moscow: The USSR Academy of Sciences, 1975. P. 3-15.
4. Vokhmin S.A. Increase the completeness and quality testing of the main reserves of rich ores Talynahsko-Oktjabrsky Deposit: dis. ... candidate of technical Sciences: 05.15.02. Krasnoyarsk, 1982. 215 p.
5. Collection of the guidance on the protection of the earth entrails. M.: Nedra, 1973. 328 p.
6. Baykov B.S., Luchko V.S. The feasibility normalization of loss and dilution of the mineral extraction. M.: Nedra, 1974. 215 p.

УДК 622.23.054:621.9.025.7

Першин Г.Д., Митин А.Н.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛИ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА\*

**Аннотация.** Определение производительности и энергосиловых показателей процесса резания является приоритетным направлением в совершенствовании технологий обработки природного камня.

Для исследования эффективности процесса поверхностного разрушения горных пород алмазно-абразивным инструментом авторы предлагают модель контактной поверхности породоразрушающего алмазно-абразивного инструмента.

Описывая эту модель, авторы не только дают её геометрические характеристики, но и выводят ряд математических зависимостей, характерных для неё. Введён коэффициент, учитывающий влияние поверхностного предразрушения породы между двумя соседними контактами зёрен. На основании численного значения данного коэффициента становится возможным определение эффективности поверхностного разрушения горных пород алмазно-абразивным инструментом, различных конструкций рабочих элементов алмазно-абразивного инструмента.

**Ключевые слова:** алмазное зерно, алмазно-абразивный инструмент, пропил, пятно контакта, единичный рез.

Pershin G.D., Mitin A.N.

## GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CONTACT SURFACE OF THE ROCK-BREAKING MODEL OF DIAMOND ABRASIVE TOOLS

**Abstract.** Determination of performance and energy-power parameters of the cutting process is a priority in improving the technology of processing of natural stone.

To study the effectiveness of the surface damage of rocks diamond abrasive tools, the authors propose a model of the contact surface of the rock cutting diamond abrasive tools.

In describing the model, the authors not only give its geometry, but the outcome of a series of mathematical functions typical for her. Introduced a coefficient that takes into account the influence of surface pre-fracture rock between two adjacent contacts of the grains. Based on the numerical value of this ratio is then possible to determine the effectiveness of surface weathering of rocks diamond abrasive tools, sound design work items of diamond abrasive tools.

**Keywords:** diamond grit, diamond grinding wheels, propyl, contact patch, a single cut.

Модель режущей поверхности алмазно-абразивного инструмента может быть представлена набором рабочих, т.е. активно контактирующих с породой зёрен, количество которых удобнее рассматривать в пределах некоторой базовой длины контактной поверхности инструмента, например шага зёрен в од-

ной линии резания. Размеры зёрен регламентируются ГОСТ 9206-80 «Порошки алмазные. Технические условия», который включает 18 групп зернистости в зависимости от области применения.

Форму зёрен в интересах простоты аналитического описания напряжённо-деформированного состояния контакта (НДС) необходимо выбирать из ряда простейших геометрических фигур, например в виде сферы, обладающей свойством осевой симметрии, что важно для кинематических расчётов.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной Программы, направленной на коммерциализацию научно-технических разработок в области нанотехнологий и наноматериалов, новых материалов и энергоресурсосбережения.

Геометрическая характеристика модели режущей поверхности инструмента включает также и выбор закономерности взаимного расположения рабочих зёрен. Минимальному количеству рабочих зёрен на контактной поверхности инструмента с породой будет отвечать такое условие их взаимного расположения, при котором осуществляется полное поражение забоя по ширине пропила в процессе перемещения инструмента вдоль распиливаемой породы. Оптимальную поверхностную концентрацию рабочих алмазных зёрен определим на элементарной контактной площади, ограниченной шириной инструмента  $b$  и шагом их расположения в одной линии резания  $t_l$  (рис. 1). В этом случае из множества всех выступающих над уровнем металлической связки зёрен к рабочим можно отнести только те, у которых проекции пятен контактов, расположенные по ширине инструмента, соприкасаются между собой. Остальная часть зёрен, в пределах рассматриваемой элементарной контактной площади, несмотря на то, что их вылет над уровнем связки такой же, как и у рабочих, являются в рассматриваемый момент времени балластными.

Балластные зёरна упруго взаимодействуют с поверхностью горной породы, не нарушая её сплошности, участвуют в процессе измельчения шлама, увеличивая тем самым непроизводительные затраты энергии и не выполняют, таким образом, полезную работу. Поэтому при оценке эффективности процесса поверхностного разрушения горных пород необходимо брать во внимание взаимодействие только активных рабочих зёрен инструмента.

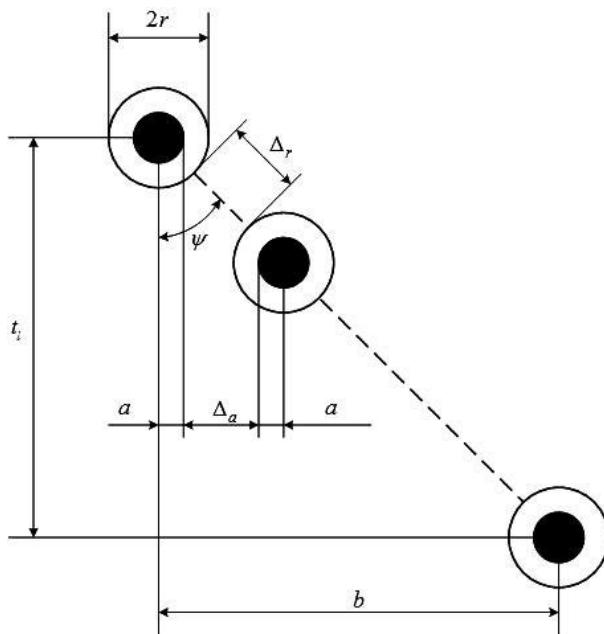


Рис. 1. Модель поверхности алмазно-абразивного инструмента

Согласно разработанной модели поверхности алмазно-абразивного инструмента рабочие зёрна предложено располагать вдоль диагонали элементарной контактной площади  $F_3 = b \cdot t_l$ , которая с продольной осью и образует угол  $\psi$  (см. рис. 1). Данной

модели соответствуют следующие геометрические взаимосвязи:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{b}{t_l}; \quad (1)$$

$$\sin \psi = \frac{2a + \Delta_a}{2r + \Delta_r}, \quad (2)$$

где  $a$  – радиус пятна контакта, м;  $r$  – радиус шаровой сферы, имитирующей алмазно-абразивное зерно, м;  $\Delta_a$  – зазор между проекциями пятен контакта рабочих зёрен с породой, обусловленный зоной предразрушений, которая образуется за счёт влияния на поверхностное разрушение за пределами радиусов пятен соседних контактов, м;  $\Delta_r$  – зазор между соседними зёрами в линии их расположения, обусловленной фактической поверхностной концентрации рабочих зёрен, м.

Выражение (2) можно записать в следующей форме:

$$\sin \psi = \frac{a}{r} \cdot \left( \frac{1 + \Delta_a/2a}{1 + \Delta_r/2r} \right) = \frac{a}{r} \cdot \frac{k_a}{k_r}. \quad (3)$$

Для случаев когда:

$k_a = 1$  – имеем соприкосновение проекций пятен контактов вдоль ширины пропила;

$k_r = 1$  – имеем плотный контакт шаровых сфер зёрен вдоль диагонали элементарной площади контакта, расположенной под некоторым углом  $\psi$  [1].

Расчёт величины коэффициента  $k_r = 1$  построим на основе взаимосвязи поверхностной удельной концентрации рабочих алмазных зёрен  $n_F^p$  и геометрических характеристик режущей поверхности инструмента в соответствии с её предложенной моделью:

$$n_F^p = \frac{1}{(2r + \Delta_r) \cdot b \cdot \cos \psi}, \quad (4)$$

откуда

$$k_r = \frac{1}{2r \cdot b \cdot n_F^p \cdot \cos \psi}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (3) даёт:

$$\sin \psi = 2k_a \cdot a \cdot b \cdot n_F^p \cdot \cos \psi,$$

или

$$\operatorname{tg} \psi = 2k_a \cdot a \cdot b \cdot n_F^p. \quad (6)$$

Совместно решая (1) и (6), получим основную зависимость геометрических характеристик контакта:

$$t_l = \frac{1}{2k_a \cdot a \cdot n_F^p}. \quad (7)$$

Выражая радиус пятна единичного контакта через его относительную глубину  $h_3$  по формуле

$$a = r \left( 2 \bar{h}_3 \right)^{0.5}, \quad (8)$$

получим для (7) следующую взаимосвязь:

$$t_l = \frac{1}{2k_a \cdot n_F^p \cdot r \left( 2 \bar{h}_3 \right)^{0.5}}, \quad (9)$$

где  $\bar{h}_3 = h_3 / r$  – относительное заглубление зерна в породу (деформация внедрения).

Взаимосвязь (9) описывает статистический контакт, в случае динамического контакта, когда имеем перемещение инструмента относительно распиливаемой породы, задняя поверхность алмазного зерна не несёт нагрузки, поэтому имеем следующее соотношение [2]:

$$\left( \bar{h}_3 \right)_c / \left( \bar{h}_3 \right)_d = 2, \quad (10)$$

учёт которого для (9) даёт окончательную зависимость

$$t_l = \frac{1}{2k_a \cdot n_F^p \cdot r \left( \bar{h}_3 \right)_c^{0.5}}, \quad (11)$$

где  $\left( \bar{h}_3 \right)_d$ ,  $\left( \bar{h}_3 \right)_c$  – относительная глубина внедрения зерна в породу в динамическом и статистическом состояниях инструмента.

Коэффициент  $k_a$  в зависимости (11) учитывает влияние зоны поверхностного предразрушения породы между двумя соседними контактами зёрен. Если  $k_a < 1$ , то проекции пятен контактов перекрываются друг с другом, а в случае  $k_a = 1$  они только соприкасаются друг с другом. Для значения коэффициента  $k_a > 1$  имеем зазор между проекциями пятен контактов. Установить величину коэффициента  $k_a$  наиболее простым способом для каждого конкретного случая можно на основании экспериментальных исследований по резанию горных пород единичным алмазным зерном.

Для дальнейшего анализа зависимости коэффициента  $k_a$  от силовых условий контакта проведём преобразование, для чего величину зазора между проекциями пятен контакта представим в следующем виде:

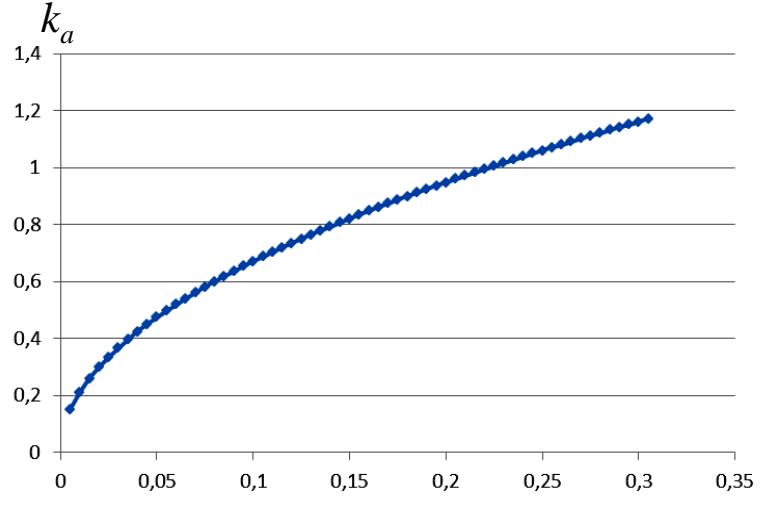
$$\Delta_a = nh_3 - 2a, \quad (12)$$

где  $n = \frac{t_p}{h_3}$  ( $t_p$  – расстояние между соседними единичными резами).

С учётом данного выражения для величины  $k_a$  получаем

$$k_a = \frac{nh_3}{2a} = \frac{n}{2\sqrt{2}} \left( \frac{h_3}{r} \right)^{0.5}. \quad (13)$$

Численные расчёты величины коэффициента  $k_a$  проводим на основании экспериментальных данных работы [6] по резанию различных горных пород (келгинский мрамор, карагандинский песчаник, янцевский гранит, шокшинский кварцит) единичным алмазным зерном, зернистостью  $r_{cp}=360$  мкм. В результате было установлено, что расстояние между резами, при котором происходит полное разрушение целиков породы, составляет  $t_p = 6h_3$  для различных заглублений в пределах  $h_p=0,05-0,1$  мм, т.е. при изменении глубины резания в два раза. На **рис. 2** приведена графическая зависимость изменения  $k_a$  от  $h_3$ , полученная на основании данных экспериментов.



**Рис. 2. Зависимость изменения  $k_a$  от  $h_3$ , полученная на основании данных экспериментов**

Как видно из **рис. 2**, разрушение целиков между соседними единичными резами достигается при различном значении коэффициента  $k_a$  в зависимости от заглубления алмазного зерна в породу. Чем больше заглубление, тем выше значение коэффициента  $k_a$ , который отражает эффективность поверхностного разрушения горных пород алмазно-абразивным инструментом.

Полученная зависимость (11) связи геометрических характеристик поверхности резания горных пород алмазно-абразивным инструментом является основополагающей для аналитических расчётов:

- производительности резания по кинематической теории [3];
- энергосиловых показателей процесса резания по энергетической теории [4, 7];
- напряжённо-деформированного состояния (НДС) контакта [5];
- рациональной конструкции рабочих элементов алмазно-абразивного инструмента [6].

#### Список литературы

1. Першин Г.Д., Церман С.И. Методические основы расчёта рациональной конструкции алмазноносного элемента камнерезных пил // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2010. С. 295-302.

2. Першин Г.Д., Ахметшин А.М., Михайлов А.А. Оценка эффективности процесса поверхностного разрушения природного камня с учётом активно работающих зёрен алмазно-абразивного инструмента// Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2005. С. 233-240.
3. Першин Г.Д., Ахметшин А.М., Павлов А.С. Кинематика процесса резания природного камня алмазно-дисковым инструментом // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2007. С.180-188.
4. Першин Г.Д., Павлов А.С. Энергетический паспорт поверхностного разрушения природного камня алмазно-абразивным инструментом // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2009. С. 217-224.
5. Першин Г.Д., Митин А.Н. Напряжённо-деформированное состояние контакта алмазно-дискового инструмента с распиливаемой породой // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2011. С. 225-236.
6. Алмазный инструмент для разрушения крепких горных пород / А.Ф. Кичигин, С.Н. Игнатов, Ю.И. Климов, В.Д. Ярёма. М.: Недра, 1980. 159 с.
7. Першин Г.Д., Садиков Е.В. Технико-экономические показатели работы алмазно-канатных пил при добыче блочного камня // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2003. Вып. 4. С 45-47.

## References

1. Pershin G.D., Tserman S.I. Methodological basis for calculating rational design element diamond masonry saws // Production, processing and use of natural stone: Sat. scientific. mp. Magnitogorsk, 2010. P. 295-302.
2. Pershin G.D., Akhmetshin A.M., Mikhailov A.A. Assessment of the effectiveness of the process of destruction of the surface of natural stone with the active grains of diamond abrasive tools // extraction, processing and use of natural stone: Sat. scientific. mp. Magnitogorsk, 2005. P. 233-240.
3. Pershin G.D., Akhmetshin A.M., Pavlov A.S. Kinematics of cutting natural stone diamond disk tool // Production, processing and use of natural stone: Sat. scientific. mp. Magnitogorsk, 2007. P. 180-188.
4. Pershin G.D., Pavlov A.S. Energy Passport surface damage natural stone diamond abrasive tools // Production, processing and use of natural stone: Sat. scientific. mp. Magnitogorsk, 2009. P. 217-224.
5. Pershin G.D., Mitin A.N. Stress-state contact diamond disk tool with sawn rock // extraction, processing and use of natural stone: Sat. scientific. mp. Magnitogorsk, 2011. P. 225-236.
6. Diamond tools for breaking hard rock / A.F. Kichigin, S.N. Ignatov, Y.I. Klimov, V.D. Yarema. Moscow, Nedra, 1980. 159 p.
7. Pershin G.D., Sadikov E.V. Techno-ekonomiceske performance diamond wire saws in the extraction of block stone // Vestnik MGTU named after G.I. Nosov. Vol 4. Magnitogorsk, 2003. P. 45-47.

УДК 622.2

Константинова С.А., Аптуков В.Н., Мерзляков А.Ф.

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦА НА СКОРОСТЬ КРАТКОВРЕМЕННОЙ РЕЛАКСАЦИИ И ПОЛЗУЧЕСТИ СИЛЬВИНИТА, КАРНАЛЛИТА И КАМЕННОЙ СОЛИ\*

**Аннотация.** Реологические свойства соляных пород изучаются, как правило, при больших временах (дни-месяцы). Представляет интерес анализ их реологического поведения в кратковременном диапазоне (минуты-десятки минут) в связи с построением моделей механического поведения соляных пород при активных нагрузках и небольших временах; интерпретацией стандартных экспериментальных данных (предел прочности на сжатие, предельная деформация, модуль деформации и т.п.), получаемых при постоянной скорости нагружения в течение обозначенного времени. Представлены результаты эксперимента для соляных пород, полученные на универсальной испытательной машине Zwick/Roell-Z250, показано влияние геометрии образца на скорость кратковременной релаксации и ползучести.

**Ключевые слова:** соляные породы; экспериментальные исследования; кратковременная релаксация и ползучесть; геометрия образца.

Konstantinova S.A., Aptukov V.N., Merzlyakov A.F.

### THE SPECIMEN GEOMETRY EFFECT ON THE SHORT-TERM SYLVINITY, CARNALLITE, ROCK SALT RELAXATION AND CREEP RATE

**Abstract.** Rheological properties of salt rocks are generally studied within long time (days, months). Salt rock short-term (within minutes or tens of minutes) rheological behavior analysis is of interest being concerned with construction of models of salt rocks mechanical behavior under active loads and within short time; interpretation of standard test data (ultimate compressive strength, ultimate strain, modulus of deformation, etc.), obtained at a constant rate of loading within specified time. Results of the rock salt specimen tests conducted in the Zwick/Roell-Z250 universal testing machine are presented laying special emphasis on the specimen geometry effect on the short-term relaxation and creep rate.

**Keywords:** salt rocks, experimental studies, short-term relaxation and creep, the specimen geometry.

Эксперименты с использованием сильвинитовых образцов различной геометрии ( $h/d = 0,5; 1,0; 2,0$ ), отобранных из слоя № 3 пласта Вс на Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей, проводились в режимах релаксации и ползучести. Сначала образцы нагружали до уровня напряжения 10 МПа. Затем, с фиксацией положения траверсы, нагружение прекращали на 20 мин, в течение которых в образце отмечали релаксацию напряжений.

Испытания в режиме ползучести проводили при

нагружении образцов сильвинита до уровня напряжения 10 МПа. После фиксации усилия траверсы испытательной машины в течение 20 мин наблюдалась рост относительной деформации образца.

Подобные эксперименты с образцами карналлита пласта Вк ( $h/d = 1,0$ ) слоя №4 проводились в режиме релаксации при уровнях нагрузки 5 МПа. С прекращением перемещения траверсы испытательной машины в течение 20 мин (рис. 1) напряжение в образце упало до 3,1 МПа (на 37,1%).

Испытание образца карналлита в режиме ползучести проводили при нагружении до уровня напряжения 5 МПа. Затем движение траверсы испытатель-

\* Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.1.2/5135).

ной машины останавливали на 20 мин (рис. 2). За это время относительная деформация образца возросла от 1,197 до 1,653% (на 38,0%).

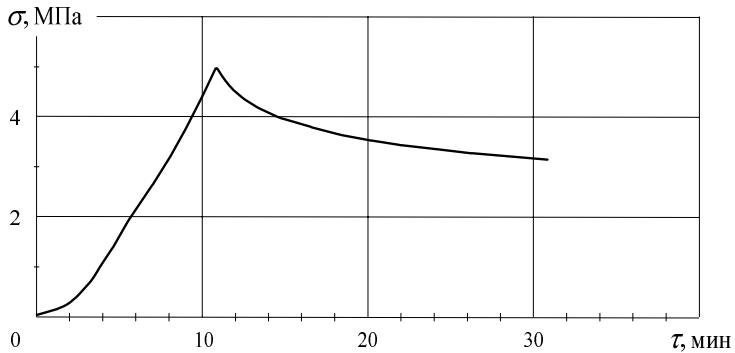


Рис. 1. Режим релаксации напряжений в образце карналлита в диапазоне времени от 11 до 31 мин

Испытания образцов каменной соли из геологического междупласта «Красный II – Красный I» ( $h/d = 1,0; 2,0$ ) проводили при уровне нагрузки 10 МПа для исследования кратковременной ползучести и релаксации.

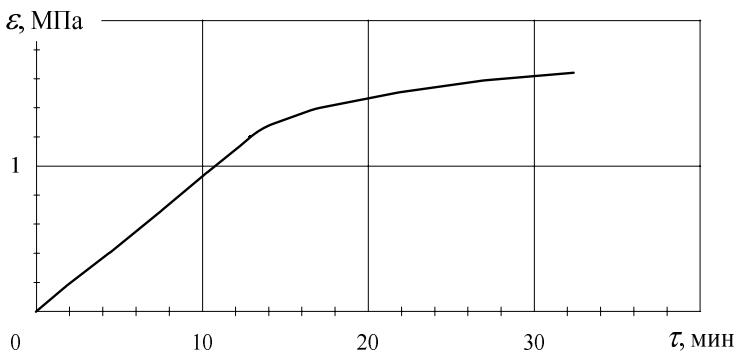


Рис. 2. Режим ползучести в образце карналлита в диапазоне времени от 12,8 до 32,8 мин

Экспериментальные диаграммы отражали начальную  $\dot{\varepsilon}_0^p$  и конечную  $\dot{\varepsilon}_k^p$  скорости ползучести; деформацию ползучести, накопленную за 20 мин  $\Delta\varepsilon^p$ ; начальную  $\sigma_0^\bullet$  и конечную  $\sigma_k^\bullet$  скорости релаксации; величину релаксации напряжения за 20 мин  $\Delta\sigma$ .

Результаты обработки всех полученных данных представлены в табл. 1-3.

Таблица 1  
Кратковременные реологические свойства сильвинита

$h/d$	$\dot{\varepsilon}_0^p, \text{c}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}_k^p, \text{c}^{-1}$	$\Delta\varepsilon^p, \%$	$\sigma_0^\bullet, \text{МПа/с}$	$\sigma_k^\bullet, \text{МПа/с}$	$\Delta\sigma, \text{МПа}$
0,5	$187 \cdot 10^{-6}$	$0,60 \cdot 10^{-6}$	0,36	$153 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	1,73
1	$74 \cdot 10^{-6}$	$0,40 \cdot 10^{-6}$	0,20	$169 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$	2,22
2	$57 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	0,18	$189 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-3}$	2,50

Анализ экспериментальных данных позволяет

сделать следующие выводы.

Реологические свойства карналлита отличаются тем, что начальные скорости ползучести и релаксации соответственно в 2-5 и 12 раз ниже известных значений для образцов каменной соли и сильвинита. При этом конечные скорости ползучести и релаксации соответственно в 4,5 и 1,5-2 раза выше показателей для каменной соли и сильвинита. В результате величина деформации ползучести за фиксированный промежуток времени 20 мин для карналлита в 2,3-3 раза выше данного показателя для каменной соли и сильвинита, а величина падения напряжений имеет приблизительно те же значения.

Таблица 2

Кратковременные реологические свойства карналлита

$h/d$	$\dot{\varepsilon}_0^p, \text{c}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}_k^p, \text{c}^{-1}$	$\Delta\varepsilon^p, \%$	$\sigma_0^\bullet, \text{МПа/с}$	$\sigma_k^\bullet, \text{МПа/с}$	$\Delta\sigma, \text{МПа}$
1	$14 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,46	$12,7 \cdot 10^{-3}$	$0,44 \cdot 10^{-3}$	1,86

Сравнение реологических свойств каменной соли и сильвинита показывает немного более высокие скорости ползучести и релаксации сильвинита по сравнению с каменной солью. С увеличением высоты образца в целом падает начальная и конечная скорость ползучести, а скорость релаксации возрастает. При этом уменьшается относительный вклад давления в напряженное состояние образца, т.е. оно приближается к одноосному. Если предположить, что скорость объемной ползучести в основном определяется давлением, а скорость сдвиговой ползучести – девиатором тензора напряжений, то основной вклад в полную деформацию ползучести вносит объемная составляющая.

Таблица 3

Кратковременные реологические свойства каменной соли

$h/d$	$\dot{\varepsilon}_0^p, \text{c}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}_k^p, \text{c}^{-1}$	$\Delta\varepsilon^p, \%$	$\sigma_0^\bullet, \text{МПа/с}$	$\sigma_k^\bullet, \text{МПа/с}$	$\Delta\sigma, \text{МПа}$
1	$27 \cdot 10^{-6}$	$0,40 \cdot 10^{-6}$	0,14	$165 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	1,81
2	$67 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$	0,22	$168 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$	2,14

С релаксацией напряжений ситуация обратная. Наибольший вклад в изменение нормальных напряжений вносит релаксация девиаторных компонент, скорость которой естественно возрастает в более высоких образцах.

Полученные результаты объясняют, почему с уменьшением высоты образца снижается измеряемый при разгрузке модуль Юнга. Более значительная деформация ползучести в «коротких» образцах увеличивает наклон кривой, по которой и определяется модуль. Особенно это проявляется в экспериментах с образцами карналлита [3].

Время стандартных испытаний образцов при малой скорости перемещения траперсы ( $V_u = 0,1$  мм/мин) составляет обычно 15-40 мин или более. Поэтому все диаграммы деформирования и механические характеристики соляных пород при этой скорости включают в себя временные эффекты подобно **рис. 1, 2**.

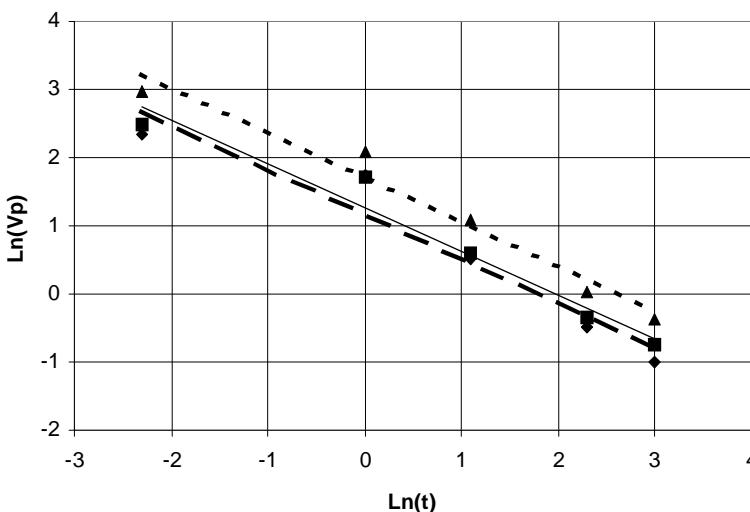
Некоторые данные испытаний для удобства могут быть представлены в виде скорости релаксации напряжений и скорости ползучести во времени в двойных логарифмических координатах.

На **рис. 3** показаны соответствующие зависимости для сильвинита (время в минутах, скорость в  $10^{-3}$  МПа/с) в образцах различной геометрии. Прямые линейной регрессии описываются следующими уравнениями:  $\ln(\dot{\sigma}) = 1,64 - 0,90\ln(t)$  – для  $h/d = 2$ ;  $\ln(\dot{\sigma}) = 1,55 - 0,92\ln(t)$  – для  $h/d = 1$ ;  $\ln(\dot{\sigma}) = 1,33 - 0,92\ln(t)$  – для  $h/d = 0,5$ .

Прямые практически параллельны друг другу, но смещены по вертикали, что указывает на повышение скорости релаксации напряжения с увеличением высоты образца (см. **табл. 1**).

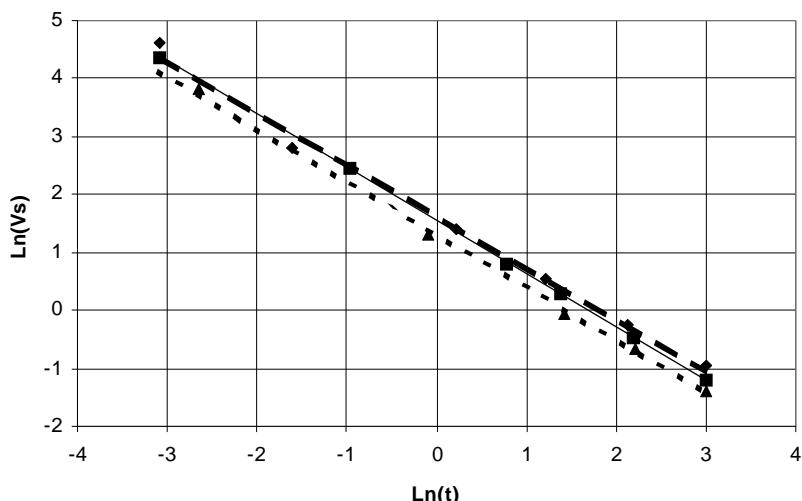
Временные зависимости скорости ползучести в двойных логарифмических координатах для сильвинита (время в минутах, скорость в  $10^{-6} \cdot 1/\text{с}$ ) в образцах различной геометрии приведены на **рис. 4**.

#### Зависимость скорости ползучести от времени для образцов различной геометрии



**Рис. 3. Временная зависимость скорости релаксации напряжений в образцах сильвинита** (— —  $h/d = 2$ ; — —  $h/d = 1$ ; - · - ·  $h/d = 0,5$ )

#### Зависимость скорости релаксации напряжений от времени для образцов различной геометрии



**Рис. 4. Временная зависимость скорости ползучести в образцах сильвинита** (— —  $h/d = 2$ ; — —  $h/d = 1$ ; - · - ·  $h/d = 0,5$ )

Прямые линейной регрессии описываются следующими уравнениями:  $\ln(\dot{\epsilon}) = 1,16 - 0,66\ln(t)$  – для  $h/d = 2$ ;  $\ln(\dot{\epsilon}) = 1,26 - 0,64\ln(t)$  – для  $h/d = 1$ ;  $\ln(\dot{\epsilon}) = 1,70 - 0,66\ln(t)$  – для  $h/d = 0,5$ .

Прямые практически параллельны друг другу, но смещены по вертикали, что указывает на уменьшение скорости ползучести с увеличением высоты образца (см. **табл. 1**).

Полученные диаграммы детального поведения образцов различной геометрии в режимах кратковременной ползучести и релаксации могут быть использованы при построении моделей механического поведения соляных пород при кратковременных активных нагрузках (минуты–десетки минут).

#### Список литературы

1. Проскуряков, Н.М. Физико-механические свойства соляных пород / Н.М. Проскуряков, Р.С. Пермяков, А.К. Черников. Л.: Недра, 1973. 272 с.
2. Барях, А.А. Деформирование соляных пород / А.А. Барях, С.А. Константинова, В.А. Асанов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 203 с.
3. Деформирование и разрушение образцов карналлита Первого Соликамского рудника / В.Н. Аптуков, М.В. Гилев, С.А. Константинова, А.Ф. Мерзляков // Маркшейдерия и недропользование. 2009. № 6. С. 61-65.

#### References

1. Proskuryakov N.M., Permyakov R.S. and Chernikov A.K. (1973). Physico-Mechanical Properties of Salt Rocks. Leningrad, Nedra, 272 p.
2. Baryakh A.A., Konstantinova S.A. and Assanov V.A. (1996). Salt Rock Straining. Ekaterinburg, the Ural Branch of RAS. 203 p.
3. Aptukov V.N., Gilyov M.V., Konstantinova S.A. and Merzlyakov A.F. (2009). The First Solikamsky Mine Carnallite Specimens Straining and Failure. Mine Surveying and Subsurface Use. № 6. pp. 61-65.

# ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ

УДК 656.223.2

Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н.

## УПРАВЛЕНИЕ ВАГОНОПОТОКАМИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

**Аннотация.** В статье представлены результаты анализа грузо- и вагонопотоков в промышленных транспортных системах металлургических предприятий. Предложена система и методы управления вагонопотоками в промышленных транспортных системах, основанные на использовании логистических принципов.

**Ключевые слова:** промышленная транспортная система, вагонопотоки, логистика, методы, информационные технологии.

Osintsev N.A., Rakhamangulov A.N.

### RAILCAR FLOW MANAGEMENT IN INDUSTRIAL TRANSPORT SYSTEMS

**Abstract.** The results of the analysis of freight and wagon traffic on the industrial transport systems. Provides a system and methods of control in the industrial and wagon transport systems based on the use of logistics principles.

**Keywords:** industrial transport system, railcar flow, logistic, methods, information technology.

В настоящее время сложились пять основных способов организации непосредственного транспортного обслуживания производства [1, 2]:

1. На договорной основе – по согласованным графикам (для крупных предприятий) или по готовности очередной транспортной партии (предприятия с небольшими объемами перевозок). Заключение договоров на транспортное обслуживание осуществляется отдельно с каждым производственным предприятием.

2. Доставка грузов «от двери до двери» (формируются транспортно-технологические (интермодальные и мультимодальные) системы, в границах которых оператор перевозок организует процесс доставки грузов и отвечает за его результаты). Способ не предусматривает непосредственного транспортного обслуживания производства, при формировании транспортно-технологических систем не учитываются дополнительные затраты на доставку груза «от двери» получателя до технологического агрегата.

3. По системе «точно в срок». Доставка грузов осуществляется в специально оговоренное контрактом время.

4. По системе «точно ко времени производства». Доставка грузов и внутренние межцеховые перевозки (отгрузка готовой продукции) согласованы с технологическим производственным процессом обслуживаемых предприятий.

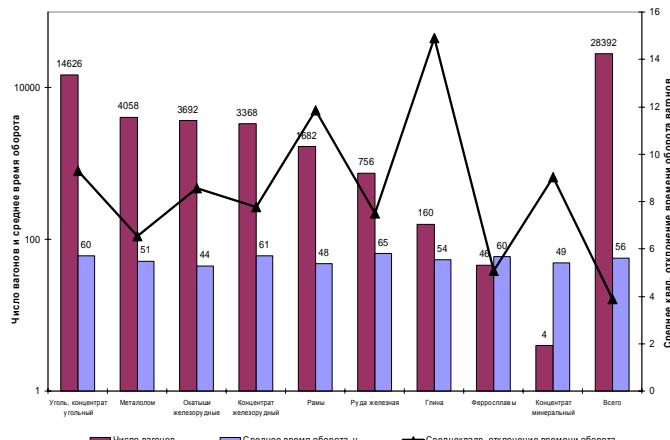
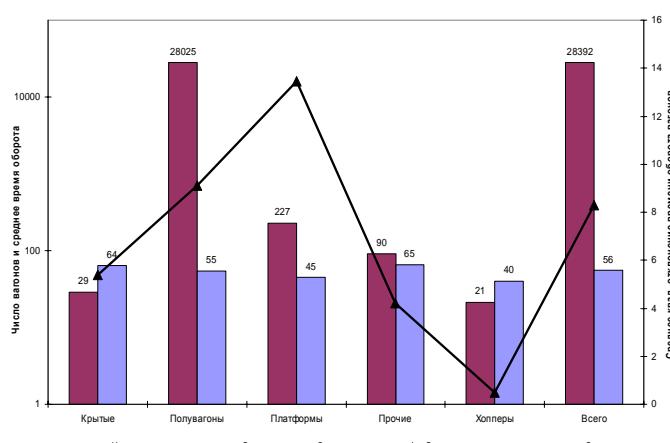
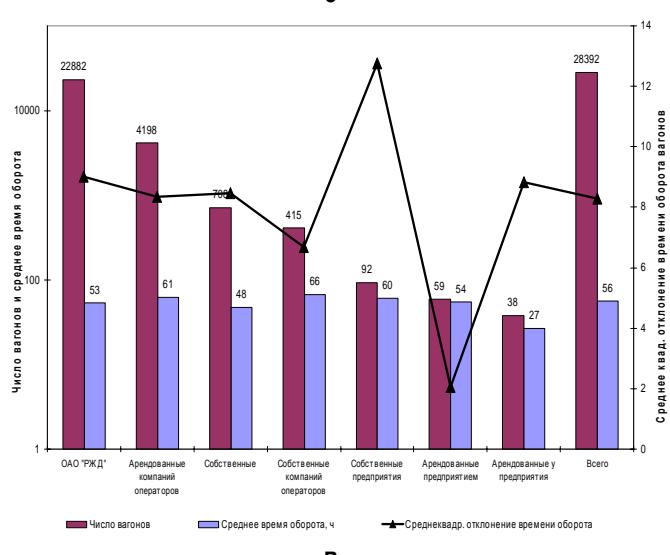
5. На основе принципов логистики (транспорт рассматривается в качестве составной части единого процесса производства, хранения и распределения товаров).

Наиболее эффективным является способ транспортного обслуживания производства, основанный на реализации логистических принципов, поскольку позволяет определить оптимальные параметры всех логистических потоков между всеми участниками логистической цепи во взаимосвязи и обеспечить соблюдение этих параметров в процессе продвижения потоков. Однако реализация такого способа затрудняется отсутствием в настоящее время эффективных организационных форм взаимодействия участников логистического процесса.

В работах [1,2] отмечается, что все виды транспорта общего и необщего пользования пока еще не составляют организованного целого. Территориальная организация транспорта и организация грузовых перевозок слабо корреспондируют с территориальной организацией производства. Сложившиеся структура и функции управления транспортом, организация грузовых перевозок и применяемый способ транспортного обслуживания предприятий стали неадекватно относиться с современной организацией процесса производства, что приводит к росту затрат на транспортное обслуживание в себестоимости продукции промышленных предприятий. Суммарные годовые потери для промышленной транспортной системы (ПТС), включающей в себя несколько десятков промышленных станций и перерабатывающей 2-3 тыс. вагонов в сутки, составляют 70-80 млн руб. в год, или более 20% общих затрат, связанных с оборотом вагонов [2,3].

Пооперационный анализ оборота вагонов в промышленных транспортных системах предприятий позволил выявить наличие значительных отклонений параметров вагонопотоков от нормативных, предусмотренных Единым технологическим процессом (ЕТП). Фундаментальной причиной возникновения таких потерь является высокая сложность оперативного планирования и управления маршрутами движения вагонопотоков в условиях колебания уровня загруженности всех элементов ПТС, а также высокой неравномерности параметров вагонопотоков (см. **рисунок**).

Возрастание времени оборота вагонов является следствием не столько увеличения задержек в обработке вагонов из-за занятости элементов путевого развития и локомотивов, сколько результатом слабого контроля и нерационального управления продвижением вагонопотоков, в частности, результатом недостаточной согласованности решений по формированию поездов и передач в ПТС. Это приводит к увеличению доли затрат времени, приходящегося на операции движения вагонов в составе поездов, сформированных без учета оперативной загруженности элементов ПТС.

**a****б****в**

### Результаты анализа статистических характеристик времени оборота вагонов: а – по роду груза, б – по типу вагона; в – по форме собственности подвижного состава

Анализ работы ПТС металлургических предприятий показывает, что промышленные станции, входящие в состав ПТС, обладают резервом пропускной и перерабатывающей способности (табл. 1). Однако исследования маршрутов движения и параметров вагонопотоков позволили выявить следующие недостатки [2–4]:

- высокая неравномерность как параметров вагонопотоков, так и степени загруженности технологических железнодорожных станций;
- движение вагонов по нерациональным маршрутам;
- наличие маршрутов движения порожних вагонов без грузовых операций на пути необщего пользования.

**Таблица 1**

### Значения статистических параметров маршрутов движения вагонов в ПТС (на примере крупного металлургического предприятия)

Параметры	Значение параметров для мощности вагонопотока		
	до 10 ваг.	от 10 до 100 ваг.	более 100 ваг.
Число регулярных маршрутов	1432	296	101
Число вариантов маршрутов	1824	963	1623
Общее число вагонов, движущихся по всем маршрутам	3633	10052	98385
Максимальная мощность вагонопотока маршрута	10	100	15489
Максимальное число вариантов одного маршрута	7	18	77
Максимальное время прохождения маршрута, ч	2619,9	1384,41	2470,92
Минимальное время прохождения маршрута, ч	5,08	19,3	39,7
Среднее время прохождения маршрута, ч	112,49	118,3	366,4
Дисперсия времени прохождения маршрута (средняя / максимальная)	1355 / 680677	4678,61 / 382981	14498 / 145323
Среднее квадратическое отклонение времени прохождения маршрута (среднее / максимальное)	7,32 / 825,1	27,09 / 618,8	82,14 / 381,2
Коэффициент вариации (средний / максимальный)	0,06 / 1,49	0,25 / 1,87	0,66 / 2,94
Коэффициент неравномерности времени прохождения маршрута (средний / максимальный)	1,06 / 2,49	1,25 / 2,87	1,66 / 3,94

### Пример маршрута движения вагонов с нерациональными участками

Мощность маршрута/Время	Маршрут следования и временные интервалы нахождения вагонов на каждой станции маршрута (жирным выделены нерациональные участки)
381 ваг.	М.КУЙБАС – РУДНАЯ (Выгрузка [Аглоруда]) – <b>ТОНКОЛИСТОВАЯ – ВХОДНАЯ – КОЛЬЦЕВАЯ – ТОПЛИВНАЯ – КОЛЬЦЕВАЯ – ВХОДНАЯ – ТОНКОЛИСТОВАЯ – ВХОДНАЯ</b> – СОРТИРОВОЧНАЯ (Погрузка[Рамы])–СОРТИРОВОЧНАЯ(Погрузка[Сталь]) – <b>ЗАПАДНАЯ – СТАЛЬНАЯ – ЗАПАДНАЯ – СОРТИРОВОЧНАЯ – ВХОДНАЯ – ПЕРЕДАЧА</b>
Время, ч	[0,00] [36,42] [2,92] [6,83] [0,07] [0,00] [25,25] [0,08] [7,25] [15,58] [0,02] [31,33] [105,67] [2,67] [52,92] [0,00] [0,08] [0,33] [0,00]

В представленном примере в маршруте имеются два нерациональных участка движения ТОН-ВХО-КОЛ-ТОП-КОЛ-ВХО-ТОН-ВХО до момента погрузки и ЗАП-СТА-ЗАП-СОР после погрузки. Суммарные потери времени при движении по нерациональным участкам рассматриваемого маршрута соответственно составляют 55,06 ч (20977 ваг.-ч) и 55,67 ч (21210 ваг.-ч).

Основные причины возникновения задержек в переработке вагонопотоков имеют организационную и информационную природу [2-4, 6]:

- недостаточный контроль параметров маршрутов (вагонопотоков);
- недостаточный контроль использования порожних вагонов в ПТС;
- недостаточная согласованность в работе маневровых диспетчеров.

Детализация причин и технологических последствий задержек в переработке вагонопотоков в ПТС ряда крупных металлургических предприятий позволила выявить следующие критические, с точки зрения снижения эффективности, объекты контроля:

1. *Маршруты движения вагонопотоков.* Продвижение вагонопотоков по маршрутам, включающим технологические железнодорожные станции с низкой величиной резерва пропускной и перерабатывающей способности, увеличивает время оборота вагонов.

2. *Вагонопотоки порожних вагонов,* с которыми в ПТС не выполнялись грузовые операции. При

больших объемах перевозок и недостаточном контроле порожних вагонопотоков поданные на предприятия порожние вагоны зачастую отправляются на пути общего пользования в порожнем состоянии.

3. *Вагонопотоки, характеризующиеся значительной неравномерностью* как по мощности, так и по времени оборота в ПТС. Управление такими «нестандартными» вагонопотоками требует применения регулировочных решений, корректировок стандартной технологии, что в условии недостаточного информационного обеспечения и согласованности работы диспетчеров приводит к еще большему увеличению отклонений параметров таких потоков от средних значений и, в итоге, к колебаниям величин резервов пропускной и перерабатывающей способности технологических станций и задержкам в продвижении вагонопотоков.

4. *Вагонопотоки на полигоне примыкания ПТС к магистральному железнодорожному транспорту.* Рассогласованность в подводе вагонов и грузов на предприятие с фактической потребностью в них приводит к задержкам отдельных струй вагонопотоков либо на станции примыкания, либо на промышленных станциях ПТС.

С целью повышения эффективности управления грузо- и вагонопотоками авторами предлагается система мероприятий, нацеленная на устранение причин возникновения затрат и задержек в переработке грузо- и вагонопотоков в ПТС (**табл. 2**).

Таблица 2

#### Система мероприятий по повышению эффективности управления грузо- и вагонопотоками в промышленных транспортных системах

Группа мероприятий	Мероприятие	Устранимое ограничение	Основная причина возникновения ограничения	Ориентировочные потери в результате действия ограничения, тыс. руб./мес	Логистические методы управления вагонопотоками в ПТС
Полностью устранимые ограничения	Согласованный подвод вагонов в адрес предприятия	Простоя вагонов на полигоне примыкания ПТС к магистральному железнодорожному транспорту	Недостаточное взаимодействие между железнодорожным транспортом предприятия и ОАО «РЖД» по управлению вагонопотоками на полигоне примыкания	1500-2500	Реализация метода контроля вагонопотоков на полигоне взаимодействия ПТС с сетью железных дорог общего пользования
	Контроль маршрутов движения порожних вагонов без грузовых операций в ПТС	Маршруты движения порожних вагонов без грузовых операций в ПТС	Отсутствие контроля использования порожних вагонов в ПТС	300-700	Реализация метода контроля порожних вагонопотоков в ПТС
Минимизируемые ограничения	Управление маршрутами движения вагонов с учетом оперативного уровня загруженности железнодорожных станций	Движение вагонов по нерациональным маршрутам	Рассогласованность действий маневровых диспетчеров на технологических железнодорожных станциях ПТС	1800-2600	Реализация метода информационного представления системы вагонопотоков как объекта управления, а также метода оценки резервов пропускной и перерабатывающей способности промышленных станций на основе теории нечетких множеств
	Контроль вагонопотоков по отдельным грузам	Неравномерность параметров вагонопотоков и загрузки железнодорожных станций	Недостаточный контроль параметров вагонопотоков, а также высокая неравномерность параметров вагонопотоков	1000-1500	Реализация метода контроля статистических параметров системы вагонопотоков

Разработанная система мероприятий состоит из четырех частей, объединенных в две группы:

– первая группа предполагает полное устранение как самих ограничений в переработке вагонопотоков, так и причин возникновения этих ограничений. К группе полностью устраниемых мест возникновения ограничений относятся простой вагонов на полигоне примыкания ПТС к магистральному железнодорожному транспорту, а также продвижение в ПТС порожних вагонов без выполнения грузовых операций;

– вторая группа мероприятий нацелена на минимизацию времени простоя вагонов парка ОАО «РЖД» и, соответственно, на минимизацию воздействия ограничений на переработку вагонопотоков. К таким ограничениям относятся промышленные железнодорожные станции, не входящие в рациональный маршрут движения вагонопотоков, а также вагонопотоки с большой величиной колебаний отклонений времени оборота от нормативных значений. Устранить данные ограничения полностью не представляется возможным по причине объективного характера неравномерности как самих параметров вагонопотоков, так и неравномерного использования пропускной и перерабатывающей способности транспортных мощностей, действовавших при обработке таких вагонопотоков.

Представленная в **табл. 2** система мероприятий по устранению ограничений в переработке вагонопотоков на пути необщего пользования предприятия наиболее эффективна при комплексной реализации всех мероприятий. Формируемая в результате реализации данных мероприятий система управления вагонопотоками, основанная на логистических принципах, предполагает не только смену объекта управления с отдельных станций и вагонов на вагонопотоки и маршруты их прохождения, но и повышение степени оперативности, уровня детализации анализа собираемых информационной системой ПТС данных.

Наиболее сложным и затратным мероприятием является реализация системы оперативного расчета оптимальных маршрутов движения вагонов на основе оценки текущего уровня и прогноза использования пропускной и перерабатывающей способности железнодорожных станций. Основным инструментом для оценки и прогнозирования являются имитационные модели технологии работы железнодорожных станций [4,5,7,9]. В настоящее время существуют два альтернативных способа построения таких моделей – использование универсальных систем имитационного моделирования, таких, например, как отечественный программный продукт AnyLogic, либо использование специализированных программных систем построения готовых имитационных моделей, учитывающих специфические особенности технологии и организации железнодорожных перевозок.

Вторым по уровню затрат и сложности является мероприятие по организации согласованного подвода вагонов в адрес предприятия на полигоне примыка-

ния, включающей в себя технические станции ОАО «РЖД» и промышленные станции ПТС, на которых производится основной объем сортировочной работы. Реализация данного мероприятия основана на создании и использовании в оперативном режиме математической модели [4], оптимизирующей объем сортировочной работы на перечисленных станциях в зависимости от степени потребности основного производства в вагонах с конкретными грузами. Важной частью данного мероприятия является реализация системы учета дополнительных маневровых операций, выполняемых на технических станциях ОАО «РЖД» и на станциях пути необщего пользования, с целью обеспечения потребных параметров вагонопотоков как по прибытию на пути ПТС, так и по сдаче в ОАО «РЖД».

Наименее затратными являются мероприятия по созданию программных продуктов углубленного оперативного анализа уже имеющихся в информационной системе предприятия данных для контроля параметров маршрутов движения вагонов в ПТС и прогнозирования потерь, возникающих в результате движения по нерациональным маршрутам.

В качестве инструмента, положенного в основу реализации мероприятий, является разработанная авторами система методов управления вагонопотоками в ПТС, основанная на логистических принципах и использовании современных достижений информационных технологий. Данные методы в совокупности представляют собой методологический базис формирования логистической системы управления вагонопотоками не только в ПТС, но и на полигоне взаимодействия этой системы с магистральным железнодорожным транспортом. Использование логистических принципов управления вагонопотоками обусловлено тем, что объектами управления становятся не отдельные промышленные железнодорожные станции, а материальные потоки (вагоно- и грузопотоки) и информационные потоки (оперативные данные об уровне загруженности элементов ПТС, параметрах вагонопотоков и управленические решения).

Краткая характеристика логистических методов управления вагонопотоками и результат их использования представлены в **табл. 3**.

Представленную систему методов управления предлагается использовать в качестве информационной основы при формировании системы управления вагонопотоками в промышленных транспортных системах. Реализация предлагаемых методов позволит сократить издержки в ПТС [3], связанные с:

- движением вагонов по нерациональным маршрутам, в среднем, на 35-40%;
- наличием маршрутов движения порожних вагонов без грузовых операций – на 5-10%;
- высокой неравномерностью параметров вагонопотоков и уровнем использования пропускной и перерабатывающей способностей промышленных железнодорожных станций – на 20%.

Таблица 3

## Система логистических методов управления вагонопотоками в ПТС

№	Название метода	Сущность метода	Объект контроля в ПТС	Результат реализации метода
1	Метод информационного представления системы вагонопотоков как объекта управления ПТС	Выборка из базы данных информации о вагонах, находящихся на территории предприятия, с последующей группировкой вагонов, имеющих совпадения маршрутов движения и моментов нахождения на технологических станциях ПТС с целью выявления нерациональных маршрутов движения	Маршруты движения вагонопотоков в ПТС	Сокращение издержек, связанных с движением вагонов по нерациональным маршрутам, в среднем, на 35-40%
2	Метод контроля статистических параметров системы вагонопотоков	Анализ статистических характеристик времени движения вагонов по маршруту следования вагонопотока, сгруппированных по определенным периодам планирования и формирование перечня устойчивых маршрутов для каждого периода планирования с целью выявления мест возникновения задержек в продвижении вагонопотоков и оценки качества управления их продвижением	Параметры вагонопотоков	
3	Метод контроля порожних вагонопотоков в ПТС	Анализ маршрутов движения порожних вагонов в ПТС с целью выявления устойчивых нерациональных порожних вагонопотоков и устранение причин их возникновения	Порожние вагонопотоки	Сокращение издержек, связанных с наличием маршрутов движения порожних вагонов без грузовых операций в ПТС – на 5-10%
4	Метод контроля вагонопотоков на полигоне взаимодействия ПТС с сетью железных дорог общего пользования	Согласованный подвод вагоно- и грузопотоков на пути необщего пользования на основе определения оперативной потребности в грузах (вагонах) и величины оптимального состава поезда, формируемого на полигоне примыкания	Вагонопотоки на полигоне примыкания ПТС	Сокращение издержек, связанных с сверхнормативным простоем вагонов на станции примыкания ОАО «РЖД» в ожидании возникновения потребности в вагонах в основном производстве – до 35%
5	Метод оценки резервов пропускной и перерабатывающей способности технологических станций на основе теории нечетких множеств	Оперативная оценка текущей загруженности технологических железнодорожных станций ПТС с целью выявления резерва пропускной и перерабатывающей способности станций для продвижения вагонопотоков и сокращения затрат вагоночасов движения вагонопотоков	Пропускная и перерабатывающая способность железнодорожных станций	Сокращение издержек, связанных с высокой неравномерностью параметров вагонопотоков и уровнем использования пропускной и перерабатывающей способностей технологических железнодорожных станций – на 20%

## Список литературы

- Усков Н.С. Организация управления территориальными производственно-транспортными комплексами: учебник для вузов. М.: ГУУ, 1999. 320 с.
- Багинова В.В., Рахмангулов А.Н. Адаптивная организация грузопотоков // Мир транспорта. 2011. Т. 36. № 3. С. 132-138.
- Багинова В.В., Рахмангулов А.Н., Осинцев Н.А. Контроль вагонопотоков на пути необщего пользования // Мир транспорта. 2010. №3. С. 108-113.
- Мишкуров П.Н., Рахмангулов А.Н. Проблемы использования метода динамического программирования для оперативного управления вагонопотоками // Современные проблемы транспортного комплекса России: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. №2. С. 279-285.
- Трофимов С.В., Рахмангулов А.Н. Выбор оптимальных методов оперативного управления работой промышленных транспортных систем: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 145 с.
- Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Оценка резервов пропускной и перерабатывающей способности технологических железнодорожных станций с использованием теории нечетких множеств // Вестник транспорта Поволжья. 2011. №1 (25). С. 45-49.
- Багинова В.В., Рахмангулов А.Н., Мишкуров П.Н. Методика оценки организационной структуры оперативного управления вагонопотоками на путях необщего пользования // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. №2. С. 19-22.
- Транспортная логистика: учеб. пособие / А.Н. Рахмангулов, С.В. Трофимов, С.Е. Гавришев, А.М. Макаров, Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. 372 с.
- Козлов П.А., Осокин О.В., Тушин Н.А. Технологические проблемы железнодорожного транспорта и пути их решения // Наука и техника транспорта. 2012. №2. С. 99-101.

## References

- Uskov N.S Management of territorial organization of production and transport industry: Textbook for high school. M.: SUM, 1999. 320 p.
- Baginova V.V., Rakhmangulov A.N. Adaptive system of freight traffic operation // World Of Transport. 2011. T.36. №3. P. 132-138.
- Baginova V.V., Rakhmangulov A.N., Osintsev N.A. Operation control of railcar flows at non-public railtrack // World Of Transport. 2010. T.31. №3. P. 108-113.
- Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Problems of using the dynamic programming method for operational control railcar flow // Modern problems of transport complex of Russia. Magnitogorsk: Publishing center of MSTU named after G.I. Nosov, 2012. №2. P. 279-285
- Trofimov S.V., Rakhmangulov A.N.The selection of optimal operative management methods of the industrial transport systems: monograph. Magnitogorsk: MSTU named after G.I. Nosov, 2000. 145 p.
- Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. Evaluating the reserves of the traffic and handling capacity of marshalling yards using the fuzzy-set theory // Bulletin of Transport of the Volga. 2011. №1 (25). P. 45-49.
- Baginova V.V., Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N. Technique Of An Estimation Of Organizational Structure Of An Operational Traffic Control On A Railway Transport Of Industrial Enterprises // Transport: science, techniques, management. 2012. №2 P.19-22.
- Transport logistics: textbook. Rakhmangulov A.N., Trofimov S.V., Gavrishev S.E., Makarov A.M. Magnitogorsk: MSTU named after G.I. Nosov, 2000. 372 p.
- Kozlov P.A., Osokin O.V., Tushin N.A. Technological challenges of rail transport and solutions // Science and Technology of Transport. 2012. № 2. P. 99-101.

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.168

Каскин К.К.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОДУКТА КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ И РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧАХ

**Аннотация.** В данной статье проводится оценка экономической эффективности и энергоемкости непрерывного процесса выплавки полупродукта коррозионностойкой стали в руднотермической печи. Следует отметить, что в работе приведена ориентировочная оценка, цель которой выявить возможный уровень эффективности новой технологии применительно к частному случаю производства высокохромистого полупродукта.

**Ключевые слова:** высокохромистый полупродукт, коррозионностойкая сталь, сравнительный анализ.

Kaskin K.K.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF CORROSION-RESISTANT STEEL INTERMEDIATES SMELTING AND ORE-SMELTING FURNACES

**Abstract.** This paper assesses the cost-effectiveness and energy continuum of intermediate stainless steel smelting in ore-smelting furnace. It should be noted that in the paper shows the advance estimate, which aims - to identify possible level of efficiency of the new technology as applied to the particular case of the production of high chromium precursor.

**Keywords:** high chrome semi-product, corrosion-resistant steel, comparative analysis.

Для оценки экономической эффективности и энергоемкости непрерывного процесса выплавки полупродукта коррозионностойкой стали в руднотермической печи рассмотрены в качестве примера технико-экономические показатели разработанной технологии и принятой в ЭСПЦ-6 Челябинского металлургического комбината. Так как в обоих случаях предусматривается однотипная технология доводки полу-продукта методом аргонокислородного рафинирования (АКР), расчет экономической эффективности АКР не приводится.

#### Состав шихты ДСП

Для определения состава шихты ДСП, в частности, легированных отходов использован баланс амортизационного лома и отходов той же марки. При этом использован баланс лома Б26 (при выплавке хромоникелевой стали типа Х18Н10Т) и Б10 (при выплавке хромистой стали марки Х17). Хромоникелевых отходов Б26 было – 333 кг/т слитков и товарного лома – 238 кг/т. Количество собственных отходов, применительно к условиям ЭСПЦ №6, должно сократиться на 120 кг/т при разливке стали на МНЛЗ [1].

Остается собственных отходов  $333 - 120 = 213$  кг/т.

Для охлаждения металла используется в среднем 120 кг на 1 т жидкой стали.

Остается собственных отходов

$$213 - \frac{120}{1,079} = 101 \text{ кг/т заготовок или } \frac{101}{1,079} = 94 \text{ кг на}$$

1 т жидкой стали, где 1,079 – расходный коэффициент жидкой стали на 1 т годной заготовки.

Товарного лома Б26 использовали 238 кг/т слитков или  $\frac{238}{1,079} = 221$  кг/т жидкой стали. Всего отходов и лома на 1 т жидкого металла составляет  $221 + 94 = 315$  кг/т. Состав металлошахты ДСП на 1 т жидкого металла при выплавке полупродукта приведен в табл. 1, 2. Выход жидкой стали из металлошахты равен 0,95.

Таблица 1

#### Средний состав металлошахты в ДСП для стали Х18Н10Т

Шихта	Масса шихты, кг	Внесено, кг		
		Cr	Ni	C
Собственный отходы	94	16,92	9,40	0,20
Амортизационный лом	221	38,34	22,10	0,44
Углеродистый лом	432	–	–	0,86
Закись никеля	96	–	73,50	–
Углеродистый ферро-хром ФХ800	207	134,74	–	16,56
Всего	1050	190,00	105,00	18,06

Примечание. Хрома в отходах и амортизационном ломе 18%, никеля 10%, углерода 0,2%. Углерод в углеродистом ломе 0,2%.

При выплавке высокохромистой стали норма расхода собственных отходов и лома Б10 (содержанием 16-18% Cr) установлена в количестве 400 кг/т. Можно рассматривать, что в шихте используется только то-

варный лом. За счет сокращения количества отходов при разливке на МНЛЗ, на 120 кг/т и использования  $\frac{120}{1,079} = 112$  кг/т в конвертере АКР. Остается в шихте:  $400 - 120 - 112 = 168$  кг/т или пересчете на 1 т жидкой стали  $\frac{168}{1,079} = 156$  кг. Состав металлошихты

ДСП при выплавке высокохромистого полупродукта типа Х17 на 1 т жидкой стали приведен в **табл. 1, 2.**

**Таблица 2**

**Средний состав металлошихты в ДСП для стали Х17**

Шихта	Масса шихты, кг	Внесено, кг	
		Cr	C
Амортизационный лом	156	26,50	0,47
Углеродистый лом	666	–	1,33
Углеродистый феррохром ФХ800	228	148,50	18,24
Всего	1050	175,00	20,04

Таким образом, рассчитан средний состав металлошихты в ДСП для сталей Х18Н10Т и Х17.

**Состав шихты в руднотермической печи**

Предлагаемый вариант выплавки высокохромистого полупродукта в печах руднотермических используется в составе шихты: металлизованные окатыши, хромистая руда, закись никеля и коксовый орешек [2].

В качестве плавильного агрегата используется стандартная круглая печь типа РКЗ с тремя самоспекающимися электродами. Печь работает в режиме сопротивления. Отличительной особенностью разработанного процесса является работа печи с закрытым колошником. При этом на поверхности ванны все время находится твердая шихта, уровень которой поддерживается постоянным за счет присадки шихты из печных бункеров. Процесс плавления идет непрерывно. Выпуск металла со шлаком производится периодически. Наличие столба твердой шихты на колошнике позволяет утилизировать тепло отходящих газов для предварительного восстановления оксидов железа и частично хрома. Печь работает на гарнисаже, что позволяет использовать ее непрерывно в течение 350 сут в году. Для работы печи в режиме сопротивления соотношение напряжения и тока должно

быть определенным:  $\frac{U}{\sqrt[5.33]{I}} = 14 - 17$ .

Используемые шихтовые материалы:

- металлизованные окатыши с содержанием пустой породы до 6% со степенью металлизации около 90%;
- хромистая руда фракцией 20-100 мм с содержанием 50% и железа общего 7%;
- закись никеля с содержанием никеля 76,8%;
- коксовый орешек с содержанием 85% С или тощий уголь.

Расчетный состав шихты при выплавке хромоникелевого и высокохромистого полупродукта приведен в **табл. 3, 4.**

Полупродукт, заливаемый в конвертер АКР, содержит 3,0-3,5% углерода и расчетное количество хрома и никеля. Часть углерода окисляется кислородом, подаваемым в конвертер АКР через верхнюю форму, что приводит к незначительному увеличению расхода кислорода на 10 м<sup>3</sup>. При окончательной обработке технологии в руднотермической печи возможно и дальнейшее понижение концентрации углерода в полупродукте.

**Таблица 3**

**Средний состав металлошихты при выплавке полупродукта для стали Х18Н10Т**

Шихта	Масса шихты, кг	Внесено, кг			
		Fe <sub>мет</sub>	Восстановится Fe из FeO	Cr	Ni
Металлизованные окатыши	774	644	46*	–	–
Хромистая руда	626	–	43*	183	–
Закись никеля	130	–	–	–	–
Коксовый орешек	103**	–	–	–	–
Всего	1633	644	89	183	103

\* Восстановится железа из хромистой руды и металлизованных окатышей.

\*\* Требуется 88 кг углерода для восстановления Cr и Ni.

**Таблица 4**

**Средний состав металлошихты при выплавке полупродукта для стали Х17**

Шихта	Масса шихты, кг	Внесено, кг	
		Fe <sub>мет</sub>	Восстановится Fe из FeO
Металлизованные окатыши	866	720	62,33*
Хромистая руда	597	–	45,38*
Коксовый орешек	73**	–	–
Всего	1536	720	108,00
		Cr	

\* Восстановится железа из хромистой руды и металлизованных окатышей.

\*\* Требуется 62 кг углерода для восстановления.

По результатам опытных плавок расход электроэнергии на выплавку легированного полупродукта (18% Cr, 10% Ni) составлял 2200-3000 кВт·ч на 1 т полупродукта [2]. Небольшие порции металла, выпускаемого из печи, ее неустановившийся тепловой режим в течение кратковременных кампаний привели к завышенному расходу электроэнергии. С учетом перехода на выплавку в крупной промышленной печи данный расход требует уточнения. Удельный расход электроэнергии – 1050 кВт·ч/т [2].

## Список литературы

- Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах. Челябинск: Металлургия, 1987. 175 с.
- Каскин К.К. Непрерывный переплав металлизованных и железорудных окатышей в руднотермической печи с получением полупродуктов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Металлургия. 2012. Вып. 18. №15(274). С. 82-85.

## References

- Morozov A.N. Modern production of steel in electric arc furnaces. Chelyabinsk: Metallurgy, 1987. 175 p.
- Kaskin K.K. Continuous remelting of metallized and iron-ore pellets in ore-smelting furnace to produce semi-product // Herald of South-Ural State University. Metallurgy. 18 series, №15(274) 2012. 82-85 p.

УДК 621.746.6

Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Гельчинский Б.Р., Рыбалко О.Ф., Лозовский Е.П., Коротин А.В.

## ИЗМЕНЕНИЕ РАБОЧЕГО СЛОЯ ФУТЕРОВКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНЛЗ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

**Аннотация.** Экспериментально исследовано изменение микроструктуры и химического состава магнезиальной футеровки промежуточного ковша МНЛЗ по шлаковому поясу. Вследствие поступления покровного шлака в капилляры футеровки протекают химические процессы с образованием новых фаз, ускоряющих её разрушение.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка стали, промежуточный ковш, футеровка, микроструктура, химический состав, фазовый состав.

Djuldina E.V., Selivanov V.N., Gelchinskiy B.R., Rybalko O.F., Lozovsky E.P., Korotin A.V.

### CHANGING THE WORKING LAYER OF LINING CASTER TUNDISH DURING CONTINUOUS CASTING OF STEEL

**Abstract.** Experimentally studied the change in micro-structure and chemical composition of magnesias refractory tundish for continuous casting slag belt. Due to receipt of the cover of slag in the capillaries lining the chemical processes take place with the formation of new phases, accelerating its destruction.

**Keywords:** continuous casting of steel, tundish lining, microstructure, chemical composition, phase composition.

Проведенное ранее исследование [1] показало, что при непрерывной разливке стали методом «плавку» происходит растворение огнеупорной футеровки промежуточного ковша в покровном шлаке, получаемом из шлакообразующих смесей. Установлено, что растворение футеровки из магнезиальной торкрет-массы существенно (в 2-3 раза) больше, чем футеровки из шамотных кирпичей. Так как шлак промежуточного ковша является основным, то более интенсивное растворение в нем магнезиальной футеровки требует специального изучения.

С использованием сканирующего спектрального микроскопа-анализатора QUANTA было проведено исследование микроструктуры и химического состава футеровки из магнезиальной торкрет-массы по месту «шлакового пояса» после разливки серии плавок низкоуглеродистой и низколегированной стали. Содержание основных химических компонентов в торкрет-массе и в покровном шлаке, образовавшемся при расплавлении шлакообразующей смеси в начале разливки серии плавок, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав материала футеровки и расплава шлакообразующей смеси

Материал	Содержание, %			
	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Футеровка (торкрет-масса)	87,5	2,5	4,1	–
Шлак	4,5	50,9	27,0	8,1

Визуально образец футеровки, взятый для исследования, состоял из двух слоев. Со стороны рабочей поверхности находился слой сероватого цвета толщи-

ной 11-12 мм. Остальная часть образца имела светло-коричневый цвет, характерный для магнезитовых огнеупоров. Очевидно, что сероватый слой – это футеровка, в которую при разливке проник шлак, а светло-коричневый слой – футеровка, не содержащая шлака. Условно будем называть их «ошлакованным» и «неошлакованным» слоями. Здесь необходимо отметить, что износ магнезиальной футеровки по «шлаковому поясу» за время разливки серии правок составляет 50-70 мм. Поэтому в данной работе объектом исследования был не весь «ошлакованный» слой футеровки, а лишь та его часть, которая сохранилась к концу разливки серии плавок.

Микроструктура «неошлакованного» слоя показана на рис. 1.

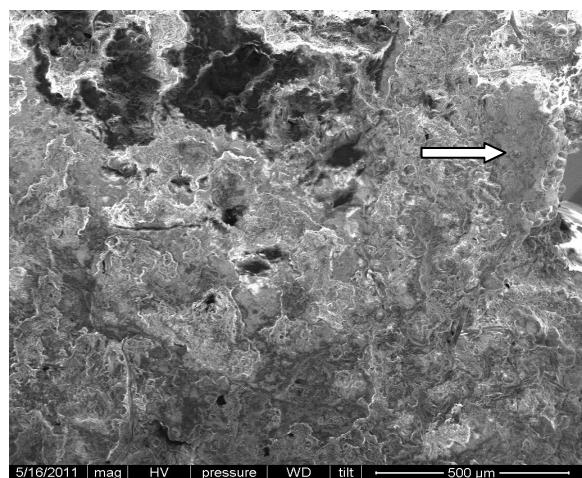


Рис. 1. Микроструктура «неошлакованной» футеровки на расстоянии 15,5-17 мм от рабочей поверхности

Футеровка состоит из относительно крупных (порядка долей миллиметра) частиц неправильной формы, между которыми расположены многочисленные поры и связывающие их капиллярные каналы (черные и темно-серые участки). Размер пор сильно колеблется – от сотых долей до 1-3 мм. Местами, например на участке, указанном стрелкой, различимы сферообразные частицы порошка торкрет-массы размером 0,02-0,03 мм.

Совершенно другую микроструктуру имеет «ошлакованный» слой футеровки (рис. 2). Здесь футеровка состоит из зёрен округлой формы, между которыми располагаются поры размером до 0,3 мм. Очевидно, что при разливке произошло заполнение жидким шлаком многочисленных пор и капиллярных каналов, первоначально имевшихся в футеровке. Незаполненными остались лишь отдельные поры, не связанные с общей системой капиллярных каналов.

Физико-химическое взаимодействие поступившего жидкого шлака с материалом торкрет-массы привело к появлению новых фаз, имеющих зернистое строение. Особенно четко зернистая структура проявляется вблизи рабочей поверхности, где хорошо видны скопления относительно крупных зёрен с четко обозначенной поверхностью раздела. В слое, удаленном от рабочей поверхности, зерна лучше просматриваются вокруг пор. На стенках пор и внутри них видны отдельные зерна с кристаллической огранкой.

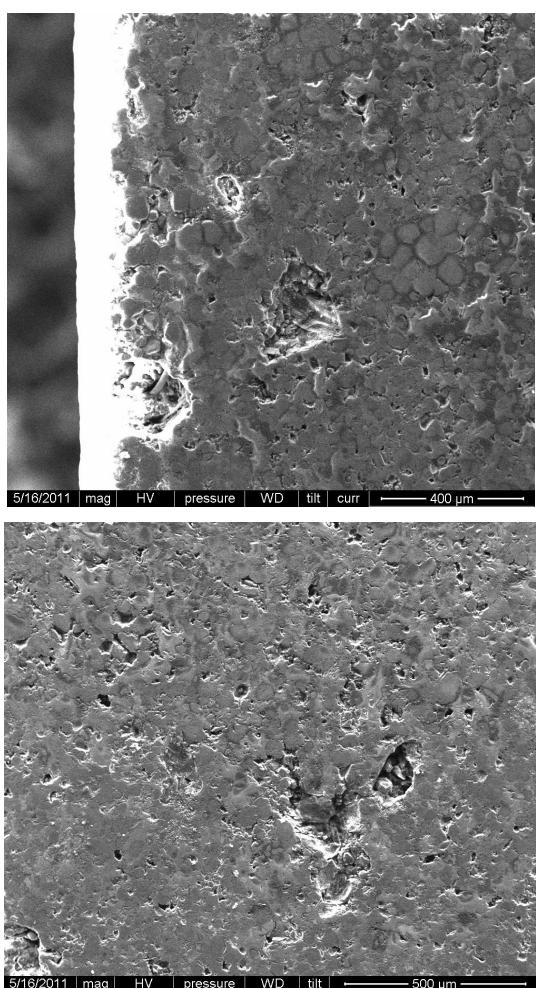


Рис. 2. Микроструктура футеровки у рабочей поверхности (вверху) и на расстоянии 3,0-4,5 мм от неё (внизу)

У границы с «неошлакованном» слоем микроструктура футеровки иная (рис. 3). Основное отличие от структуры других участков «ошлакованного» слоя заключается в наличии большого количества пор и слабом проявлении зернистой структуры огнеупорного материала. Поры, в основном, изолированы друг от друга. Внутри некоторых пор видны (см. стрелку) гранулы торкрет-массы, состоящие из нескольких частичек размером до 0,05 мм. Вероятно, на этом участке шлак заполнял, в основном, капиллярные каналы и лишь частично – наиболее крупные поры.

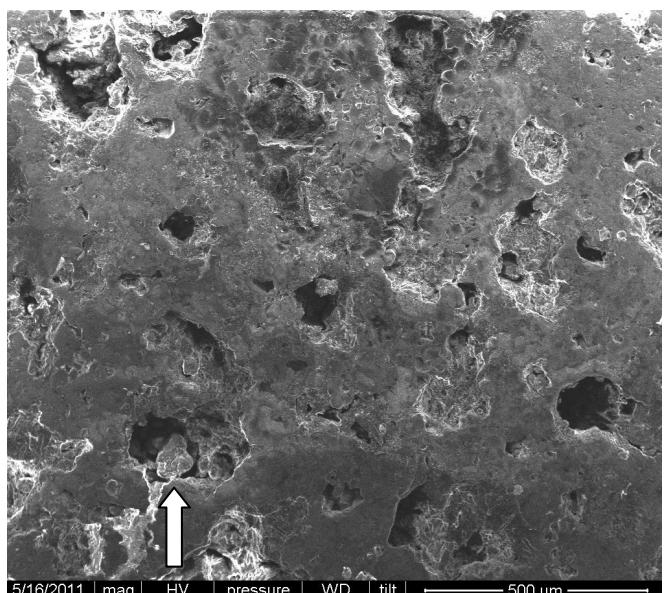


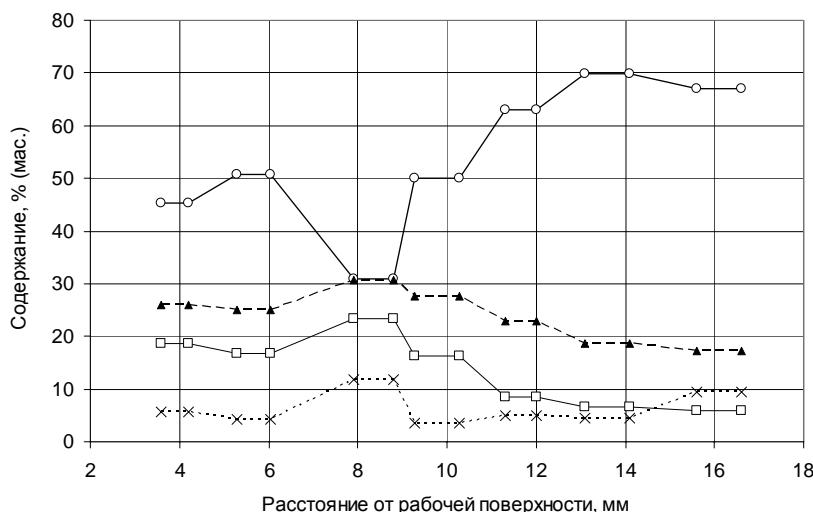
Рис. 3. Микроструктура футеровки у границы с «неошлакованным» слоем (11-12,5 мм от рабочей поверхности)

Одновременно с исследованием микроструктуры изучалось и изменение химического состава футеровки от рабочей поверхности вглубь образца тремя методами: «с площади», «в точке» и «по линии». Первый метод дает средний химический состав футеровки на площади 0,5-1,0 мм<sup>2</sup>, а два других – химический состав отдельных элементов микроструктуры.

Микроскоп-анализатор QUANTA производит химический анализ материалов энергодисперсионным методом, которым определяются массовые и атомные концентрации элементов, нормированные на 100%. Концентрация легких элементов, таких как кислород и углерод, определяется с большой погрешностью. При нормировании результатов анализа на 100% вносится существенное искажение и в результаты определения содержания более тяжелых элементов. Поэтому в данном исследовании результаты определения содержания элементов пересчитывались на их оксиды с нормализацией на 100% суммы основных оксидов материала футеровки и шлака: MgO, SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO и FeO. Присутствие других химических элементов (Na, K, Ti, Cr и P) при анализе выявлялось не всегда и в малых концентрациях. Поэтому данные о содержании этих элементов при обработке результатов анализа в расчет не принимали.

Изменение среднего содержания четырех основных компонентов футеровки, сумма которых состав-

ляет 90-95%, представленное на **рис. 4**, в целом, соответствует результатам исследования микроструктуры. В поверхностном слое толщиной до 10 мм содержание всех компонентов находится примерно на одном уровне. Это вполне объясняется с заполнением жидким шлаком почти всей системы пор и капиллярных каналов исходного торкрет-слоя. Некоторое отклонение от примерно постоянного состава для оксида магния в сторону снижения, а для остальных оксидов в сторону увеличения на удалении 8-9 мм от рабочей поверхности можно объяснить тем, что на этом участке футеровки находилась более крупная пора, которая была заполнена большим количеством шлака.



**Рис. 4. Изменение содержания MgO (○), SiO<sub>2</sub> (▲), CaO (□) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (×) в футеровке по данным химического анализа «с площади»**

Средний химический состав футеровки также мало изменяется и на удалении более 13 мм от рабочей поверхности. Постоянство химического состава этой части футеровки вполне понятно: здесь находится футеровка, в которую шлак вообще не поступал.

Между этими двумя слоями находится переходный слой промежуточного состава. Его появление можно объяснить частичным заполнением шлаком системы пор и капилляров футеровки, что вполне соглашается с макроструктурой, представленной на **рис. 3**.

Изложенные представления о формировании различных слоев футеровки были использованы для моделирования изменения среднего химического состава футеровки «ошлакованного» слоя. Содержание компонентов рассчитывали по формуле

$$K_{ij}^p = K_i^u (1 - \varphi_j) + K_i^w \varphi_j,$$

где  $K_{ij}^p$  – содержание  $i$ -го компонента в  $j$ -точке футеровки по расчету, %;  $K_i^u$  – содержание  $i$ -го компонента в «неошлакованном» слое футеровки, %;  $K_i^w$  – содержание  $i$ -го компонента в шлаке, %;  $\varphi_j$  – относительная масса шлака в  $j$ -точке футеровки.

При моделировании находили изменение массы шлака по толщине в «ошлакованном» слое, при котором наблюдалось наилучшее совпадение результатов расчета с опытными данными.

Наилучшее совпадение результатов расчетов с опытными данными получилось при следующих условиях:

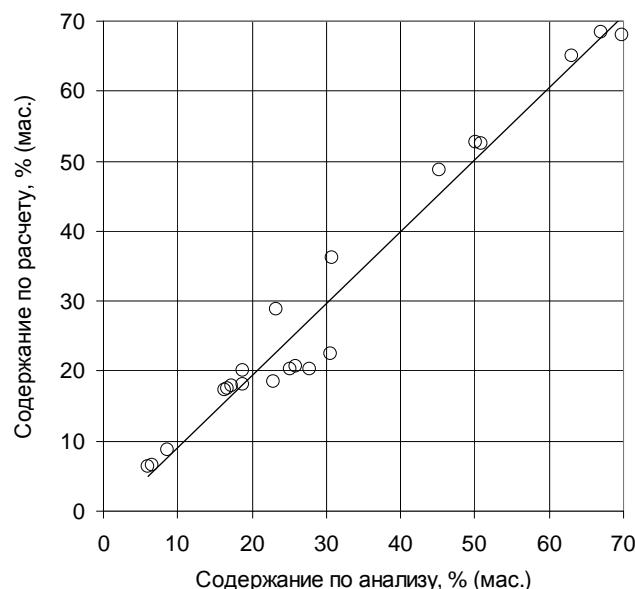
– футеровка пропитывается шлаком, появляющимся в самом начале разливки серии плавок при расплавлении шлакообразующей смеси;

– относительная масса шлака  $\varphi$  в «ошлакованном» слое в среднем составляет 0,27, причем на участке повышенной пористости она возрастает до 0,50, а на границе с «неошлакованным» слоем уменьшается до 0,06.

Сопоставление результатов моделирования при этих условиях с данными химического анализа приведено на **рис. 5**.

На **рис. 5** линия тренда практически совпадает с диагональю, соответствующей равенству результатов расчета и опытных данных. Таким образом, изменение среднего химического состава футеровки в «ошлакованном» слое вполне удовлетворительно описывается поступлением в него покровного шлака, образовавшегося в начале разливки в результате расплавления шлакообразующей смеси.

Результаты химического анализа материала футеровки «в точке» и «на линии» были использованы для идентификации компонентов микроструктуры по соотношению атомных концентраций элементов. Идентификация производилась на основе диаграммы состояния четверной системы CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO [2] и литературных данных о содержании других компонентов в природных минералах [3]. Результаты идентификации структурных составляющих материала футеровки представлены в **табл. 2**.



**Рис. 5. Сопоставление содержания компонентов футеровки по результатам расчета и химического анализа**

Идентификация компонентов структуры материала футеровки

Расстояние от поверхности, мм	Соотношение атомных концентраций		Дополнительные данные	Минералы-аналоги	
	Mg+Ca Si	Ca Mg+Ca		Название	Формула
0,5	1,57	0,58		Окерманит	$2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$
0,5	1,32	0,10		Протенстатит	$\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$
0,9	*	*		Периклаз	$\text{MgO}$
2,1	5,06	0,15		Периклаз	$\text{MgO}$
4,0	1,52	0,17		Протенстатит	$\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$
5,8	27,20	0,03	Mg:Al = 0,64	Шпинель	$\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$
8,0	2,23	0,30		Форстерит	$2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$
9,7	8,37	0,10	**	Магнезит	$\text{MgCO}_3$
12,0	11,79	0,02	**	Магнезит	$\text{MgCO}_3$
14,0	58,50	0,09	**	Магнезит	$\text{MgCO}_3$
16,0	3,09	0,17	**	Магнезит***	$(\text{Mg},\text{Ca})\text{CO}_3$

\* Кальций и кремний отсутствуют.

\*\* Присутствует углерод.

\*\*\* Магнезит доломитизированный.

Как видно из табл. 2, фазы материала футеровки имеют магнезиальную основу, причем в «ошлакованном» слое – это оксиды или силикаты магния. В их состав входят также некоторые другие оксиды, чаще всего оксид кальция. Лишь однажды в «ошлакованном» слое была обнаружена фаза, состоящая только из оксидов магния и алюминия – магнезиальная шпинель.

Химическим анализом было выявлено присутствие в значительном количестве углерода на расстоянии 10 и более миллиметров от рабочей поверхности (см. табл. 2). В материале торкрет-массы углерод отсутствовал. Можно предположить, что при нагреве промежуточного ковша перед разливкой газы, содержащие  $\text{CO}_2$ , легко проникали в футеровку. В тех её зонах, где температура не превышала 500–600°C, происходило образование карбонатов магния и кальция. Известно [4], что при низких температурах карбонаты этих элементов более устойчивы, чем их оксиды.

Из данных табл. 2 следует, что нет четкой связи между природой фазы (оксиды, силикаты, шпинель) и удалением от рабочей поверхности. Отсутствие такой связи проявилось и при исследовании микроструктуры футеровки. Например, группа крупных зерен в верхней части рис. 2 состоит из периклаза, а вокруг них находятся зерна протенстатита (энстатита).

Отсутствие четкой связи между фазовым составом футеровки и расстоянием от рабочей поверхности дает основание предположить, что разные фазы имеют раз-

личный механизм образования. Силикаты образуются при растворении материала торкрет-массы в жидким шлаке, поступившем в капилляры и поры футеровки, и последующей кристаллизации расплава, ставшего более тугоплавким. Тип силиката (метасиликат – протенстатит или ортосиликат – форстерит) зависит от количества шлака в поре или капилляре, т.е. от их объема. Вероятно таков же и механизм образования шпинели, с той лишь разницей, что шпинель образуется на конечной стадии процесса, когда оставшийся шлак значительно обогатится оксидом алюминия.

Крупные зерна периклаза образуются в результате рекристаллизации тех частиц торкрет-массы, которые в шлаке не растворились. При этом их состав может измениться вследствие диффузионного поступления атомов других элементов, в первую очередь, атомов кальция и кремния.

Основная фаза вблизи рабочей поверхности футеровки – это протенстатит. Чистый протенстатит  $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$  плавится

инконгруэнтно при температуре 1557°C. Присутствие примесей понижает температуру его плавления. Металлы в промежуточном ковше при разливке обычно имеет температуру 1540–1560°C. Такую же температуру имеет и рабочая поверхность футеровки. Материал рабочего слоя футеровки по «шлаковому поясу» при такой температуре будет плавиться и переходить в шлак. При расплавлении протенстатита в шлак будет также переходить и тугоплавкая фаза футеровки – периклаз. Это обстоятельство, по-видимому, и является причиной повышенного износа футеровки, изготовленной из магнезиальной торкрет-массы.

#### Список литературы

1. Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Лозовский Е.П. Формирование шлака в промежуточном ковше МНЛЗ // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2009. №4 (28). С. 26-29.
2. Schlackenatlas // Düsseldorf: Verlag M.B.H. 1981. 282 р.
3. Дир У.А., Хаун Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т.1. Ортосиликаты и кольцевые силикаты. М.: Мир, 1965. 372 с.
4. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч.1. М.: Металлургиздат, 1954. 601 с.

#### References

1. Djuldina E.V., Selivanov V.N., Lozovsky E.P. Slag formation in a tundich of a continuous casting machine // Vestnik MSTU named after G.I. Nosov. 2009. № 4 (28). P. 26-29.
2. Schlackenatlas // Düsseldorf: Verlag M.B.H. 1981. 282 p.
3. Dir U.A., Haun R.A., Zusman Dj. Породообразующие минералы. V.1. Ортосиликаты и кольцевые силикаты. M.: Mir, 1965, 372 c.
4. Esin O.A., Geld P.V. Physical chemistry of pirometallurgy processes. V.1. M.: Metallurgizdat, 1954. 601 p.

УДК 621.746.5.047

Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н.

## ИЗУЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СЛЯБОВОЙ ЗАГОТОВКИ, ОТЛИТОЙ НА КРИВОЛИНЕЙНОЙ МНЛЗ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ УЧАСТКОМ

**Аннотация.** Повышенный перегрев металла в промежуточном ковше МНЛЗ вызывает снижение качества макроструктуры непрерывнолитых слябов и производимых из них толстых горячекатанных листов.

**Ключевые слова:** непрерывнолитой сляб, качество макроструктуры, перегрев металла в промежуточном ковше.

Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N.

### THE QUALITY SLAB BILLET, CASTED ON CURVED CCM WITH VERTICAL SECTION, IN STUDIED

**Abstract.** Metal's increased overheating in caster tundish CCM causes reduced quality macrostructure of continuously produced slabs and made of them thick hot-rolled sheets.

**Keywords:** continuous casting slab, quality macrostructure, overheating of the metal in the tundish.

В ОАО «Уральская Сталь» слябовая непрерывнолитая заготовка с размерами поперечного сечения 190, 270×1200 мм отливается на одноручевой МНЛЗ фирмы «SMS Demag». Машина криволинейного типа с вертикальным участком имеет базовый радиус 10,5 м и металлургическую длину 30,305 м. Вместимость стальной разливочного и промежуточного ковшей равняется 120 и 25 т. Высота вертикального кристаллизатора с поддерживающей роликовой системой на выходе составляет 900 мм. Зона вторичного охлаждения состоит из 17 секций. В 2011 году на данной МНЛЗ было отлито 883 тыс. т слябов в основном из стали марок 09Г2С и 10ХСНДА, а также класса прочности К52-1. При этом отбраковка горячекатаного листа толщиной 8-50 мм по дефектам непрерывнолитого сляба толщиной 190 и 270 мм оказалась значительной и составила соответственно 1,98 и 4,76% (отн.). Таким образом, наиболее проблемным оказалось получение качественного листа из слябов толщиной 270 мм. При анализе составляющих отбраковки горячекатаного листа, произведенного из слябов толщиной 270 мм, был установлен значительный вклад ультразвукового контроля проката, например, для листов из стали марки 09Г2С – в 45% случаев. Качество листового проката во многом определяется качеством исходной непрерывнолитой заготовки. Поэтому в работе было изучено качество слябовой непрерывнолитой заготовки толщиной 270 мм.

С этой целью был проанализирован массив производственных данных около 1300 плавок стали марок 09Г2С, 10ХСНДА и класса прочности К52-1. Параметры плавок представлены в **табл. 1**.

Из приведенной в таблице информации следует, что разливаемая на МНЛЗ сталь приведенного сортамента имела достаточно высокое содержание растворенных газов: азота – до 0,012% и водорода – до 9,2 ppm. Температура металла в промежуточном ковше находилась в интервале от 1519 до 1550°C, при этом скорость вытягивания слябов из кристаллизатора изменялась на 0,2 м/мин.

Величина перегрева стали марок 09Г2С, 10ХСНДА и класса прочности К52-1 над средними значениями температуры ликвидус равнялась соот-

ветственно 8-34, 9-36 и 5-34°C при допустимых технологической инструкцией значениях 10-25°C. На **рис. 1** представлено частотное распределение величин перегрева стали разного химического состава в промежуточном ковше МНЛЗ.

Наиболее часто, примерно в 28%, случаев наблюдалось превышение величины перегрева над его максимальным регламентированным значением при разливке стали марки 10ХСНДА и в менее 10% случаев – при разливке стали марки 09Г2С и класса прочности К52-1.

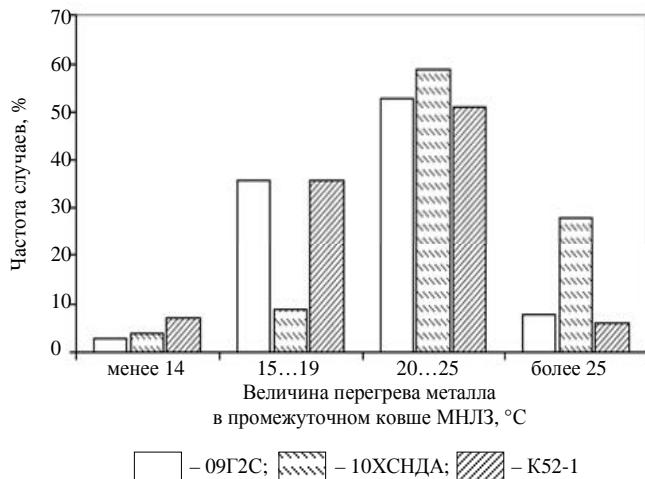
Таблица 1

#### Параметры плавок при отливке слябов сечением 270×1200 мм

Параметр	Марка стали или класс прочности		
	09Г2С	10ХСНДА	K52-1
Количество плавок, шт.	344	438	521
Содержание в металле: азота, % водорода, ppm	0,006–0,012 4,8–9,1	0,006–0,012 4,6–9,2	0,006–0,012 5,2–8,3
Температура металла в промежуточном ковше, °C	1521–1547 1533	1519–1546 1533	1521–1550 1535
Температура ликвидус (среднее значение), °C	1513	1510	1516
Величина перегрева металла в промежуточном ковше, °C	8–34 20	9–36 23	5–34 19
Скорость вытягивания сляба из кристаллизатора, м/мин		0,8–1,0 0,90	

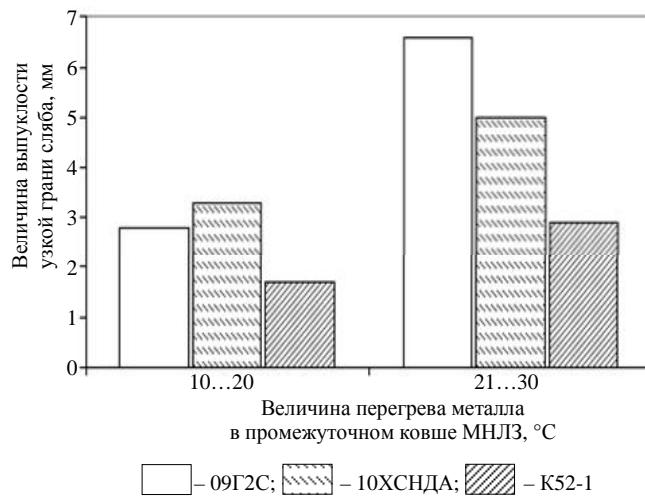
\* В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение

Такая высокая температура разливаемого металла могла явиться причиной ухудшения качества отливаемых слябовых заготовок в том случае, если не было произведено соответствующее снижение скорости вытягивания слябов из кристаллизатора.



**Рис. 1. Частотное распределение перегрева стали разного химического состава над температурой ликвидус в промежуточном ковше МНЛЗ**

При анализе качества металла угловых темплетов, вырезанных из слябов толщиной 270 мм 303 плавок, было установлено, что 65% (отн.) всех темплетов имеют выпуклость узких граней заготовок величиной 2-12 мм. На **рис. 2** приведена зависимость величины выпуклости узких граней слябов от перегрева стали в промежуточном ковше МНЛЗ.



**Рис. 2. Зависимость величины выпуклости узкой грани слябовых непрерывнолитых заготовок толщиной 270 мм от перегрева стали разных марок и класса прочности в промежуточном ковше МНЛЗ**

Из представленных данных видно, что с превышением величины перегрева металла в промежуточном ковше над температурой ликвидус возрастает и выпуклость узких граней заготовки. Так, при увеличении перегрева металла в среднем на 10°C выпуклость узких граней слябов возрастает наиболее сильно при разливке стали марки 09G2С – примерно в 2,4 раза и несколько меньше – в 1,5 и 1,7 раза при разливке стали марки 10XCHDA и класса прочности К52-1.

Известно [1-3], что выпуклость узких граней непрерывнолитой заготовки является внешним признаком увеличения степени развития целого ряда

внутренних дефектов: осевой рыхлости, осевой химической неоднородности, осевых трещин, трещин, перпендикулярных разным граням заготовки. Анализ качества макроструктуры 176 темплетов из слябов толщиной 270 мм (**табл. 2**) в целом подтвердил сделанный прогноз.

**Таблица 2**  
**Результаты оценки макроструктуры слябов толщиной 270 мм**

Дефект*	Марка стали или класс прочности	Величина перегрева металла, °C	
		10–20	более 20
ОР	09G2С	<u>0,5–1,5</u> 1,20	<u>1,0–2,0</u> 1,70
	10XCHDA	<u>1,0–1,5</u> 1,22	<u>1,0–1,5</u> 1,33
	K52-1	<u>0,5–1,5</u> 1,20	<u>1,0–2,5</u> 1,50
ОХН	09G2С	<u>0,5–1,0</u> 1,0	<u>1,0–1,5</u> 1,30
	10XCHDA	<u>0,5–1,5</u> 1,07	<u>1,0–2,0</u> 1,22
	K52-1	<u>0,5–1,0</u> 0,78	<u>0,5–2,0</u> 1,15
ОТ	09G2С	<u>0,5–1,0</u> 0,6	<u>0,5–1,0</u> 0,8
	10XCHDA	<u>0–1,0</u> 0,43	<u>0–1,0</u> 0,53
	K52-1	<u>0–1,0</u> 0,39	<u>0–1,0</u> 0,52
ТП <sub>у</sub>	09G2С	<u>0,5–1,0</u> 0,8	<u>0,5–1,5</u> 1,15
	10XCHDA	<u>0,5–1,5</u> 0,76	<u>0,5–1,5</u> 0,94
	K52-1	<u>0,5–1,0</u> 0,76	<u>0,5–1,5</u> 0,87
ТП <sub>ш</sub>	09G2С	<u>0,5–1,0</u> 0,75	<u>0,5–1,5</u> 0,95
	10XCHDA	<u>0,5–1,5</u> 0,87	<u>0,5–1,5</u> 1,11
	K52-1	<u>0–1,5</u> 0,78	<u>0–1,5</u> 0,95

\* ОР – осевая рыхлость; ОХН – осевая химическая неоднородность; ОТ – осевые трещины; ТП<sub>у</sub> – трещины, перпендикулярные узким граням сляба; ТП<sub>ш</sub> – трещины, перпендикулярные широким граням сляба.

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

Данные **табл. 2** свидетельствуют о том, что при разливке перегретого металла возрастает степень развития всех изученных дефектов: осевой рыхлости, осевой химической неоднородности, трещин, перпендикулярных узким и широким граням сляба. Так, при разливке металла с перегревом более 20°C над температурой ликвидус по сравнению с металлом, имею-

щим перегрев 10-20°C, осевая рыхлость увеличивается в среднем на 42 и 25% (отн.) для стали марки 09Г2С и класса прочности К52-1, а осевая химическая неоднородность возрастает на 30 и 47% (отн.). На 44% (отн.) увеличивается степень развития трещин, перпендикулярных узким граням, в слябах из стали марки 09Г2С и на 28% (отн.) степень развития трещин, перпендикулярных широким граням, в заготовках из стали марки 10ХСНДА.

Средние значения всех приведенных дефектов макроструктуры слябов толщиной 270 мм, отлитых из стали разного химического состава с перегревом 10-20°C в промежуточном ковше, меньше, чем при разливке металла с величиной перегрева более 20°C. Для оценки статистической значимости различия в степени развития дефектов была проведена проверка гипотезы о равенстве средних значений выборок.

В табл. 3 приведены данные сравнения средних значений степени развития внутренних дефектов слябов, отлитых из металла с разным перегревом.

Из приведенных данных видно, что все расчетные значения t-критерия превышают его критические величины ( $t_{0,05}$ ). Это позволяет сделать вывод о том, что гипотеза о равенстве средних значений осевой рыхлости, осевой химической неоднородности, осевых трещин, трещин, перпендикулярных узким граням сляба, и трещин, перпендикулярных широким граням заготовки, для выборок с разной величиной перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ отвергается. Следовательно, с вероятностью 95% можно утверждать, что увеличение перегрева металла в промежуточном ковше в среднем на 10°C вызывает статистически значимое возрастание степени развития выше-перечисленных внутренних дефектов в непрерывнолитых слябах толщиной 270 мм.

Большая степень развития внутренних дефектов непрерывнолитых заготовок, отлитых из перегретого выше требуемого предела металла, вызывает и повышенную отбраковку толстого горячекатаного листа. На рис. 3 приведены данные об отбраковке листов, прокатанных из слябов разных марок с различным перегревом в промежуточном ковше.

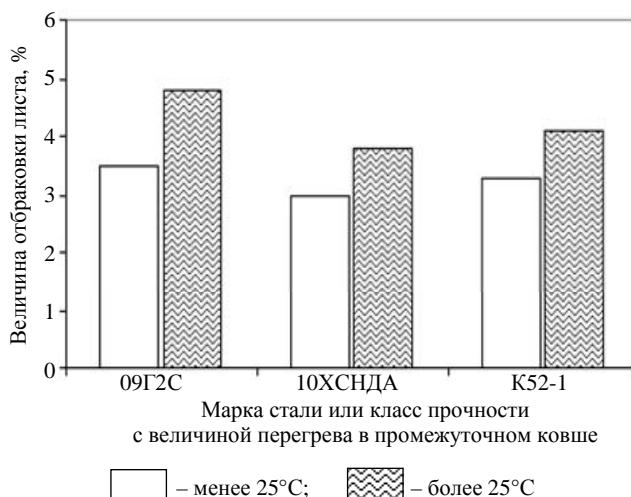


Рис. 3. Данные по отбраковке толстых горячекатанных листов из непрерывнолитых слябов толщиной 270 мм

Величина отбраковки толстых горячекатанных листов, прокатанных из слябов толщиной 270 мм из стали разных марок, имевшей перегрев в промежуточном ковше МНЛЗ более 25 °C над температурой ликвидус, возрастает на 0,8-1,2% (абс.). Основными причинами отбраковки листов являются внутренние несплошности, обнаруживаемые при ультразвуковом контроле листов, а также рвы и трещины.

**Таблица 3**  
**Сравнение степени развития внутренних дефектов слябов, отлитых из стали с разной величиной перегрева в промежуточном ковше МНЛЗ**

Параметр	Величина перегрева металла в промежуточном ковше, °C					
	10-20	более 20	10-20	более 20	10-20	более 20
Марка стали или класс прочности	09Г2С			10ХСНДА		
Количество темплетов, шт.	74	12	10	35	29	16
ОР:						
Среднее значение	1,20 0,069	1,70 0,097	1,22 0,081	1,33 0,063	1,20 0,082	1,50 0,10
F-критерий	1,40		1,28		1,22	
F <sub>0,05</sub>	1,92		2,17		2,04	
t-критерий	2,53		2,55		2,42	
t <sub>0,05</sub>	1,99		2,02		2,02	
ОХН:						
Среднее значение	1,0 0,083	1,3 0,046	1,07 0,111	1,22 0,079	0,78 0,061	1,15 0,129
F-критерий	1,83		1,41		2,12	
F <sub>0,05</sub>	2,48		2,17		2,04	
t-критерий	2,56		2,45		2,46	
t <sub>0,05</sub>	1,99		2,02		2,07	
ОТ:						
Среднее значение	0,6 0,060	0,8 0,106	0,43 0,058	0,53 0,079	0,39 0,042	0,52 0,132
F-критерий	1,77		1,35		3,16	
F <sub>0,05</sub>	1,92		2,85		2,04	
t-критерий	2,31		2,27		2,33	
t <sub>0,05</sub>	1,99		2,02		2,09	
ТП <sub>У</sub> :						
Среднее значение	0,8 0,123	1,15 0,097	0,76 0,067	0,94 0,076	0,76 0,081	0,87 0,133
F-критерий	1,27		1,13		1,65	
F <sub>0,05</sub>	2,48		2,85		2,04	
t-критерий	2,10		2,35		2,11	
t <sub>0,05</sub>	1,99		2,02		2,02	
ТП <sub>ш</sub> :						
Среднее значение	0,75 0,090	0,95 0,112	0,87 0,067	1,11 0,090	0,78 0,091	0,95 0,129
F-критерий	1,24		1,35		1,42	
F <sub>0,05</sub>	1,92		2,85		2,04	
t-критерий	2,15		2,19		2,16	
t <sub>0,05</sub>	1,99		2,02		2,02	

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что перегрев металла в

промежуточном ковше МНЛЗ выше допустимого технологической инструкцией верхнего предела ведет к снижению качества макроструктуры непрерывнолитых слябов и производимых из них горячекатанных листов.

**Список литературы**

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Смирнов А.Н. Производство стали. Т.4. Непрерывная разливка металла. М.: Технотехник, 2009. 528 с.
2. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
3. Мельничук Е.А., Королев А.С., Селиванов В.Н. Анализ деформации затвердевающей оболочки непрерывнолитого сляба // Теория и тех-

нология metallurgical production: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. Вып. 11. Magnitogorsk: Изд-во Magnitogorsk. гос. техн. ун-та, 2011. С 83-87.

**References**

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.N. Production of steel. V4. Continuous casting of metals. M.: Heat Engineering. 2009. 528 p.
2. Smirnov A.N., Kuberskaya S.V., Stepan E.V. Continuous casting: Donetsk: Donetsk National Technical University. 2011. 482 p.
3. Melnychuk E.A. Korolev A.S., Selivanov V.N. Analysis of strain hardening shell slab continuous casting // Theory and technology of metallurgical production: Mezhduregion. Sat scientific. mp. / Ed. V.M. Kolokoltsev. No. 11. Magnitogorsk Magnitogorsk Acad. State. tech. University Press, 2011. P. 83-87.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.778

Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Чернова Т.В.

## УСЛОВИЯ УЛУЧШЕННОГО (СМЕШАННОГО) РЕЖИМА ТРЕНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

**Аннотация.** Предложена методика оценки режима смешанного трения при волочении, коэффициент трения для которого находится в пределах коэффициента жидкостного трения – коэффициента граничного трения. Из условий нагнетающей способности одинарной волоки определена толщина слоя смазки в начале зоны деформации.

**Ключевые слова:** волочение, волочильный инструмент, гидродинамическое трение, смазочный слой, коэффициент трения

Kholmogorov G.L., Trofimov V.N., Chernova T.V.

### IMPROVED (COMBINED) FRICTION RATE CONDITIONS BY DRAWING

**Abstract.** Method of combined friction rate assessment by drawing is offered. Friction coefficient of this rate is in scope «coefficient of friction of complete lubrication – coefficient of friction of boundary lubrication». From the conditions of forcing capability of single die the lubrication layer depth in the beginning of deformation zone is defined.

**Keywords:** drawing, drawing tool, hydrodynamic friction, lubricating layer, coefficient of friction.

В технологических процессах обработки металлов давлением большую роль играет внешнее (контактное) трение между обрабатываемым материалом и технологическим инструментом [1]. Особенno велика роль трения при волочении, на преодоление которого расходуется значительная часть (40-50%) общего усилия волочения. Силы трения приводят к износу волочильного инструмента, налипанию протягиваемого материала на волочильный инструмент, ограничению скоростей волочения из-за чрезмерного разогрева контактных поверхностей изделия и волочильного инструмента.

Наиболее эффективным путем решения проблемы снижения сил трения при волочении является реализация условий жидкостного трения за счет гидродинамического эффекта технологической смазки, так называемое гидродинамическое волочение [2]. Отличительной особенностью режима гидродинамической смазки является существование достаточно толстого разделительного слоя смазки между поверхностями обрабатываемого изделия и инструмента. Смазочный слой при этом имеет толщину, превышающую высоту микронеровностей поверхностей деформируемого тела и инструмента, обеспечивая разделение поверхностей и механически экранируя трущиеся поверхности от контакта.

$$h_0 \geq R_z^3 + R_z^u, \quad (1)$$

где  $R_z^u$ ,  $R_z^u$  – средняя высота микронеровностей заготовки и инструмента соответственно.

Учитывая, что для волочильного инструмента  $R_z^3 >> R_z^u$ , можно условие реализации гидродинамического трения (1) записать в следующем виде:

$$h_0 \geq R_z^3. \quad (2)$$

Наряду с положительным влиянием режима жидкостного трения на основные технологические параметры процесса волочения следует отметить, что при гидродинамическом волочении качество поверхности изделий несколько уступает по сравнению с волочением в граничном режиме трения, поскольку волочильный инструмент за счет механического экранирования контактных поверхностей не производит сглаживающего действия на микронеровности протягиваемого изделия. Данный момент зачастую является сдерживающим фактором при использовании процесса гидродинамического волочения. Следует отметить также, что наличие излишнего слоя смазки на протягиваемой заготовке может оказаться нежелательным при проведении промежуточных термообработок в случае многократного волочения. В данном случае на поверхности заготовки могут сохраняться продукты сгорания смазки, снижающие качество поверхности изделий и затрудняющие последующее волочение. При этом может оказаться рациональным реализация улучшенного трения с пониженным коэффициентом трения по сравнению с коэффициентом граничного трения.

В качестве параметра, определяющего коэффициент улучшенного трения, предлагается использовать толщину смазочного слоя в очаге деформации, полученную в результате решения гидродинамической задачи течения смазки в рабочем конусе волочильного инструмента. Коэффициент улучшенного трения определяется при этом следующей зависимостью:

$$f = f_{ep} - (f_{ep} - f_{sc}) \frac{h_0}{R_z^3}, \quad (3)$$

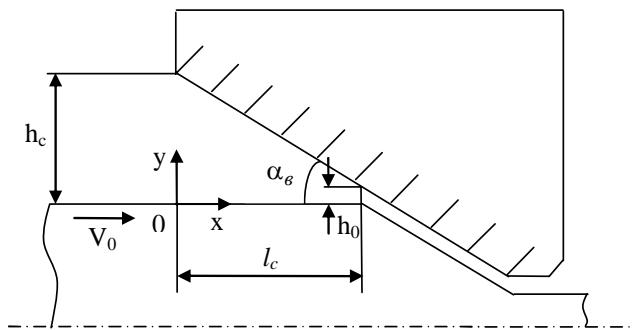
где  $f_{ep}$  – коэффициент граничного трения;  $f_{ж}$  – коэффициент трения, соответствующий жидкостному режиму смазки.

В соответствии с формулой (3) при  $h_0 = 0$  реализуется режим граничного трения ( $f = f_{ep}$ ), при  $h_0 = R_z$  соответственно режим жидкостного трения ( $f = f_{ж}$ ).

Учитывая то, что  $f_{ep} \gg f_{ж}$ , соотношение (3) упрощается и имеет вид

$$f = f_{ep} \left( 1 - \frac{h_0}{R_z^3} \right). \quad (4)$$

Толщина слоя смазки в зоне деформации может быть рассчитана с учетом закономерностей течения смазки в рабочем конусе волочильного инструмента (см. **рисунок**)



**Рабочий конус волочильного инструмента**

Течение применяемых при волочении жидких смазок описывается дифференциальным уравнением [2]

$$\frac{d^2V_x}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (5)$$

где  $V_x$  – осевая составляющая скорости течения смазки в рабочем конусе волоки;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\frac{dp}{dx}$  – градиент давления в слое смазки в направлении волочения.

Интегрируя дифференциальное уравнение дважды по  $y$ , получим

$$V_x = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y^2 + c_1 y + c_2.$$

Постоянные интегрирования  $c_1$  и  $c_2$  определяются из граничных условий прилипания смазки к поверхностям протягиваемого изделия и волочильного инструмента  $V_{x|y=0} = V_0$ ,  $V_{x|y=h} = 0$ .

После определения постоянных интегрирования получим распределение скорости течения смазки в смазочном слое

$$V_x = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y(y-h) + V_0 \left( 1 - \frac{y}{h} \right). \quad (6)$$

Градиент давления смазки определяется из условия постоянства расхода смазки по длине смазочного слоя

$$q = \int_0^h V_x dy = const.$$

После подстановки соотношения (6) интегрирования и упрощений получим

$$dp/dx = 6\mu V_0 (1 - 2\bar{q})/h^2, \quad (7)$$

где  $\bar{q} = q/V_0 h$  – объемный расход смазки.

При волочении в качестве смазки находят широкое применение минеральные масла, вязкость которых определяется давлением в смазочном слое по формуле

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha \cdot p}, \quad (8)$$

где  $\mu_0$  – динамическая вязкость при атмосферном давлении;  $\alpha$  – пьезоэффектив вязкости.

Кроме минеральных масел в качестве смазки применяют эмульсии, вязкость которых с давлением не изменяется [2]

$$\mu(p) = const. \quad (9)$$

Для минеральных масел с зависимостью вязкости от давления (8) решение дифференциального уравнения (7) после определения постоянной интегрирования из условия  $p_{|x=0} = 0$  получим распределение давления смазки в рабочем конусе волоки, которое дает для входа в зону деформации

$$p = -\frac{1}{\alpha} \ln \left( 1 - \frac{3\alpha\mu_0 V_0}{h_0 \operatorname{tg} \alpha_e} \right). \quad (10)$$

Из соотношения (10) определяется толщина слоя смазки на входе в зону деформации [2]

$$h_0 = \frac{3\alpha\mu_0 V_0}{\operatorname{tg} \alpha_e (1 - e^{-\alpha p_{ex}})}, \quad (11)$$

где  $p_{ex}$  – давление смазки на входе в зону деформации.

Величина  $p_{ex}$  определяется из условия пластичности для входящей в зону деформации проволоки

$$p_{ex} = \sigma_s - \sigma_0, \quad (12)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации протягиваемого материала;  $\sigma_0$  – напряжение противонатяжения при волочении.

С учетом соотношения (12) выражение (11) примет вид

$$h_0 = \frac{3\alpha\mu_0 V_0}{\operatorname{tg} \alpha_e [1 - e^{-\alpha(\sigma_s - \sigma_0)}]}. \quad (13)$$

Для эмульсий с постоянной вязкостью от давления (9) решение дифференциального уравнения (7)

дает распределение давления по длине смазочного слоя, определяющееся зависимостью

$$p = \frac{6\mu_0 V_0}{(h_c - xtg\alpha_e)h_c} \cdot x. \quad (14)$$

Уравнение (14) при  $x = l_c$  определяет давление в слое смазки к началу зоны деформации

$$p_{ex} = \frac{6\mu_0 V_0}{h_0 h_c} \cdot l_c, \quad (15)$$

где  $l_c$  – свободная длина рабочего конуса волоки.

Из геометрических соотношений следует

$$l_c = (h_c - h_0) / \operatorname{tg}\alpha_e.$$

Подставляя данное соотношение в выражение (15), после упрощений получим

$$p_{ex} = \frac{6\mu_0 V_0}{h_0 \operatorname{tg}\alpha_e}, \quad (16)$$

откуда следует

$$h_0 = \frac{6\mu_0 V_0}{p_{ex} \operatorname{tg}\alpha_e}.$$

С учетом условия пластичности для входа в зону деформации имеем окончательно

$$h_0 = \frac{6\mu_0 V_0}{\operatorname{tg}\alpha_e (\sigma_s - \sigma_0)}. \quad (17)$$

При известных реологических характеристиках

смазки ( $\alpha, \mu_0$ ) и технологических параметров ( $V_0, \operatorname{tg}\alpha_e, \sigma_s, \sigma_0$ ) рассчитывается значение  $h_0$  и по формуле (4) для известного значения средней высоты микронеровностей поверхности заготовки  $R_z^3$  оценивается коэффициент трения улучшенного (смешанного) режима смазки при волочении. Найденное значение коэффициента трения улучшенного режима может быть использовано в расчетах энергосиловых режимов процесса волочения [3].

### Выводы

- Предложена аналитическая зависимость для определения коэффициента трения улучшенного (смешанного) режима смазки при волочении.
- Определена нагнетающая способность смазочного конуса рабочей волоки. Получена формула для определения толщины слоя смазки на входе в зону деформации при волочении, позволяющая оценить коэффициент трения улучшенного (смешанного) режима смазки.

### Список литературы

- Колмогоров Г.Л., Ковалев А.Е., Бажин А.А. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. №9. С. 64-65.
- Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
- Перлин И.Л., Ерманюк М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 448 с.

### References

- Kholtmogorov G.L., Kovalev A.E., Bazhin A.A. // Izv. Vuzov. Chernaja metallurgija. 2002. №9. P. 64-65.
- Kholmogorov G.L. Hydrodynamic lubrication by metal forming. M.: Metal-lurgija, 1986. 168 p.
- Perlin I.L., Ermanjuk M.Z. Drawing theory. M.: Metallurgija, 1971. 448 p.

УДК 621.778

Харитонов В.А., Столяров А.Ю.

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ НА РАЗРУШЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

**Аннотация.** В работе с помощью математического моделирования в программной среде «DEFORM» рассмотрено влияние основных параметров процесса волочения, таких как форма очага деформации и коэффициент трения на разрушение проволоки. За основной показатель разрушения принят критерий M.G. Cocroft–D.J. Latham «C». Полученные результаты моделирования подтверждены экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** проволока высокоуглеродистая, волочение, очаг деформации, разрушение, критерий, эксперимент, моделирование, технология, совершенствование.

Haritonov V.A., Stolyarov A.Y.

## EFFECT OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE DEFORMATION ZONE ON DESTRUCTION OF THE WIRE DURING DRAWING

**Abstract.** In the work with the help of mathematical modeling software environment «DEFORM» estimated effect of the main parameters of the process of drawing, such as the form of the deformation zone and the coefficient of friction on the destruction of the wire. The main indicators of destruction adopted criterion MG Cocroft–D.J. Latham «C». The results are confirmed by modeling the experimental data.

**Keywords:** high carbon wire, drawing, deformation, destruction, criterion, experiment, simulation, technology, improvement.

По мнению известного учёного в области обработки металлов давлением А.А. Преснякова: «Теория любого технического процесса формоизменения ме-

таллов сводится к теории очага деформации, которая позволяет с определённой точностью оценивать нагрузки на оборудование, энергетические затраты на

оборудование и разрабатывать конструкцию инструмента (а следовательно, и задавать строение очага деформации) для обеспечения высокого качества изделий. Таким образом, изучение очага деформации представляет собой необходимую степень совершенствования процесса обработки металлов давлением» [1].

Большое внимание этим вопросам уделено при исследовании процесса прокатки, а полученные результаты опубликованы во множественных печатных изданиях различного уровня, широко применяются в практике прокатного производства и включены практически во все учебники по теории прокатки.

В качестве геометрического параметра очага деформации (далее по тексту ОД) при прокатке принят коэффициент формы  $l_d/h_{cp}$ , представляющий собой отношение длины дуги контакта к средней толщине полосы в очаге деформации. Этот коэффициент определяет, прежде всего, характер распределения деформаций по высоте полосы и другие параметры процесса [2].

При волочении в монолитной волоке характерной геометрической величиной для очага деформации является отношение  $l_d/d_{cp} = 2 l_d (d_0 + d_1)$  [3]. В этом же источнике отмечается, что деформация при этом преимущественно происходит в относительно коротком очаге.

Отечественная теория волочения изучением этого вопроса практически не занималась, уделяя внимание таким факторам, как рабочий угол волоки, единичное обжатие. Соответственно не нашёл применения такой подход в отечественной практике при расчёте маршрутов волочения. Использовать же результаты, полученные в теории прокатки, для анализа процессов волочения в монолитной волоке сложно, т.к. эти процессы имеют различные способы подвода энергии в очаг деформации, у них разные контактные условия, что в итоге вызывает большое различие их напряжённо-деформированного состояния в геометрически подобных ОД.

За рубежом в качестве геометрического параметра формы ОД принято использовать показатель  $\Delta = l/L$ , где  $l$  – длина дуги, перпендикулярной контактной линии инструмента в центре зоны деформации;  $L$  – длина контактной линии инструмента. Для волочения круглой проволоки в монолитной волоке с коническим ОД этот показатель определяется по следующему выражению [4]:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1 - r})^2, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – полуугол рабочей зоны волоки, рад;  $r$  – величина относительной деформации;  $r = 1 - (\frac{d_1}{d_0})^2$ .

При волочении формирование напряжённо-деформированного состояния, определяющего силовые параметры процесса, технологические свойства проволоки и характер её разрушения во многом зависит от параметров ОД. Анализ современных публикаций показывает, что данный круг вопросов сравнительно глубоко изучался сотрудниками лаборатории

вычислительной техники (AGH University of Science and Technology, Poland, Krakow) и, в частности, А. Милениным и др. [5-7] с помощью разработанного ими же программного комплекса «Drawing 2D», а также «Deform», «Abacus» и «Forge-2». При однократном и многократном волочении высокоуглеродистой проволоки было изучено влияние угла волочильного инструмента, степени единичной деформации и коэффициента трения на характер напряжённого состояния ОД и величину критерия разрушения «С», который был предложен M.G. Cockcroft–D.J. Latham [8]. Критерий «С» является показателем предельной деформируемости металла и основан на оценке полной работы деформации на единицу объёма в точке разрушения.

$$C = \int_{-\bar{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  – накопленная эффективная деформация;  $\sigma^*$  – максимальное главное напряжение;  $\bar{\sigma}$  – эффективное напряжение по Мизесу.

При моделировании получены следующие результаты:

- максимальное значение критерий разрушения принимает на оси проволоки;
- с уменьшением угла волочильного инструмента и коэффициента трения значение критерия разрушения «С» уменьшается;
- с увеличением эффективной деформации значение критерия разрушения «С» повышается;
- ресурс пластичности при многократном волочении зависит от формы волочильного инструмента и коэффициента трения на каждом проходе.

Однако проведённые исследования не позволяют определить зависимость критерия разрушения от технологических параметров процесса волочения и применить полученные результаты на практике. Так, например, в работе [7] экспериментально было установлено, что разрушение проволоки при волочении может происходить при различных значениях критерия «С». Достаточных объяснений данного факта не приводится. Далее, отсутствует анализ влияния параметров процесса волочения на величину критерия разрушения «С» в области значений  $\Delta < 1,2$  и  $\Delta > 2,0$ , нет практических рекомендаций по использованию критерия разрушения «С» при проектировании маршрутов волочения проволоки и, наконец, результаты моделирования не сопоставлялись с результатами испытаний готовой проволоки.

Цель настоящей работы - исследование с применением программного комплекса «DEFORM» влияния геометрического параметра ОД и коэффициента трения на величину критерия разрушения «С» при волочении высокоуглеродистой проволоки и экспериментальная проверка результатов.

Для этого было проведено компьютерное моделирование процесса однократного волочения высокоуглеродистой патентированной заготовки диаметром  $d_0$  на диаметр  $d_1$ . При этом изменялась величина еди-

ничной деформации  $\varepsilon$ , геометрия волочильного инструмента (полуугол рабочей зоны  $\alpha$ ), условия трения (коэффициент трения  $f$ ) для различных групп диаметров. Экспериментальная проверка осуществлялась на первом блоке волочильного стана UDZSA 2500/7 на скорости 1 м/с. В качестве смазочного материала использовался Lubrifil 7001. После процесса волочения на холоднотянутой проволоке по стандартным методикам исследовался комплекс механических свойств: предел прочности, относительное сужение, относительное удлинение.

Компьютерное моделирование осуществлялось в программной среде «DEFORM-2D» при следующих условиях:

- материал проволоки – пластичное тело, упрочняющееся по эмпирической кривой. Объёмные силы инерции и тяжести не учитывались. Упругое воздействие на инструмент также не учитывалось;

- материал волоки – абсолютно жёсткое тело. Деформационный разогрев проволоки и разогрев на контактной поверхности не учитывался;

- кривая пластического течения для моделирования была взята для конкретного материала на основе экспериментальных данных.

Условия проведения эксперимента и анализируемые параметры приведены в **табл. 1**

Область значений формы ОД  $1,2 < \Delta \leq 2,0$  – это на сегодняшний день «рабочая» область при волочении проволоки. Характеризуется она тем, что при уменьшении  $\Delta$  снижается значение  $\sigma_z$  на оси проволоки и также уменьшается значение критерия разрушения «С». Аналогичные результаты были получены в работах А. Миленина и др. [5-7], где с помощью программного комплекса «Drawing-2D» была исследована указанная область значений  $\Delta$ . В качестве критерия разрушения при моделировании был выбран критерий В.Л. Колмогорова [6]. Снижение значение  $\Delta$  в указанном диапазоне значений приводит к более равномерной пластической деформации, повышая пластические свойства холоднотянутой проволоки, что подтверждается анализом комплекса прочностных и пластических свойств холоднотянутой проволоки [9,10].

В «укороченном» ОД при  $\Delta \leq 1,2$  анализ влияния величины единичной деформации  $\varepsilon$  на критерий разрушения «С» показывает, что увеличение  $\varepsilon$ , при фиксированном значении показателя  $\Delta$  (обеспечивается изменением  $\alpha$ ), приводит к увеличению  $\sigma_z$  на оси проволоки и, соответственно, увеличению значения критерия разрушения «С».

Так, например, при волочении заготовки диаметром  $d_0 = 3,20$  мм ( $\varepsilon = 34\%$ ,  $\alpha = 5^\circ$ ) критерий разрушения  $C = 0,17$ , тогда как при волочении заготовки диаметром  $d_0 = 1,85$  мм ( $\varepsilon = 25\%$ ,  $\alpha = 3,5^\circ$ ) критерий разрушения  $C = 0,10$ . Значение фактора формы ОД и в том, и в другом случае одинаково  $\Delta = 0,84$ . Аналогично при волочении заготовки диаметром  $d_0 = 3,20$  мм ( $\varepsilon = 34\%$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ) критерий разрушения  $C = 0,20$ , тогда как при волочении заготовки диаметром  $d_0 = 1,85$  мм ( $\varepsilon = 25\%$ ,  $\alpha = 5^\circ$ ) критерий разрушения  $C = 0,13$ . Значение фактора формы ОД и в том, и в другом случае одинаково  $\Delta = 1,20$  (рис. 1).

Таким образом, обеспечение равномерности деформации за счёт повышения величины частного обжатия, при прочих равных условиях, приводит к увеличению значения растягивающих напряжений на оси проволоки и, соответственно, увеличивает значение критерия разрушения «С», повышая риск образования центральных трещин.

В области значений  $\Delta \leq 1,2$  уменьшение угла волочильного инструмента приводит к повышению значения  $\sigma_z$  ( $\sigma_m$ ) на оси протягиваемого образца, при этом значение критерия разрушения «С» практически не изменяется.

Для примера рассмотрен процесс волочения проволоки диаметром  $d_0 = 5,00$  мм,  $\varepsilon = 36\%$  и диаметром  $d_0 = 3,20$  мм,  $\varepsilon = 35\%$ , при  $\alpha = 7, 6, 5, 4^\circ$  (рис. 2).

**Материал и условия проведения эксперимента**

Номер серии	Начальный диаметр $d_0$ , мм	Вид термической обработки (покрытие)	Конечный диаметр $d_1$ , мм	Изменяемый параметр	Анализируемые показатели	
					Механические свойства	Напряжения в очаге
1	5,00	Патентирование (бура)	4,00	Угол волочильного инструмента	Предел прочности $\sigma_b$ , относительное удлинение $\delta$ , относительное сужение $\varphi$ , число перегибов $b$	Главные нормальные напряжения $\sigma_z$ (продольные), $\sigma_R$ (радиальные), гидростатическое давление $\sigma_m$ , критерий разрушения «С», эффективная деформация («Von Mises»). Все показатели рассчитывались по максимальным значениям на оси проволоки
2	3,20 3,00 2,80		2,60	Форма очага деформации		
3	1,85	Патентирование (бура, латунь, без покрытия)	1,75 1,68 1,60	Форма очага деформации, коэффициент трения		
4	1,14		1,08 1,03 0,985			

На основании полученных данных моделирования по влиянию фактора формы ОД  $\Delta$  на напряжённое состояние в очаге и критерий разрушения «С» область значений  $\Delta$ , при которых было проведено исследование, можно условно разделить на три подобласти:  $\Delta \leq 1,2$ ;  $1,20 < \Delta \leq 2,0$ ;  $\Delta > 2,0$ . Далее рассмотрено влияние формы ОД и коэффициента трения  $f$  на величину критерия разрушения в каждой из подобластей значения  $\Delta$ .

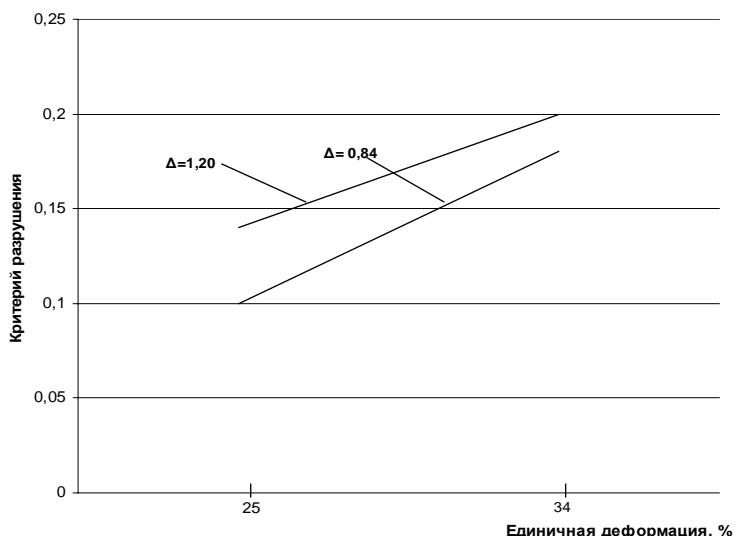


Рис. 1. Зависимость критерия разрушения «С» от величины единичной деформации при фиксированном значении  $\Delta$

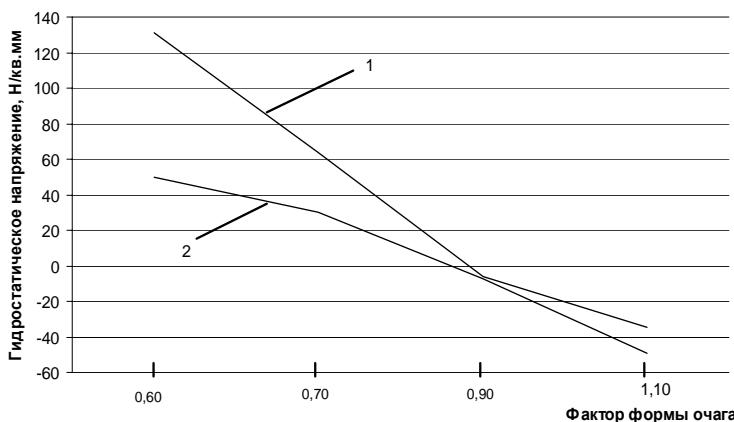


Рис. 2. Зависимость изменения гидростатического напряжения  $\sigma_m$  от фактора формы ОД: 1 –  $d_0 = 5,00 \text{ мм}, \varepsilon = 36\%$ ; 2 –  $d_0 = 3,20 \text{ мм}, \varepsilon = 35\%$

Несмотря на явное влияние формы ОД в области значений  $\Delta \leq 1,2$  на величину  $\sigma_m$  ( $\sigma_z$ ) на оси проволоки, влияние его на критерий разрушения незначительно. Так, например, изменение угла  $\alpha$  с 4 до  $7^\circ$  при  $D_0 = 5,00 \text{ мм}, \varepsilon = 36\%$  (соответствующее изменение фактора формы очага деформации  $\Delta$  с 0,63 до 1,10) приводит к увеличению значения критерия разрушения «С» с 0,19 до 0,21 и с 0,17 до 0,20 при  $D_0 = 3,20 \text{ мм}, \varepsilon = 35\%$ . Такое незначительное изменение значения «С» обусловлено тем, что область значений фактора формы ОД  $\Delta \leq 1,2$  при волочении характеризуется высокой степенью эффективной деформации. При этом становится незначительной разница в значении критерия разрушения «С» при действии высоких растягивающих напряжений на оси проволоки  $\sigma_z$ .

Полученные результаты моделирования подтверждаются экспериментальными данными. Снижение значений угла  $\alpha$  с  $7^\circ$  до  $4^\circ$  при волочении проволоки диаметрами  $d_0 = 5,00$  и  $3,20 \text{ мм}$  со степенью деформации  $\varepsilon = 36$  и  $35\%$  соответственно, т.е. когда процесс осуществляется при значениях фактора ФОД  $\Delta \leq 1,2$ , приводит к снижению комплекса пластических свойств проволоки (относительное удлинение, суже-

ние, число перегибов и скручиваний). Происходит это, несмотря на повышение равномерности пластической деформации при снижении угла  $\alpha$ , степень равномерности которой была исследована с помощью измерения микротвёрдости в поперечной плоскости шлифа холоднотянутой проволоки [9].

В «удлинённом» ОД ( $\Delta > 2,0$ ) при уменьшении  $\Delta$  снижается значение  $\sigma_z$  на оси проволоки так же, как и в области значений  $1,2 < \Delta \leq 2,0$ . Однако при этом не происходит существенного изменения критерия разрушения «С» по той же самой причине, что и в области значений  $\Delta \leq 1,2$ , т.е. в результате высоких значений  $\sigma_z$  на оси проволоки. Так, например, при волочении заготовки диаметром  $d_0 = 2,80 \text{ мм}, \varepsilon = 14\%$  изменение  $\alpha$  с  $4^\circ$  до  $7^\circ$  приводит к увеличению значения  $\sigma_z$  с 675 до  $908 \text{ Н/мм}^2$  с соответствующим увеличением  $\sigma_m$  с 142 до  $396 \text{ Н/мм}^2$  (рис. 3). Данному трёхкратному увеличению гидростатического давления  $\sigma_m$  соответствует незначительное изменение критерия разрушения «С» в пределах 0,14-0,15.

Результаты моделирования процесса волочения на всех сериях опытов показывают, что значение на оси проволоки  $\sigma_z$  и  $\sigma_m$  в области значений  $\Delta > 2,0$  выше, чем в области значений  $\Delta < 2,0$ , но при этом значение критерия разрушения «С» ниже. Таким образом, с одной стороны, при волочении в области значений  $\Delta > 2,0$  риск образования центральных трещин и разрывов повышается, поскольку повышается значение  $\sigma_z$  и  $\sigma_m$  на оси проволоки, но, с другой стороны, величина критерия разрушения «С» ниже, чем в серии опытов при  $\Delta < 2,0$ .

Далее приведён анализ напряжённого состояния в ОД при волочении заготовки  $d_0 = 2,60 \text{ мм}$  при  $\Delta = 0,67$  ( $C = 0,179$ ),  $\Delta = 1,47$  ( $C = 0,16$ ),  $\Delta = 3,30$  ( $C = 0,15$ ). Рассмотрим для сравнения значения главных нормальных напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_R$  и значение гидростатического напряжения  $\sigma_m$  на оси проволоки (рис. 4-6), где (L0-L1) – длина ОД при  $\Delta=3,30$ , (L0-L2) при  $\Delta=1,47$  и (L0-L3) при  $\Delta=0,67$ .

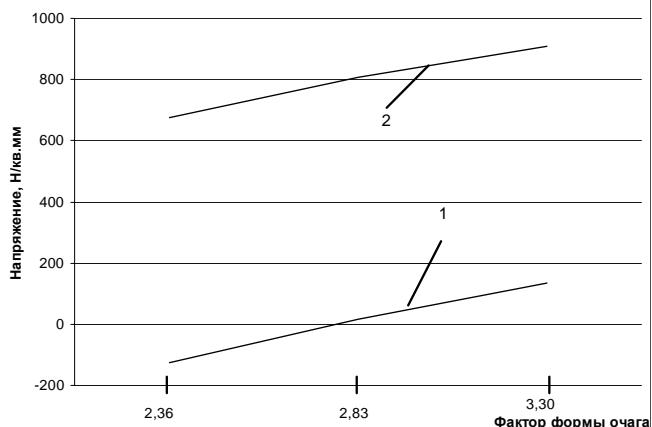


Рис. 3. Зависимость напряжения растяжения  $\sigma_z$  (1) и гидростатического давления  $\sigma_m$  (2) от формы ОД при  $d_0 = 2,80 \text{ мм}, \varepsilon = 14\%$

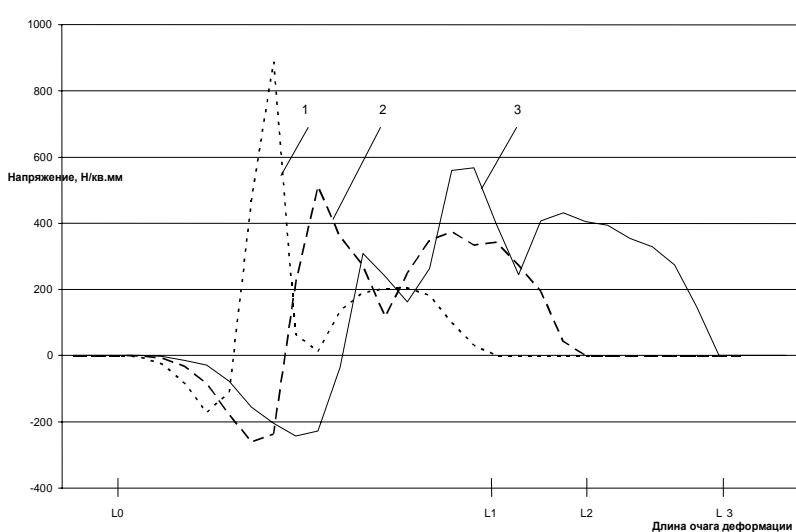


Рис. 4. Распределение  $\sigma_z$  по длине ОД: 1 –  $\Delta = 3,30$ ,  
2 –  $\Delta = 1,47$ , 3 –  $\Delta = 0,67$

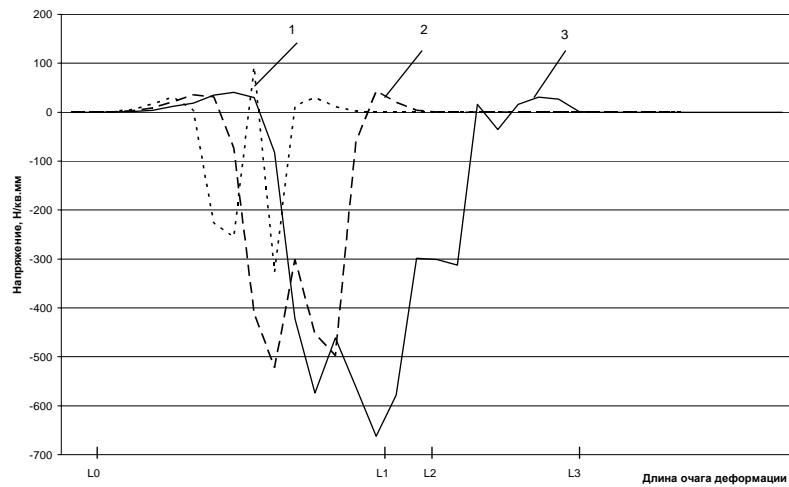


Рис. 5. Распределение  $\sigma_R$  по длине ОД: 1 –  $\Delta = 3,30$ ,  
2 –  $\Delta = 1,47$ , 3 –  $\Delta = 0,67$

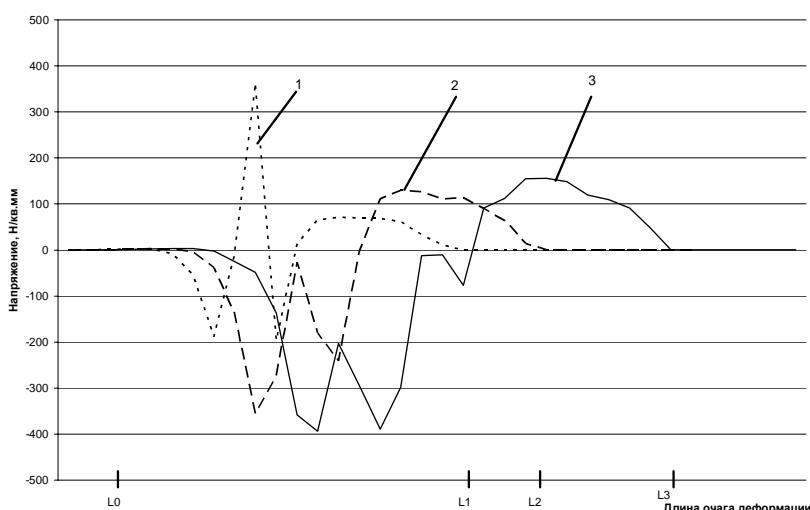


Рис. 6. Распределение  $\sigma_m$  по длине ОД: 1 –  $\Delta = 3,30$ ,  
2 –  $\Delta = 1,47$ , 3 –  $\Delta = 0,67$

Анализ полученных результатов показывает, что в «укороченном» ОД ( $\Delta = 3,30$ ) значение  $\sigma_z$  и  $\sigma_m$  на оси проволоки выше, чем в «удлинённом» очаге (см. рис. 4-6), и на оси возникает зона всестороннего растяжения, причём значение  $\sigma_m$  в очаге меняет свой знак с отрицательного значения на положительное, а затем опять на отрицательное (рис. 6, кривая 1). В отличие от этого в «удлинённом» ОД при волочении значение  $\sigma_m$  меняет знак с отрицательного на положительный на выходе из очага (рис. 6, кривая 3).

Таким образом, с одной стороны, установлено, что вероятность образования осевых трещин при волочении проволоки в «укороченном» очаге выше, с другой стороны, значение критерия разрушения «С» ниже. Объяснением данного противоречия служит то, что величина критерия разрушения «С» во многом зависит от степени эффективной деформации («Von Mises» в терминологии DEFORM). В случае волочения проволоки при  $\Delta = 3,30$  степень эффективной деформации составляет 0,15, а в случае волочения при  $\Delta = 0,67$  степень эффективной деформации составляет 0,40. А поскольку значение критерия «С» численно равно площади под кривой  $\frac{\sigma^*}{\sigma}$  – эффективная деформация», то в случае волочения проволоки в «укороченном» очаге эта площадь меньше, чем при волочении в «удлинённом», несмотря на более высокое в первом случае значение  $\sigma_z$ , (рис. 7).

Исходя из приведённых данных, можно предположить, что в «укороченном» очаге ( $\Delta > 2,0$ ) уменьшение значения критерия разрушения «С» не означает снижения вероятности образования осевых трещин и разрывов, что подтверждается анализом механических свойств проволоки. Пластические свойства проволоки, протянутой в «укороченном» ОД, понижены по сравнению с проволокой, протянутой при  $1,2 < \Delta \leq 2,0$  [9, 10].

Для исследования влияния коэффициента трения на величину критерия разрушения были протянуты образцы проволоки диаметром  $d_0$  1,85 и 1,14 мм с разным типом подсмазочного покрытия (бура, латунь) и без покрытия. Соответственно для расчётов напряжённого состояния в ОД были приняты коэффициенты трения при волочении бурированной, латунированной и заготовки без покрытия, равные  $f = 0,08; 0,10$  и  $0,12$ . В

зависимости от фактора формы ОД  $\Delta$  было исследовано влияние коэффициента трения на критерий разрушения «С». По результатам моделирования установлено, что при волочении проволоки в «укороченном» очаге ( $\Delta=3,77$ ) значение критерия разрушения «С» практически не зависит от коэффициента трения, в то время как при  $\Delta=1,81$ ,  $\Delta=0,84$  при увеличении коэффициента трения значение критерия разрушения повышается (рис. 8).

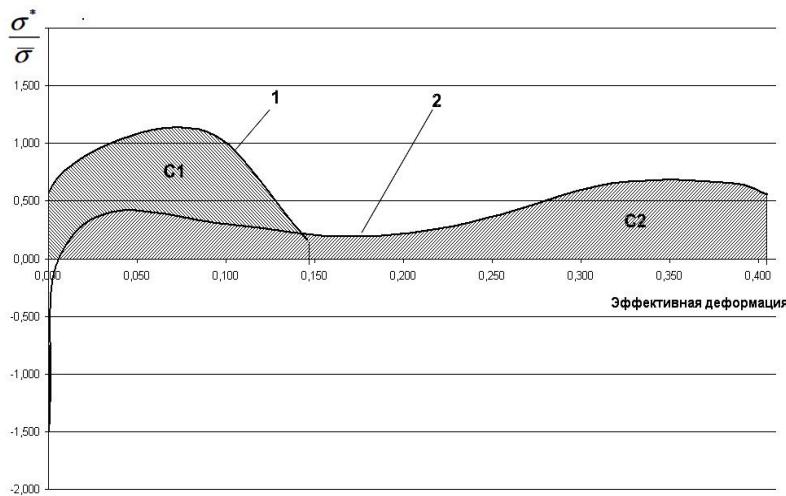


Рис. 7. Зависимость критерия разрушения «С» от степени эффективной деформации: 1 –  $\Delta=3,30$ , 2 –  $\Delta=0,67$

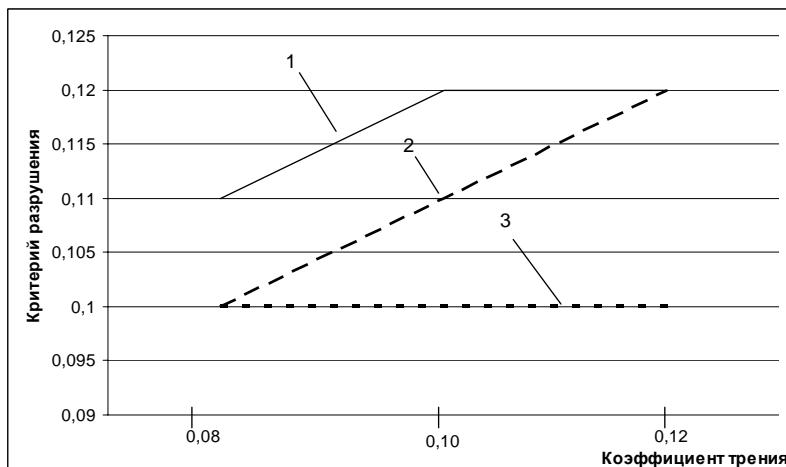


Рис. 8. Зависимость критерия разрушения «С» от коэффициента трения: 1 –  $\Delta=0,84$ ; 2 –  $\Delta=1,81$ ; 3 –  $\Delta=3,77$

### Выводы:

1. В «рабочей» области значений  $1,2 < \Delta \leq 2,0$  критерий разрушения «С» наглядно отображает вероятность образования трещин и разрывов на оси проволоки, что подтверждается имеющимися в литературе данными. При этом наблюдается хорошая корреляционная зависимость между значением гидростатического напряжения на оси протягиваемой проволоки и критерием разрушения «С».

2. В области значений фактора формы ОД  $\Delta \leq 1,2$  (в «удлинённом» очаге) величина критерия разрушения «С» незначительно зависит от изменения  $\Delta$  по

причине высоких значений растягивающих напряжений на оси проволоки. В данном случае более наглядно вероятность образования центральных обрывов отображает отношение величины гидростатического напряжения к пределу текучести материала.

3. В области значений  $\Delta > 2,0$  (в «укооченном» очаге) критерий разрушения «С» имеет меньшее абсолютное значение по сравнению с областью значений  $\Delta \leq 2,0$ . Однако при этом значения гидростатического напряжения в исследуемой области выше. Данное противоречие может быть объяснено более низкой степенью эффективной деформации при волочении в «укооченном» очаге.

4. Увеличение коэффициента трения приводит к повышению значения критерия разрушения «С» в большей степени в «удлинённом» ОД. Происходит это по причине большего влияния пути трения (работы сил трения) при уменьшении фактора формы очага  $\Delta$ .

5. Повышение равномерности пластической деформации в ОД при волочении за счёт увеличения величины единичного обжатия нежелательно, поскольку при этом происходит увеличение значения критерия разрушения «С» и повышается риск образования центральных трещин и надрывов на проволоке. Более предпочтительным является уменьшение угла рабочей зоны волочильного инструмента.

6. Характер напряжённого состояния в ОД при волочении проволоки, а также значение критерия разрушения практически не зависят от абсолютного диаметра протягиваемой проволоки.

7. Результаты моделирования процесса волочения, характер напряжённого состояния в очаге деформации подтверждаются экспериментальными данными механических свойств холоднотянутой проволоки.

### Список литературы

- Пресняков А.А. Очаг деформации при обработке металлов давлением. Алма-Ата: Наука, 1988. 136 с.
- Грудев А.П. Теория прокатки: учебник для вузов / А.П. Грудев. М.: Металлургия, 1988. 240 с.
- Технология процессов обработки металлов давлением / П.Н. Полухин, А. Хензель, В.П. Полухин; под ред. Полухина П.Н. М.: Металлургия, 1988. 408 с.
- Бэкофен В. Процессы деформации. М.: Металлургия, 1977. 288 с.
- Publications of Laboratory of Computational Mechanics (LCM). [Электронный ресурс]. URL: <http://home.agh.edu.pl/~milenin/StronaPracowniMilenin/Publications/publicMilenin.htm>
- Milenin Andriej. FEM simulation of wire fracture phenomena during multi-pass drawing / Andriej Milenin, B.P. Gautham, S. Goyal, J. Pilarczyk, Z. Muskalski // Wire Journal. 2008. October. P. 93-99.
- Benesova Sonia. Application of Cockcroft-Latham criterion in FEM analysis of wire fracture in conventional drawing of high carbon steel wires / Sonia Benesova, Jan Krnac, Rafał Włudzik3, Jan W. Pilarczyk [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isvav.cz/resultDetail.do?jsessionid=06462BBDED95C2355FE6584A878EA04?rowId=RIV%2F49777513%3A23210%2F08%3A4389851!RIV12-MSM-23210>

8. Cockcroft M.J. Ductility and workability of metals / Cockcroft M.J., Latham D.J. // Journal of the institute of metals. 1968. Vol. 96. P. 33-39.
9. Столяров А.Ю., Харитонов В.А. Влияние формы очага деформации и режимов волочения на пластичность высокоуглеродистой проволоки // Обработка сплошных и сложных материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: МГТУ, Вып. 35. 2008. С. 60-67.
10. Столяров А.Ю., Харитонов В.А. Влияние масштабного фактора на свойства проволоки под металлокорд // Метиз. 2010. №3 С. 15-18.

## References

1. Presnyakov A.A. The deformation in metal forming. Alma-Ata: Science. 1988. 136 p.
2. Grudev A.P. Theory rolling: Textbook for Universities. M.: Metallurgy. 1988. 240 p.
3. The technology of metal forming / P.N. Polukhin, A.Henzel, V.P. Polukhin; ed. Polukhina P.N. M.: Metallurgy. 1988. 408 p.
4. Bekofen B. Process of strain. Moscow: Metallurgy, 1977. 288 p.
5. Publications of Laboratory of Computational Mechanics (LCM). [Electronic

- resource]. URL: <http://home.agh.edu.pl/~milenin/StronaPracowniMilenin/Publications/publMilenin.htm>
6. Milenin Andriej. FEM simulation of wire fracture phenomena during multi-pass drawing / Andriej Milenin, B.P. Gautham, S. Goyal, J. Pilarczyk, Z. Muskalski // Wire Journal. 2008. October. P. 93-99.
7. Benesova Sonia. Application of Cocksroft-Latham criterion in FEM analysis of wire fracture in conventional drawing of high carbon steel wires / Sonia Benesova, Jan Krnac, Rafał Włudzik3, Jan W.Pilarczyk [electronic resource]. URL: <http://www.isvav.cz/resultDetail.do;jsessionid=06462BBDED95C2355FE66584A878EA04?rowId=RIV%2F49777513%3A23210%2F08%3A43898515!RIV12-MSM-23210>
8. Cockcroft M.J. Ductility and workability of metals / Cockcroft MJ, Latham DJ // Journal of the institute of metals. 1968. Vol. 96. P. 33-39.
9. Stolyarov A.Y., Kharitonov V.A. Effect of the deformation zone and modes of drawing on the plasticity of high carbon wire // Processing of continuous and complex materials. №35. Intercollege, Sat. Nauchn. tr. / ed. Prof. M.V. Chukin Magnitogorsk: MGTU, 2008. P. 60-67.
10. Stolyarov A.Y., Kharitonov V.A. Size effect on the properties of the wire for steel cord // Metiz. 2010. №3 С. 15-18.

УДК 621.778:539.4.015.3

Герасимов В.Я., Парышев Д.Н.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ АТЕРМИЧЕСКОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ СТАЛЬНЫХ ПРУТКОВ

**Аннотация.** Установлены закономерности атермического разупрочнения металла при изготовлении калиброванной стали. На примере волочения прутков из стали 10kp найдены границы деформирования металла с предельными обжатиями 0,07 и 0,20 и оптимальным обжатием 0,10, что подтверждается изменением плотности, удельного электрического сопротивления и электропроводности.

**Ключевые слова:** волочение, стальные прутки, обжатие, плотность, удельное электрическое сопротивление, электропроводность.

Gerasimov V.Y., Paryshev D.N.

### REGULARITIES OF ATHERMIC METAL WEAKENING DURING DRAGGING OF STEEL RODS

**Abstract.** Regularities of athermic metal weakening during manufacturing of calibrated steel have been found out. At the example of rods dragging made of 10kp steel there were limits of metal deformation found with limiting drafts of 0,07 and 0,20 and optimal draft of 0,10 that is confirmed with density, specific electric resistivity and electric conductivity changes.

**Keywords:** dragging, steel rods, draft, density, specific electric resistivity, electric conductivity.

В работе [1] установлены закономерности упрочнения металла при волочении стальных прутков. В работе [2] деформационное разупрочнение металла названо атермическим разупрочнением, которое может проявляться несколько раз при осуществлении непрерывного деформационного процесса.

В работе [3] показано влияние наклена на изменение деформированного объема и соответственно плотности, а также удельного электрического сопротивления.

В настоящей работе исследованы процессы деформационного упрочнения металла при волочении стальных прутков и проявляющегося атермического разупрочнения на локальном и интегральном уровнях.

На первом этапе определяли физические свойства деформируемого и упрочняемого металла при волочении прутков из отожженной стали 10kp – плотность, удельное электрическое сопротивление и электропроводность.

При проведении экспериментов определяли изменение плотности  $\Delta d$ , %, и удельного электрического сопротивления  $\rho/\rho_0$  в относительных единицах с помо-

щью электроизмерительной установки, собранной по схеме двойного моста Томсона [1] ( $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление для отожженного металла).

Эти параметры характеризуют свойства металла на интегральном уровне (рис. 1), и по их изменению можно установить закономерности атермического разупрочнения при волочении прутков.

Получен экстремальный характер изменения плотности и электрического сопротивления для деформированного металла с двумя максимумами и одним минимумом на графических зависимостях 1 и 2. При этом первый максимум соответствует преимущественному уплотнению и упрочнению металла в периферийной зоне на протянутых прутках при первом предельном обжатии  $\epsilon_1 = 0,07$  при повышении физических свойств соответственно на 0,8 и 30% при сравнении с отожженным металлом.

Второй максимум на графиках появляется при волочении со вторым предельным обжатием  $\epsilon_2 = 0,20$  и ему соответствует преимущественное и достаточно интенсивное упрочнение металла в центральной зоне вблизи продольной оси протянутых прутков. При

этом обжатие  $\varepsilon = 2\ell n d_0/d_1$  является определяющим технологическим параметром для процесса волочения ( $d_0$  и  $d_1$  – диаметры исходного и протянутого металла).

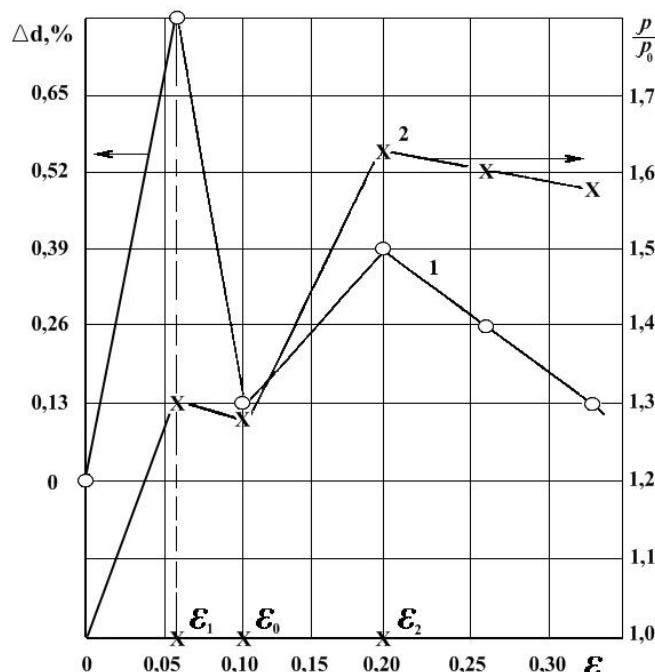


Рис. 1. Изменение плотности (кривая 1) и удельного электрического сопротивления (кривая 2) при волочении прутков из стали 10кп

Минимум для удельного веса и электрического сопротивления соответствует равномерному или однородному упрочнению металла по всему поперечному сечению прутков, что достигается при оптимальном обжатии  $\varepsilon_0 = 0,10$ . Этот минимум можно рассматривать как проявление первого атермического разупрочнения металла из-за перераспределения упрочняющего эффекта в поперечном сечении протягиваемых прутков от периферийного слоя к центральной зоне.

При превышении второго предельного обжатия начинается второй цикл атермического разупрочнения, что можно объяснить пластическим разрыхлением металла в центральной зоне. Этот процесс согласуется с представлениями В.В. Новожилова и Ю.И. Кадашевича об особенностях разрыхления металла при его холодной деформационной обработке [4].

Дополнительно определяли электропроводность металла на торцах и на цилиндрической поверхности образцов, отрезанных от протянутых прутков (рис. 2). При этом по электропроводности можно оценивать изменения упрочняющего эффекта на локальном уровне без разрушения образцов.

Метод электропроводности базируется на методе вихревых токов, и для его применения требуется генератор высокочастотных электромагнитных колебаний с подключенным к нему рабочим индуктивным датчиком с концентратором магнитного поля в виде ферритового сердечника [5]. При установке датчика нормально к контролируемой поверхности в металле

возникает круговое поле вихревых токов.

Электропроводность оценивается по величине силы тока  $J$  (мкА) в регистрирующем приборе – микромперметре, включенном в электрическую цепь генератора. Изменение силы тока обусловлено изменением индуктивности катушки на рабочем датчике при действии на него поля вихревых токов.

Благодаря высокой частоте генератора (от 15 МГц и выше) и резонансному режиму работы обеспечивается высокая точность контроля свойств упрочненного металла.

Получен также экстремальный характер изменения электропроводности, который согласуется с графическими зависимостями на рис. 1.

Можно также выделить диапазоны экстремального деформирования металла в поперечном сечении протянутых прутков при  $\varepsilon_1 = 0,07$  и  $\varepsilon_0 = 0,10$ . При этом не удается выявить второе предельное обжатие вследствие локализованного характера электроиндуктивного контроля.

В отличие от методов плотности и удельного электрического сопротивления метод электропроводности можно считать универсальным с широкими технологическими возможностями. Это особенно относится к высокой скорости оценки свойств металла (время одного измерения не превышает 2-3 с), что обеспечивает возможность 100%-го контроля как опытных образцов, так и изготовленных изделий.

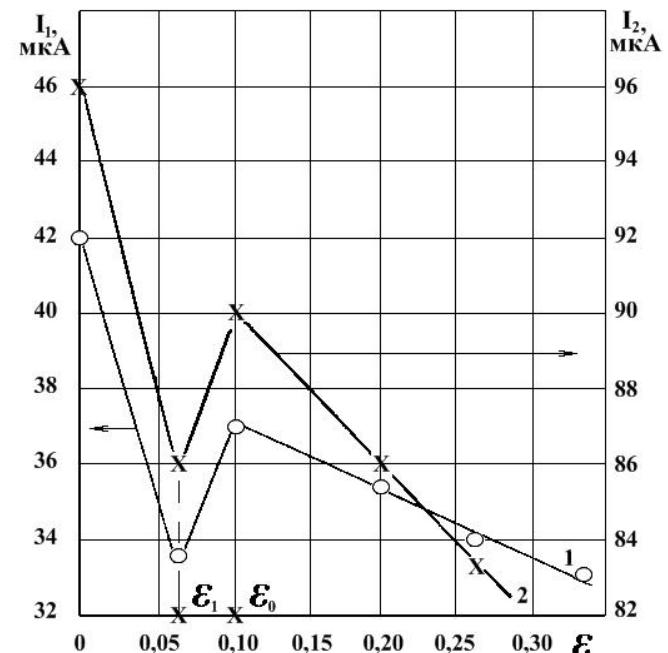


Рис. 2. Изменение электропроводности металла на торцах цилиндрических образцов (кривая 1) и на боковой поверхности (кривая 2) при волочении прутков из стали 10кп

Можно применять электроиндуктивный контроль упрочняющего эффекта и его изменения при производстве калиброванной прутковой стали без изготовления опытных образцов. Такой контроль может проводиться непосредственно в цеховых условиях путем

установки рабочего датчика на цилиндрическую поверхность прутка. Благодаря оперативности контроля можно регулировать величину обжатия с учетом требований заказчика к качеству изготавливаемых стальных прутков. Например, при изготовлении стержневых деталей с резьбовым участком, получаемым непосредственно на заготовках из калиброванного металла, целесообразно назначать обжатие в области второго предельного значения. В этом случае обеспечивается повышенная прочность резьбы благодаря созданию в центральной зоне стержневого изделия сильно упрочненного «стержня», который будет воспринимать наибольшую часть растягивающей нагрузки при затяжке резьбового соединения.

При изготовлении гладких стержневых деталей для пар трения и прессовых посадок наиболее пригоден первый предельный диапазон обжатия, которому будет соответствовать повышенный уровень физических и механических свойств металла в контактном поверхностном слое.

Общий вывод заключается в том, что можно оценивать атермическое разупрочнение металла при его холодной деформационной обработке по схемам волочения, редуцирования, выдавливания и прокатки по изменению физических свойств. Применение металлофизических методов контроля свойств и структурного состояния деформированного металла позволяет значительно снизить трудозатраты и количество раз-

рушающих механических испытаний при изготовлении стальной металлопродукции.

#### Список литературы

1. Владимиров Ю.В., Герасимов В.Я. Технологические основы холодной высадки стержневых крепежных изделий. М.: Машиностроение, 1984. 120 с.
2. Долматов А.П., Рубанов В.П., Пименов А.Ф. О закономерности проявления атермического разупрочнения металлов // Вестник машиностроения. 2007. № 4. С. 54-57.
3. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов / под ред. Б.Г. Лившица. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
4. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. Л.: Машиностроение, 1990. 223 с.
5. А.с. 1837222 СССР. МКИ Г 01 N 27/90. Устройство для вихревокового контроля / В.Я. Герасимов (СССР). № 4816364/28; заявл. 11.03.90; опубл. 30.08.93, Бюл. №32. 5 с.
6. Герасимов В.Я. Электроиндуктивный контроль деформационного упрочнения калиброванной стали // Сталь. 1993. № 8. С.62.

#### References

1. Vladimirov Y.V., Gerasimov V.Y. Technological basis of cold upsetting of rod-shaped fasteners. M.: Machinebuilding, 1984. 120 p.
2. Dolmatov A.P., Rubanov V.P., Pimenov A.F. On regularity of revealing of athermic weakening of metals // Bulletin of Machinebuilding. 2007. № 4. p. 54-57.
3. Livshits B.G., Kraposhin V.S., Lynetskiy Y.L. Physical properties of metals and alloys/Edited by Livshits B.G. M.: Metallurgy, 1980. 320 p.
4. Novozhilov V.V., Kadashevich Y.I. Microstress in structural materials. L.: Machinebuilding, 1990. 223 p.
5. A.S. 1837222 USSR.MKI Г 01 N27/90. Device for eddy-current control / V.Y. Gerasimov (USSR). №4816364/28; submitted on 11.03.1990; published on 30.08.1993. Bul. №32. 5 p.
6. Gerasimov V.Y. Electro inductive control of deformation strengthening of calibrated steel // Steel. 1993. №8. p. 62.

УДК 621.774

Козлов А.В., Бобылев А.В., Шеркунов В.Г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗОНЕ ГИБА

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы влияния нагрева в ходе гибки труб с раскатыванием на структуру материала трубы и приведены результаты моделирования и экспериментов по оценке температуры в зоне раскатывания.

**Ключевые слова:** гибка труб, раскатывание, пластическая кольцевая зона, температура при раскатывании.

Kozlov A.V., Bobylev A.V., Sherkunov V.G.

## RESEARCH OF TEMPERATURE CHARACTERISTICS IN A ZONE FLARING

**Abstract.** Questions of influence of heating in a course are considered are flexible pipes with a flaring on structure of a material of a pipe and results of modeling and experiments are given according to temperature in a flaring zone.

**Keywords:** pipe bend, flaring, bending force, temperature at a flaring.

Процесс гибки с раскатыванием (рис. 1) неразрывно связан с выделением тепла в зоне гиба. Причины его возникновения, характер распределения, а также процессы теплообмена между элементами технологической системы в зоне деформаций ещё недостаточно изучены [1].

Как известно, пластическое течение металла при гибке с раскатыванием представляет собой сдвиг одной части кристаллов вещества по отношению к другой, что является основной причиной выделения тепла в зоне гиба [2]. Его распределение – весьма сложный вопрос. Неравномерность распределения тепла по сечению трубы обусловлена как различной интен-

сивностью деформаций в разных участках сечения, так и теплообменом с элементами оснастки станка (раскатным инструментом, роликом-шаблоном и т.д.). Исследование микроструктуры металла в поперечном сечении показало, что металл трубы представляет собой феррит, около 20% перлита плотного строения, в растянутой зоне гиба структура значительно деформирована (рис. 2, 3) [3]. Такое изменение структуры может быть вызвано значительным разогревом поверхности металла, контактирующей с раскатным инструментом. По краю внутренней поверхности имеется оторочка из очень мелкого зерна – мельче 10 баллов по ГОСТ 5639–82, что может быть вызвано

началом процессов рекристаллизации. Структура в сжатой зоне гиба удовлетворительна для стали 20, зерно 5–6 баллов. Образцы для изучения микроструктуры были вырезаны из трубы Ø 89.

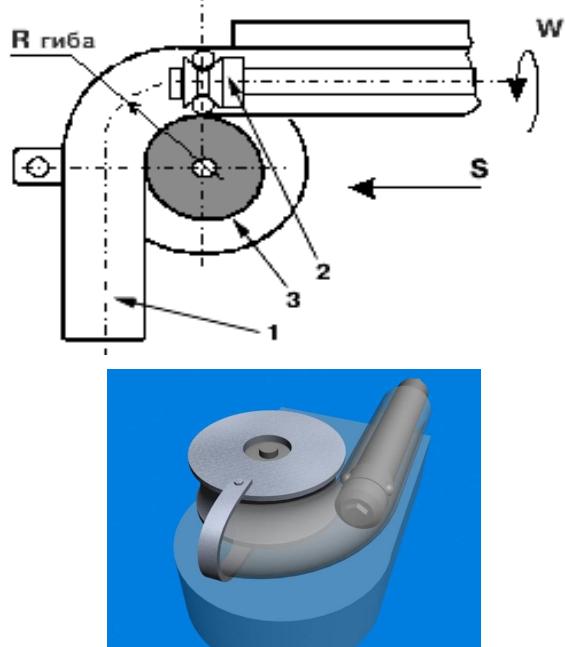
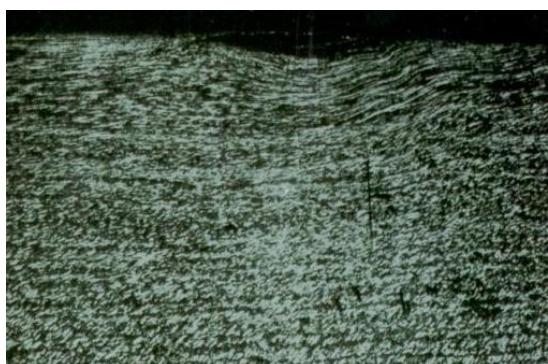


Рис. 1. Схема гибки труб с раскатыванием: 1 – труба; 2 – раскатной инструмент; 3 – гибочный ролик



а



б

Рис. 2. Микроструктура образца внутренней стенки трубы, × 50: а – поверхностный дефект и строчечность перлитно-ферритной структуры с внутренней стороны стенки; б – строчечность перлитно-ферритной структуры с наружной стороны стенки (уменьшение 1/2)



а



б



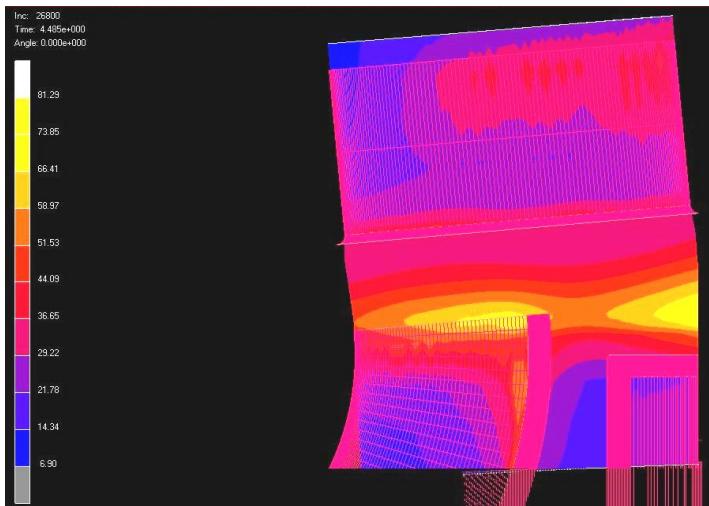
в

Рис. 3. Строчечность перлитно-ферритной структуры, × 500: а – со стороны внутренней поверхности стенки трубы; б – средних слоев; в – со стороны наружной поверхности

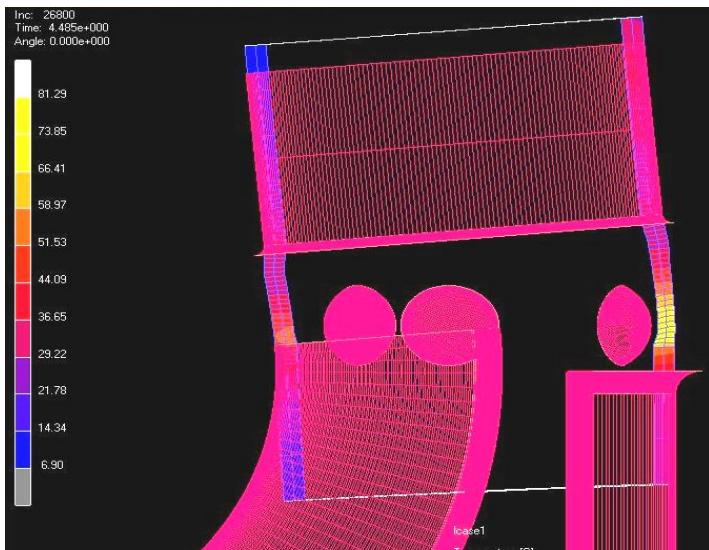
Моделирование, проведенное в среде FormingSFM 8.0, показало (рис. 4, 5) наличие узкозонального нагрева в плоскости вращения деформирующих элементов раскатного инструмента. Каждый деформирующий элемент образует вокруг себя локальную зону нагрева с максимальной температурой для всего процесса гибки. Между деформирующими элементами происходит снижение температуры, но скорость охлаждения не достаточна для образования закалочных структур, что подтверждают исследования микроструктуры металла. Это объясняется образованием

в зонах между деформирующими элементами пластических шарниров, которые дают нагрев, хотя и в меньшей степени, чем в зонах действия деформирующих элементов.

Хорошо видно воздействие оснастки на процесс распределения теплоты в технологической системе (см. **рис. 4, 5**). В ходе гибки ролик-шаблон наматывает изгибаемую трубу, обеспечивая тем самым плотный контакт ложемента ролика и внутренней стенки гиба трубы. Это дает постоянный теплоотвод от этой части гиба и поэтому температура здесь несколько ниже, чем на внешней стенке. Такая неравномерность распределения теплоты объясняется технологическими причинами – раскатка должна свободно деформировать поперечное сечение трубы для еёгибы, поэтому в отличие от аналогичных типов оборудования опорная призма в нашем случае остается неподвижной и не контактирует с зоной воздействия раскатника, а следовательно, и не отводит тепло с наружной стенки гиба.

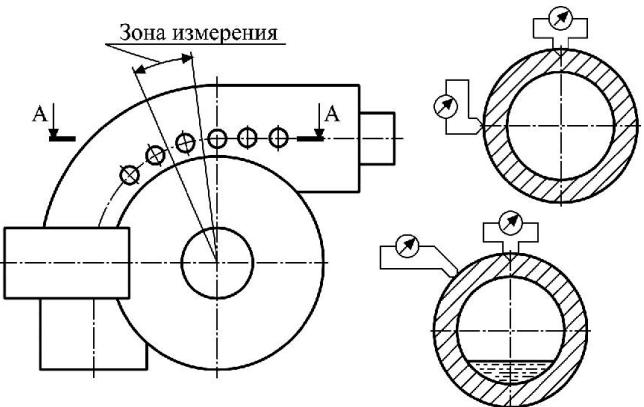


**Рис. 4. Распределение теплоты в стенках трубы в зоне раскатывания**



**Рис. 5. Распределение теплоты в стенках трубы в зоне раскатывания в продольном сечении**

С целью получения температурных характеристик в зоне гиба был проведен ряд экспериментов. Измерение температуры осуществлялось косвенным методом, с использованием искусственной термопары (хромель – копель) (**рис. 6**).



**Рис. 6. Схема измерения температуры. Измерение температуры выполнено также с использованием метода естественной термопары [4]**

Результаты экспериментов показывают (см. **таблицу, рис. 7**), что температура в зоне гиба изменяется с течением времени. Характер изменения таков, что первоначально наблюдается рост температуры, далее происходит постепенное снижение интенсивности роста вплоть до стабилизации около некоторого значения. То есть процесс теплообмена между стенками трубы, элементами станка и окружающей средой приходит в равновесное состояние.

#### Результаты экспериментов

Размеры трубы D×h, мм	Натяг H, мм	Зона измерения	Вид охлаждения	ТермоЭДС, мВ	Температура T, °C
$\varnothing 57 \times 4$	1,2	Боковая стенка, глубина 3,5 мм	Без охлаждения	5,8	108
				6,1	112
				6,7	120
				6,8	122
				7,3	129
				7,3	129
				7,6	133
		Внешняя стенка, на поверхности	Вода	1,0	40
				1,0	40
				1,1	41
		Без охлаждения	Без охлаждения	1,0	40
				1,0	40
				6,9	123
				8,0	138
		Внешняя стенка, на поверхности	Вода	9,2	154
				10,3	169
				1,1	40
				1,2	41
				1,2	41
				1,3	43
				1,5	46

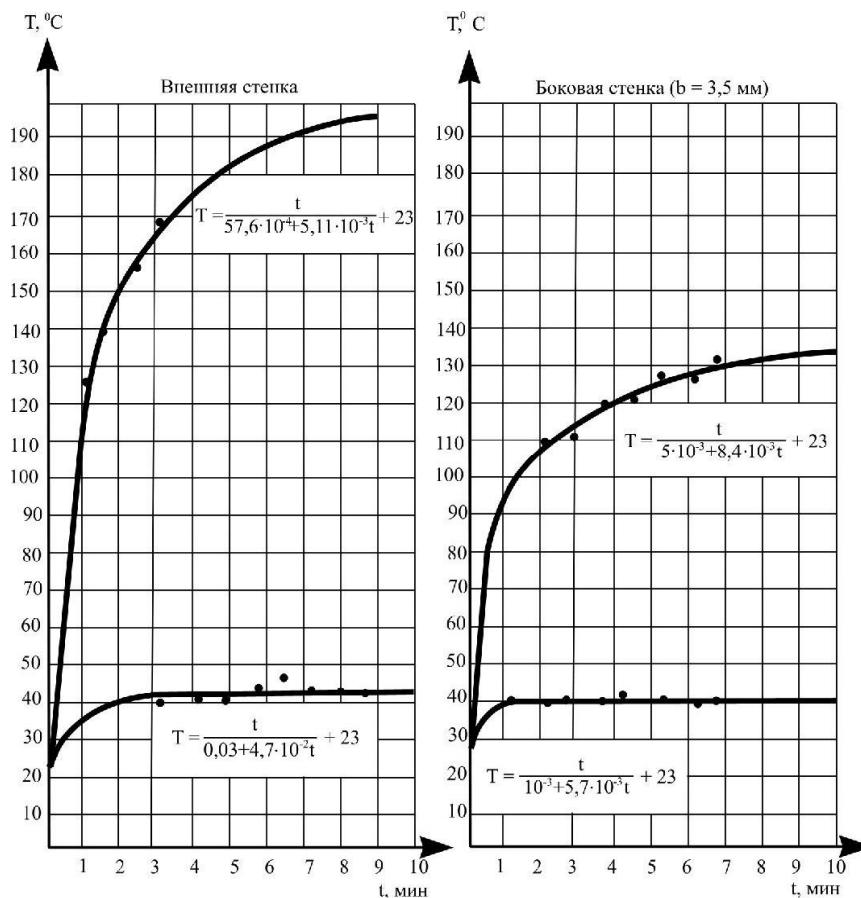


Рис. 7. Графики зависимости температуры от времени

Проведенные исследования тепловых явлений показали, что под воздействием температуры протекают процессы определенного изменения свойств материала. В то же время вряд ли нагрев трубы до 200° существенно влияет на характер ее деформации, кроме случаев гибки труб из жаростойких и нержавеющих сталей. В этом случае важным является установление оп-

тимального теплового режима, обеспечивающего наибольшую стойкость раскатного инструмента и правильный подбор режима охлаждения [5].

#### Список литературы

- Козлов А.В., Бобылев А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография. Челябинск: ЮУрГУ, 2007. 169 с.
- Козлов А.В., Бобылев А.В. Изучение тепловых явлений при гибке труб с раскатыванием. Рубцовск: Рубцовск. технолог. ин-т, 2000.
- Козлов А.В., Чуманов И.В., Бобылев А.В. Изучение влияния холодной гибки труб с раскатыванием на структуру и свойства металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1999. № 6. С. 33-35.
- Козлов А.А., Козлов С.А. Измерение температуры при гибке с раскатыванием методом естественной термопары // Вестник КГУ. Сер. «Технические науки». Курган: Изд-во КГУ, 2006. Вып. 2. Ч. 1. С. 48-49.
- Козлов А.В., Бобылев А.В. Особенности холодной гибки труб из легированных сталей // Вестник КГУ. Серия «Технические науки». Курган: Изд-во КГУ, 2006. Вып. 2. Ч. 1. С. 190-192.

#### References

- Kozlov A.V., Bobilev A.V. The technology and the equipment of the cold are flexible thin-walled pipes: monograph. Chelyabinsk: Publishing house of SuSU, 2007. 169 p.
- Kozlov A.V., Bobilev A.V. Studying of the thermal phenomena at are flexible pipes with a flaring. Rubtsovsk: Rubtsovsk institute of technology, 2000.
- Kozlov A.V., Chumanov, I.V. Bobilev A.V. Studying of influence of the cold are flexible pipes with a raskatyanie on structure and metals // News of higher education institutions. Ferrous metallurgy. 1999. No. 6. P. 33-35.
- Kozlov A.A., Kozlov S.A. Izmereniye temperatures at are flexible with raskatya-niy a method of natural thermocouple // Messenger of KGU. Technical science series. Kurgan: KGU publishing house, 2006. V. 2. P. 1. P. 48-49.
- Kozlov A.V., Bobilev A.V. Osobennosti cold are flexible pipes from alloyed staly // The Messenger of KGU. Technical science series. Kurgan: KGU publishing house, 2006. V. 2. P. 1. P. 190-192.

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.777:621.771.22

Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Дроздова Т.Н., Трифоненков Л.П., Ворошилов Д.С., Сидельников А.С.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОЦЕНКА СВОЙСТВ ЛИТЬИХ И ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-PЗМ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ\*

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований влияния количественного состава церия, лантана и никеля на свойства и структуру литьих и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ, полученных с помощью совмещенных методов обработки. Изучена структура и свойства металла, дан анализ влияния различного содержания этих элементов в исследуемых сплавах на механические и электрофизические свойства катанки и проволоки, полученные из этих сплавов.

**Ключевые слова:** совмещенные процессы, литье, прокатка, прессование, механические свойства, структура, электросопротивление.

Dovjenko N.N., Sidelnikov S.B., Drozdova T.N., Trifonenkov L.P., Voroshilov D.S., Sidelnikov A.S.

### RESEARCH OF THE STRUCTURE OF METAL AND ESTIMATION OF PROPERTIES CAST AND DEFORMED SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM ALLOYS OF AL-PREM SYSTEM CONTAINING DIFFERENT AMOUNTS OF NICKEL

**Abstract.** There were presented the results of experimental studies of influence of quantitative composition of cerium, lanthanum and nickel on the properties and structure of cast and deformed semi-finished products of alloys Al-REM system, that were receipt with using combined methods of treatment. Studied the structure and properties of metal, presented analysis of the influence of various content of these elements in the experimental alloys on mechanical and electro physical properties of rolled wire and wire receipt from these alloys.

**Keywords:** combined processes, casting, rolling, extruding, mechanical properties, structure, electrical resistance.

Исследования по поиску новых составов алюминиевых сплавов системы Al-PЗМ и изучение их свойств с различным расчетным содержанием церия, лантана и никеля проводили для оценки механических свойств и структуры литьих и деформированных полуфабрикатов. Химический состав слитков из экспериментальных сплавов приведен в табл. 1. Слитки отливали в изложницы, при этом температура плавки составляла 740-750°C, а температура заливки – 730-740°C. Далее по известной технологии [1-3] из слитков методом совмещенной прокатки-прессования получали прутки диаметром 9 мм, а затем холодным волочением проволоку диаметром 2 мм.

Исследование литьих проб всех образцов проводили для оценки влияния химического состава на формирование структуры и свойств экспериментальных сплавов. Макроструктурный анализ показал, что литье пробы исследуемых сплавов состоят из зоны

столбчатых кристаллов, которая занимает более половины слитка, и центральной зоны равноосных кристаллов. Установлено, что увеличение содержания РЗМ более 2 масс. % приводит к образованию зон с веерной структурой.

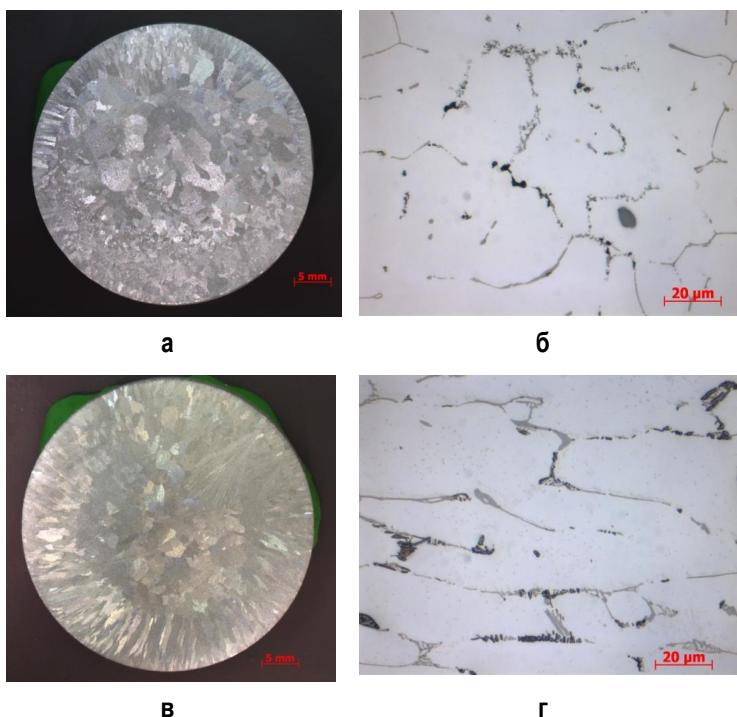
Таблица 1

#### Химический состав слитков из экспериментальных сплавов системы Al-PЗМ с добавками никеля, масс. %

Номер образца сплава	Ce+La (Ce/La=1,2)	Ni	Fe	Si	Cu	Mg	Zn	Ga	$\Sigma Ti,V, Mn,Cr$	Прочие элементы	
										не более	Количество каждого
											Сумма
1	0,9-1,4	-	0,15	0,06	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,05	0,2
2	2,1-2,6	-	0,15	0,06	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,05	0,2
3	2,9-3,4	-	0,15	0,06	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,05	0,2
4	0,9-1,4	0,26-0,32	0,15	0,06	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,05	0,2
5	2,1-2,6	0,20-0,25	0,15	0,06	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,05	0,2

Структура пробы образца №1 (рис. 1), содержащая минимальное количество легирующих элементов, отличается от остальных образцов. Она характеризуется разнозернистостью в центральной зоне равноосных кристаллов и имеет небольшую периферийную зону столбчатых кристаллов.

\* В работе принимали участие В.Н. Баранов, В.А. Падалка, Е.С. Лопатина, Т.А. Орелкина, В.Ф. Фролов, А.В. Сальников.



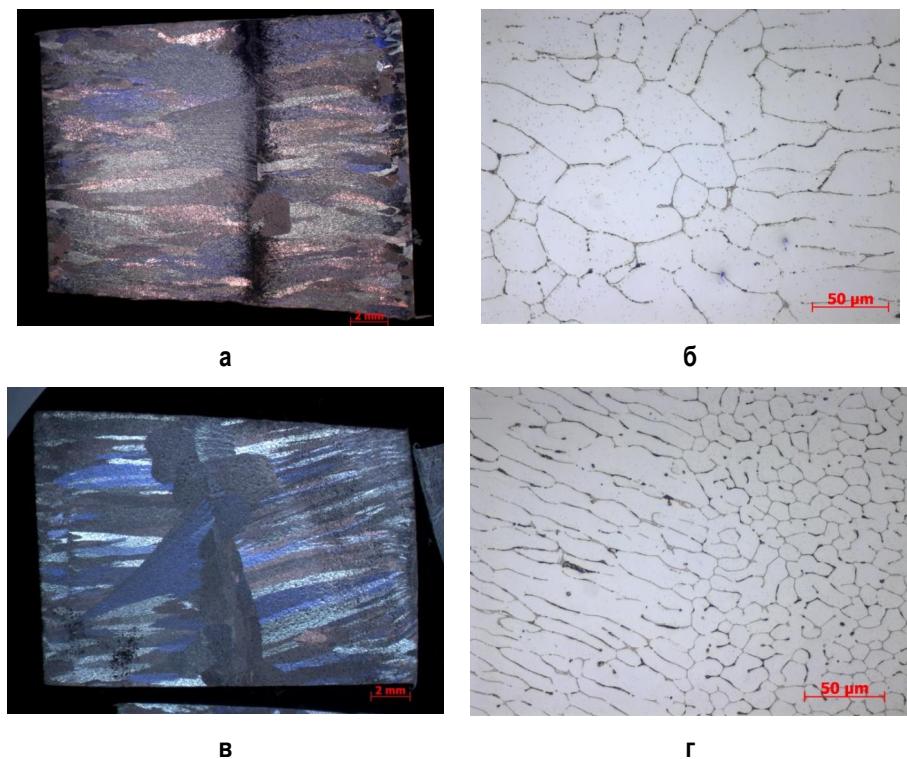
**Рис. 1. Структура литьих образцов №1 (а, б) и №5 (в, г): макроструктура (а, в); микроструктура (б, г), ×1000**

Металлографический анализ литьих проб показал, что микроструктура сплавов состоит из дендритов α-твердого раствора и эвтектических включений избыточных фаз, расположенных по границам дендритных ячеек. Микроструктура всех образцов характеризуется однородным расположением избыточных фаз по сечению. При комплексном легировании в структуре образуются вторичные фазы различной формы и состава. Исследования микроструктуры проб на оптическом и электронном микроскопах позволили выявить морфологию эвтектических фаз, которые имеют округлую и пластинчатую форму. Поэлементный состав включений избыточных фаз в исследуемых сплавах, определенный методом микрорентгеноспектрального анализа, выявил, что окружные включения содержат Al, Si, Fe, Ce, La и Ni (в сплавах, дополнительно легированных никелем). Включения пластинчатой формы содержат элементы Al, Si, Ce, La и Ni (в сплавах, дополнительно легированных никелем). Микрорентгеноспектральный анализ исследуемых сплавов показал, что в эвтектических фазах содержание церия в два раза превышает содержание лантана.

Далее проводили металлографические исследования слитков, полученных из экспериментальных сплавов. Макро- и микроструктура некоторых образцов слитков приведена на **рис. 2**.

В образцах №1, 3, 5 центральная зона равноосных кристаллов практически отсутствует, и макроструктура представляет собой столбчатую транскристаллитную структуру. Макроструктура исследуемых слитков №2 и 4 состоит из периферийной зоны столбчатых кристаллов и центральной зоны равноосных кристаллов. Макроструктура всех слитков, кроме образца №4, содержит зоны с неблагоприятной веерной структурой.

Микроструктура исследуемых слитков характеризуется однородным расположением избыточных фаз по сечению образцов. Увеличение концентрации легирующих элементов влияет на размер дендритных ячеек, форму эвтектических кристаллов и их объемную долю. В образце №1 с содержанием РЗМ 0,9-1,4 масс. % размер дендритной ячейки составляет 26 мкм, в образце 3 с концентрацией РЗМ 2,9-3,4 масс.% размер дендритной ячейки уменьшается до 19 мкм. Повышение суммарной концентрации легирующих элементов в анализируемом интервале приводит к увеличению объемной доли эвтектики с 10 до 20%. Грубые веерные кристаллы с двойниковаными границами приводят к формированию при кристаллизации характерного расположения ветвей дендритов относительно плоскости двойникования (образцы №3 и 5). Такие участки структуры могут оказывать неблагоприятное воздействие при изготовлении деформированных полуфабрикатов.



**Рис. 2. Структура слитков образцов №1 (а, б) и №5 (в, г): макроструктура (а, в); микроструктура (б, г), ×500**

Далее из литьих заготовок по технологии совмещенной прокатки-прессования получали катанку диаметром 9 мм, из которой далее изготавливали проволоку диаметром 2 мм холодным волочением. Полученная микроструктура образцов деформированных полуфабрикатов приведена на рис. 3.

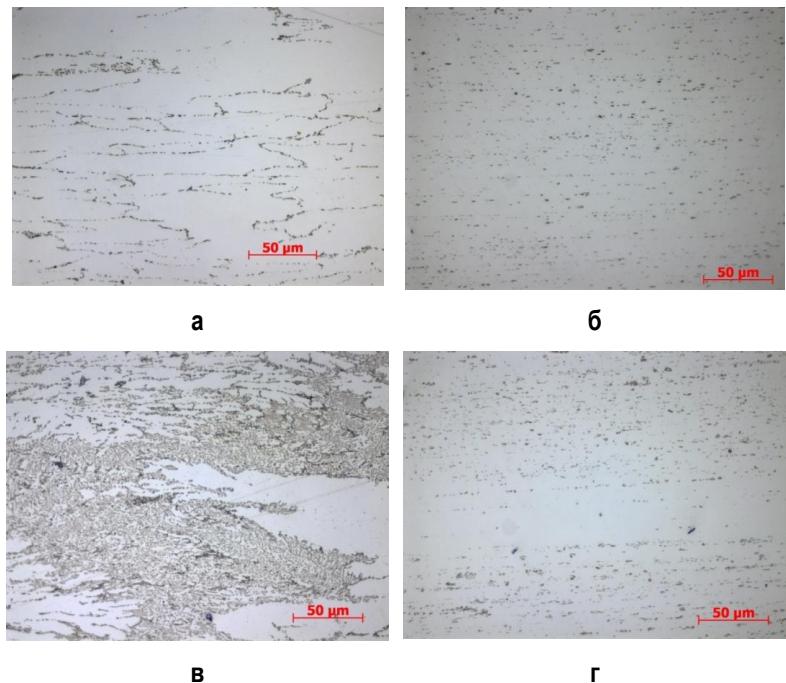


Рис. 3. Микроструктура катанки (а, в) и проволоки (б, г) образцов №1 (а, б) и №5 (в, г), x500

Выявлено, что совмещенная прокатка-прессование привела к деформации твердого раствора, изменению формы дендритных ячеек и дроблению избыточных фаз эвтектического состава, а также частичному растворению неравновесных фаз. Дендритные ячейки и эвтектические колонии пластинчатого строения ориентированы в направлении оси деформации. Расположение фаз, их количество, размер и форма будут оказывать влияние на упрочнение и электрофизические свойства полуфабрикатов из исследуемых сплавов.

Повышение суммарной концентрации легирующих элементов в интервале от 0,9-1,4 до 2,9-3,4 масс.% приводит к увеличению неоднородности в структуре катанки. Зоны с расположением избыточных фаз становятся шире за счет увеличения объемной доли эвтектических составляющих в сплавах системы Al-PЗМ.

Волочение привело к образованию строчечной структуры в виде избыточных фаз. Строчечность в структуре проволоки возрастает с повышением степени легированности сплавов РЗМ.

Для определения механических свойств использовали универсальные машины LFM 400 кН и LFM 20 кН. Измерение микротвердости деформированных полуфабрикатов проводили при нагрузке 200 гр. на приборе AFFRI DM 8. Свойства деформированных полуфабрикатов, изготовленных из исследуе-

мых сплавов, приведены в табл. 2.

Временное сопротивление разрыву катанки находится в диапазоне 134-153 МПа, относительное удлинение достигает 16-27%. После холодного волочения временное сопротивление разрыву образцов проволоки увеличивается до 194-218 МПа, а относительное удлинение падает до 1,5-8,3%.

Анализ полученных результатов показал, что микротвердость катанки изменяется в пределах 39-46 кгс/мм<sup>2</sup>, а проволоки достигает значений 54-57 кгс/мм<sup>2</sup>, что аналогично изменению прочностных свойств полуфабрикатов.

Полученные значения удельного электрического сопротивления (УЭС) для деформированных полуфабрикатов находятся в интервале: для катанки – 0,0278-0,0295 Ом·мм<sup>2</sup>/м; для проволоки – 0,0287-0,030 Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Таким образом, в результате исследований выявлено, что увеличение концентрации легирующих элементов в исследуемых сплавах на основе алюминия приводит к росту временного сопротивления разрыву и удельного электросопротивления, что связано в основном с увеличением объемной доли эвтектики в этих сплавах. Анализ результатов механических и электрофизических свойств показал, что с увеличением содержания церия и лантана увеличивается временное сопротивление разрыву, твердость и удельное электросопротивление. Легирование никелем сплавов системы Al-PЗМ повышает пластичность и технологичность обработки, при этом прочностные свойства соответствуют сплавам без никеля с аналогичным содержанием РЗМ, а значения УЭС несколько повышаются.

Таблица 2  
Механические и электрофизические свойства деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов

Номер образца	Ce+La (Ce/La = 1,2)	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, %	Микротвердость HV, кгс/мм <sup>2</sup>	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м
Катанка					
1	0,9-1,4	139,7	16,0	40,9±2,7	0,0278
2	2,1-2,6	142,5	17,3	42,9±1,4	0,0286
3	2,9-3,4	152,9	17,5	46,5±1,5	0,0288
4	0,9-1,4	134,0	18,8	42,4±0,8	0,0279
5	2,1-2,6	141,8	26,6	39,2±0,9	0,0295
Проволока					
1	0,9-1,4	193,6	8,2	56,0±0,6	0,0287
2	2,1-2,6	207,1	3,3	56,6±0,8	0,0296
3	2,9-3,4	217,5	2,9	56,5±4,4	0,0302
4	0,9-1,4	218,3	1,5	55,9±2,4	0,0289
5	2,1-2,6	204,2	5,1	54,5±0,8	0,0298

Полученные результаты исследований использовались при проектировании технологии и оборудования совмещенной обработки алюминиевых сплавов с переходными и редкоземельными металлами для получения катанки электротехнического назначения в рамках выполнения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и ООО «РУСАЛ ИТЦ» договора №13.G25.31.0083 с Минобрнауки России по созданию высокотехнологичного производства.

#### **Список литературы**

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
  2. Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al-P3M, полученных совмещенными методами литья и обработки давлением / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Ворошилов Д.С. и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 23-28.
  3. Повышение эффективности производства профилей из алюминиевых сплавов на основе управления тепловыми условиями процесса прессования / С.В. Беляев, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников и др. // Журнал Сибирского федерального университета. 2009. №4. С. 418-426.
- 
- References
1. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. Combined methods of treatments of non-ferrous metals and alloys: a monograph. M.: MAKSPRESS, 2005. P. 344.
  2. Research of the structure of metal and estimation properties of test samples from alloy of Al-P3M system, which were receipt with using combined methods of casting and forming / Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Voroshilov D.S. and other // Bulletin of the MSTU named after G.I. Nosov. 2011. №2. P. 23-28.
  3. Improving the efficiency of production profiles from aluminum alloys based on control of thermal conditions of extruding process / S.V. Belyaev, N.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov and other // Journal of Siberian Federal University. 2009. №4. P. 418-426.
-

# УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

УДК 65.018

Федосеев С.А., Гитман М.Б., Столбов В.Ю.

## СВОЕВРЕМЕННОСТЬ ПОСТАВКИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

**Аннотация.** Показано, что своевременность поставки продукции потребителям является одним из важнейших показателей ее качества. Рассмотрен комплекс задач, решение которых позволяет промышленным предприятиям минимизировать отклонения от установленных потребителями сроков поставки продукции.

**Ключевые слова:** качество продукции, своевременность поставки продукции, оптимизация планов производства, устойчивость планов производства, сетецентрические производственные системы.

Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Yu.

### ON-TIME DELIVERY AS A MEASURE OF THE QUALITY OF PRODUCTS

**Abstract.** It is shown that on-time delivery of products to customers is one of the most important indicators of quality. The complex of problems whose solution allow industries to minimize deviations from the consumers product delivery dates.

**Keywords:** quality of products, on-time delivery of products, optimization of production plans, sustainability of production plans, network-centric operating system.

#### Введение

В работе [1] отмечено, что одним из важнейших требований современного потребителя является своевременность поставки продукции, т.е. минимальное отклонение от установленных потребителем сроков предоставления продукции. Это связано с динамичностью качества продукции [2], т.е. свойства, составляющие качество продукции, могут изменяться с течением времени. В терминах интегрального качества [3] со временем могут меняться функциональные свойства продукции, ее потребительная стоимость и стоимость. Так, задержка поставки может привести к порче (полной или частичной) продукции с небольшим сроком хранения или к отказу потребителя от продукции, который уже потерял в ней необходимость, или нанести потребителю экономический ущерб из-за вынужденногоостояния его производственных мощностей. Аналогичные негативные последствия могут наступить и при преждевременной поставке продукции потребителю.

Для выполнения поставок продукции точно в установленный срок предприятию-поставщику необходимо решить целый комплекс взаимосвязанных задач, среди которых могут быть выделены следующие:

1) планирование производства с минимальными отклонениями от установленных потребителем сроков поставки продукции;

2) повышение устойчивости планов производства к малым возмущениям производственных ресурсов за счет изменения параметров производственного планирования (параметрическая адаптация);

3) ликвидация отклонений от планов производства при значительных возмущениях производственных ресурсов за счет изменения структуры управления производственной системой (структурная адаптация).

Рассмотрим возможные подходы к решению данных задач.

#### Оптимизация планов производства

В работе [4] показано, что для своевременной поставки продукции потребителям необходимо соответствующим образом определить целевые функции (критерии) в задачах оптимизации планов производства на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях управления предприятием.

Результатом решения задачи оптимального планирования на стратегическом уровне управления предприятием является главный календарный план производства (ГКПП), оптимальный по критериям выгодности (прибыльности) и важности потребителей для предприятия. ГКПП определяет, какую готовую продукцию, в каком объеме и к какому моменту необходимо произвести. При формировании ГКПП могут быть использованы критерии следующего вида [4]:

– критерий прибыльности

$$\sum_{i=1}^N \left[ \alpha_i \sum_{j=1}^{L_i} q_{ij} (c_{ij} - c_{ij}^*) - (1 - \alpha_i) F(D_i, \gamma) \right] \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , определяет включение  $i$ -й отгрузочной партии в ГКПП, если  $\alpha_i = 1$ , то отгрузочная партия включается в ГКПП; если  $\alpha_i = 0$ , то отгрузочная партия не включается в ГКПП;  $L_i$  – количество позиций в  $i$ -й отгрузочной партии;  $q_{ij}$  – объем  $j$ -й позиции в  $i$ -й отгрузочной партии;  $c_{ij}$  – цена  $j$ -й позиции в  $i$ -й отгрузочной партии;  $c_{ij}^*$  – себестоимость  $j$ -й позиции в  $i$ -й отгрузочной партии;  $F(D_i, \gamma)$  – функция, определяющая значение критерия прибыльности для  $i$ -й отгрузочной партии.

ции в  $i$ -й отгрузочной партии;  $F$  – функция штрафа;  $D_i$  – отклонение от требуемой даты выпуска;  $\gamma$  – период планирования;

– критерий важности

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i W_i \max_j V_{ij} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $V_{ij}$  – важность  $j$ -й позиции в  $i$ -й отгрузочной партии;  $W_i$  – важность клиента, заказавшего  $i$ -ю отгрузочную партию.

При формировании оптимального ГКПП своевременность поставки продукции, с одной стороны, достигается введением в критерий (1) функции штрафа  $F$ , который возрастает при увеличении отклонения от даты отгрузки продукции потребителю и тем самым снижает прибыль предприятия. С другой стороны, своевременность поставки продукции достигается за счет дифференциации потребителей на стратегически более и менее важных для предприятия с помощью параметра  $W_i$ , используемого в критерии (2). При этом предприятие ориентируется на первоочередное выполнение обязательств перед потребителями, наиболее важными для него в долгосрочном плане, а требования менее важных потребителей предприятие учитывает в меньшей степени или не учитывает совсем.

На тактическом уровне управления предприятием в большей степени, чем на стратегическом уровне, учитываются интересы производственных подразделений предприятия, связанные с сокращением затрат на производство, в том числе за счет возможного снижения прибыльности ГКПП и своевременности его выполнения. Проблема состоит в том, чтобы повышение эффективности использования оборудования не привело к значительному снижению своевременности выполнения ГКПП и его прибыльности. Для этого должна быть решена соответствующая много-критериальная задача календарного планирования, учитывающая интересы потребителей, а также сбытовых и производственных подразделений предприятия. В результате решения данной задачи должен быть получен устрашающий все стороны план производства комплектующих (полуфабрикатов), необходимых для производства готовой продукции. При этом для обеспечения своевременности выполнения ГКПП может быть использован критерий следующего вида [4]:

$$\sum_{d=1}^T \sum_{d^*=1}^{d-d^*>0} \frac{1}{d^*} \chi_d \sum_{l=1}^W \frac{p_{ld-d^*} t_l}{q_{e_l} t_{e_l}^*} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $T$  – количество дней в плановом периоде;  $\tau$  – нормативный запас времени перед отгрузкой продукции (параметр опережения);  $\chi_d$  – индикатор наличия отгрузки продукции в день  $d$ ;  $W$  – количество видов операций;  $p_{ld}$  – количество операций вида  $l$  в день  $d$ ;  $t_l$  – трудоемкость операций вида  $l$ ;  $e_l \in \overline{1, E}$  – на рабо-

зах центрах какого типа выполняется операция вида  $l$ ;  $E$  – количество типов рабочих центров;  $q_k$  – количество рабочих центров типа  $k$ ;  $t_k^*$  – максимальная загрузка рабочих центров типа  $k$ . Содержательно данный критерий означает уменьшение загрузки оборудования к дате выпуска готовой продукции, т.е. выпуск продукции с некоторым запасом по времени (опережением), определяемом параметром  $\tau/2$ .

На оперативном уровне управления предприятием должны решаться задачи, направленные на сокращение производственных затрат с учетом специфики конкретного производства, но без отрицательного влияния на принятый на тактическом уровне план производства комплектующих (полуфабрикатов). В результате решения данных задач должны быть получены сменно-суточные задания для исполнителей на конкретных рабочих местах. При этом для обеспечения своевременности выполнения плана производства комплектующих (полуфабрикатов) может быть использован критерий следующего вида [5]:

$$\sum_{ijkl} x_{ij}^{kl} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где каждому элементу матрицы  $x_{ij}^{kl}$  соответствует время запуска  $i$ -й партии на  $j$ -й операции для  $k$ -й детали на  $l$ -м станке. Содержательно данный критерий означает уменьшение времени обработки партий деталей и, как следствие, обеспечивает запас времени для выполнения плана производства комплектующих (полуфабрикатов). При этом выполняются все ограничения на сроки сдачи продукции заказчику, заложенные в плане производства комплектующих (полуфабрикатов).

На практике оптимизация планов производства на различных уровнях управления предприятием с использованием критериев (1)–(4) позволяет предприятиям увеличить количество своевременно выполненных заказов потребителей на 2-5% и более.

### Устойчивость планов производства

В условиях реального производства всегда возникают отклонения, связанные с количеством необходимых для выполнения планов производственных ресурсов, которые учитывались в качестве ограничений при решении оптимизационных задач, описанных выше. Причинами таких отклонений могут быть поломки оборудования, срыва поставок материалов и комплектующих, рост процента брака и т.п. В связи с этим возникает необходимость в обеспечении устойчивости планов производства к указанным отклонениям. Следует отметить, что при решении задач оптимального производственного планирования, как правило, может быть получено несколько планов, среди которых может быть выбран наиболее устойчивый к возможным отклонениям.

Один из подходов к решению задачи повышения устойчивости планов производства может быть следующим [6]. Вводится в рассмотрение метрическое фазовое пространство, каждая точка которого соответствует состоянию производственной системы в

определенный момент времени  $t$ :

$$\Pi = (X, \rho),$$

$$x^t = (x_1^t, \dots, x_n^t) \in X,$$
(5)

где  $X$  – множество элементов фазового пространства  $\Pi$ ;  $x^t$  – элемент множества  $X$ , определяющий состояние плана производства в момент времени  $t$ ;  $\rho$  – метрика пространства  $\Pi$ , определяющая расстояние между состояниями производственной системы;  $x_1^t, \dots, x_n^t$  – компоненты элемента  $x$  множества  $X$ , значениями которых является объем произведенных комплектующих (полуфабрикатов) типа  $i$  ( $i = \overline{1..n}$ ) на момент времени  $t$ ;  $n$  – общее число типов комплектующих (полуфабрикатов) для готовой продукции из ГКПП;  $t$  – момент времени планового периода.

План производства  $X$ , рассматриваемый в пространстве состояний вида (5), называется устойчивым по вероятности, если в конечный момент времени выполняется неравенство

$$P(\|x - x^*\| < \varepsilon) > P^{**},$$
(6)

где  $P^{**}$  – допустимая вероятность отклонения возмущенного плана от запланированного;  $\|x - x^*\|$  – отклонение конечного состояния возмущенного плана от конечного состояния невозмущенного по соответствующей норме;  $\varepsilon$  – максимально допустимое отклонение возмущенного плана  $x^*$  от невозмущенного плана  $x$ , который имеет размерность расстояния между состояниями производственной системы в ее фазовом пространстве.

Параметры  $P^{**}$  и  $\varepsilon$  задаются экспертами и отражают требования конкретного предприятия к устойчивости плана  $X$ .

Введенное определение устойчивости плана производства означает, что при любой вероятности возникновения возмущения в процессе выполнения на конечном временном шаге вероятность совпадения возмущенного и исходного планов в пределах допустимого отклонения  $\varepsilon$  будет приемлемой, т.е. больше наперед заданной вероятности  $P^{**}$ .

На основе введенного фазового пространства состояний производственной системы и определения устойчивости плана производства в работе [6] была предложена методика оценки вероятностной устойчивости планов производства, в том числе позволяющая оценивать влияние параметров алгоритма планирования производства на устойчивость результирующего плана производства. С помощью данной методики и имитационного моделирования на конкретном примере удалось показать, что план, ориентированный на сокращение

времени изготовления продукции (план 2), является менее устойчивым по отношению к внешним возмущениям по сравнению с планом, ориентированным на сокращение риска срыва плана производства с использованием критерия (3) (план 1). Результаты оценки вероятностной устойчивости планов производства 1 и 2 представлены на **рис. 1**. Анализ графиков, приведенных на **рис. 1**, показывает, что при одной и той же вероятности поломки оборудования вероятность выполнения плана 1 выше, чем плана 2. Следует отметить, что вероятность выполнения плана 1 в значительной степени определяется значением параметра опережения  $\tau$ .

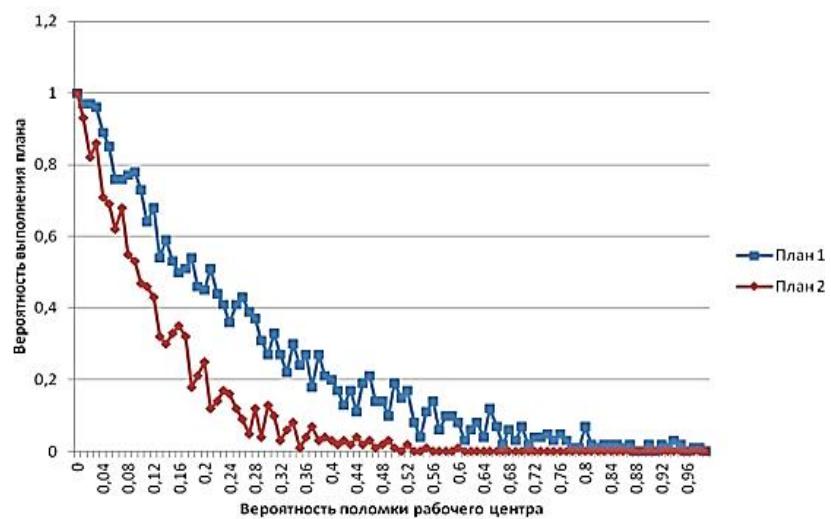


Рис. 1. Результаты моделирования выполнения двух планов производства с различными критериями оптимальности

### Сетецентрические производственные системы

Любые планы производства, в т.ч. устойчивые в вероятностном смысле, не гарантируют своевременность поставки продукции потребителям при достаточно больших отклонениях, связанных с количеством необходимых для выполнения планов производственных ресурсов. Поэтому еще одной задачей для предприятия, стремящегося к максимально полному выполнению требований потребителей, является успешное преодоление существенных отклонений от планов производства, возникающих на практике. Данная задача может быть решена за счет изменения структуры управления производственной системой на основе сетецентрического подхода [7].

Под сетецентрической производственной системой будем понимать промышленное предприятие, для управления которым используются самоорганизующиеся распределенные группы интеллектуальных элементов. Согласно [8] под группой интеллектуальных (способных принимать самостоятельные решения) элементов производственной системы будем понимать сбытовые, производственные и снабженческие подразделения промышленного предприятия, функционирующие в некоторой внешней среде, образованной, в частности, рынками продукции, сырья и труда, и способные получать информацию об этой среде, реагиро-

вать на изменение состояния среды и взаимодействовать друг с другом для достижения единой цели, например своевременного выполнения ГКПП.

В общем случае для решения конкретной задачи, ведущей к достижению цели, например преодоления отклонений от плана производства комплектующих (полуфабрикатов), могут быть использованы не все подразделения группы. При этом для реализации группового управления должны быть решены следующие подзадачи:

- формирование активной части группы – кластера как совокупности подразделений, сформированной для решения конкретной задачи;

- оптимальное в некотором смысле распределение функций и имеющихся ресурсов производственной системы между подразделениями группы, а также перераспределение этих функций и ресурсов при изменении ситуации;

- реализация функций подразделениями, входящими в кластер.

При невыполнении плана производства комплектующих (полуфабрикатов) одно или несколько производственных подразделений могут либо привлечь дополнительные трудовые ресурсы (организовать дополнительные рабочие смены или привлечь дополнительных рабочих из вне), либо договориться со снабженческими подразделениями о закупке недостающих комплектующих у других производителей, либо договориться со сбытовыми подразделениями о приемлемом для потребителей изменении ГКПП. Другими словами, может быть найдено эффективное управление решением путем самоорганизации подразделений предприятия при их сетевом взаимодействии.

Постановка задачи группового управления в производственных системах может быть рассмотрена как частный случай постановки, предложенной в работе [9].

Пусть некоторая группа  $\mathbf{P}$ , состоящая из  $N$  подразделений  $P_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , выполняет ГКПП, т.е. реализует потребности в готовой продукции  $M$  потребителей  $B_k$ ,  $k = \overline{1, M}$ . Состояние каждого подразделения  $P_i$  описывается вектором  $\mathbf{S}_i(t) = [s_{1i}, s_{2i}, \dots, s_{li}]^T$ ,  $i = \overline{1, N}$ , где компоненты вектора  $s_{ji}$  могут обозначать количества отгруженной готовой продукции, выпущенных комплектующих или закупленных материалов каждым подразделением. Состояние каждого потребителя  $B_k$  описывается векторами  $\mathbf{E}_k(t) = [e_{1k}, e_{2k}, \dots, e_{wk}]^T$ ,  $k = \overline{1, M}$ , где элементы вектора  $e_{jk}$  могут обозначать количества готовой продукции определенного вида, полученной каждым потребителем. Пусть каждое подразделение  $P_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  для выполнения ГКПП может потратить некоторую совокупность ресурсов  $\mathbf{A}_i = \{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{mi}\}$ ,  $i = \overline{1, N}$ , где компоненты вектора  $A_{ji}$  могут обозначать материалы, комплектую-

щие, готовую продукцию, трудовые и финансовые ресурсы. Затрачивая ресурсы, подразделение  $P_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , может менять как состояние потребителей, так и состояние других подразделений. В общем случае эти изменения во времени определяются системами вида:

$$\dot{\mathbf{S}}_i(t) = F_i(\mathbf{S}_1, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{A}_N, \mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_M), \quad i = \overline{1, N}, \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{E}}_k(t) = F_k(\mathbf{S}_1, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{A}_N, \mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_M), \quad k = \overline{1, M}. \quad (8)$$

На состояние подразделений и потребителей, а также на действия подразделений в конкретных ситуациях могут налагаться некоторые ограничения, в общем случае определяемые системами неравенств:

$$\mathbf{G}(\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_M) \leq 0, \quad (9)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{S}_1, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{A}_N, \mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_M) \leq 0. \quad (10)$$

Содержательно данные неравенства могут обозначать ограничения на потребности потребителей, на составы изделий, на имеющиеся в распоряжении производственной системы материальные, трудовые, финансовые ресурсы и производственные мощности.

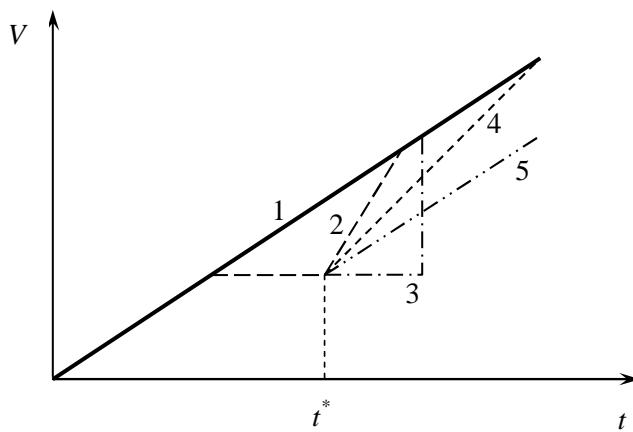
Пусть необходимо решить некоторую целевую задачу  $\mathbf{T}_\mu \in \Xi$ , где  $\Xi$  – множество целей, на которые ориентирована данная группа подразделений. Примером  $\mathbf{T}_\mu$  может быть преодоление отклонения от плана производства комплектующих в условиях  $\mathbf{f}_\mu = \{f_{1\mu}, f_{2\mu}, \dots\}$ , где элементы  $f_{j\mu}$  могут обозначать количественные или временные отклонения от плана. Для этого требуется потратить некоторую совокупность ресурсов  $\mathbf{R}_\mu = \{R_{1\mu}, R_{2\mu}, \dots, R_{r\mu}\}$ , где элементы  $R_{v\mu}$  могут обозначать количества ресурсов определенного вида. При этом каждый из ресурсов  $R_{v\mu}$  может быть потрачен подразделением  $P_i$  с затратами  $q_{i\mu}(R_{v\mu})$  в денежном или временном выражении. Необходимо сформировать кластер из подразделений  $P_i \in \mathbf{P}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n \leq N$ , который при ограничениях (8)-(10) доставит экстремальное значение критерию оптимальности решения целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$ :

$$J_\mu = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^r q_{i\mu}(R_{v\mu}) \rightarrow \min,$$

где  $n$  – количество подразделений, включенных в кластер для решения целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  в результате самоорганизации в производственной системе.

На **рис. 2** представлена иллюстрация возможных траекторий выполнения плана по выпуску некоторой продукции при возникновении в момент  $t^*$  отклоне-

ний от первоначального плана (график 1), например связанных с поломкой оборудования. При этом отклонение от плана может быть преодолено либо только производственными подразделениями предприятия за счет организации сверхурочных работ или найма дополнительной рабочей силы (график 2), либо только снабженческими подразделениями за счет закупки недостающей продукции у внешних поставщиков (график 3), либо только сбытовыми подразделениями за счет договоренности с потребителем о сокращении объемов поставки (график 4), либо совместно несколькими или всеми подразделениями предприятия (график 5). При этом окончательное решение о варианте преодоления отклонений от плана производства может быть принято подразделениями предприятия на основании стоимостных затрат на каждый из вариантов.



**Рис. 2. Варианты решения задачи преодоления отклонений от плана производства**

### Выводы

Своевременность поставки продукции потребителям является одним из важнейших показателей ее качества. Для выполнения поставок продукции точно в установленный срок предприятию-поставщику необходимо решить целый комплекс взаимосвязанных задач по оптимизации планов производства, по обеспечению устойчивости планов производства, а также по преодолению возможных значительных отклонений от планов производства. Для решения перечисленных задач предлагается использовать специальные целевые функции, минимизирующие риски срыва планов производства. Расчет введенной вероятностной устойчивости позволяет из полученного набора оптимальных планов выбрать наименее подверженные влиянию возможных возмущений. Применение сетецентрического подхода, ориентированного на самоорганизацию взаимосвязанных подразделений предприятия, обеспечивает преодоление существенных отклонений от планов производства, возникающих на практике.

### Список литературы

1. Федосеев С.А., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Математические модели управления качеством продукции на этапе планирования производства // Проблемы управления. 2011. № 4. С. 60-67.
2. Субетто А.И. Сочинения. Ноосферизм: в 13 т. Т.8: Квализитивизм: философия и теория качества, квалитология, качество жизни, качество человека и качество образования. Кн. 1 / под ред. Л.А. Зеленова. С.-Петербург; Кострома: КГУ им. Н.А.Некрасова, 2009. 392 с.
3. Гличев А.В., Панов В.П., Азгалдов Г.Г. Что такое качество? М.: Экономика, 1968. 135 с.
4. Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях: монография / С.А. Федосеев, М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов, А.В. Вожаков. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. ун-та, 2011. 229 с.
5. Федосеев С.А., Беляев А.А. Роль процессов планирования производства в обеспечении качества продукции // Вестн. высших учебных заведений Черноземья. 2010. № 4 (22). С. 61-65.
6. Елисеев А.С., Гитман М.Б., Суханцев С.С. Алгоритм оценки устойчивости производственного плана в условиях стохастичности ресурсных ограничений // Материалы 5-й Рос. мультиконференции по проблемам управления «Управление в технических, эргодических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012, 9-11 октября 2012 года, Санкт-Петербург). С. 572-575. [Электронный ресурс]. URL: <http://uteoss2012.ipu.ru/>
7. Федосеев С. А., Столбов В.Ю., Пустовойт К.С. Модель группового управления в сетецентрических производственных системах // Материалы 5-й Российской мультиконференции по проблемам управления «Управление в технических, эргодических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012, 9-11 октября 2012 года, Санкт-Петербург). С. 1240-1243. [Электронный ресурс]. URL: <http://uteoss2012.ipu.ru/>
8. Каляев И.А., Купустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Сетевые модели в управлении. М.: Эгес, 2011. С. 57-89.
9. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Купустян С.Г. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.

### References

1. Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Yu. Mathematical models for production quality control at the manufacture planning stage // Control sciences. 2011. № 4. P. 60-67.
2. Subetto A.I. Noospherism. Vol. 8: Qualitievism: philosophy and theory of quality. Book No. 1 / Ed. by L.A. Zelenov. St. Petersburg - Kostroma: Kostroma State University named after N.A. Nekrasov, 2009. 392 p.
3. Glichev A.V., Panov V.P., Azgaldov G.G. What is quality? Moscow: Economics, 1968. 135 p.
4. Product quality control in modern industrial enterprises: Monograph / S.A. Fedoseev, M.B. Gitman, V.Yu. Stolbov, A.V. Vozhakov. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2011. 229 p.
5. Fedoseev S.A., Belyaev A.A. The role of the planning of production to ensure the quality of products // News Chernozem universities. 2010. № 4 (22). P. 61-65.
6. Ellseev A.S., Gitman M.B., Suhantsev S.S. Algorithm for assessing the sustainability of the production plan in a stochastic resource constraints // Materials of the conference «Control in engineering, ergatic, organizational and network systems» (Russia, St. Petersburg, 9-11 October 2012). P. 572-575. Electronic resource. <http://uteoss2012.ipu.ru/>
7. Fedoseev S.A., Stolbov V.Y., Pustovoit K.S. Model of group control in network-centric manufacturing systems // Materials of the conference «Control in engineering, ergatic, organizational and network systems» (Russia, St.-Petersburg, 9-11 October 2012). P. 1240-1243. Electronic resource / <http://uteoss2012.ipu.ru/>
8. Kalyaev I.A., Kupustyan S.G., Haiduk A.R. Self-organizing distributed systems for intelligent robots group management that are based on the network model // Network models in management. M.: Egves, 2011. P. 57-89.
9. Kalyaev I.A., Hayduk A.R., Kupustyan S.G. Methods and models of collective management in groups of robots. M.: FIZMATLIT, 2009, 280 p.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВАГОННЫХ ОСЕЙ

**Аннотация.** В работе рассматривается алгоритм нахождения причин дефектов в процессе производства заготовок вагонных осей. Предложенный алгоритм позволяет выявить параметры производственного процесса, влияющие на качество продукции. Полученные результаты можно использовать при формировании рекомендаций по уменьшению количества дефектных изделий.

**Ключевые слова:** качество продукции, анализ производства, управление качеством.

Sukhantsev S.S., Gitman M.B., Elyseev A.S.

### STATISTICAL ANALYSIS OF THE FACTORS INFLUENCING THE FORMATION OF DEFECTS IN THE PROCESS OF CAR AXLES PRODUCTION

**Abstract.** The survey contains algorithm, which helps to find out reasons for car axles of poor quality while production. This algorithm gives an opportunity to define production characteristics, which will help to control its quality. Selection of particular characteristics will help to give recommendations how to reduce defective products.

**Keywords:** production quality, production analysis, quality control.

#### Введение

Металлургические предприятия в жестких условиях рынка должны производить продукцию высокого качества. Поэтому актуальным является вопрос нахождения причин, способствующих образованию дефектов в готовых изделиях. Одним из методов, позволяющих найти причины низкого качества продукции, не увеличивая при этом ее себестоимости, является метод Тагуты [6]. Этот метод основан на применении методики математического планирования эксперимента [1] и позволяет управлять качеством продукции с помощью нахождения таких параметров проведения процесса изготовления изделия, при которых отклонение получаемого качества продукции от необходимого (заданного) уровня качества будет минимальным.

В данной работе рассматривается задача нахождения причин, влияющих на качество заготовок вагонных осей одного из металлургических предприятий. Основные производственные этапы и оборудование технологического маршрута производства заготовок вагонных осей представлены на рис. 1. После выполнения производственного цикла, который представляет собой совокупность процессов плавки стали, обработки, вакуумирования и разливки, заготовки вагонных осей отгружаются заказчику. Следует отметить, что брак выявляется только при механической обработке заготовок и отследить его в процессе производства изделий невозможно. Механическая обработка заготовок происходит на стороне заказчика. Партия с уровнем брака больше допустимой нормы возвращается, и соответственно предприятие терпит убытки.

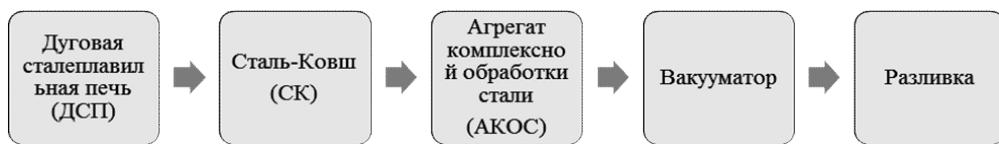


Рис. 1. Этапы технологического маршрута

Целью данной работы является разработка алгоритма нахождения факторов производства, влияющих на параметры качества заготовок вагонных осей на примере реальных данных металлургического предприятия. [1]. Под параметрами качества будем понимать количество бракованных изделий в одной плавке.

#### Алгоритм решения задачи

Необходимо определить факторы, влияющие на качество готового изделия. Оптимальные значения этих факторов определят минимальный уровень брака [4].

Для решения этой задачи был разработан алгоритм, состоящий из двух этапов. На первом этапе отбираются две плавки заготовок вагонных осей, проведенные за рассматриваемый период, с минимальным и максимальным количеством бракованных изделий. Бракованные изделия предусматривают наличие заводских дефектов – несоответствие требованиям отдела качества, а также дефекты, обнаруженные при механической обработке заготовок, – волосовины. Волосовины представляют собой дефект стальных изделий в виде тонких трещинок, расположенных в прокатанных изделиях. Отметим, что рассматриваемый технологический процесс отливки заготовок содержит более 200 настраиваемых факторов производства. Рассматривая значения этих факторов в плавках, находим наиболее различающиеся. При этом факторы, значения которых значительно не отличаются, убираются из дальнейшего рассмотрения.

На втором этапе полученный набор факторов подвергаем корреляционному и регрессионному анализу. Первоначально определяются параметры, коррелирующие которых с уровнем брака наибольшая. Далее составляются уравнения регрессии для определения уровня влияния рассматриваемых факторов на параметры качества.

Отметим, что дополнительным преимуществом предлагаемого подхода является повышение эффективности выборочных методов контроля качества [3].

### Применение алгоритма

В качестве основного источника данных по факторам производства были взяты паспорта плавок за 2011 год в количестве более шестидесяти штук для заготовок (блумов) диаметром 380x380 (первая группа) и 480x540 (вторая группа). По каждому из паспортов были получены данные по уровню брака в партии заготовок вагонных осей. Уровень брака в выборке варьируется от 0 до 16.7%. Уровень определяется как процент вагонных осей из конкретной плавки с дефектом, определенным на производстве и рекламациях.

Для первой группы были выбраны две плавки с максимально разным уровнем брака. В качестве рассматриваемых плавок взяты: M4-5987 и M4-4544, где брак составил 0 и 16,7% соответственно. Из каждой плавки было получено 84 заготовки вагонных осей. Таким образом, две плавки с одинаковым количеством получившихся осей имеют очень большой разрыв по уровню брака. Соответственно, чтобы определить причины появления дефектов в плавке M4-4544, необходимо найти факторы производства, значения которых заметно отличаются от соответствующих в M4-5987. Получившийся список в дальнейшем будем рассматривать как факторы, влияние которых на параметры качества наиболее значительное.

В каждом из паспортов рассмотрим все факторы, которые отражены при производстве, их около 200 штук. Выберем в качестве возможных факторов, влияющих на брак, те, которые больше всего различаются по величине в рассматриваемых плавках. В результате анализа был получен следующий набор факторов:

- уровень Mn в стали;
- продолжительность операции кипения в ДСП;
- расход кислорода в ДСП;
- общее время работы на АКОС;
- уровень аргона в трим доводке при операции в вакууматоре;
- сумма расхода добавленного материала на этапе сталь – ковш (алюминиевая проволока и FeMn);
- общее время разливки;
- скрап при отливке.

Составлены графики облаков рассеивания для каждого из рассматриваемых факторов. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о

том, что наиболее правдоподобной зависимостью между параметрами плавки и уровнем брака можно считать линейную зависимость. На **рис. 2** представлен один из 8 графиков облаков рассеивания для уровня брака и расхода добавленного материала на этапе сталь-ковш.

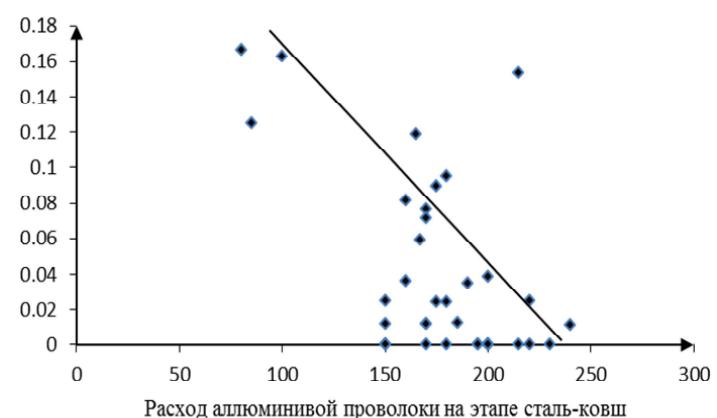
В **табл. 1** представлены результаты проведенного корреляционного анализа факторов.

Исходя из результатов корреляционного анализа (см. **табл. 1**), можно сделать вывод о том, что у большинства факторов слабая и средняя корреляция. В **табл. 2** указана интерпретация коэффициентов корреляции [2].

**Таблица 1**

### Корреляция факторов производства

Параметр	Кислород (м3)	Общее время работы	Уровень Mn	Трим доводка	Скрап	Лэддл (FeMn)	Лэддл (Al проволока)	Общее время разливки	Время кипения	Брак
Кислород (м3)	1.00									
Общее время работы	0.13	1.00								
Уровень Mn	-0.02	-0.17	1.00							
Трим доводка	0.13	0.02	-0.21	1.00						
Скрап	0.11	0.24	-0.41	0.21	1.00					
Лэддл (FeMn)	0.08	0.31	0.80	-0.14	-0.25	1.00				
Лэддл (Al проволока)	-0.21	-0.44	0.24	-0.06	-0.22	0.09	1.00			
Общее время разливки	-0.13	-0.12	0.48	-0.21	-0.16	0.44	0.30	1.00		
Время кипения	0.09	-0.03	-0.05	-0.09	-0.23	0.02	0.25	0.00	1.00	
Брак	0.24	0.36	-0.52	0.33	0.41	-0.37	-0.55	-0.51	-0.08	1.00



**Рис. 2. Облако рассеивания**

В результате корреляционного анализа в рассмотрении были оставлены только те факторы, которые имеют среднюю корреляцию с уровнем брака и выше:

- уровень Mn в стали;
- добавление Al проволоки;
- общее время разливки.

На втором этапе было построено регрессионное уравнение и проанализировано влияние изменения факторов на уровень брака.

Таблица 2

## Интерпретация коэффициентов корреляции

Абсолютное значение	Интерпретация
До 0,2	Очень слабая корреляция
До 0,5	Слабая корреляция
До 0,7	Средняя корреляция
До 0,9	Высокая корреляция
Свыше 0,9	Очень высокая корреляция

В выборке имеется 38 наблюдений, связанных с плавкой бломов формы 380x380. Эта выборка была взята из тех соображений, что именно для этой группы уровень брака был наиболее высок.

При обработке данных параметр «общее время разливки» получился не значимым на 95% интервале, а это означает, что гипотеза о значимости коэффициента регрессии отвергается.

Регрессионная статистика представлена в табл. 3.

Таблица 3

## Регрессионная статистика

R-квадрат	0.462943
Нормированный R-квадрат	0.432254
Стандартная ошибка	0.038445
Наблюдения	38

В качестве оценки для принятия полученной регрессионной модели используется количество объясненной дисперсии с корректировкой на количество элементов в выборке (*нормированный R-квадрат*), а также стандартная ошибка для оценки отклонений исходных значений уровня брака от смоделированных значений [2]. Такой набор характеристик в совокупности с тестами на значимость факторов позволит сделать вывод о принятии или не принятии полученного регрессионного уравнения в качестве решения задачи.

Всего в выборке было 38 наблюдений. Из регрессионного анализа следует, что коэффициент детерминации равен 0.43, а это означает, что примерно 43% дисперсии мы можем объяснить с помощью расхода газа уровня Mn в стали и количества добавленной Al проволоки на этапе сталь-ковш с коррекцией на количество предметов в выборке.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при производстве вагонных осей наиболее значимыми факторами, влияющими на уровень брака, являются уровень Mn в стали и количества добавленной Al проволоки.

Значимость коэффициентов регрессии была проверена на тестах Стьюдента и Фишера, соответственно для принятия гипотезы о том, что коэффициенты значимы как по отдельности, так и в целом на 95% доверительном интервале. Величина стандартной ошибки показывает, что в среднем наша модель будет «ошибаться» при прогнозировании уровня брака на значение, равное 0.038.

Окончательно полученное уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{y} = 0.35 - 0.27x_1 - 0.0007x_2,$$

где  $x_1$ ,  $x_2$  – уровень Mn и Al проволоки соответственно.

Таким образом, при увеличении на одну единицу каждого из показателей мы добьёмся уменьшения уровня брака на 27 и 0.07% соответственно. Оптимальными значениями факторов будут максимально возможные значения, предусмотренные технологией производства [5].

## Анализ результатов

Предложенный алгоритм позволяет находить факторы, влияющие на брак продукции. Отметим, что использование такого подхода для решения подобных задач не является трудозатратным и помогает дать четкие рекомендации по изменению параметров производства для минимизации бракованных изделий.

## Список литературы

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 139 с.
2. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконо- метрики: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ, 1998. 1022 с.
3. Елисеев А.С., Федосеев С.А., Гитман М.Б. К вопросу об устойчивости систем контроля качества на предприятии // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. №34. С. 34-36.
4. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути / Р. Леон, А. Шумейкер, Р. Какар и др. М.: СЕЙФИ, 2002. 384 с.
5. Столбов В.Ю., Гитман М.Б., Федосеев С.А. Устойчивость структурной модели управления производственными системами // Проблемы управления. 2007. №5. С. 44-47.
6. Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yuin Wu. Taguchi's Quality Engineering Handbook. Wiley-Interscience, 2004. 1696.

## References

1. Adler U.P., Markova E.V., Granovskiy U.V. Design of Experiments for Search of Optimality Conditions, Nauka, Moscow (1976). 139 p.
2. Aivazian S.A., Mkhitaryan V.S. Applied statistics and basic econometrics. Textbook for high schools. Moscow, UNITY, 1998. 1022 p.
3. Elyseev A.S., Fedoseev S.A., Gitman M.B. To the question of production schedule control stability // Vestnik MGTU named after G.I. Nosov. 2011. №34. P. 34-36.
4. Leon R., Shoemaker A., Kakar R. etc. Quality management. Robust design. Taguchi method. Moscow, SAFY, 2002. P. 384.
5. Stolbov V.U., Gitman M.B., Fedoseev S.A. Stability structural model of industrial control systems. Management Challenges. 2007. №5. P. 44-47.
6. Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yuin Wu. Taguchi's Quality Engineering Handbook. Wiley-Interscience, 2004. 1696.

# НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.7

Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Чигинцев П.А.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ DEFORM МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Аннотация.** Воздействие на структуру, а следовательно, и на свойства материалов при помощи способов интенсивной пластической деформации (ИПД) является актуальной задачей машиностроения. Для анализа воздействия исследуемого способа ИПД на микроструктуру материалов Waspalloy и сталь 42CrMo4 в пакете Deform было произведено компьютерное моделирование. Оценивался средний размер зерен по модели «Johnson – Mehl – Avrami – Kolmogorov» (JMAK) в исследуемых точках на каждом этапе способа ИПД. Результаты моделирования показали, что уже после одного полного цикла деформирования средний размер зерна существенно уменьшается.

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением, выдавливание, микроструктура металлов, интенсивная пластическая деформация, заготовки, рекристаллизация, размер зерна.

Semashko M.Yu., Sherkunov V.G., Chigintsev P.A.

### MODELING MICROSTRUCTURE OF METALS, SUBJECTED TO SEVERE PLASTIC DEFORMATION IN THE SYSTEM DEFORM

**Abstract.** Impact on the structure and properties of the materials by methods of severe plastic deformation (SPD) is an actual problem of mechanical engineering. Computer Simulation in the package Deform been made to analyze the impact of this method SPD on the microstructure of materials Waspalloy and steel 42CrMo4. Average grain size was estimated by the model «Johnson – Mehl – Avrami – Kolmogorov» (JMAK) in the test points at each step of the process SPD. The modeling found that after one full cycle of deformation of the average grain size is significantly reduced.

**Keywords:** metal forming by pressure, extrusion, metal microstructure, severe plastic deformation, billets, recrystallization, grain size.

Проведение модельного эксперимента является одним из важнейших этапов исследования, так как позволяет значительно сократить временные и материальные затраты. В процессе моделирования решается ряд важнейших задач, таких как определение оптимальной геометрии оснастки, энергосиловые и технологические параметры и пр. Эти задачи позволяют решать программные пакеты, такие как Deform, Q-form, Ansys, LS Dyna и многие другие. Для данного исследования был использован продукт компании SFTC Deform, позволяющий анализировать напряженно-деформированное состояние заготовки, изменение температуры в ее объеме, направление и скорость течения материала, а также изменение его микроструктуры.

В основе главного решателя Deform лежит метод конечных элементов. При этом используются итерационные исчисления. Приложение «Johnson – Mehl – Avrami – Kolmogorov» (JMAK) или клеточного автомата (Cellular Automata).

Модель JMAK позволяет отслеживать два вида эволюции структуры материала: рост зерен и рекристаллизация. Рост зерен отвечает за увеличение их размера с увеличением времени выдержки и температуры, а рекристаллизация характеризует объем зерен с измененным размером (чаще всего меньшим начального). При этом принято различать статическую, метадинамическую и динамическую рекристаллизацию. В про-

цессе деформации зародыши рекристаллизации могут образовываться и расти в рекристаллизуемые зерна – динамическая рекристаллизация. Некоторые зародыши рекристаллизации, образованные в процессе деформации, не могут расти во время деформации. Они начинают расти сразу после ее завершения – метадинамическая рекристаллизация. После деформации, при высокой температуре могут образовываться новые зародыши, способные к росту в рекристаллизованные зерна, – статическая рекристаллизация [1].

Выражения JMAK позволяют вычислить долю рекристаллизованного объема  $X$  в зависимости от деформации и температуры (для динамической рекристаллизации) (рис. 1) и времени и температуры (для метадинамической и статической рекристаллизаций)  $X$  (рис. 2). Время между завершением деформации и началом образования зародышей рекристаллизации и их ростом называется инкубационным периодом. Метадинамическая рекристаллизация в модели JMAK рассматривается как статическая рекристаллизация, но с нулевым временем инкубационного периода.

В расчете рассматриваемой задачи учитывалась только динамическая рекристаллизация, учитывающая образование зародышей и рост зерен в процессе деформации, что было обусловлено характером процесса (большими степенями деформаций и его непрерывностью).

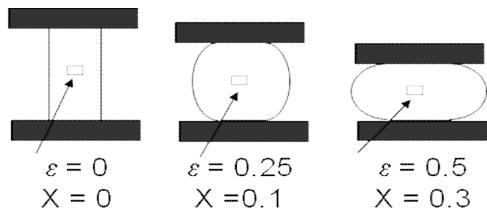


Рис. 1. Динамическая рекристаллизация

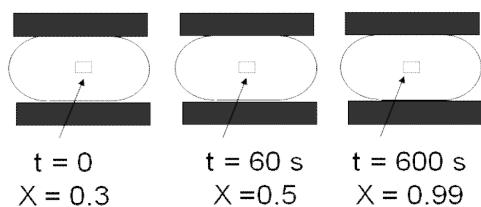


Рис. 2. Методинамическая / статическая рекристаллизация

Моделированию подвергались: сплав Waspalloy (45% Ni, 17% Cr) и сталь 42CrMo4 (аналогична стали 40ХНМ). В обоих случаях начальная температура заготовки составляет  $1000^{\circ}\text{C}$ , а скорость деформирования 0,4 м/с. Заготовка представляет собой цилиндр диаметром 20 мм и высотой 120 мм. Изображение заготовки и используемой при моделировании оснастки приведено на рис. 3.

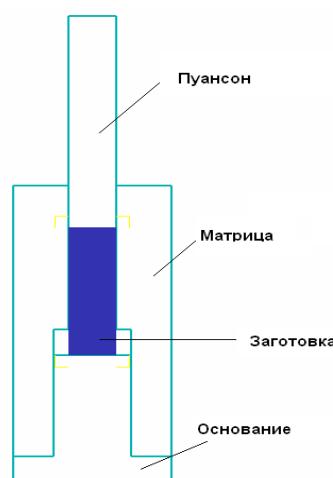


Рис. 3. Модель заготовки с оснасткой

Способ обработки металлов давлением, по схеме которого деформировались образцы (рис. 3), запатентован Южно-Уральским государственным университетом и состоит из комбинации известных операций осадки, прошивки и выдавливания [2–4]. Ключевой целью в ходе моделирования была качественная оценка изменений, происходящих в микроструктуре в процессе деформирования, а также анализ этих изменений для характерных моментов процесса, чтобы заключить о возможности их влияния на изменения физико-механических свойств металлов. Для более четкого описания процесса в сечении заготовки было выделено 9 точек.

Представляет интерес начальный момент заполнения и поднятия подвижной матрицы (рис. 4). Деформации подвержена та часть заготовки, которая и заполняет полость матрицы. При этом наибольшим деформациям подвержена точка 5 и область вдоль ос-

нования. В меньшей степени – материал в точках 6 и 9. Также явно заметна граница раздела, проходящая через угол матрицы под углом  $45^{\circ}$  к направлению движения пuhanсона, что говорит о сдвиговом характере деформирования. В соответствии с этим происходит и процесс измельчения зерна, показанный на рис. 5.

Изменение среднего размера зерна материала заготовки происходит в зоне, где наблюдается ненулевая деформация. Здесь же увеличивается доля зерен, подвергнувшихся динамической рекристаллизации. При этом оба процесса идентичны и взаимосвязаны. Минимального значения средний размер зерна достигает в т. 5–8,17 мкм, т. 6–26,85 мкм, тогда как начальная величина зерна составляет порядка 30,02 мкм для Wasp alloy. Аналогичная картина для стали 42CrMo4: 16,63 мкм – т.5 и 17,36 – т.6, начальная величина зерна  $\approx 31$  мкм.

Следующим рассматриваемым этапом эксперимента является переход от процесса высадки к прошивке. При этом картины деформаций на данном этапе различаются уже значительно, что показано на рис. 6. Видно, что в случае стали деформации распределены более равномерно по объему заготовки, однако в никелевом сплаве максимальные значения параметра значительно выше.

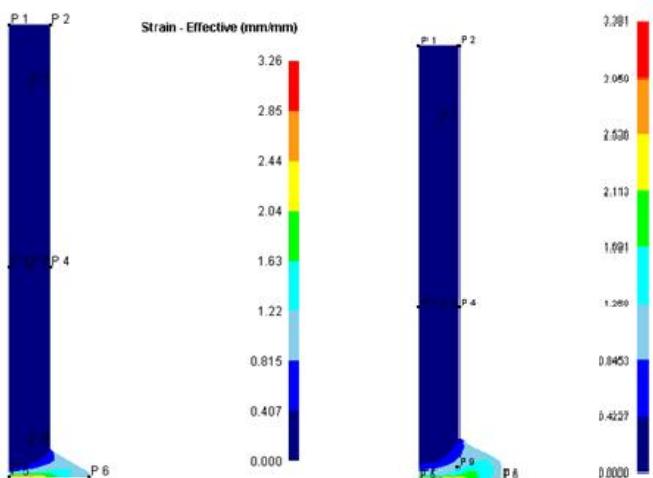


Рис. 4. Картина деформаций в материалах Waspalloy (слева) и 42CrMo4 (справа)

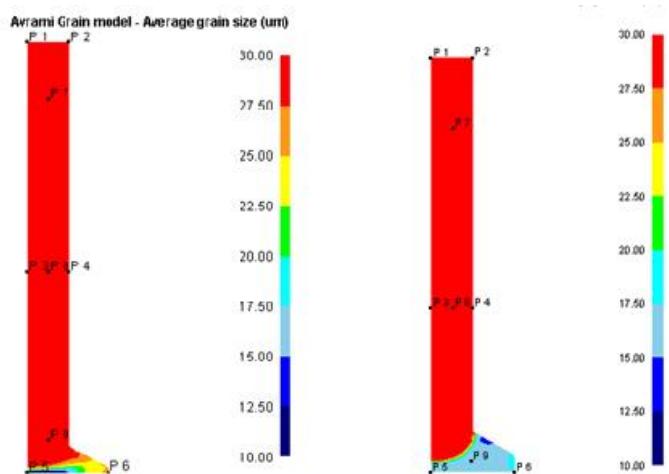
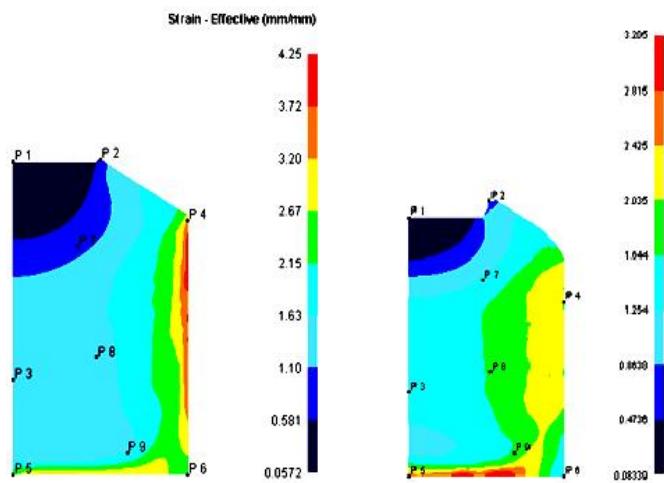
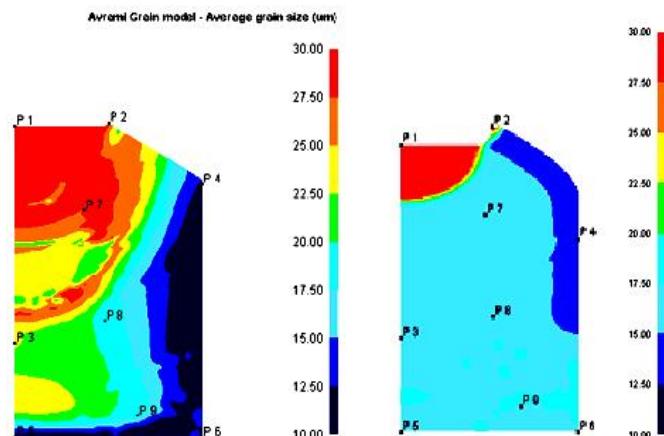


Рис. 5. Измельчение микроструктуры в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)



**Рис. 6. Деформации в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**

Очевидно, различаются, вслед за деформациями, средние размеры зерен в заготовках (**рис. 7**). При этом закономерность более равномерной проработки стальной заготовки сохранилась, что позволяет сделать вывод о том, что параметры процесса больше подходят для сталей, нежели для материалов, схожих по свойствам с рассматриваемым сплавом.

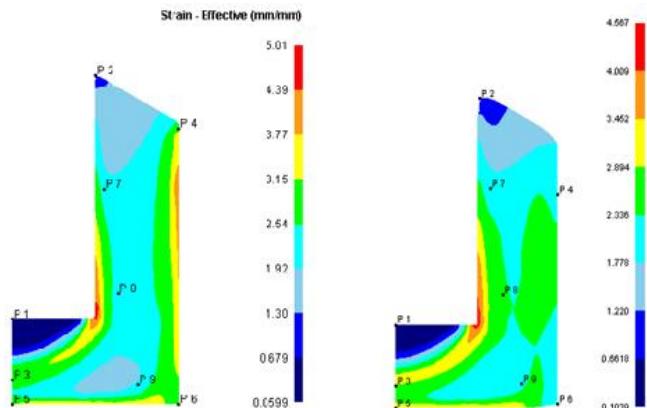


**Рис. 7. Средний размер зерна в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**

Кроме этого, нужно заметить меньшую долю непроработанного металла и более предсказуемый эффект на стальной заготовке, что положительно скажется при натурных испытаниях. Наибольшая дробимость зерна наблюдается в точках 4, 5, 6 – от 10,13 до 11,44 мкм и в точках 8, 9 – 19,19–17,68 мкм для сплава Wasp alloy. Для 42CrMo4 размер зерна в точках 4–9 составляет от 13,62 до 16,96 мкм.

Третьим шагом при рассмотрении моделирования является окончание «прямого» процесса, при котором усилие пресса прикладывалось к пuhanсону. Этот момент также характеризуется наименьшей толщиной дна полученного «стакана». На **рис. 8** видно, что зона под пuhanсоном не подверглась деформации и является областью минимальных значений степеней деформации. Максимум находится в месте внедрения угла пuhanсона в металл.

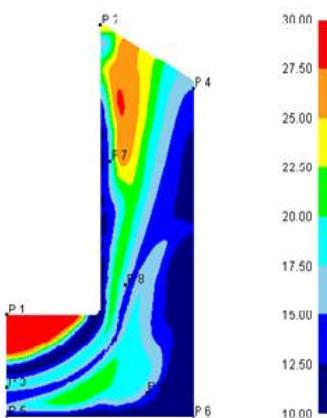
Также существует зона повышенных деформаций, располагающаяся под углом 45° от максимума к оси заготовки и частично вдоль пuhanсона, а также в области контакта материала с основанием и с цилиндрической частью матрицы. При этом все, кроме последней, выглядят для обоих материалов одинаково.



**Рис. 8. Степень деформации в конце «прямого» процесса в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**

Распределение средних размеров зерен в объеме материала носит нетривиальный характер, о чем говорит **рис. 9**. Общих черт для рассматриваемых материалов практически не наблюдается. Исключениями являются область вокруг точки 1, где микроструктура не подвержена изменениям, и характерная зона, проходящая через точки 3, 9 и 7, ярко иллюстрирующая сдвиговый характер процесса. В сплаве Wasp alloy весь объем заготовки явно поделился на 2 части: участки, подвергнувшиеся деформации на предыдущих этапах процесса, и участки, деформируемые на этом этапе. Видно, что область заготовки в районе точек 5, 6 и 9 не вовлечена в динамическую рекристаллизацию, однако там зерно имеет средний размер около 10 мкм, что говорит о том, что процесс динамической рекристаллизации в данной области уже прошел. А в местах заготовки, где процесс идет на данном этапе (дугообразная область от точки 4 к 8 и 3), малый средний размер зерна, около 15 мкм, сочетается с высокой долей зерен, задействованных в процессе динамической рекристаллизации. Также есть зоны, средний размер зерна в которых остался прежним, как-то область непосредственно под пuhanсоном вокруг точки 1 и между точками 2 и 7. Для 42CrMo4 средний размер зерна в основной части объема заготовки значительно уменьшился. Так, в областях вокруг точек 3, 7 и 8 он составляет 20–17,5 мкм, вокруг точек 5, 6 и 9 – 17,5–15 мкм, а в точке 4 и некоторых локальных участках – меньше 15 мкм. Однако неизменным зерно остается в точке 1 и зоне под пuhanсоном, а в точке 2 дробится незначительно. При этом в динамическую рекристаллизацию вовлечены участок, совпадающий с температурным максимумом (доля вовлеченного зерна равна 1), и область вокруг точек 7 и 8 (доля колеблется от 0,5 до 1).

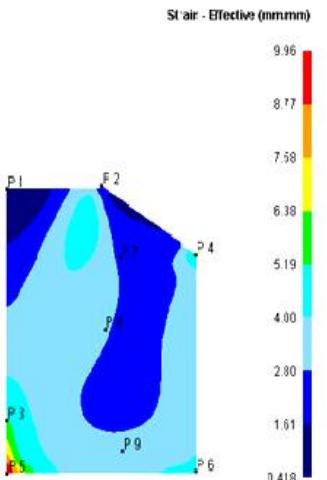
Avrami Grain model - Average grain size (um)



**Рис. 9. Средний размер зерна в конце «прямого» процесса в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**

Рассматривая обратный процесс, то есть процесс выдавливания из стакана посредством приложения усилия к матрице, выделим следующие два момента, отражающие характерные этапы деформирования.

В момент окончания выдавливания «стакана» и перехода к обратному выдавливанию из цилиндра видно, что часть металла, сопряженная с конусом матрицы, в обоих случаях не деформируется, так как не движется относительно инструмента. То же происходит вокруг точки 1 (рис. 10).

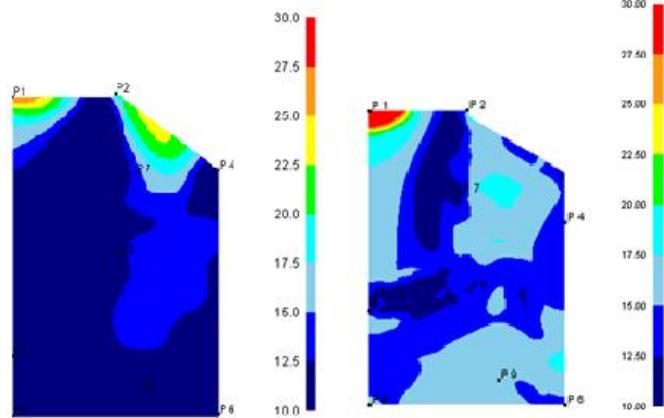


**Рис. 10. Степень деформации в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**

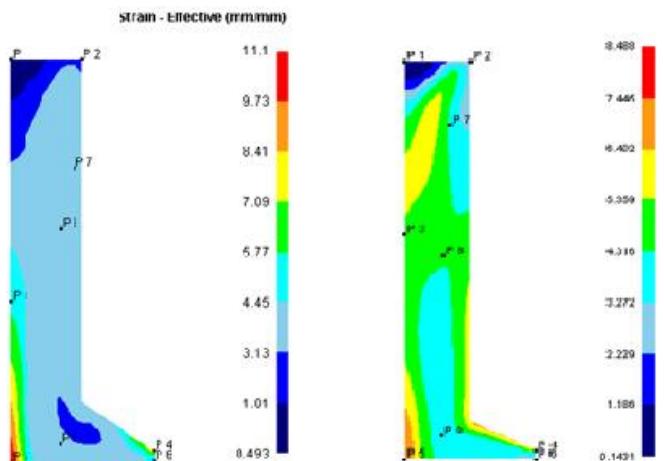
Однако, несмотря на большие максимальные деформации, указанные застойные зоны в никелевом сплаве значительно больше, что отражается на среднем размере зерна в этих областях, как показано на рис. 11. Однако, в целом, зерно в никелевом сплаве значительно мельче и более равномерно распределено, нежели в стали.

И наконец, момент окончания процесса. Итоговая деформация в образцах достигает 10,5 и 8 в точке 5. При этом в левом образце (рис. 12) распределение более равномерное при аналогичных абсолютных величинах.

Avrami Grain model - Average grain size (um)



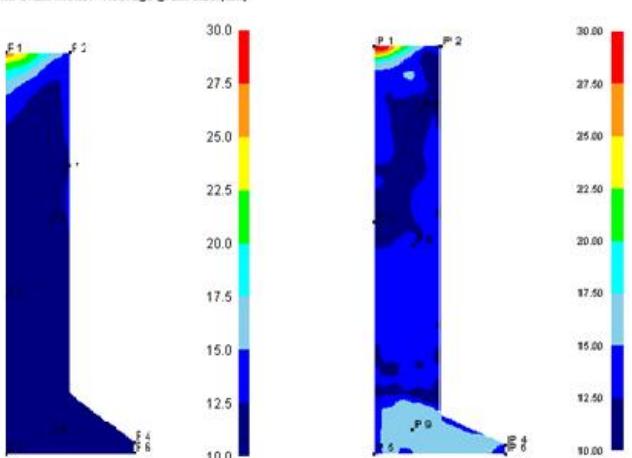
**Рис. 11. Средний размер зерна в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**



**Рис. 12. Итоговая деформация в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**

Интегральной характеристикой процесса можно считать картину, показывающую средний размер зерна в каждой области заготовки и изображенную на рис. 13. Значения среднего размера зерна для Wasp alloy и 42CrMo4 приведены в таблице.

Avrami Grain model - Average grain size (um)



**Рис. 13. Средний размер зерна в материалах Wasp alloy (слева) и 42CrMo4 (справа)**

**Значения среднего размера зерна в исследуемых точках для Wasp alloy и 42CrMo4**

Номер точки	Средний размер зерна, мкм	
	Wasp alloy	42CrMo4
1	26.245596	30.333809
2	13.859410	14.625051
3	8.190919	11.935083
4	8.299410	12.947099
5	4.297962	13.265373
6	7.572508	14.243878
7	12.165915	10.966502
8	11.255841	12.836920
9	7.749315	16.671513

В качестве заключения отметим, что в результате компьютерного моделирования процесса деформирования материалов Wasp alloy и 40CrMo4 выявлены и оценены изменения, происходящие в микроструктуре заготовки. В результате совмещенной обработки заготовок существенно изменяется средний размер зерна, что должно повлечь за собой изменения физико-

механических свойств обработанных таким образом металлов.

**Список литературы**

1. Презентационный материал компаний SFTS и ООО «Артех» (Официальный представитель SFTC в России).
2. Пат. 2424076 РФ, МПК B21J5/00, C21D7/10, C22F1/00. Способ пластического структурообразования и устройство для его осуществления / Семашко М.Ю., Трусковский В.И., Шеркунов В.Г. (РФ).
3. Экспериментальное исследование способа пластического структурообразования металлов / Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Экк Е.В., Трусковский В.И., Мезенцев В.М. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. 2010. № 34 (210). С. 62-67.
4. Моделирование процесса интенсивной пластической деформации для измельчения структуры металлов / Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Экк Е.В. // Известия Тульского государственного университета. Сер.: Технические науки. 2010. № 2-2. С. 23-28.

**Reference**

1. Presentation material companies SFTS and «Artech» (SFTC official representative in Russia).
2. Pat. 2424076 RF, B21J5/00, C21D7/10, C22F1/00. Method of structure and plastic device thereof / M. Semashko, V. Truskovsky, V. Sherkunov. (RF).
3. Semashko M., Sherkunov V., Eck E., Truskovsky V., Mezentsev V. Experimental study of structure formation process of the plastic metal. // Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy. 2010. № 34 (210). Pp. 62-67.
4. Semashko M., Sherkunov V., Eck E. Simulation of the severe plastic deformation of grinding metal structure. Proceedings of Tula State University. Series: Engineering. 2010. № 2-2. Pp. 23-28.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.771.23

Найзабеков А.Б., Талмазан В.А., Ержанов А.С.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫКАТЫВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПОЛОС ТИПА «ВДАВ» ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

**Аннотация.** Повышение качества металлопродукции является одной из основных задач современного прокатного производства, а также занимает особое место в научно-производственной деятельности промышленных предприятий.

В области машиностроения постоянно повышаются требования к качеству поверхности листа, в связи с этим обеспечение бездефектной продукции, а также исследование процесса дефектообразования и формоизменения дефектов поверхности остается актуальной задачей.

В данной работе приведены результаты исследований о возможности улучшения качества поверхности холоднокатаной полосы за счет повышения выкатываемости поверхностных дефектов типа «вдав» при помощи ЭВМ.

**Ключевые слова:** холодная прокатка, поверхностный дефект, моделирование, метод конечных элементов, выкатываемость, формоизменение, исследование, прокатный стан, относительная глубина дефекта, рабочий валок, суммарное обжатие, коэффициент трения, напряженное состояние, регрессионная модель, координатная сетка.

Naizabekov A.B., Talmazan V.A., Yerzhanov A.S.

### MATHEMATICAL MODELING OF A BURNISHING OF SUPERFICIAL DEFECTS OF THE «DENT» TYPE COLD ROLLING

**Abstract.** Improvement of quality of steel products is one of the main objectives of modern rolling production, and also takes a special place in research-and-production activity of the industrial enterprises.

In the field of mechanical engineering requirements to quality of a surface of a leaf, in this regard providing faultless production constantly raise, and also research of process of a defectform and a formchange of defects of a surface remains an actual task.

Results of researches are given in this work about possibility of improvement of quality of a surface of a cold rolling strip at the expense of increase of a burnishing of superficial defects of the «dent» type by means of the COMPUTER.

**Keywords:** cold rolling, surface defect, simulation, finite-element method, flattening, forming, exploration, the rolling mill, relative depth of flaw, work roll, net reduction, coefficient of friction, case-hardening, regression a sample piece, a reference grid.

Моделирование промышленных процессов в лабораторных условиях является трудоемким процессом. Применение ЭВМ в значительной степени облегчает данный процесс моделирования.

В данной работе моделировали процесс холодной прокатки полос с поверхностными дефектами типа «вдав» при помощи специализированного программного комплекса «DeForm3D».

Проводили моделирование процесса формоизменения объемных поверхностных дефектов типа «вдав» при холодной прокатке полос на непрерывном пятиклетевом стане 1700. С целью увеличения точности расчетов и в соответствии с сортаментом стана 1700 смоделирована небольшая область ( $50 \times 100$  мм) вязко-пластичной полосы толщиной 4,5 мм. На поверхность полосы дефекты наносились в виде углублений.

Принимали материал рабочих валков сплошным с неожимаемым диаметром 600 мм. Материал полосы – сталь 08kp. На полосе смоделированы три поверхностных дефекта цилиндрической формы (рис. 1) с различной начальной относительной глубиной  $\delta_0/h_0$ .

Согласно исследованиям работ [1-5] на практике встречаются поверхностные дефекты с относительной глубиной  $\delta_0/h_0 = 0,37$ . С целью расширения области исследования предельную относительную глубину поверхностного дефекта решено увеличить на 13%. Та-

ким образом, относительные начальные глубины дефектов варьировали в пределах 10-50% от толщины полосы. Моделирование проводили при постоянной скорости прокатки. С целью снижения времени расчетов задали на полосу оптимальную координатную сетку (100 тысяч элементов). Исследования проводили при минимальном ( $f = 0,03$ ) и среднем коэффициентах трения ( $f = 0,07$ ) при холодной прокатке. Результаты формоизменения поверхностных дефектов полосы с различной начальной относительной глубиной  $\delta_0/h_0$ , прокатанной с разными суммарными обжатиями  $\varepsilon_{\Sigma}$  и при разных коэффициентах трения  $f$ , приведены в таблице.

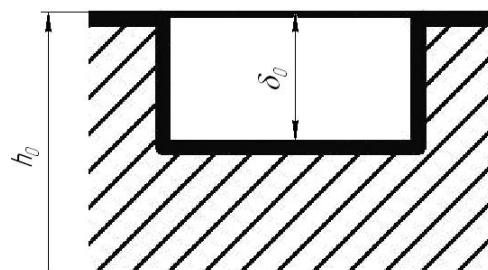


Рис. 1. Профиль поперечного сечения полосы с дефектом цилиндрической формы типа «вдав»:  
 $h_0$  – толщина полосы, мм;  $\delta_0$  – глубина дефекта, мм

## Формоизменение поверхностных дефектов

Начальная относительная глубина дефекта $\delta_0/h_0$	Начальный вид дефекта	Коэффициент трения	
		$f = 0,03$	$f = 0,07$
0,1		$\varepsilon_{\Sigma} = 19,18\%$	
			дефект выкатан
		$\varepsilon_{\Sigma} = 35,11\%$	дефект выкатан
0,3		$\varepsilon_{\Sigma} = 19,18\%$	
			дефект выкатан
		$\varepsilon_{\Sigma} = 35,11\%$	дефект выкатан
0,5		$\varepsilon_{\Sigma} = 45,56\%$	
			дефект выкатан
		$\varepsilon_{\Sigma} = 45,56\%$	дефект выкатан

Так как при холодной прокатке уширение очень мало, то в процессе исследований уширение полосы с дефектами не учитывалось.

Исследовали напряженное состояние внутренней части поверхностных дефектов. В области дефектов выбирали точки, как показано на **рис. 2**. Также проводили отслеживание напряженного состояния в указанных точках (**рис. 3**).

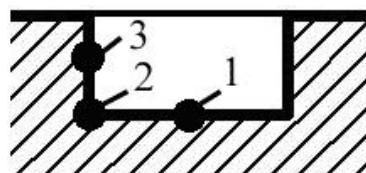
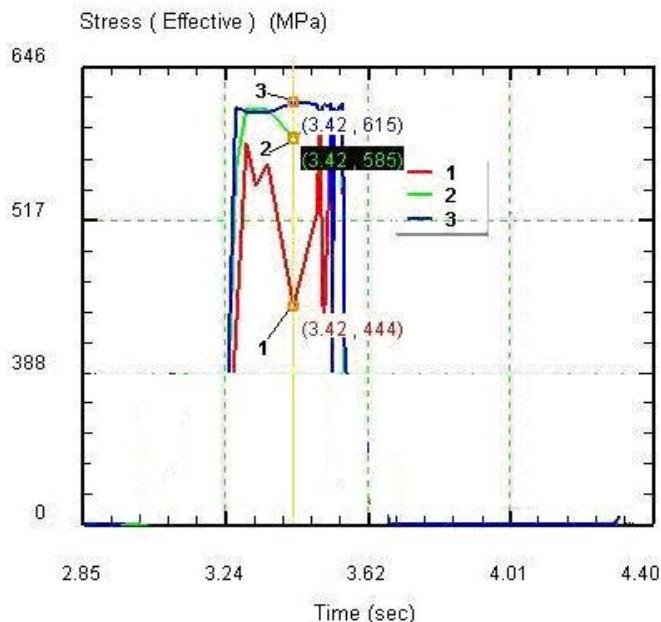
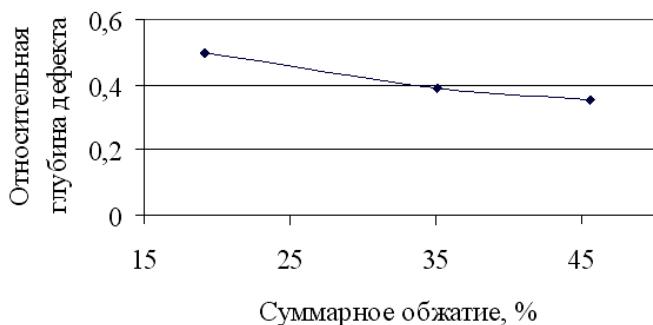


Рис. 2. Схема отслеживания напряжения в дефектах



**Рис. 3. Напряженное состояние в точках дефекта**

На **рис. 4** приведена зависимость относительной глубины дефекта типа «вдав» от суммарного обжатия.



**Рис. 4. Зависимость относительной глубины дефекта «вдав» от суммарного обжатия**

Анализ полученных данных показывает, что точки, расположенные на грани поперечного сечения объемного поверхностного дефекта типа «вдав» (точка 3 на **рис. 2**), испытывают наибольшее напряжение по сравнению с точками в узлах граней и на донной поверхности (точки 2 и 1 соответственно на **рис. 2**). Относительно большая разность напряжений в точках 1 и 3 (см. **рис. 3**), составляющая 171 МПа, объясняется наличием двойного концентратора напряжений, что обусловлено геометрическим строением дефектов цилиндрической формы.

По результатам моделирования получена регрессионная модель, отражающая характер воздействия технологических параметров на выкатываемость поверхностных дефектов.

$$\frac{d}{h} = -0,002 \cdot e - 0,85 \cdot f + 0,35. \quad (1)$$

Результаты таблицы свидетельствуют о положительной роли внешнего трения на процесс формоизменения поверхностных дефектов. Внешние силы трения активизируют напряжения в точках, расположенных на гранях (точка 3 **рис. 2**), тем самым увеличивают формоизменение дефекта. С увеличением сил трения усиливается процесс «выпучивания» донной части дефекта.

**Выводы.** Методом конечных элементов проведено моделирование процесса холодной прокатки полосы с поверхностными дефектами типа «вдав». Проанализировано напряженное состояние в зоне дефекта. Получена модель зависимости относительной глубины дефекта от параметров прокатки.

#### Список литература

1. Зенченко Ф.И., Чернов П.П., Мазур В.Л. Предупреждение порывов при холодной прокатке полос // Прокатное производство. 1990. №3. С. 35-42.
2. Скороходов В.Н., Бармин Г.Ю., Чернов П.П. Выкатываемость дефектов поверхности при холодной прокатке и качество полосы // Сталь. 1991. №5. С. 45-48.
3. Зильберг Ю.В. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке // Сталь. 1997. №10. С. 44-46.
4. Зильберг Ю.В., Миленин А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование формоизменения поверхностных впадин при прокатке // Изв. вузов. Черная металлургия. 1998. №11. С. 27-29.
5. Ершов В.Н. Исследование интенсивности выработки поверхностных дефектов металла при прокатке // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. №12. С. 48-50.

#### References

1. Zhenchenko F.I., Chernov P.P., Masur V.L. The prevention of gusts at cold rolling of strips. Minfermet the USSR, the Karaganda integrated iron-and-steel works and the Institute of Steel and Iron. «Plate rolling». 1990. №3. P. 35-42.
2. Skorohodov V.N., Barmin G.J., Chernov P.P. Flattening of surface defects at cold rolling and quality of a strip. The Karaganda integrated iron-and-steel works and the Institute of Steel and Iron. «Steel». 1991. №5. P. 45-48.
3. Zilberg J.V. Exploration of regularities of a forming of surface defects at rolling. The state metallurgical academy of Ukraine. «Steel», 1997. №10. P. 44-46.
4. Zilberg J.V., Milenin A.A. Theoretical and an experimental research of a forming of superficial caves at rolling. The state metallurgical academy of Ukraine. «Informations of higher educational institutions. Iron and steel industry». 1998. №11. P. 27-29.
5. Ershov V.N. Exploration of intensity of galling of surface defects of metal at rolling. «Informations of higher educational institutions. Iron and steel industry», 1985. №12. P. 48-50.

УДК 621.771

Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Свердлик М.К.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПРЕДЕЛЬНОМ СЛУЧАЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ\*

**Аннотация.** В работе выполнена численная оценка возможности применения процесса асимметричной тонколистовой прокатки в качестве метода интенсивной пластической деформации для получения ультрамелкозернистых структур металла. Показано, что при асимметричной прокатке в деформируемом материале возникают более высокие сдвиговые деформации, чем при прокатке в симметричном режиме.

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, предельный случай асимметрии, рассогласование скоростей рабочих валков, сдвиговая деформация, интенсивная пластическая деформация, моделирование методом конечных элементов.

Pustovoitov D.O., Pesin A.M., Perehogih A.A., Sverdlik M.K.

### MODELING OF SHEAR DEFORMATION IN THE LIMITING CASE OF ASYMMETRIC SHEET ROLLING

**Abstract.** The article considers the numerical estimate of the possibility of using of asymmetric sheet rolling process as a method of severe plastic deformation to produce ultra-fine structures of the metal. It is shown that during asymmetric rolling the material has higher shear deformation than during symmetric rolling.

**Keywords:** asymmetric rolling, the limiting case of asymmetry, differences in rotational speed of the work rolls, shear strain, severe plastic deformation, finite element modeling.

Интенсивная пластическая деформация (ИПД), как известно, является эффективным методом получения металлических материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Известен целый ряд процессов ИПД, позволяющих получать УМЗ структуры в объемных образцах. Однако большинство таких процессов имеет ограничения по технологичности, что сдерживает их широкое промышленное внедрение. Поэтому в настоящее время требуется разработка новых высокопроизводительных методов, желательно в рамках известных методов обработки металлов давлением, таких как прокатка, волочение и др., использующихся для получения массовой продукции [1].

По мнению ряда исследователей [2-5], одним из перспективных методов ИПД листовых материалов является процесс вертикально асимметричной тонколистовой прокатки. Целенаправленная асимметрия может создаваться за счет следующих основных факторов [6-9]: 1) разница диаметров рабочих валков; 2) разница скоростей рабочих валков; 3) разница условий трения на контакте с верхним и нижним рабочими валками; 4) жесткозаданный угол входа и выхода полосы из очага деформации; 5) температурный фактор; 6) различные комбинации факторов (1)-(5).

Фактор асимметрии, с одной стороны, приводит к снижению отрицательного влияния контактных сил трения и, как следствие, возможности увеличения деформаций сжатия при прокатке, с другой стороны, в очаге создаются значительные сдвиговые деформации.

Реализация высоких сдвиговых деформаций является определяющим фактором при разработке процесса асимметричной прокатки как метода ИПД. При симметричной прокатке (рис. 1, а) деформации сдвига

крайне малы, наклона вертикальных сечений не происходит. В свою очередь, в асимметричном очаге деформации (рис. 1, б), в особенности, в так называемом, предельном случае, когда на одном валке реализуется только зона отставания, а на другом – только зона опережения, интенсивность деформаций сдвига может достигать 2-3 и более единиц.

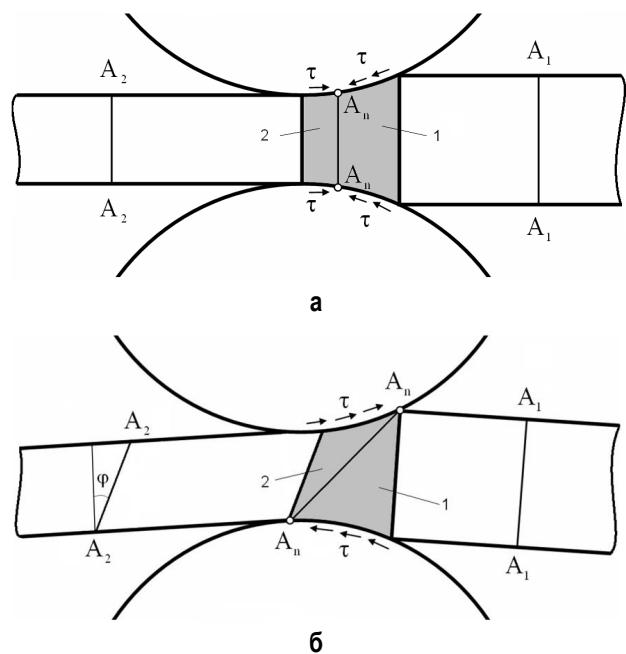


Рис. 1. Упрощенная схема симметричного (а) и асимметричного (б) очага деформации в предельном случае (1 – зона отставания; 2 – зона опережения;  $A_nA_n$  – нейтральное сечение;  $\tau$  – силы контактного трения;  $A_1A_1$  – сечение до деформации;  $A_2A_2$  – сечение после деформации;  $\varphi$  – угол наклона сечения)

Целью данной работы является численное исследование и оценка возможности получения высоких

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение №14.В37.21.0936 «Разработка асимметричного процесса интенсивной пластической деформации для получения нано- и ультрамелкозернистой структур металла».

сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки.

Одним из вариантов реализации предельного случая асимметричной листовой прокатки является ПВ-процесс (процесс «прокатка-волочение»), разработанный В.Н. Выдриным и Л.М. Агеевым в 1971 г. Этот процесс характеризуется тем, что для его осуществления необходимо точное поддержание скорости переднего и заднего концов полосы, при этом деформация осуществляется при высоком уровне переднего натяжения.

Численное моделирование процесса асимметричной тонколистовой прокатки в режиме ПВ проводили методом конечных элементов с использованием программного комплекса DEFORM. В соответствии со схемой (рис. 2) полоса деформируется между двумя валками, один из которых является ведущим, вращающимся с угловой скоростью  $\omega_2$ , а второй – ведомым, вращающимся с угловой скоростью  $\omega_1$ . При этом выполняется следующее условие:

$$\omega_2 R_2 > \omega_1 R_1 \text{ и } \frac{\omega_2 R_2}{\omega_1 R_1} = \frac{h_1}{h_2}, \quad (1)$$

где  $h_1$ ,  $h_2$  – толщина полосы до и после деформации;  $R_1$ ,  $R_2$  – радиус верхнего и нижнего рабочих валков соответственно.

Задний конец полосы движется со скоростью  $V_1 = \omega_1 R_1$ , а передний – со скоростью  $V_2 = \omega_2 R_2$ . При этом к переднему и заднему концам полосы прикладываются натяжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определенной величины. При указанных условиях на всей контактной поверхности ведущего валка будет происходить только отставание, а на контакте с ведомым валком – только опережение.

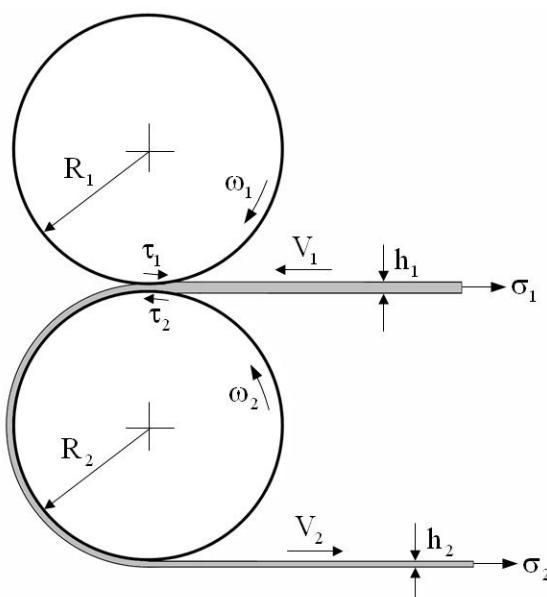


Рис. 2. Схема моделируемого процесса асимметричной листовой прокатки ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – силы контактного трения)

Допущения, принятые при моделировании: 1) плоско-деформированное состояние; 2) деформируемая среда – упрочняющаяся жесткопластическая; 3) рабочие валки – абсолютно жесткие; 4) закон контактного трения – Кулона; 5) условия деформирования – изотермические.

Интенсивность деформаций сдвига для объемной деформации:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ ,  $\varepsilon_{zx}$  – компоненты тензора деформаций.

Для условий плоской деформации можно записать:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz} = 0, \varepsilon_{yz} = 0, \varepsilon_{zx} = 0. \quad (3)$$

С учетом (3) интенсивность деформаций сдвига (2) для плоско-деформированного состояния преобразуется к следующему виду:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{2\varepsilon_{yy}^2 + 6\varepsilon_{xy}^2}, \quad (4)$$

Таким образом, для плоской задачи интенсивность деформаций сдвига определяется двумя компонентами: деформацией сжатия  $\varepsilon_{yy}$  и деформацией сдвига  $\varepsilon_{xy}$ .

Исходные данные для моделирования: 1) начальная толщина полосы  $h_1 = 3 \text{ мм}$ ; 2) радиус рабочих валков  $R_1 = R_2 = 200 \text{ мм}$ ; 3) деформируемый материал AISI-1045 из базы материалов DEFORM; 4) температура деформируемого материала  $20^\circ\text{C}$ ; 5) коэффициент трения на контакте с верхним валком  $\mu_1 = 0,05$ , на контакте с нижним валком  $\mu_2 = 0,15$ ; 6) угловая скорость вращения нижнего валка  $\omega_2 = 5 \text{ рад / с}$ .

При моделировании оценивали: 1) искажение вертикальных линий (наклон вертикальных сечений); 2) изменение интенсивности деформаций сдвига (ф-ла (4)) по сечению полосы. Анализировали влияние суммарной степени деформации по толщине: 10, 30, 50, 70, 80%. Полученные результаты сравнивали с симметричным случаем прокатки (при  $\mu_1 = \mu_2 = 0,05$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = 5 \text{ рад / с}$  и прочих равных условиях).

Выполненные расчеты показали, что в асимметричном режиме прокатки происходит наклон вертикальных сечений (рис. 3, 4), причем этот наклон становится ярко выраженным при суммарной степени деформации 50% и более. В частности, угол наклона  $\Phi$  при суммарной степени деформации 50% составил приблизительно  $45^\circ$ , а при 80% – около  $75^\circ$ .

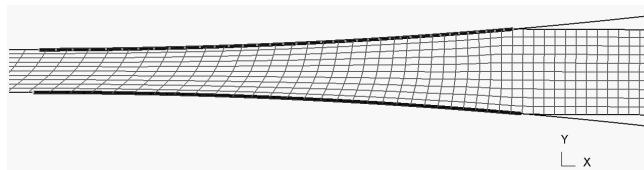


Рис. 3. Искажение сетки при асимметричной прокатке

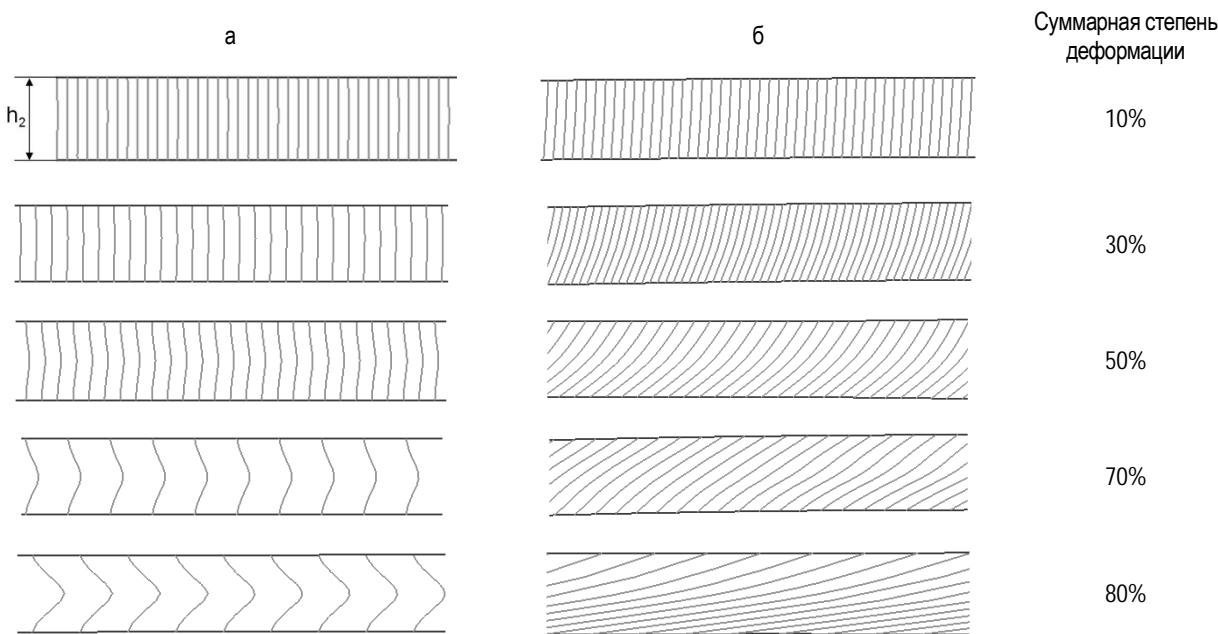


Рис. 4. Искажение вертикальных линий после симметричной (а) и асимметричной (б) прокатки

При прокатке в асимметричном режиме деформация сжатия  $\varepsilon_{yy}$  распределяется по сечению полосы неравномерно (рис. 5, а) в отличие от симметричного случая, при котором  $\varepsilon_{yy}$  не изменяется по толщине (рис. 5, б).

Особенностью процесса асимметричной тонколистовой прокатки является значительное возрастание сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{xy}$  по всему сечению полосы (рис. 5, б). Для верхней поверхности полосы величина  $\varepsilon_{xy}$  возросла в 2,6 раза (с 0,183 до 0,477), для нижней поверхности сдвиговая деформация увеличилась в 9 раз (с 0,183 до 1,65) в сравнении с прокаткой в симметричном режиме. Кроме того, при симметричной прокатке сдвиговые деформации в центре полосы равны нулю, а при прокатке в асимметричном режиме они составили 0,917.

Существенный прирост интенсивности деформаций сдвига при асимметричной тонколистовой прокатке в сравнении с симметричным случаем наблюдается при суммарной степени деформации более 50% (рис. 6), что связано, видимо, с увеличением угла наклона сечений на более чем  $45^\circ$ . Распределение интенсивности деформаций сдвига по сечению полосы является неравномерным: максимальное значение  $\Gamma=3,5$

соответствует нижней поверхности полосы (рис. 6, а), а минимальное  $\Gamma=2,1$  – верхней (рис. 6, б).

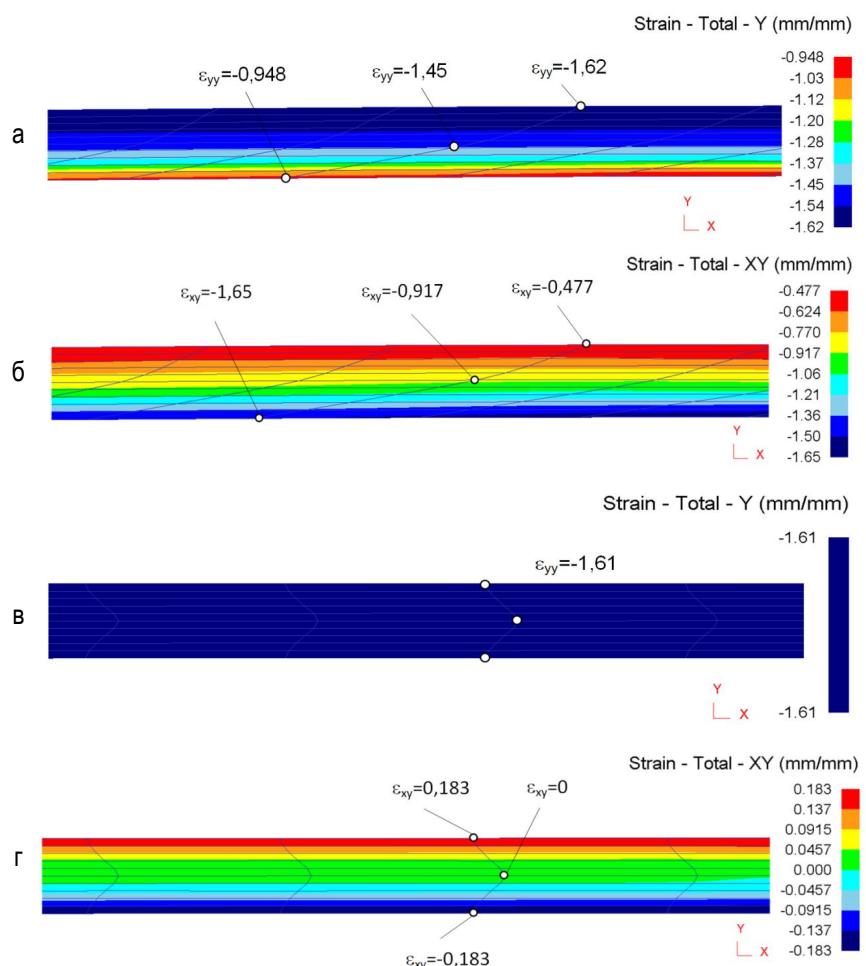
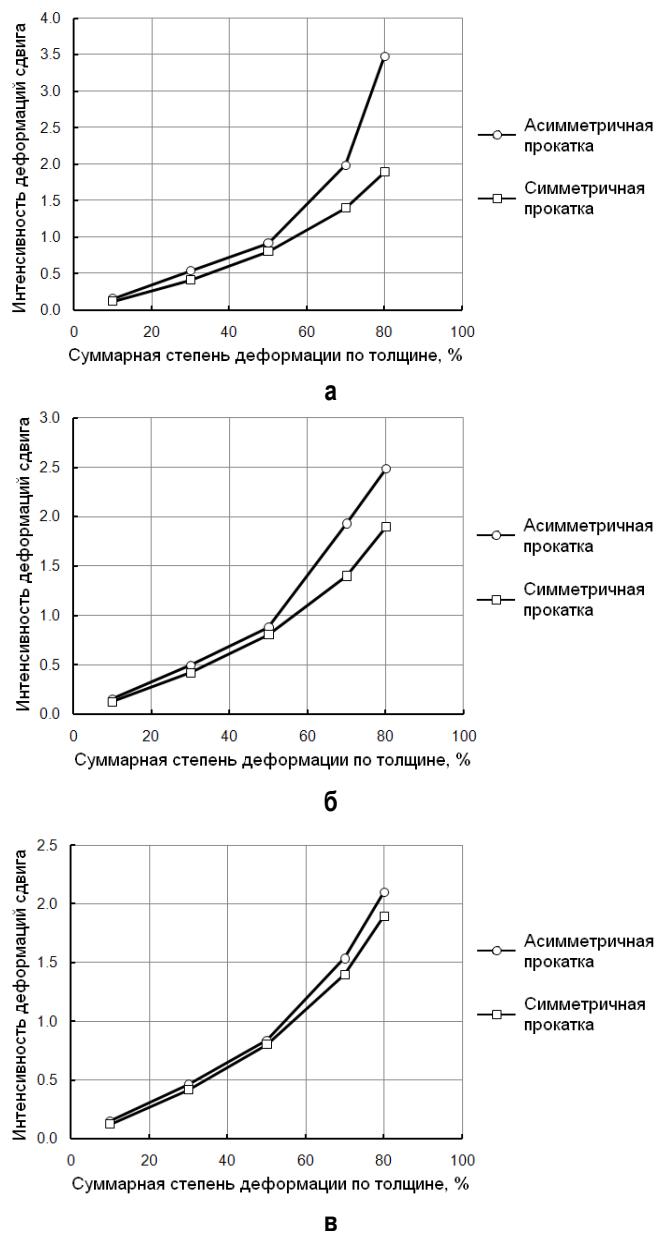


Рис. 5. Распределение деформаций сжатия  $\varepsilon_{yy}$  и сдвига  $\varepsilon_{xy}$  по толщине полосы при асимметричной (а, б) и симметричной (в, г) прокатке (суммарная степень деформации 80%)



**Рис. 6. Влияние суммарной степени деформации по толщине и режима прокатки на интенсивность деформаций сдвига: а – для нижней поверхности полосы; б – для центра полосы; в – для верхней поверхности полосы**

Таким образом, процессы асимметричной тонколистовой прокатки обладают значительным резервом для повышения интенсивности деформаций сдвига по сечению полосы и могут быть использованы для по-

лучения УМЗ структур в длинномерном листовом прокате.

#### Список литературы

1. Рааб Г.И. Перспективы использования методов интенсивной пластической деформации для получения высокопрочных металлических материалов в промышленных масштабах // Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН, 2011. С. 205-206.
2. Ji Y.H., Park J.J. Development of Severe Plastic Deformation by Various Asymmetric Rolling Processes // Materials Science and Engineering. 2009. Vol. 499. P. 14-17.
3. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling // Scripta Materialia. 2009. Vol. 60. P. 905-908.
4. Jong-Kook Lee, Dong Nyung Lee. Texture Control and Grain Refinement of AA1050 Al Alloy Sheets by Asymmetric Rolling // International Journal of Mechanical Sciences. 2008. Vol. 50. P. 869-887.
5. Zuo F., Jiang J., Shan A., Fang J., Zhang X. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2008. Vol 18. P. 774-777.
6. Песин А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2003. 395 с.
7. Салганик В.М., Песин А.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения. М.: МИСиС, 1997. 192 с.
8. Dyja H., Pesin A.M., W.M. Salganik, A. Kawalek. Asymetrczne walcowanie bladli cienkicili: teoria, teclinologia i nowe rozwiazania: Seria Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa. 2008. 345 p.
9. Pesin A.M., Salganik V.M., Pustovoitov D.O., Dyja H. Asymmetric rolling: Theory and Technology // HUTNIK-WIADOMOSCI HUTNICZE. 2012. No 5. P. 358-363.

#### References

1. Raab G.I. Prospects for the use of severe plastic deformation methods for obtaining high-strength metallic materials on an industrial scale // Proceedings of IV international Conference « Deformation and fracture of materials and nanomaterials». M.: IMET RAN, 2011, P. 205-206.
2. Ji Y.H., Park J.J. Development of Severe Plastic Deformation by Various Asymmetric Rolling Processes // Materials Science and Engineering. 2009. Vol. 499. P. 14-17.
3. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling // Scripta Materialia. 2009. Vol. 60. P. 905-908.
4. Jong-Kook Lee, Dong Nyung Lee. Texture Control and Grain Refinement of AA1050 Al Alloy Sheets by Asymmetric Rolling // International Journal of Mechanical Sciences. 2008. Vol. 50. P. 869-887.
5. Zuo F., Jiang J., Shan A., Fang J., Zhang X. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2008. Vol 18. P.774-777.
6. Pesin A.M. Modeling and development of the processes of asymmetric deformation to improve sheet rolling: thesis ... Dr. of Technical Sciences: 05.16.05. Magnitogorsk, 2003. – 395 p.
7. Salganik V.M., Pesin A.M. Asymmetric rolling of thin sheet: the development of theory, technology and new solutions. M.: MISIS, 1997. 192 p.
8. Dyja H., Pesin A.M., W.M. Salganik, A. Kawalek. Asymetrczne walcowanie bladli cienkicili: teoria, teclinologia i nowe rozwiazania: Seria Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa. 2008. 345 s.
9. Pesin A.M., Salganik V.M., Pustovoitov D.O., Dyja H. Asymmetric rolling: Theory and Technology // HUTNIK-WIADOMOSCI HUTNICZE. 2012. No 5. P. 358-363.

УДК 621.771.06:621.892

Платов С.И., Дема Р.Р., Зотов А.В.

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛАКИРОВАННОГО СЛОЯ НА ДЕТАЛЯХ ПАР ТРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ\*

**Аннотация.** Надежность и долговечность технологического оборудования во многом зависит от состояния поверхностных слоев деталей пар трения. В данной работе предложена модель формирования толщины покрытия при обработке деталей пар трения деформационным плакированием гибким инструментом. Полученная модель позволяет назначать оптимальные режимы обработки и параметры плакирующего инструмента для получения качественного слоя покрытия необходимой толщины.

**Ключевые слова:** плакирование, микрошлиф, металлическая щетка, технологическое оборудование.

Platov S.I., Dema R.R., Zotov A.V.

### MODEL OF THE FORMATION THICKNESS CLAD LAYER FOR FRICTION PAIRS OF PROCESS EQUIPMENT

**Abstract.** Reliability and durability of the process equipment in many respects depends on the state of the surface layers of friction pairs. In this paper we propose a model for the formation of the coating thickness in the processing of friction pairs cladding deformation flexible. The resulting model allows us to assign the optimum cutting data and parameters of plating tool to get a good coat desired thickness.

**Keywords:** cladding, microsection, metal brush, of technological equipment.

Своевременный и качественный ремонт технологического оборудования играет важную роль в непрерывности процесса производства продукции машиностроения. Надежность технологического оборудования во многом зависит от качества поверхностного слоя деталей пар трения динамических систем данного оборудования. С целью повышения качества ремонта и сокращения затрат на его производство предлагается использовать новый экономичный и высокоизделийный способ обработки поверхностей деформационным плакированием гибким инструментом (ДПГИ). Кроме защитных функций, плакирование позволяет осуществлять восстановление изношенных поверхностей без затрат на изготовление новых деталей [1-3].

Основа способа ДПГИ – явления, возникающие при переносе материала покрытия с донора на обрабатываемую поверхность. Единичная ворсинка в процессе удара и скольжения по донору вызывает появление предельной сдвиговой деформации в поверхности, при которой материал в очаге деформации переходит в сильно возбужденное аморфизированное состояние, эквивалентное состоянию металла при температуре плавления [4]. В результате адгезии аморфизированного металла на торцевой ювелирной поверхности гибких элементов образуется микрообъем материала донора в виде полусферической частицы, обладающей минимальной поверхностной энергией, которая транспортируется к поверхности детали.

Нашему анализу подверглись микрошлифы ворсинки с захваченной частицей плакирующего матери-

ала (рис. 1). Как видно, материал частицы покрытия представляет собой полусферу.



Рис. 1. Микрошлиф ворсинки с частицей материала покрытия

Металлы и сплавы, обладающие небольшим деформационным упрочнением, такие как алюминий, некоторые медные сплавы деформируются с большей интенсивностью, чем высокоупрочняемые металлы, поэтому, контактируя с поверхностью ворсинки, материал покрытия быстрее переходит в локально сильно возбужденное (СВ) состояние, на торцевой поверхности ворсинки формируется частица большего объема, и покрытие растет быстрее. После выхода из зацепления гибкого элемента с донором в материале частицы происходит обратный фазовый переход в кристаллическое состояние [4].

Механизм формирования покрытия с определенными допущениями можно представить следующим образом: при входе ворса в зону контакта полусферическая частица ударяется о поверхность и движется по ней следом за гибким элементом. В процессе трения обнажаются ювелирные поверхности частицы и

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Мероприятие 1.4.

детали, между ними происходит схватывание и, в результате, образование металлической связи.

При математическом моделировании процесса плакирования сделаем следующие допущения:

- частица плакирующего металла, переносимая ворсинкой, имеет форму полусферы с радиусом  $R=d_B$ , где  $d_B$  – диаметр ворсинки (рис. 2);

- температура частицы равна 0,7-0,8 температуре плавления материала покрытия;

- разрушение частицы происходит под углом  $\psi$ , который находится из условия разрушения капли нормальными и касательными напряжениями, возникающими в плоскости  $\psi$ ;

- скорость перемещения ворса по длине контакта с обрабатываемой поверхностью постоянная;

- шероховатость обработанной поверхности определяется величиной пластического оттеснения микровыступов.

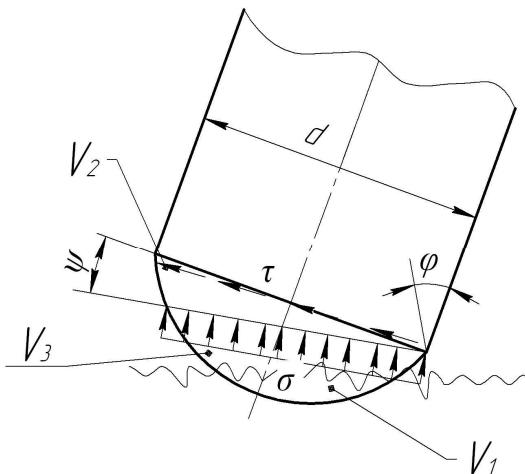


Рис. 2. Схема нанесения частицы покрытия на поверхность

Таким образом, в предлагаемой модели частица материала покрытия, переносимая гибким элементом при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью, делится на 3 объема:  $V_1$  (материал покрытия заполняет неровности поверхности),  $V_2$  (объем капли, уходящий в стружку) и  $V_3$  (объем капли, уходящий в рост толщины покрытия). При этом необходимо отметить следующий факт. При продолжительном обрабатывании деталей происходит их разогрев, вследствие чего нанесенный слой покрытия срезается гибкими элементами и происходит нежелательный процесс «отдачи» плакирующего материала деталью.

Предлагаемая модель формирования слоя покрытия основывается на возможности захвата торцом ворсинки шарового сегмента, который находится из решения известных уравнений Дюпре и равновесия сил поверхностного натяжения.

Высота сегмента, мм:

$$h_{сегм} = \frac{d_B}{2} \cdot [(\cos(90^\circ - \Theta))^{-1} - \tan(90^\circ - \Theta)], \quad (1)$$

где  $d_B$  – диаметр ворсинки, мм;  $\Theta$  – угол смачивания, град.

Объем частицы материала покрытия на торце гибкого элемента,  $\text{мм}^3$ :

$$V_o = \frac{\pi \cdot d_B^3}{12 \cdot \cos^2(90^\circ - \Theta)} \times \\ \times [\cos^{-1}(90^\circ - \Theta) - \tan(90^\circ - \Theta)]. \quad (2)$$

Объем частицы, остающийся на поверхности детали,  $\text{мм}^3$ :

$$V_{полезн} = \frac{\pi \cdot d_B^3}{12 \cdot \cos^2(90^\circ - \Theta + \Psi)} \times \\ \times [\cos^{-1}(90^\circ - \Theta + \Psi) - \tan(90^\circ - \Theta + \Psi)]. \quad (3)$$

Объем, заполняющий микровыступы поверхности детали,  $\text{мм}^3$ :

$$V_{шерох} = \frac{\pi \cdot d_B^3}{12 \cdot \cos^2(90^\circ - \Theta + \varphi)} \times \\ \times [\cos^{-1}(90^\circ - \Theta + \varphi) - \tan(90^\circ - \Theta + \varphi)], \quad (4)$$

где  $\varphi$  – угол входа ворсинки в контакт, град;

При моделировании геометрических и силовых параметров взаимодействия «гибкий инструмент – заготовка» на входе ворса в контакт ( $\varphi$ ) воспользуемся моделью [2], а на участке скольжения ворса по поверхности изделия – методикой [6].

$\psi$  – угол, характеризующий условие разрушения.

Для угла  $\psi$  можно записать:

$$\frac{d\sigma}{d\psi} = 0 \quad \text{при} \quad \sigma \geq \sigma_m, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – расчетные напряжения в рассматриваемом объеме материала покрытия;  $\sigma_m$  – предельные напряжения, возникающие в рассматриваемом объеме переносимого покрытия, при соблюдении граничных условий, что температура частицы равна 0,7-0,8 температуре плавления материала. При выполнении расчета принималось, что  $\sigma_m \approx \sigma_m$ , где  $\sigma_m$  – предел текучести материала покрытия, МПа.

Объем частицы, уходящий в рост толщины покрытия,  $\text{мм}^3$ :

$$V_{покр} = V_{полезн} - V_{шерох}. \quad (6)$$

Таким образом, толщина нанесенного слоя покрытия, мм:

$$H = \frac{V_{покр} \cdot n \cdot p \cdot \tau}{S}, \quad (7)$$

где  $p$  – количество гибких элементов в щетке, шт., определяется:

$$p = i \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.1 \cdot R \cdot u, \quad (7.1)$$

где  $i$  – плотность упаковки, шт./см<sup>2</sup>;  $R$  – радиус щетки, мм;  $u$  – ширина щетки, см;  $S$  – площадь обрабатываемой поверхности детали, мм<sup>2</sup>:

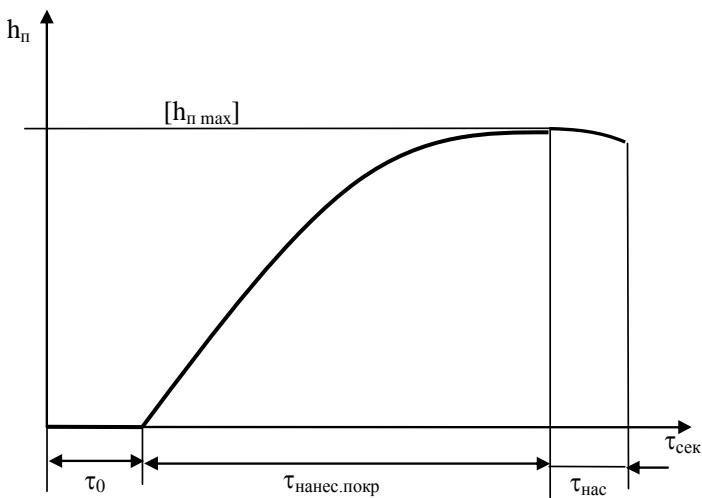
$$S = 2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot l_o, \quad (7.2)$$

где  $l_o$  – длина детали, мм;  $n$  – частота вращения инструмента, об/мин:

$$n = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \cdot 60. \quad (7.3)$$

$\tau$  – время обработки площади детали, равной 1 см<sup>2</sup>.

Анализ уравнения (6) показывает линейный характер представляемой модели. Многочисленные исследования способа ДПГИ [1-5] позволяют сделать предположение о том, что рост толщины покрытия ( $h_n$ ) можно представить согласно графику на **рис. 3**.



**Рис. 3. Стадии процесса плакирования:**  $t_0$  – время обработки, при котором происходит подготовка поверхности к нанесению покрытия;

$t_{\text{нанес.покр}}$  – процесс нанесения покрытия, при котором формируется максимальная толщина  $h_{n \max}$ ;

$t_{\text{нас}}$  – участок насыщения, при котором наступает насыщение и наблюдается уменьшение толщины

Для определения граничных условий роста модели (6)-(7) толщины покрытия был реализован четырехфакторный эксперимент, поставленный по плану Бокса-Бенкина [7], целью которого было определить  $[h_{n \max}]$ .

В качестве варьируемых факторов были выбраны: натяг  $N$  плакирующего инструмента к обрабатываемой поверхности ( $X1$ ); диаметр ворса  $d_B$  инструмента ( $X2$ ); отношение угловых скоростей вращения  $\omega_o/\omega_u$  обрабатываемого образца и гибкого инструмента ( $X3$ ); отношение длины вылета ворса к радиусу его заделки  $l/r_3$  ( $X4$ ). Параметром оптимизации служила  $h$  толщина получаемого покрытия в мкм.

Уровни варьирования выбранных факторов указаны в **таблице**.

#### Уровни варьирования факторов

Факторы	Натяг $N$ , мм	Диаметр ворса $d_B$ , мм	Отношение угловых скоростей $\omega_o/\omega_u$	Отношение длины вор- са к радиусу заделки $l/r_3$
	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$
Основной уровень ( $X_{10}$ )	1	0,18	0,00225	0,35
Интервалы варьирования ( $\Delta X$ )	0,5	0,04	0,00125	0,1
Верхний уро- вень ( $X_{i=+1}$ )	1,5	0,22	0,0035	0,45
Нижний уро- вень ( $X_{i=-1}$ )	0,5	0,14	0,001	0,25

Эксперимент проводился на переоборудованном токарном станке, на суппорте которого была установлена плакирующая установка. В качестве материала покрытия использовалась бронза БрОЦС5-5-5, элемент материала покрытия которой прижимался к инструменту с усилием в 20 Н. В качестве экспериментальных образцов использовались диски СЧ 21-40 (НВ 180-190) диаметром 45 мм. Опыты не дублировали, поскольку центральный опыт повторяли трижды.

Для измерения толщины покрытия использовали толщиномер QuaNix 4500 (в электромагнитном режиме работы) с погрешностью – 2% и минимальным радиусом измерения – 5 мм. На каждом образце проводили порядка 25 замеров, среднее значение которых и шло в окончательный анализ толщины сформированных покрытий.

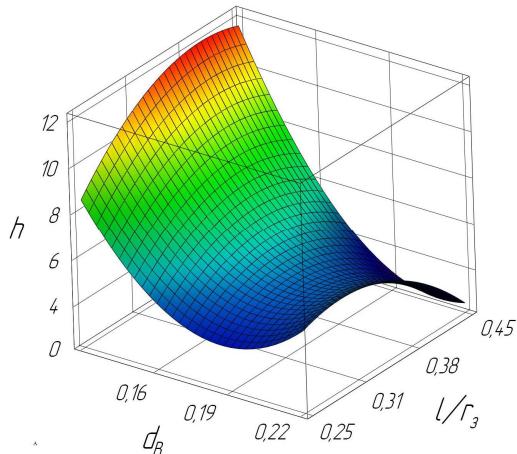
Обработка данных эксперимента позволила получить уравнение регрессии для толщины нанесенных покрытий:

$$h = 5,733 - 2,992 \cdot x_2 - 1,325 \cdot x_3 + \\ + 2,3 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,9 \cdot x_2 \cdot x_3 - \\ - 1,575 \cdot x_2 \cdot x_4 - 1,004 \cdot x_1^2 + 2,946 \cdot x_2^2 - \\ - 0,804 \cdot x_3^2 - 1,504 \cdot x_4^2, \quad (8)$$

где  $x_i$  – коэффициент перехода от кодированных величин к натуральным [4].

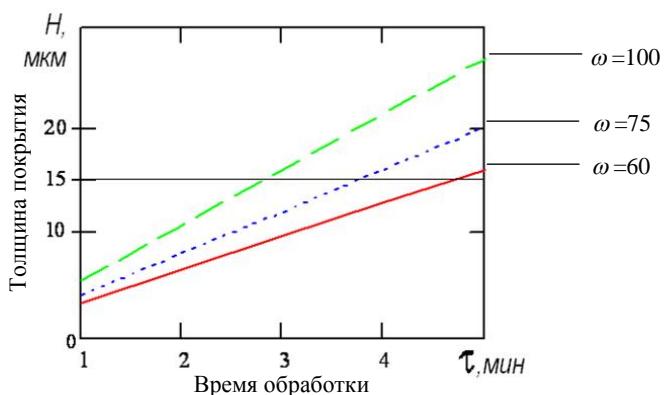
Проверка модели по критерию Фишера при 5% уровне значимости подтвердила ее адекватность. При проверке модели учитывали то обстоятельство, что один опыт плана трижды дублировали.

Анализ уравнения регрессии показывает, что наибольшее влияние на формирование толщины покрытия оказывают: диаметр ворса  $d_B$  инструмента и отношение длины вылета ворса к радиусу его заделки  $l/r_3$ . На **рис. 4** приведена зависимость толщины покрытия от этих параметров.



**Рис. 4. Зависимость толщины покрытия при  $N = 1$  мм;  $\omega_d/\omega_{u_1} = 0,00225$**

Для оценки адекватности разработанной модели (6)-(7) с учетом (8) была произведена практическая реализация полученных результатов. В лаборатории МГТУ им. Г.И. Носова была произведена обработка плунжера гидравлического цилиндра пресса, поверхность которого была изношена на величину 7 мкм. С учетом технологических особенностей эксплуатации плунжера необходимо сформировать антифрикционное покрытие толщиной  $h_n = 15$  мкм. По разработанной модели были подобраны соответствующие режимы обработки (рис. 5):  $N = 1,5$  мм;  $\omega_{u_1} = 75 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_d = 0,175 \text{ с}^{-1}$ ; параметры инструмента:  $l = 50$  мм;  $d_B = 0,18$  мм.



**Рис. 5. Зависимость толщины покрытия от режимов обработки**

Плакирование производилось на переоборудованном круглошлифовальном станке, на котором вместо камня была установлена металлическая щетка диаметром 400 мм. Снимки плунжера до обработки и после показаны соответственно на рис. 6 и 7.

Толщина сформированного покрытия (см. рис. 7) составила 14,8-16,2. Таким образом, адекватность предложенной модели составляет 3-5%.

В результате, эксплуатационные режимы работы пары трения «плунжер – цилиндр» гидравлического пресса вышли на оптимальные показатели, а за счет нанесения бронзы стабилизировались силы

трения в контакте.



**Рис. 6. Плунжер пресса до обработки**



**Рис. 7. Плунжер, плакированный БрОЦС5-5-5**

Таким образом, полученная модель позволяет назначать оптимальные режимы обработки и параметры плакирующего инструмента для получения качественного слоя покрытия необходимой толщины.

#### Список литературы

1. Расширение технологических возможностей метода плакирования гибким инструментом / В.И. Кадошников, В.П. Анцупов, Р.Р. Дема и др. // Вестник машиностроения. 2003. №10. С. 64-67.
2. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
3. Повышение надежности и долговечности механического оборудования методом плакирования гибким инструментом / В.И. Кадошников, С.И. Платов, В.П. Анцупов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. №6. С. 31-33.
4. Завалишин А.Н., Смирнов О.М., Тулупов С.А. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытия. М.: Орбита-М, 2012. 336 с.
5. Завалишин А.Н. Механизм образования покрытий, сформированных во фрикционном контакте // Трение и износ. 2001. Т. 22. № 2. С. 197.
6. Зотов А.В. Методика расчета геометрических и силовых параметров зоны контакта при плакировании изделий гибким инструментом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 85-88.
7. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

#### References

1. Kadoshnkov V.I. Antsupov V.P., Dema R.R. etc. The expansion of technological possibilities of the cladding flexible instrument for // Journal of Engineering. 2003. №10. Pp. 64-67.
2. Antsupov V.P. Theory and practice of cladding products flexible instrument. Magnitogorsk: MSTU. GI Nosov, 1999. 241 P.
3. Kadoshnkov V.I., Platov S.I., Antsupov V.P. and so increase the reliability and durability of the mechanical equipment and the method of cladding flexible tool // strengthening technology and the coating 2007. № 6. Pp. 31-33.
4. Zavalishchin A.N., Smirnov O.M., Sheepskins S. Modification of the surface of metal products using the coating. M. Orbit-M, 2012, 336 p.
5. Zavalishchin A.N. Mechanism of formation of coatings formed in frictional contact. Friction and wear. 2001. T. 22. Number 2. S. 197.
6. Zотов А.В. The method of calculation of geometric and strength parameters of the contact with cladding products flexible tool // The vector science of Togliatti State University. 2012. Number 3. Pp. 85-88.
7. Novick F.S., Arsov J.B. Process optimization technology metals by DOE - Mashinostroenie, 1980. 304.

УДК 621.89

Жиркин Ю.В., Пузик Е.А.

## АНАЛИТИЧЕСКИ-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕЖИМА ЭГД-СМАЗКИ

**Аннотация.** Статья посвящена изучению явления термоэффекта входной зоны. В статье приводятся зависимости, позволяющие использовать температуру смазочного материала, входящего в зону контакта, для определения температурного коэффициента и толщины смазочного слоя, разделяющего трещицескую поверхность при работе подшипников качения. Знание фактического значения толщины смазочного слоя на контакте весьма значимо для проведения анализа работоспособности подшипников качения.

**Ключевые слова:** эластогидродинамическая смазка в подшипниках качения, термоэффект входной зоны, температурный коэффициент.

Zhirkin Y.V., Puzik E.A.

### ANALYTICALLY AND EXPERIMENTAL METHOD USED FOR DEFINITION THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF THE ELASTO-HYDRODYNAMIC LUBRICATION

**Abstract.** This article devoted to the thermoeffect of the entrance zone. It is describe a method for calculation the temperature of a lubricant, which enter to the zone of contact, for determination the temperature coefficient, and a method for calculation thickness of the lubricating layer, which separate the friction surface. The actual value of the lubricating layer in the contact is very meaningful for analysis of the functionality of the rolling bearing.

**Keywords:** elasto-hydrodynamic lubrication in the rolling bearing, thermoeffect of the entrance zone, temperature coefficient

На толщину смазочного слоя, разделяющего трещицескую поверхность при работе подшипников качения, существенное влияние оказывает вязкость смазочного материала, зависящая как от давления, так и температуры.

Однако температура масла на контакте в большинстве случаев неизвестна и существенно отличается от температуры масла, поступающего в зону контакта. Это следствие проявления термоэффекта входной зоны, о котором упоминали ещё А.В. Крук, А. Дайсон, Г. Нейлор и др.

Поэтому расчёт толщины смазочного слоя по формуле, приведённой И.Д. Ратнером [1] при температуре смазочного материала на входе в контакт, может привести к получению завышенного значения толщины смазочного слоя. Особенно при высоких скоростях движения.

В результате исследования данной проблемы В.Н. Васиным была предложена формула для расчёта толщины смазочного слоя, учитывающая термоэффект входной зоны.

$$h_0 = 1,864(\mu_0 U_{\Sigma})^{0,7235} \alpha^{0,558} E^{0,002} \rho_{np}^{0,444} q_H^{-0,167} K_1^{-1}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – кинематическая вязкость масла при атмосферном давлении, Па·с;  $U_{\Sigma}$  – суммарная скорость качения в контакте, м/с;  $\alpha$  – пьезоэффективент вязкости смазочного материала, Па<sup>-1</sup>;  $\rho_{np}$  – приведённый радиус кривизны поверхностей трения, м;  $q_H$ ,  $K_1$  – коэффициент, учитывающий термоэффект входной зоны на контакте:

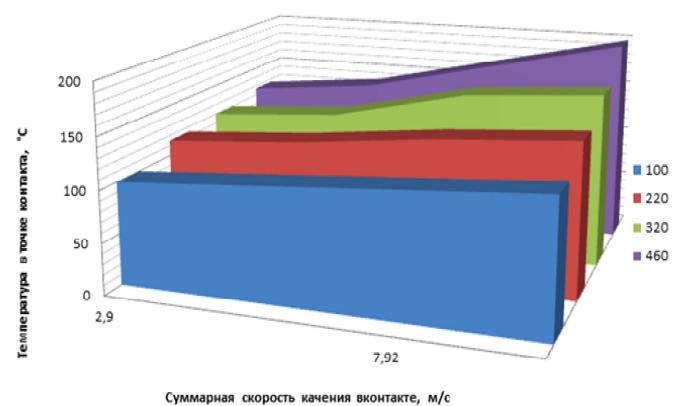
$$K_1 = 1 + \left( \frac{\mu_0 \beta U_1^2}{\lambda} \right)^{0,65} \lg \times \\ \times \left[ 0.922(\mu_0 U_{\Sigma})^{0,114} \alpha^{0,285} E^{0,2565} \rho_{np}^{-0,0285} q_H^{-0,0855} \right], \quad (2)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент, 1/К.

Однако вычисление толщины смазочного слоя по формуле (1) осложняется отсутствием значений температурного коэффициента для исследуемых масел.

Для определения величины температурного коэффициента необходимо знать фактическую температуру масла на контакте. С этой целью была проведена серия экспериментов по определению температуры на контакте в соответствии с методикой, описанной в работах [2] и [3]. Эксперимент проводился на базе масел четырёх различных классов вязкости: 100, 220, 320, 460 на двух различных скоростных режимах, число оборотов внутреннего кольца приводного подшипника составляло 514, 1400 об/мин, суммарная скорость качения в контакте при этом составила 2,9, 7,92 м/с соответственно.

Средние значения полученных температур приведены на **рис. 1**.



**Рис. 1. Среднее значение рабочей температуры в точке контакта для смазочных материалов четырёх классов вязкости (100, 220, 320, 460) при двух суммарных скоростях качения в контакте 2,9, 7,92 м/с**

По обобщённому графику (1) видно, что на температуру в точке контакта существенное влияние оказывает суммарная скорость качения, а также вязкость смазочного материала. Значительный прирост температуры наблюдается при подаче наиболее вязкого материала (класс вязкости 460) при суммарной скорости качения 7,92 м/с<sup>2</sup>.

При этой же скорости, но при использовании наименее вязкого смазочного материала, температура в точке контакта существенно ниже. При более низкой скорости температура в точке контакта для масел классом вязкости (КВ) 220, 320, 460 существенно не отличается. Более низкая температура при указанной скорости фиксировалась при использовании смазочного материала КВ 100.

Таким образом, увеличение вязкости смазочного материала несущественно влияет на изменение температуры в точке контакта, т.е. при увеличении вязкости наблюдался незначительный прирост температуры. Однако при более вязком смазочном материале (СМ), например КВ 460, температура в точке контакта была выше, чем при менее вязком, например КВ 100.

Рост температуры в точке контакта происходит с увеличением суммарной скорости движения при вращении внутреннего кольца.

Полученные предложенным аналитическим методом значения температуры на контакте значительно превышают температуру смазочного материала, поступающего в зону контакта, и характеризуют фактическую вязкость смазочного материала на контакте, что оказывает существенное влияние на толщину смазочной плёнки и соответственно на условия реализации режима ЭГД-смазки в подшипниках качения [4].

Используя полученные значения температур по формуле, предложенной И.Д. Ратнером, была определена толщина смазочного слоя в точке контакта для исследуемых масел. Графики зависимости толщины масляной плёнки (МП), разделяющей трещиющуюся поверхности, от температуры СМ, поступающего в зону контакта для четырёх классов вязкости СМ, представлены на рис. 2, 3.

Из представленных зависимостей видно, что температура смазочного материала, поступающего в зону контакта, оказывает существенное влияние на толщину смазочного слоя. При суммарной скорости качения 2,9 м/с наибольшие значения толщины МП устанавливаются для смазочного материала КВ 460. При суммарной скорости качения 7,92 м/с значение толщины МП для четырёх классов вязкости существенно не различается. Однако наименьшее значение МП для данной скорости качения фиксируется при использовании смазочного материала КВ 100 при его разогреве до 45°C и для смазочного материала КВ 460 при его разогреве от 45°C.

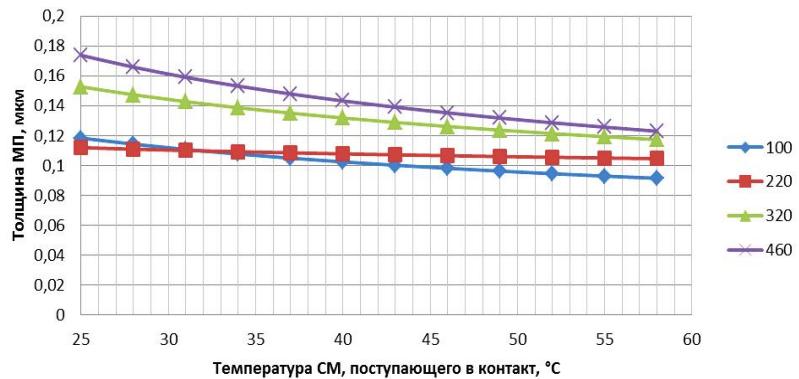


Рис. 2. Зависимость толщины смазочного слоя, разделяющего трещиющуюся поверхности от температуры смазочного материала, поступающего в зону контакта при суммарной скорости качения в контакте 2,9 м/с

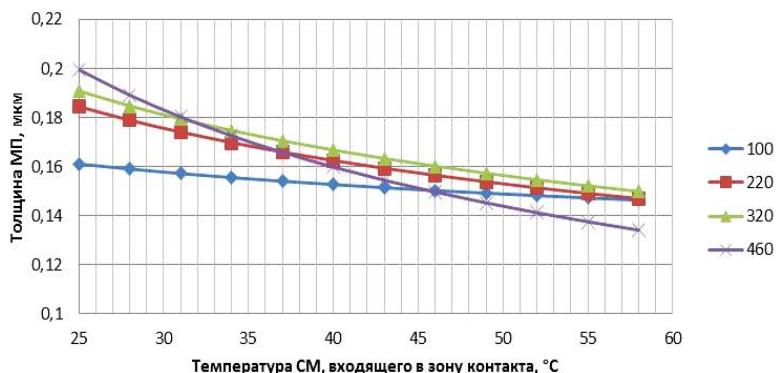


Рис. 3. Зависимость толщины смазочного слоя, разделяющего трещиющуюся поверхности, от температуры смазочного материала, поступающего в зону контакта при суммарной скорости качения в контакте 7,92 м/с

Зная значение толщины смазочного слоя (СС), разделяющего трещиющуюся поверхности, используя зависимости В.Н. Васина (1), (2), становится возможным установление зависимости температурного коэффициента  $\beta$  от температуры СМ, поступающего на контакт (рис. 4, 5). Математически зависимости коэффициента  $\beta$  от температуры СМ, поступающего на контакт, представлены в таблице.

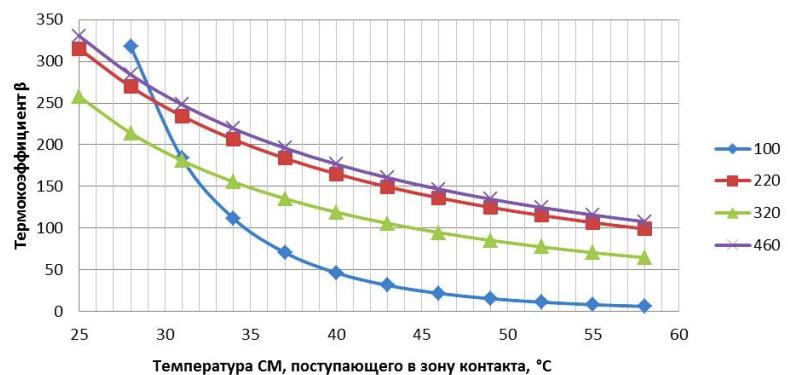
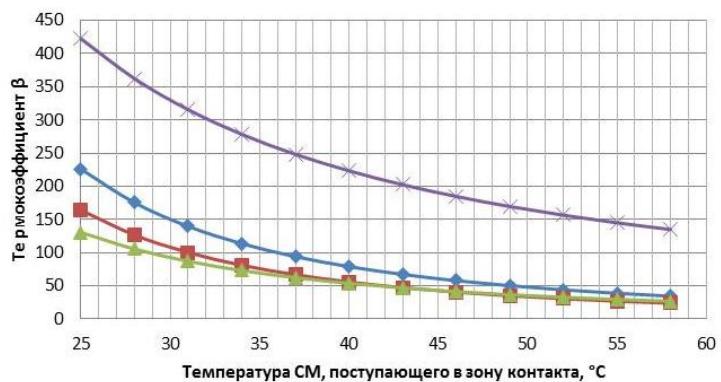


Рис. 4. Зависимость температурного коэффициента  $\beta$  от температуры СМ, поступающего в зону контакта при суммарной скорости качения в контакте 2,9 м/с



**Рис. 5. Зависимость температурного коэффициента  $\beta$  от температуры СМ, поступающего в зону контакта при суммарной скорости качения в контакте 7,92 м/с**

**Зависимость температурного коэффициента  $\beta$  от температуры СМ- $t$ , поступающего в зону контакта при суммарных скоростях качения в контакте 2,9 и 7,92 м/с**

Класс вязкости СМ	Суммарная скорость качения в контакте, м/с	
	2,9	7,92
100	$2 * 10^{10} * t^{-5.389}$	$299547 * t^{-2.234}$
220	$26165 * t^{-1.373}$	$263276 * t^{-2.293}$
320	$50726 * t^{-1.641}$	$56507 * t^{-1.886}$
460	$23889 * t^{-1.33}$	$33206 * t^{-1.356}$

Полученные зависимости позволяют по ф-ле (2) более точно определить толщину смазочного слоя на контакте, используя в расчётах температуру СМ, входящего в зону контакта. Знание фактического значе-

ния толщины смазочного слоя на контакте весьма значимо для проведения анализа работоспособности подшипников качения.

#### Список литературы

1. Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчёт деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 160 с.
2. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А., Мироненков Е.И. Экспериментальные исследования области реализации ЭГД смазки в подшипниках качения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й междунар. науч.-техн. конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010.
3. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А. Определение рабочей температуры смазочного слоя непосредственно в зоне контакта // Materiały VII Międzynarodowej konferencji «Perspektywiczne opracowania nauk i technikami – 2011» Vol. 54. Techniczne nauki: Przemysł. Nauka i studia, 2011. 112.
4. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А., Аналитико-экспериментальное определение параметров ЭГД-смазки в подшипниках качения опор рабочих валков стана 2000 горячей прокатки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. №4. С. 52-56.

#### References

1. Kodnir D.S, Zhilnikov E.P., Biborodov Yu.I. Elastodynamics calculation of machine element. M.: Mechanical engineering, 1988. 160 p
2. Zhirkin Y.V., Puzik E.A., Mironenkov E.I. Experimental research of area of elasto-hydrodynamic lubrication in the rolling bearing// Actual problem of the modern science techincs and education: materials of the 68th international scientific-technical conference. Magnitogorsk. 2010
3. Zhirkin Y.V., Puzik E.A. The definition of the operating temperature of the lubricating layer in the contact // The materials of the 7th international theoretical and practical conference: «The perspective direction of the science and techincs-2011». Vol. 54. Technical sciences. Praga. Science and education. 112 p.
4. Zhirkin Y.V., Puzik E.A. Analytical and experimental determination of the parameters of the EHD lubrication in rolling bearings work rolls hot rolling mill 2000 // Vestnik MSTU named after G.I. Nosov. 2010. 4. pp. 52-56.

# ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.365.2:669.187.2

Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю., Якимов И.А.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ КАК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА\*

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности и результаты моделирования сверхмощных дуговых сталеплавильных печей, широко применяемых в настоящее время ведущими металлургическими предприятиями. Результаты моделирования могут быть использованы при оптимизации электрических режимов подобных комплексов как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, модель электрической дуги, оптимальный электрический режим, компенсатор реактивной мощности.

Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R., Vahitov T.Ju., Jakimov I.A.

### FEATURE OF THE SIMULATION THE ELECTRIC ARC FURNACE AS ELECTRO TECHNICAL COMPLEX

**Abstract.** The article describes the features and results of simulation of super electric arc furnaces are widely used at the present time the leading steel enterprises. The simulation results can be used to optimize the electric conditions of such complexes as the design stage and at the stage of operation.

**Keywords:** electric arc furnace, a model of electric arcs, the optimal electric mode, the reactive power compensator.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются неотъемлемым элементом технологической цепи металлургического, машиностроительного производства. Установленная мощность печных трансформаторов изменяется от единицы до сотен мегаватт. В системе электроснабжения предприятия ДСП является специфическим нелинейным приемником с несимметричным и резкопеременным характером изменения нагрузки. При проектировании и эксплуатации таких комплексов наиболее актуальными являются две проблемы:

– обеспечение условий максимального и наиболее эффективного использования электрической энергии во всех технологических режимах ДСП;

– обеспечение требований электромагнитной совместимости ДСП с питающей системой электроснабжения.

С учётом поставленных задач наиболее продуктивным и доступным инструментом исследования является метод имитационного моделирования, который позволяет адекватно отразить сложные электротехнологические процессы и существенно расширить диапазоны исследований изучаемого объекта, включая и аварийные режимы.

\* Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ МК-4182.213.8.

При моделировании использован системный подход, учитывающий все особенности ДСП и предполагающий, во-первых, изучение объекта как единого целого по отношению к внешней энергосистеме, а во-вторых, представление ДСП как сложного электротехнического комплекса, состоящего из отдельных локальных подсистем (элементов) с перекрёстными связями. В дальнейшем в качестве основных элементов выделены следующие:

– система внешнего электроснабжения с печным трансформатором и реактором;

– система управления электрическим режимом с гидроприводом перемещения электродов;

– система стабилизации и симметрирования напряжения, реализованная в виде статического тиристорного компенсатора (СТК) в составе фильтров и тиристорно-реакторной группы (ТРГ) с системой управления.

Блок-схема модели комплекса ДСП-СТК приведена на рис. 1. Буквенные обозначения электрических величин являются общепринятыми и отражены в тексте.

При моделировании ДСП наибольшие трудности вызывает представление собственно самой электрической дуги, поскольку модель должна, с одной стороны, достаточно точно и адекватно отражать реальные физические процессы, а с другой – быть легко реализуемой и гибкой при проведении исследований.

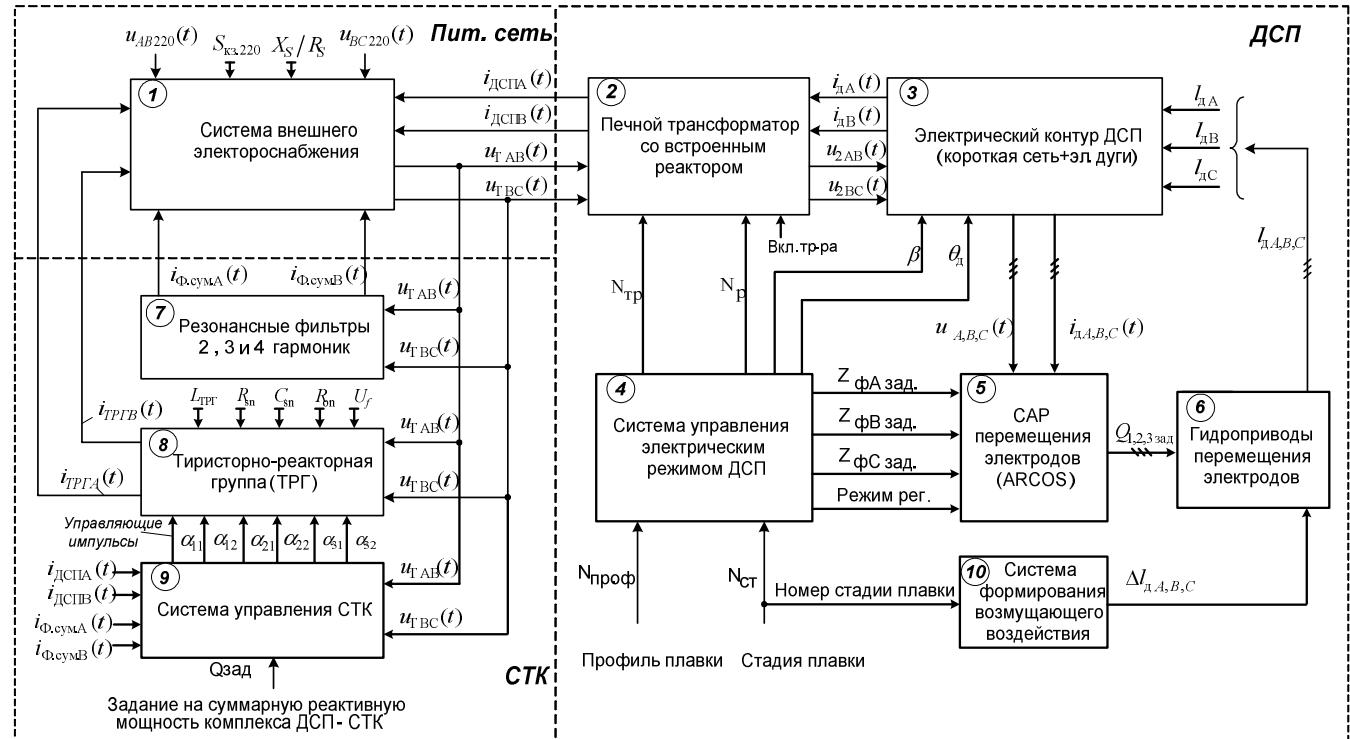


Рис. 1. Блок-схема математической модели комплекса «ДСП-СТК»

В настоящее время используют три основных способа описания электрической дуги:

### 1. Представление дуги переменным активным сопротивлением.

Электрический контур ДСП на однофазной схеме замещения состоит из трёх элементов (рис. 2, а). Это дуговой промежуток в виде переменного активного сопротивления  $R_d$ , суммарного активного  $R_\Sigma$  и индуктивного  $X_\Sigma$  сопротивлений, приведённых к вторичной стороне печного трансформатора. Они учитывают сопротивления печного трансформатора с реактором, короткую сеть с электродом и расплавом. В соответствии с векторной диаграммой (рис. 2, б) напряжение на дуге определяют по формуле

$$U_d = \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d \cdot X_\Sigma)^2} - I_d \cdot R_\Sigma. \quad (1)$$

Аналитические выражения активной, реактивной и полной мощностей ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ), активных потерь, электрического КПД и коэффициента мощности имеют вид:

$$P_d = 3 \cdot U_d \cdot I_d; \Delta P = 3 \cdot I_d^2 \cdot R_\Sigma;$$

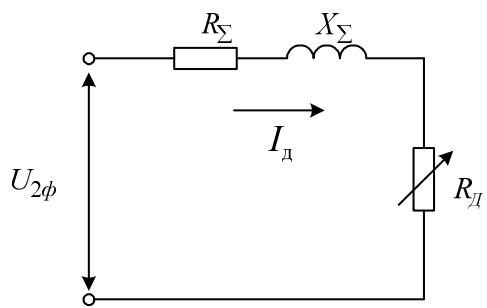
$$P = P_d + \Delta P; S = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_d;$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; \cos \varphi = \frac{P}{S}; \eta_{el} = \frac{P_d}{P}.$$

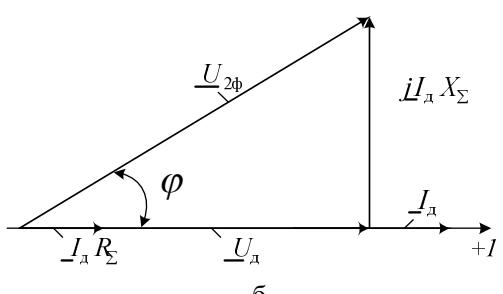
На основании этих формул рассчитывается электрическая характеристика  $P_d = (I_d)$ .

Приведенная упрощённая методика расчёта с постоянными значениями активного и реактивного сопротивлений не учитывает нелинейных свойств дуги

и предполагает наличие синусоидального тока. Это допущение вносит наибольшую погрешность в расчёт электрических характеристик, особенно для начальных стадий плавки с длинными дугами, где содержание высших гармоник имеет максимальное значение.



а



б

Рис. 2. Упрощённая схема замещения ДСП (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б)

По истечении почти 30 лет после выхода самого цитируемого учебника [1], заложившего основы инженерного проектирования ДСП, в том числе электрических режимов, один из его авторов признает, что

«... обычно используемые при анализе и синтезе режимов электрические характеристики, полученные без учёта нелинейности токоподвода, не позволяют адекватно отразить электрические режимы электрических печей» [2, с. 57]. В современных исследованиях и моделях электрическая дуга представляется нелинейным элементом.

**2. Представление дуги нелинейным дифференциальным уравнением Касси** позволяет учёт её нелинейные свойства [3]

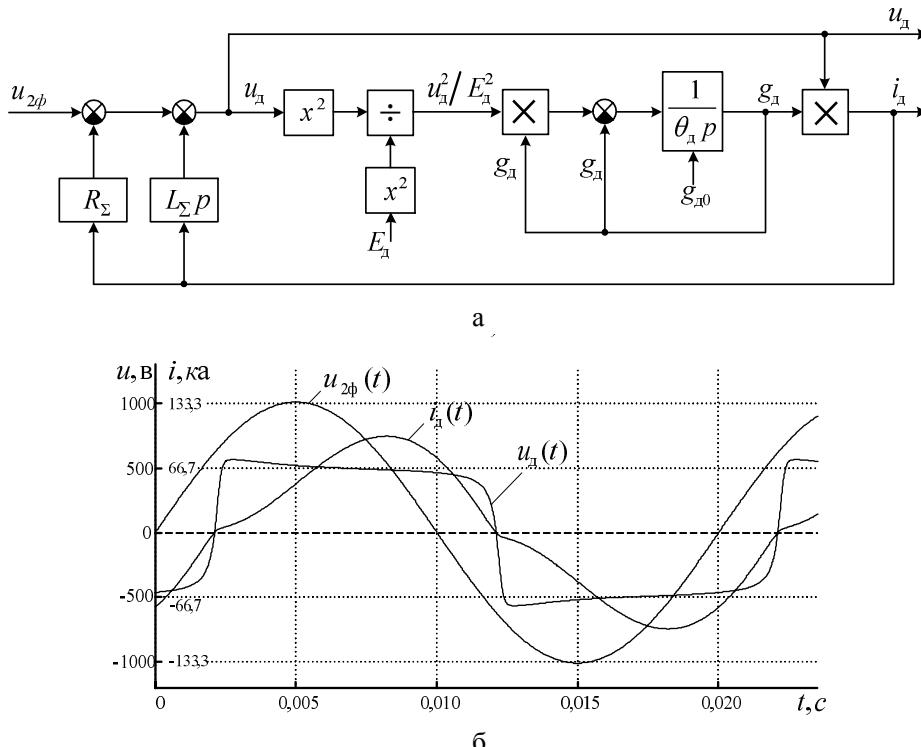
$$\theta_d \frac{dg(t)}{dt} = \left( \frac{u_d^2(t)}{E_d^2} - 1 \right) \cdot g(t), \quad (2)$$

где  $g(t)$  – мгновенная проводимость дуги;  $E_d$  – противоЭДС дуги;  $u_d(t)$  – мгновенное напряжение на дуге;  $\theta_d$  – постоянная времени, характеризующая тепловую инерционность дуги.

Структурная схема модели дуги, составленная на основе исходных уравнений (2)-(4), приведена на **рис. 3, а**. Здесь же (**рис. 3, б**) показана осциллограмма мгновенных значений тока и напряжения на дуге.

$$u_d = u_{2\phi} - i_d \cdot R_\Sigma - L_\Sigma \frac{di_d}{dt}, \quad (3)$$

$$i_d = u_d \cdot g_d. \quad (4)$$

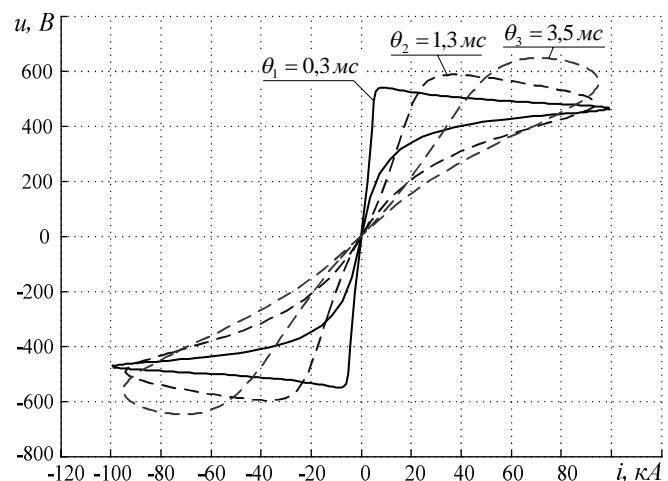


**Рис. 3. Структурная схема одной фазы ДСП на основе уравнения Касси (а) и осциллограммы напряжений и тока (б)**

Благодаря использованию тепловой постоянной времени учитываются условия горения дуги на различных технологических стадиях плавки. Изменение постоянной времени  $\theta_d$  существенно отражается на

динамической вольтамперной характеристике и её площади, которая характеризует реактивную мощность дуги. В начале расплавления шихты величина постоянной времени находится в пределах 0,2-0,5 мс, по мере возникновения жидкой фазы её значение увеличивается до 1-1,5 мс, а при работе дуг на жидкий расплав под слоем шлака величина  $\theta_d$  возрастает до 3-5 мс.

На **рис. 4** приведена серия вольтамперных характеристик однофазной дуги для различных значений тепловой постоянной времени.



**Рис. 4. Вольтамперные характеристики однофазной дуги при различных значениях постоянной времени**

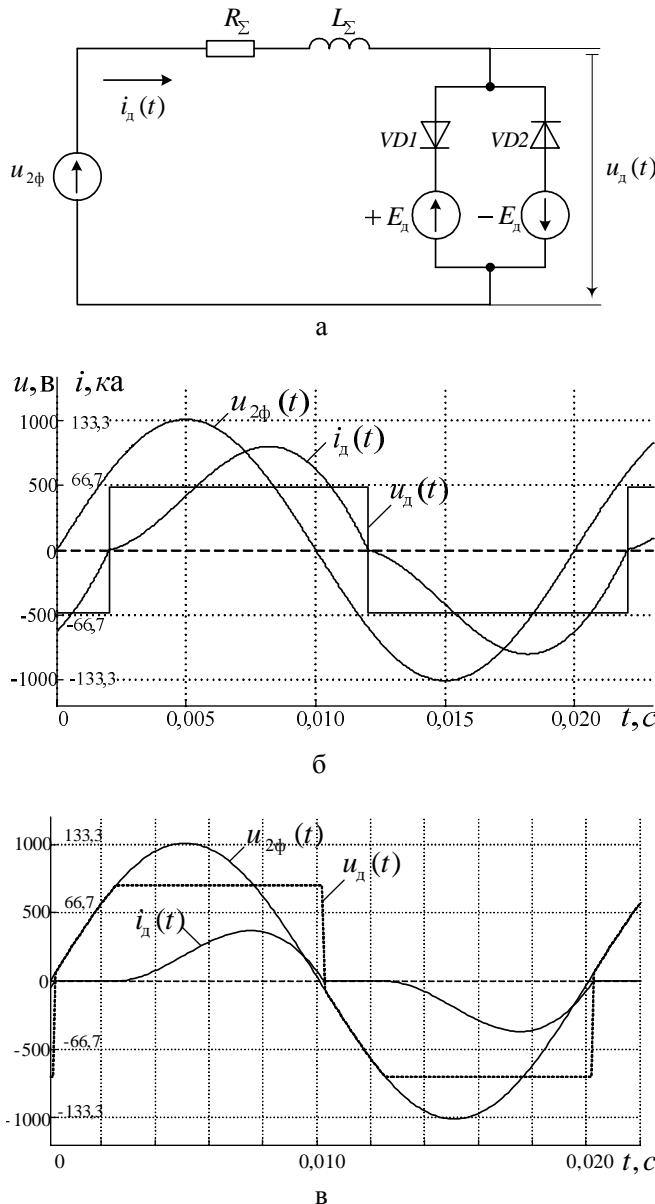
В предельном случае  $\theta_d=0$  напряжение дуги имеет прямоугольную форму  
 $u_d(t) = E_d \cdot \text{sign}[i(t)].$

**3. Представление напряжения дуги во время горения постоянным значением  $E_d = \text{const}$**  было предложено С. И. Тельным [4].

Электрическая схема замещения для этого случая приведена на **рис. 5, а**. Этот способ, будучи достаточно простым в реализации, позволяет учёт «вентильный» эффект дуги, а также несимметрию токов по фазам. «Вентильный» эффект возникает из-за неодинаковых условий горения дуги, особенно в начальной стадии плавки между разогретым электродом и холодной шихтой, что является причиной появления чётных гармоник тока.

На **рис. 6** представлены зависимости мощности дуг (а) и отношение эксплуатационного реактивного сопротивления к сопротивлению короткого замыкания от тока дуги (б). Цифры на рисунке соответствуют: 1 – упрощённое представление дуги переменным активным сопротивлением (схема замещения

на **рис. 2, а**; 2 – представление дуги в виде противовоздушной ЭДС для одной фазы (**рис. 5, а**); 3 – то же, но для трёхфазной схемы замещения; 4 – представление дуги уравнением Касси для одной фазы (см. **рис. 3, а**); 5 – то же для трёхфазной схемы замещения.



**Рис. 5. Схема замещения дуги по способу С.И. Тельного (а) и осциллограммы для случаев непрерывного (б) и прерывистого (в) токов**

Расчёты показывают, что при одном и том же токе значения мощности отличаются на 15-20% для двух случаев представления дуг, наиболее распространенных на практике: 1 – упрощенное представление переменным активным сопротивлением; 5 – трёхфазная модель дуги на основе уравнения Касси.

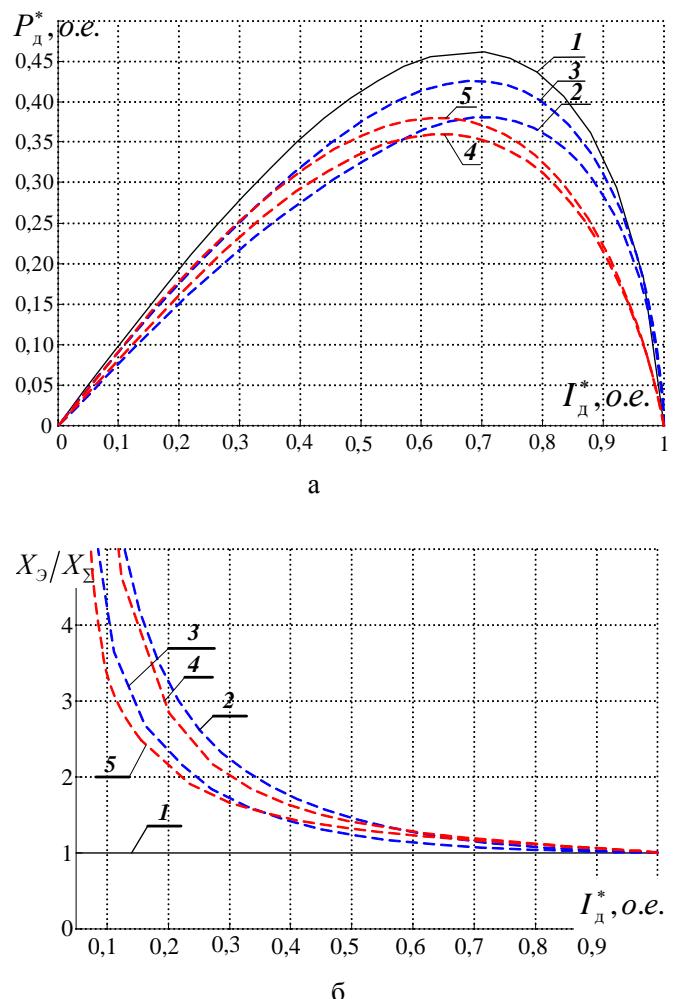
Эксплуатационное реактивное сопротивление  $X_\vartheta$  на **рис. 6, а** выражено в относительных единицах относительно  $X_\Sigma$  – суммарного сопротивления в режиме КЗ и рассчитывается по полной реактивной мощности, которая складывается из реактивной мощности

на первой гармонике  $Q_{(1)}$  и мощности искажения Т.

$$X_\vartheta = \frac{\sqrt{Q_{(1)}^2 + T^2}}{I^2} = \frac{\sqrt{S^2 - P^2}}{I^2}. \quad (5)$$

Характер изменения эксплуатационного реактивного сопротивления отражаемый кривыми 2–4 хорошо согласуется с представлением дуги как нелинейного элемента [5]. При коротком замыкании цепь работает в синусоидальном режиме, поэтому  $X_\vartheta = X_\Sigma$ .

Зависимости  $X_\vartheta/X_\Sigma = f(I_d^*)$  нередко используются в практических расчётах при упрощённом представлении дуги переменным активным сопротивлением. В случае применения нелинейного дифференциального уравнения Касси коррекция  $X_\vartheta$  в зависимости от тока оказывается необязательной, поскольку эффект изменения этого сопротивления от тока (длины дуги) учитывается автоматически. При этом необходимо изменять тепловую постоянную времени  $\theta_d$  на различных стадиях плавки [5].



**Рис. 6. Зависимости относительной мощности дуги (а) и эксплуатационного реактивного сопротивления (б) от тока**

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что от выбора модели зависят точность расчёта, так же как и сложность её реализации, и этот выбор определяется поставленной целью и задачами исследования. Так, например, для предварительной оценки теплового баланса ДСП возможно использование упрощённой модели без учёта несинусоидальности тока. Для анализа электрических факторов, влияющих на производительность ДСП и устойчивость её работы на различных стадиях плавки с учётом питающей сети, системы регулирования перемещения электродов и пр., необходимо более детальное описание электрических дуг. С учётом этого в дальнейших исследованиях используется уравнение Касси в трёхфазном исполнении.

Математическая модель, реализованная на основе уравнения Касси, позволяет судить о том, насколько рационально выбран электрический режим на различных стадиях плавки. Для этого на семейство рабочих точек, зафиксированных экспериментально и представляющих собой некую область рассеивания, накладывается расчётная зависимость  $P_D(I_D)$ . Постоянная времени подбирается методом итераций из условия, чтобы дисперсия отклонений экспериментальных значений мощности от расчётной мощности  $P_D$  была минимальной. Как правило, для этого бывает достаточно двух - трёх итераций.

Ниже, в качестве примера, приведена расчётная электрическая характеристика сверхмощной ДСП-250 для последней стадии плавки (рис. 7, а) с нанесёнными рабочими точками, полученными в ходе эксперимента.

Здесь надо отметить, что система управления электрическим режимом формирует в течение плавки несколько стадий и каждая из них имеет свой профиль – это набор основных задаваемых электрических параметров: коэффициента трансформации печного трансформатора ( $N_{TP}$ ), ступени реактора ( $N_P$ ) и номера рабочей кривой ( $N_{PK}$ ).

Перечисленные параметры, в конечном счете, определяют  $Z_{\phi i \text{ зад}}$  – задания по фазам полных сопротивлений (по существу токов дуг) вторичного контура ДСП.

Наложение фактических рабочих точек на расчёт-

ную электрическую характеристику, полученную на модели, показывает, что на заключительной стадии ДСП-250 работает с короткими дугами в области максимальных значений КИН – коэффициента интенсивности нагрева [6]. Такой режим работы с короткими дугами, погруженными в расплав, обеспечивал наибольшее усвоение тепла, был технически оправданым и широко применялся до освоения технологии наведения вспененного шлака. В современных условиях вспененный шлак закрывает длинные дуги, позволяет работать с повышенным напряжением на электродах и соответственно с меньшими токами. Сравнение электрических режимов двух сверхмощных ДСП с нанесёнными рабочими точками для одной и той же стадии плавки свидетельствует о том, что режим работы ДСП-180 (см. рис. 7, б) является более предпочтительным с точки зрения затрат электроэнергии – рабочие точки здесь находятся слева от максимума мощности и имеют место режим работы на длинных дугах под слоем шлака с меньшими значениями тока [7].

Работа на длинных дугах сопровождается также снижением реактивной мощности, потребляемой из сети, а значит, уменьшением суммарных активных потерь и общего электропотребления.

Математическое моделирование имеет большие перспективы при исследовании электромагнитной совместимости, особенно сверхмощных ДСП и обоснованном выборе элементов компенсатора реактивной мощности.

Тема эта, безусловно, актуальная, заслуживает отдельного рассмотрения, поскольку рекомендации по этому вопросу в специальной литературе весьма расплывчаты. Так, в известной монографии [8] находим: «мощность СТК выбирается как наибольшее значение из двух: мощности, необходимой для компенсации фликера, и мощности, обеспечивающей требуемое значение коэффициента мощности» [с. 204] и далее... с учётом «несимметрии, обусловленной работой ДСП, мощность ТРГ должна быть увеличена дополнительно на 15-20%» [с. 206].

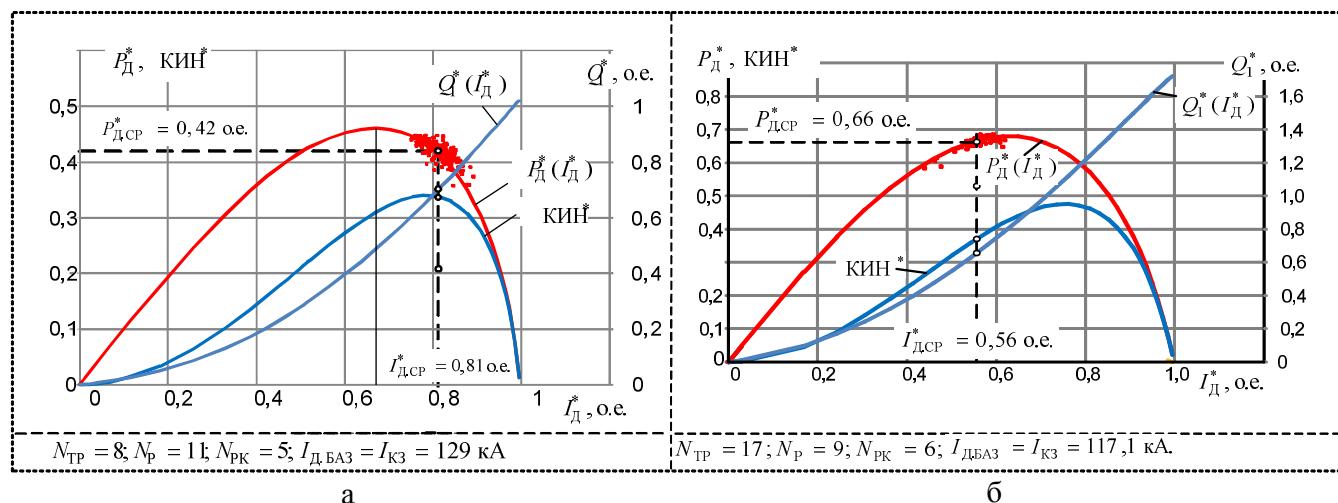


Рис. 7. Сравнение электрических характеристик двух сверхмощных печей: а – ДСП-250; б – ДСП-180

По результатам исследований действующих комплексов ДСП-СТК различной мощности разработана уточнённая методика расчёта установленной мощности СТК с учётом несимметричных режимов [9].

С помощью математической модели доказано, что мощность СТК, необходимая для устранения несимметрии питающего напряжения во всех режимах ДСП, является достаточной для выполнения вышеперечисленных условий – обеспечения допустимой дозы фликера и нормированного коэффициента мощности.

Предложенная методика может быть использована для действующей и проектируемой ДСП. В первом случае по мгновенным значениям первичных токов дуг, полученных экспериментально, рассчитываются токи прямой ( $I_{ДСП(1)}$ ) и обратной последовательности ( $I_{ДСП(2)}$ ) и строится область их распределения в эти же оси (рис. 8). Рабочие точки находятся внутри квазитреугольника ABC, вершины которого соответствуют предельным режимам работы ДСП. Это обрыв дуг в трёх фазах – точка A, двухфазное и трёхфазное КЗ – точки B и C. На сторонах этого треугольника отмечены диапазоны изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности  $K_{2I}$ . Затем на этом же графике проводятся расчётные кривые устойчивой работы СТК (MN, M'N') с сохранением функции симметрирования и компенсации заданного уровня реактивной мощности  $Q_{\Sigma \text{зад}}$ . Эти кривые строятся по результатам моделирования. Если распределение рабочих точек ДСП не выходит за границу устойчивой СТК, то значения установленной мощности ТРГ и фильтров можно считать приемлемыми.

Для проектируемой ДСП случайные изменения токов задают формирующие фильтры, передаточные

функции которых синтезированы на основе статистической обработки экспериментальных данных для различных стадий плавки (звено 10 на рис. 1). Выходной сигнал формирующего фильтра имеет спектральную плотность, аналогичную реальному объекту.

Так, для ДСП-180, действующей в ОАО «ММК», результаты моделирования и эксперименты подтвердили, что установленная мощность СТК (180 Мвар) примерно на 30% завышена по отношению к расчётовой. Из двух возможных вариантов – генерирование реактивной мощности в питающую сеть или отключение части фильтров выбрали второе. В результате фильтр четвертой гармоники мощностью 68 Мвар был выведен из работы, что практически не отразилось на показателях электромагнитной совместимости в точке общего подключения на шинах 220 кВ.

## Выводы

1. Разработанная имитационная модель является перспективным и эффективным инструментом для оптимизации электрических режимов ДСП и исследования её электромагнитной совместимости, как мощного электротехнического комплекса, с питающей сетью.

2. Представление дуги нелинейным дифференциальным уравнением Касси с тепловой постоянной времени, изменяющейся по ходу плавки, наиболее адекватно отражает электрические характеристики ДСП и позволяет критически оценивать работу системы управления электрическим режимом на различных стадиях плавки.

3. С помощью модели комплекса «ДСП-СТК» успешно осуществляется проверка и выбор мощности элементов компенсирующего устройства.

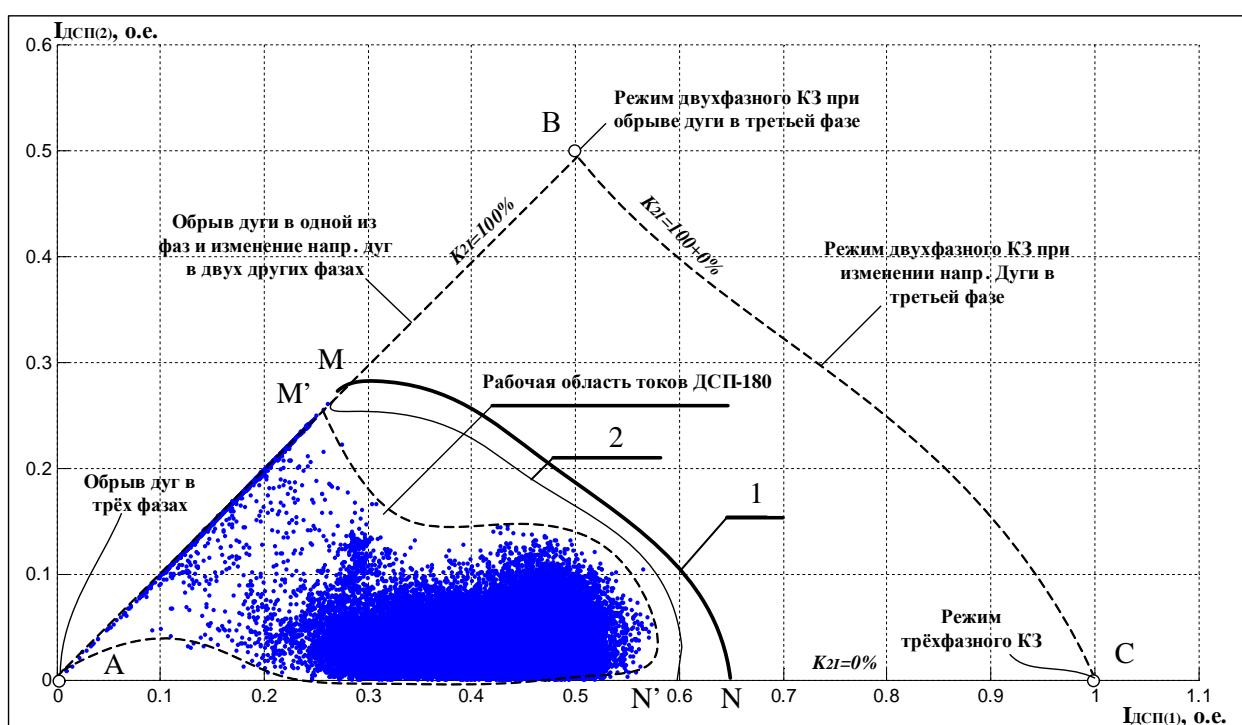


Рис. 8. Проверка устойчивой работы СТК при различных заданиях на реактивную мощность:  
1 –  $Q_{\Sigma \text{зад}}=0$  Мвар; 2 –  $Q_{\Sigma \text{зад}}=-30$  Мвар

## Список литературы

1. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / Свенчанский А.Д., Жердев И.Т., Кручинин А.М., Миронов Ю.М. и др.; под ред. Свенчанского А.Д.. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
2. Миронов Ю.М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных электропечей // Электричество. 2006. №6. С. 56-62.
3. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учеб. пособие / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Мурзиков А.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 235 с.
4. Тельный С.И. К теории трёхфазной дуговой печи с непроводящей подиной // Электричество. 1954. №12. С. 38-42.
5. Эксплуатационное реактивное сопротивление дуговой сталеплавильной печи / Пирогов Н.А., Хайнсон А.В., Робинович В.Л., Дрогин В.И. // Актуальные проблемы создания дуговых и рудно-термических печей. М.: Энергоиздат, 1984.
6. Кручинин А.М. К вопросу проектирования электрического режима дуговой сталеплавильной печи на основе теплообменной модели дуги // Электрометаллургия. 2010. №7. С. 2-8.
7. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография: Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 347 с.
8. Кошкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 248 с.
9. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной

печи: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03. Магнитогорск, 2009.

## References

1. Electric industrial furnaces. Arc furnaces and special heating / Svenchansky A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M., Mironov Y.M. and others, ed. Svenchanskogo AD. 2nd ed., Rev. and add. // Energoizdat, 1981. 296 p.
2. Mironov Y.M. Patterns of electric arc steel furnaces modes // Electricity, 2006, № 6, pp. 56-62
3. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R., Murzikov A.A. Modeling complex electrical steel plants: studies. allowance. Magnitogorsk: Publ. Magnitogorsk State Technical University after G.I.Nosov, 2012. 235 p.
4. Tel'nyj S.I. The theory of the three-phase arc furnace with a non-conductive hearth // Electricity. 1954. №12, pp. 38-42.
5. Operational reactance EAF / Pirogov N.A., Hainson A.V., Robinovich V.L., Drogin V.I. In Sat: Topical problems of creating arcs and ore-heat treatment furnaces. Energoizdat, 1984.
6. Kruchinin A.M. On the design of the electric arc furnace mode based heat transfer model of the arc // Electrometallurgy. 2010. №7. pp. 2-8.
7. Tuluevsky J.N., Zinur I.Y. Innovations for electric arc furnaces. Scientific bases of choice: monograph: Novosibirsk. Publishing house of the NSTU. 2010. 347 p.
8. Kochkin V.I., Nechaev O.P. The use of static reactive power compensators in electric power systems and enterprise networks. Moscow. Publ. NC ENAS. 2002. 248 p.
9. Nikolaev A.A. Improving the efficiency of static thyristor compensators superpowerful electric arc furnace: Diss.... Candidate. tech. sciences on spec. 05.09.03. Magnitogorsk, 2009.

УДК 621.313.292.001.2

Вигриянов П.Г.

## ОЦЕНКА ПУЛЬСАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА УПРАВЛЯЕМЫХ ДЕВЯТИФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ОТКАЗАХ ТИПА «КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ»

**Аннотация.** В статье изложены результаты расчета пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента управляемого девятифазного вентильного двигателя с разомкнутой обмоткой якоря, питающейся от двух источников, для заданного диапазона частот вращения при изменении угла управления коммутацией в пределах одного межкоммутационного интервала для отказов «короткое замыкание силового ключа полупроводникового коммутатора» и «короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя».

**Ключевые слова:** девятифазный вентильный двигатель, электромагнитный момент; пульсации момента; отказ элемент; короткое замыкание ключа полупроводникового коммутатора; короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя.

Vigriyanov P.G.

### ELECTROMAGNETIC TORQUE PULSATIONS ARE DRIVEN BY MOTORS NINE-PHASE FAILURE OF THE «SHORTCUT CIRCUIT»

**Abstract.** The article presents the results of calculation of the current ripple component of the electromagnetic torque controlled nine-phase valve engine with an open wound armature is powered by two sources for a given speed range when the angle switching control in a single intercommutating interval for failure, «a short circuit of the power semiconductor switch key» and «short-circuit phase electromechanical transducer».

**Keywords:** nine-phase valve engine, the electromagnetic torque, pulse time, the refusal element; short key semiconductor switch, a short circuit phase electromechanical transducer.

Применение управляемых вентильных двигателей (ВД) в системах автоматического управления и регулирования или в непосредственном приводе высококачественных магнитофонов и дисководов требует тщательного исследования величины пульсаций электромагнитного момента в зависимости от числа фаз и способов их коммутации, величины индуктивности обмотки, формы фазных ЭДС, угла управления коммутацией [1-3]. В научной и технической литературе чаще всего рассматриваются конкретные варианты исполнения ВД и проводится исследование влияния одного из этих факторов на характеристики исправной машины.

В настоящее время к управляемым ВД предъявляются повышенные требования по надежности и величине пульсаций электромагнитного момента. Они могут быть удовлетворены путем увеличения числа фаз электромеханического преобразователя (ЭМП). При этом критериями оптимальности выступают составляющие надежности в различных их сочетаниях и соответствующие этим составляющим показатели надежности (чаще всего это вероятность безотказной работы (например,  $p=0,9990-0,9999$ ), наработка до отказа (например, 12.000–20.000 ч), средний срок сохраняемости (например 12-18 лет). Выполнить

такие требования по надежности двигателей при современном уровне развития электромашиностроения для исправного состояния машины невозможно [4, 5], однако они могут быть обеспечены, если допустить в многофазных ВД отказ одного или нескольких элементов. Однако для определения работоспособного состояния двигателя при отказах необходимо иметь количественную оценку энергетических параметров и выходных координат двигателя [6]. Величина пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента часто является критерием оценки работоспособности многофазных ВД и определяет выбор схемы соединения, способа питания, числа фаз обмотки якоря электромеханического преобразователя и алгоритмов коммутации.

В работе [7] показано, что подавляющее большинство отказов элементов схемы ВД могут быть сведены к четырем основным видам отказов силовой части машины: обрыв и короткое замыкание силового ключа полупроводникового коммутатора (ОК и КК), обрыв и короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя (ОФ и КФ). По характеру проявления отказов их можно разделить на два вида: отказы типа «обрыв» (это ОК и ОФ) и отказы типа «короткое замыкание» (КК и КФ). По статистическим данным [4] для машин систем автоматики в 30% случаев отказов наблюдается короткое замыкание обмотки, если в процессе эксплуатации нагрузки не превышали допустимых уровней.

**Постановка задачи.** Требуется оценить величину пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента управляемых девятифазных ВД с разомкнутой схемой обмотки якоря, питающейся от двух источников, при полной коммутации для исправной машины при отказах элементов силовой части типа «короткое замыкание».

Рассмотрим влияние отказов на пульсации момента при питании обмотки якоря от двух источников, соединенных разноименными шинами, подключенными к средней точке разомкнутой обмотки (рис. 1). Полупроводниковый коммутатор (ПК) такого двигателя состоит из девяти стоек, каждая из которых имеет два силовых ключа ( $VT_1$  и  $VT_2$ ), соединенных последовательно. Концы фаз обмотки якоря соединены в общую точку, к которой подключены объединенные шины источников питания. Начала фаз соединяются со средней точкой своей стойки. При работе двигателя силовые ключи каждой стойки полупроводникового коммутатора  $VT_1$ ,  $VT_2$  работают поочередно. При открывании верхнего ключа  $VT_1$  начало фазы подключается к положительнойшине источника питания  $U_1$ , конец фазы постоянно соединен к средней точке обмотки и в данном состоянии к отрицательнойшине источника  $U_1$ . Для реверсирования тока необходимо открыть нижний ключ  $VT_2$ , который подключает начало фазы к отрицательнойшине второго источника  $U_2$ . На конец фазы подается положительное напряжение того же источника.

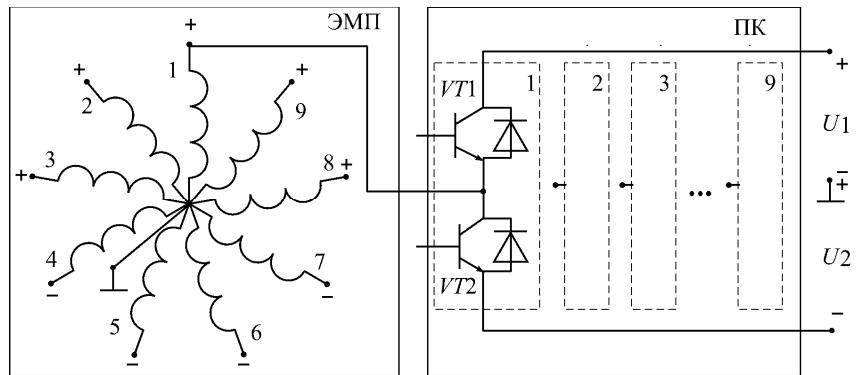


Рис. 1. Схема включения разомкнутой обмотки якоря, питающейся от двух источников, соединенных разноименными шинами

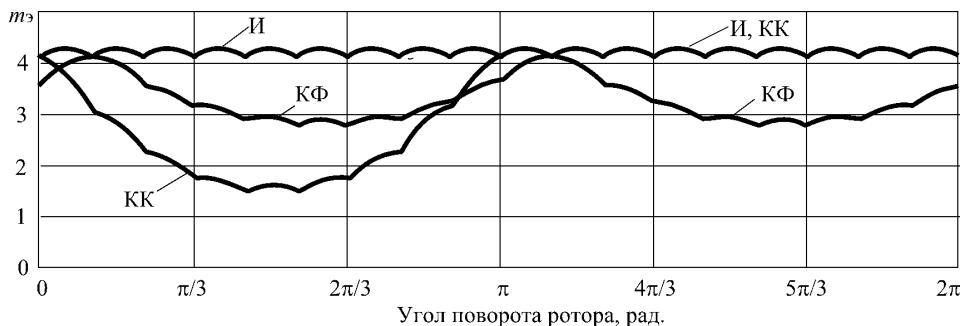
Отказ «короткое замыкание ключа ПК» возникает в том случае, если в процессе работы происходит пробой любого из пары силовых ключей стойки ПК. При этом фаза постоянно подключена к одной из шин источника питания. На одной половине тактов коммутации, когда должен был быть открытим отказавший ключ, двигатель работает так же, как и в исправном состоянии. На остальных тактах коммутации, где отказавшая фаза должна была отключаться от источника или должна бы подключаться исправным ключом кшине другой полярности, она остается подключенной кшине той же полярности, что и на предыдущих тактах. Таким образом, при коротком замыкании любого из силовых ключей одной стойки ПК напряжение на отказавшей фазе в течение всех тактов периода повторяемости остается неизменным.

При отказе «короткое замыкание фазы ЭМП» открытое состояние любого ключа стойки ПК приводит к короткому замыканию одного из источников питания. Поэтому при разработке схемы управления ключами ПК вместе с защитой от сквозных токов должна быть предусмотрена защита ключей при этом отказе. Тогда фаза отключается от источников питания, а протекающий по ней переменный ток определяется величиной и формой фазной ЭДС. Остальные фазы обмотки работают точно так же, как и в исправной машине.

Для выяснения влияния отказов «короткое замыкание ключа ПК» и «короткое замыкание фазы ЭМП» на величину пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента нашего двигателя воспользуемся программным обеспечением, разработанным на основе общей методики исследования электромагнитных процессов многофазных ВД двигателей по мгновенным значениям координат в нормальных и аварийных режимах работы [8].

Расчет пульсаций момента проводится в такой последовательности. Сначала рассчитываем мгновенные значения фазных координат и электромагнитного момента двигателя в исправном состоянии при заданной относительной частоте вращения и угле управления коммутацией, затем вводим метку отказа и определяем период повторяемости электромагнитных процессов (его первый и последний такты). После этого проводим расчет мгновенных значений фазных токов и ЭДС, а затем мгновенных значений электромагнитного момента на периоде повторяемости электромаг-

нитных процессов, последовательно переходя от начального такта коммутации до конечного такта. В результате получаем зависимости мгновенного значения токовой составляющей электромагнитного момента от угла поворота ротора для каждого вида отказа. Пример таких зависимостей для одной из частот вращения при заданной величине угла управления коммутацией  $\theta_y$  приведен на **рис. 2**. После этого определяем минимальное ( $m_{\min}$ ), максимальное ( $m_{\max}$ ) значения момента и проводим численное интегрирование для определения среднего значения момента на периоде повторяемости ( $m_{cp}$ ).



**Рис. 2.** Пульсации токовой составляющей электромагнитного момента ВД в исправном состоянии (И) и отказах элементов силовой части «короткое замыкание ключа ПК» (КК), «короткое замыкание фазы ЭМП» (КФ) (при  $\xi=0,25$ ;  $V=0,4$ ;  $\theta_y=0$ )

Величину пульсаций электромагнитного момента будем оценивать по отношению разности максимального и минимального моментов к среднему моменту, выраженному в процентах

$$\Delta m = (m_{\max} - m_{\min}) / m_{cp} \cdot 100\%.$$

Рассмотрим пульсации момента девятифазных управляемых ВД в исправном состоянии и в случаях отказов элементов силовой части типа «обрыв» при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного МКИ при одинаковой величине индуктивности фаз обмотки якоря. Индуктивность обмотки удобно учитывать при помощи коэффициента  $\xi$ , который по своей сути является относительным индуктивным сопротивлением фазы обмотки якоря при базовой частоте вращения. Относительная угловая частота вращения определяется по выражению

$$V = \frac{E_m}{U_n},$$

где  $E_m$  – амплитуда ЭДС основной гармоники фазы;  $U_n$  – номинальное напряжение питания двигателя.

На **рис. 3** приведены зависимости относительных пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента  $\Delta m$ , %, в случаях отказов «короткое замыкание ключа ПК» и «короткое замыкание фазы ЭМП» при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного МКИ

$$\Delta m = f(V, \theta_y) \text{ при } \xi = \text{const.}$$

Длительность одного МКИ в девятифазных двигателях при симметричной коммутации составляет  $\Delta = \pi/9$  (или  $20^\circ$ ). При этом угол управления коммута-

цией будем изменять в пределах  $\theta_y = \pm\pi/18$  ( $\pm 10^\circ$ ) относительно нейтральной коммутации ( $\theta_y=0$ ). Задаем диапазон частот вращения  $V=0,05$ – $0,85$  и величину относительной индуктивности обмотки якоря  $\xi = 0,25$ .

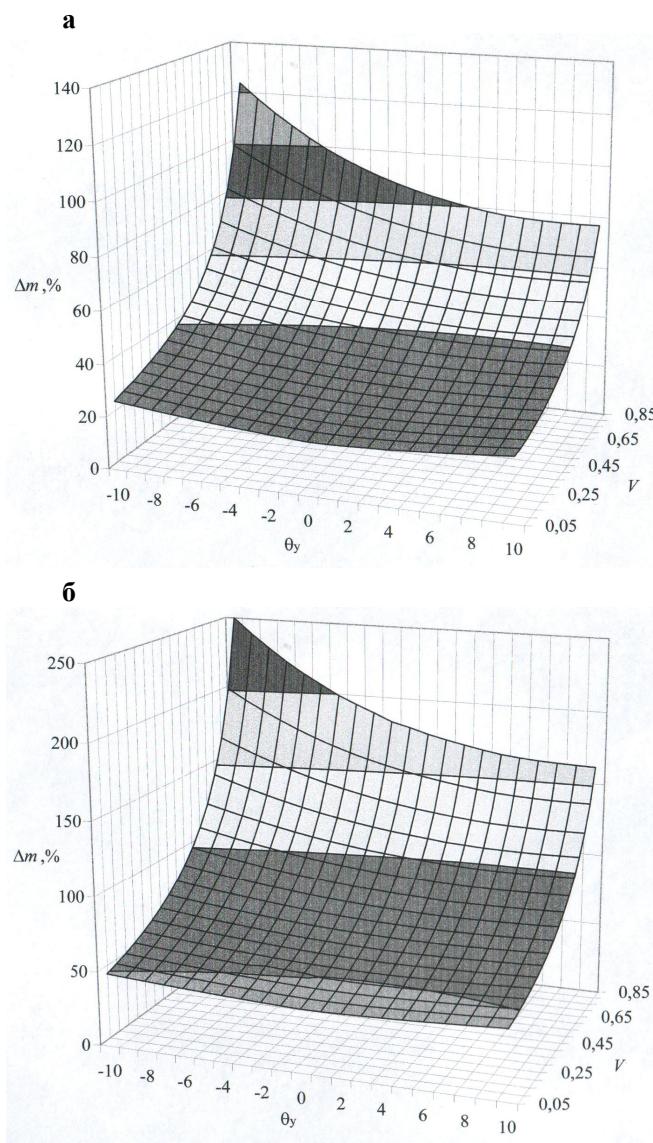
Сначала проведем оценку относительной величины пульсаций момента при нейтральной коммутации. В случае отказа «короткое замыкание ключа ПК» (**рис. 3, а**) величина пульсаций момента по мере роста частоты вращения монотонно увеличивается с 42,4% (при  $V=0,05$ ) до 179,8% (при  $V=0,85$ ). Регулирование угла управления в любую сторону от нейтральной коммутации при любой частоте вращения ведет к росту уровня пульсаций. При этом величина пульсаций при изменении угла управления в сторону отстающей коммутации во всем диапазоне частот вращения больше, чем при опережающей коммутации. Если при меньшей частоте вращения это различие не велико – 49,8 и 47,3%, то по мере её роста увеличивается в полтора раза и для большей частоты вращения составляет 250 и 161,6%.

Полученные зависимости позволяют определить области, в которых величина пульсаций не превышает некоторого заданного уровня. Например, пульсации не превышают 100% при любом угле управления для опережающей коммутации до частоты вращения  $V=0,65$  и до  $V=0,55$  для отстающей коммутации. Таким образом, можно определить диапазоны изменения частоты вращения и угла управления коммутацией при заданной предельной величине пульсаций электромагнитного момента.

В случаях отказов «короткое замыкание ключа ПК» при изменении угла управления коммутацией в пределах одного МКИ для выбранного диапазона частот вращения получаем в уровень пульсаций электромагнитного момента управляемого девятифазного ВД в пределах 42,4–250%.

В случаях отказов «короткое замыкание фазы ЭМП» (**рис. 3, б**) наблюдаются аналогичные закономерности, но имеются количественные различия. Так, при нейтральной коммутации уровень пульсаций момента увеличивается с 20,3% (при  $V=0,05$ ) до 85,0% (при  $V=0,85$ ). Характер изменения величины пульсаций момента сохраняется как при нейтральной коммутации, так и при регулировании угла управления коммутацией в сторону опережения и отставания, только величины пульсаций момента при коротком замыкании фазы будут меньше, чем при коротком замыкании ключа. В случае нейтральной коммутации величины пульсаций уменьшаются на 22,1 и 94,8% при частотах вращения соответственно 0,05 и 0,85. Для предельных величин угла отстающей и опережающей коммутации получим соответственно 22,5; 126,3 и 22,8; 85%. Таким образом, величина пульсаций электромагнитного момента при коротком замы-

кании фазы примерно в два раза меньше, чем при коротком замыкании силового ключа ПК.



**Рис. 3. Пульсации электромагнитного момента девятифазного ВД при отказах «обрыв ключа ПК» (а) и «обрыв фазы ЭМП» (б) при  $\xi=0,25$ ;  $V=0,05-0,85$ ;  $\theta_y=\pm 10^\circ$**

В случаях отказов «короткое замыкание фазы ЭМП» при изменении угла управления коммутацией в пределах одного МКИ для выбранного диапазона частот вращения получим уровень пульсаций электромагнитного момента управляемого девятифазного ВД в пределах 20,3-123,7%.

Для сравнения величины пульсаций при отказах элементов с величиной пульсаций исправной машины следует добавить, что при нейтральной коммутации величина пульсаций увеличивается с 1,6% ( $V=0,05$ ) до 2,0% ( $V=0,85$ ). А для предельных углов управления с ростом частоты вращения величина пульсаций сначала уменьшается с 6,2% ( $V=0,05$ ) до 4,2% ( $V=0,55$ ), а затем увеличивается до 5,4% ( $V=0,85$ ) для отстающей коммутации. Для опережающей коммутации пульсации момента так же сначала уменьшаются с 4,9% ( $V=0,05$ ) до 3,0% ( $V=0,55$ ), а затем увеличиваются до 3,6% ( $V=0,85$ ).

Сравнение величины пульсаций момента исправного ВД с пульсациями в аварийных режимах работы дает следующий результат. В случае отказа «короткое замыкание ключа ПК» величина пульсаций момента при отстающей, нейтральной и опережающей коммутации по сравнению с исправным двигателем при одинаковых условиях увеличивается соответственно в 10-46; 14-93 и 14-46 раз. В случае отказа «короткое замыкание фазы ЭМП» при отстающей, нейтральной и опережающей коммутации пульсации увеличиваются намного меньше: в 5-23, 7-44 и 7-22 раза.

Поскольку величина пульсаций момента часто является критерием оценки работоспособного состояния управляемого ВД, то полученные результаты могут быть использованы в качестве такового при разработке вентильных электроприводов повышенной надежности.

#### Выводы:

1. Получены зависимости величины пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента девятифазных управляемых ВД малой мощности с гальванически развязанными фазами обмотки якоря для выбранного диапазона частот вращения при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного МКИ.

2. Проведена оценка влияния отказов типа «короткое замыкание» на величину пульсаций электромагнитного момента при постоянной индуктивности обмотки якоря. Установлена степень влияния этих отказов на величину пульсаций управляемых девятифазных ВД.

3. Предложено использовать величину пульсаций электромагнитного момента в качестве критерия оценки работоспособного состояния ВД в аварийных режимах работы.

#### Список литературы

- Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока. М.: Энергия, 1975. 128 с.
- Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979. 270 с.
- Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н.П. Адволовский, В.Т. Гращенко, Н.И. Лебедев, И.Е. Овчинников, А.К. Стыцына. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
- Белецкий В.В. Теория и практические методы резервирования радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1977. 104 с.
- Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
- Сандалов В.М. Резервированные электроприводы на базе вентильных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. 18 с.
- Вигриянов П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 143 с.
- Вигриянов П.Г. Исследование электромагнитных процессов вентильных двигателей: монография. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 161 с.

#### References

- Balagurov V.A., Gridin V.M., Lozenko V.K. Contactless DC motors. Moscow: Energiya, 1975. 128 p.
- Ovchinnikov I.E., Lebedev N.I., Contactless DC motors. Leningrad: Nauka, 1979. 270 p.
- Managed contactless DC motors. Advolotkin N.P., Graschenkov V.T. Lebedev N.I., Ovchinnikov I.E., Stysyna A.K. L.: Energoatomizdat, 1984. 160 p.
- Beletsky V.V. The theory and practical methods of backup electronic equipment. Moscow: Energiya, 1977. 104 p.
- Khazov B.F., Didusev B.A. Guide to the calculation of the reliability of machines at the design stage. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 224 p.
- Sandalov V.M. Redundant electric motors based on the gate: summary of the thesis. ... Candidate. Technical Sciences. Chelyabinsk: Publishing

- House of the South Ural State University, 2000. 18 p.
7. Vigriyanov P.G. The electromagnetic processes of multiphase valve engines: a monograph. Chelyabinsk: Publishing House of the South Ural State University, 2007. 143 p.
8. Vigriyanov P.G. The study of electromagnetic processes valve engines: a monograph. Chelyabinsk: Publishing Center SUR-MG, 2010. 161 p.
- 

УДК 66.046.1

Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В., Сысуев Н.Е.

## ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ ПЕРФОРИРОВАННЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК

**Аннотация.** В данной работе производится обоснование эффективности регенерации теплоты через перфорированные ограждения высокотемпературных установок в условиях обработки расплавленного материала. Целью исследования является определение возможности снижения тепловых потерь через ограждение реактора с одновременным снижением расхода первичного энергоресурса.

**Ключевые слова:** энергосбережение, регенерация теплоты, перфорированное ограждение, теплотехнология.

Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V., Sysuev N.E.

### EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF HEAT RECOVERY THROUGH THE PERFORATED FENCE HIGH-TEMPERATURE INSTALLATIONS

**Abstract.** In this paper is evaluation of the effectiveness of heat recovery through the perforated fence establish high-ments to the processing conditions of the molten material. The aim of the study is to identify opportunities to reduce heat loss through the fenced-denie reactor while reducing consumption of primary energy resources.

**Keywords:** energy, heat recovery, perforated fence thermal technology.

Задачи рационального использования минеральных и энергетических ресурсов в настоящее время наиболее значимы при производстве конечной продукции. Особенно это актуально для теплотехнологического комплекса черной металлургии, который является одним из крупнейших потребителей первичных природных ресурсов.

Значительная интенсивность процессов получения продукта приводит к необходимости применения принудительного охлаждения ограждений высокотемпературных технологических промышленных установок (ВТПУ), в которых реализуются главные теплотехнологические стадии обработки материалов. При этом увеличиваются тепловые потери через ограждения.

Применение водяного охлаждения (кессоны, панели) основных элементов конструкций в теплотехнических объектах черной металлургии увеличивает потери тепла через ограждения, но спасает их от физического износа. Например, в тепловом балансе доменной печи потери тепла с охлаждающей водой составляют 3-5%, в мартеновской печи 15-30%, в нагревательной печи прокатных станов 20-30%, в рудовосстановительных электропечах 8-12%, в сталеплавильных печах 17-20% [1], а в печах цветной металлургии применение гарнисажа привело к возрастанию этих потерь от 12-15 до 40-75% [2-5].

Учет тепловых потерь в окружающую среду во многом определяет видимый расход топлива на процесс. Особенно это актуально для процессов, в которых химическая энергия топлива не может быть полностью использована, например в восстановительных процессах жидкогофазного получения чугуна.

Высокие температуры расплавленных материалов (1200-1800°C) обусловливают значительные потери

теплоты через ограждения реакторов, которые находятся в непосредственном контакте с расплавами. Известные теплотехнические принципы регенерации тепловых потерь в окружающую среду, такие как «температурный барьер», фильтруемое и пористое ограждение, перфорированный слой технологического материала, могут быть применены только в низкотемпературном диапазоне процесса регенерации теплоты в высокотемпературных технологических промышленных установках, содержащих расплав.

В работах [6-8] на «теплой» модели ВТПУ, содержащей расплав, проведены экспериментальные исследования процесса снижения тепловых потерь через ограждения на всём температурном диапазоне. Эксперименты показали возможность осуществления такого процесса путем применения перфорированного ограждения в условиях прямого соприкосновения с расплавом технологического материала.

С теплотехнической точки зрения тепловые потери через ограждения могут быть регенерированы по разным направлениям, например для нагрева входящих потоков. Наиболее выгодным следует считать предварительный нагрев и термохимическую регенерацию входящего потока топлива, поскольку это позволит увеличить температуру его горения. Как известно, высокая температура способствует увеличению скорости химических реакций и, как следствие, приводит к увеличению удельной производительности установки.

Таким образом, обозначен способ регенерации тепловых потерь в окружающую среду применительно к реакторам, содержащим расплав. Обоснуем теоретически эффективность регенерации теплоты через перфорированные ограждения высокотемпературных установок.

Для этого необходимо на уровне теплового баланса реактора рассмотреть возможное влияние процесса регенерации на главную характеристику – видимый расход топлива. В качестве базы сравнения примем тепловой баланс реактора, в котором отсутствует регенеративное использование тепловых потерь через ограждение в окружающую среду. Считаем, что в реакторе обрабатывается некоторый исходный материал, при этом имеют место только тепловые потери с отходящими газами  $Q_{o.r}$ , через ограждение в окружающую среду  $Q_{o.c}^0$  и теплота технологического продукта  $Q_{t.p}$ . Запишем уравнение теплового баланса реактора:

$$Q_{x.t} = Q_{t.p} + Q_{o.r} + Q_{o.c}^0; \quad (1)$$

$$B^0 \cdot Q_h^p = Q_{t.p} + Q_{o.r} + Q_{o.c}^0, \quad (2)$$

где  $Q_{x.t}$  – химическая теплота холодного топлива;  $B^0$  – базовый расход топлива;  $Q_h^p$  – низшая теплота сгорания топлива.

Введем параметр  $\eta_{kit}$ , характеризующий долю теплоты топлива, которая в заданных условиях может быть передана на теплотехнологический процесс (коэффициент использования теплоты); соответственно  $(1 - \eta_{kit})$  характеризует долю теплоты топлива, которая в заданных условиях не может быть передана на теплотехнологический процесс и теряется с отходящими газами.

Тогда упростить тепловой баланс можно путем исключения тепловых потерь с отходящими газами и учетом их с помощью  $\eta_{kit}$  в приходной части:

$$B^0 \cdot Q_h^p \cdot \eta_{kit} = Q_{t.p} + Q_{o.c}^0. \quad (3)$$

Тогда базовый расход топлива определится так:

$$B^0 = \frac{Q_{t.p} + Q_{o.c}^0}{Q_h^p \cdot \eta_{kit}}. \quad (4)$$

Таким образом, снизить расход топлива можно путем регенерации тепловых потерь в окружающую среду через ограждение реактора.

Ниже исследуется возможное влияние регенерации теплоты, теряющейся через ограждение газообразным топливом, на расход последнего на основе анализа баланса процесса во всём возможном диапазоне решений.

При регенерации  $Q_{o.c}^0$  заранее не известно, какая часть энергии от нагретого топлива была воспринята именно от  $Q_{o.c}^0$ , а какая от реакционной зоны. Поэтому необходимо введение параметра доли от общего количества теплоты топлива, которая была воспринята при его нагревании теплотой, ранее теряющейся через

ограждение. Обозначим эту долю как  $d_{per}$ .

При нагревании топлива теплота может затрачиваться как на нагрев  $c_p \cdot \Delta t$ , так и на преобразование его химических связей  $\Delta Q$ . Общее количество теплоты, воспринятое топливом:

$$\Delta Q_t = d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t), \quad (5)$$

где  $d$  – доля топлива от общего его количества, которая направлена на регенерацию;  $B$  – общий расход топлива на процесс с регенерацией  $Q_{o.c}^0$ .

Тогда теплота, воспринятая единицей топлива от  $Q_{o.c}^0$ , определится так:

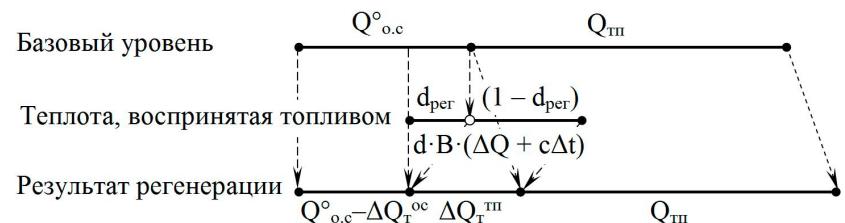
$$\Delta Q_t^0 = d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot d_{per}. \quad (6)$$

Соответственно теплота, воспринятая единицей топлива от реакционной зоны

$$\Delta Q_t^{rn} = d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot (1 - d_{per}). \quad (7)$$

Из **рис. 1** видно, что ограничением для процесса регенерации теплоты, теряющейся через ограждение, является условие, которое характеризует свойства конкретного топлива:

$$d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot d_{per} \leq Q_{o.c}^0. \quad (8)$$



**Рис. 1. Графическое пояснение к формулам (5)-(7)**

Если условие (8) не выполняется, то это означает, что топливо принципиально нагревается на величину, большую, чем  $Q_{o.c}^0$ . При этом  $Q_{o.c}^0$  регенерируется полностью при условии  $d_{per} < 1$ , а остальная часть топлива нагревается от реакционной зоны (**рис. 2**).

Запишем тепловой баланс реактора с условием регенерации теплоты, теряющейся в окружающую среду путем нагрева части входящего потока топлива:

$$(1-d) \cdot B \cdot Q_{h1}^p + d \cdot B \cdot (Q_{h2}^p + c \cdot \Delta t) = \\ = Q_{o.c}^0 - \Delta Q_{t}^{0.c} + Q_{tn} + \Delta Q_{t}^{rn} + Q_{or1} + Q_{or2}, \quad (9)$$

где первое слагаемое левой части есть энергия потока топлива, напрямую поступающего в реактор без нагрева, второе – энергия потока топлива, поступающего в реактор после регенерации теплоты в окружающую среду;  $Q_{or1}$  – теплота отходящих газов, образованная при сгорании первого потока топлива;

$Q_{or2}$  – теплота отходящих газов, образованная при сгорании второго потока топлива;  $Q_{h1}^p$  – низшая теплота сгорания первого потока топлива;  $Q_{h2}^p$  – низшая теплота сгорания потока топлива, направленного на регенерацию. Так как при нагреве топлива может меняться его химический состав, то и теплота сгорания тоже изменится на величину  $\Delta Q$ , тогда:  $Q_{h2}^p = Q_{h1}^p + \Delta Q$ .

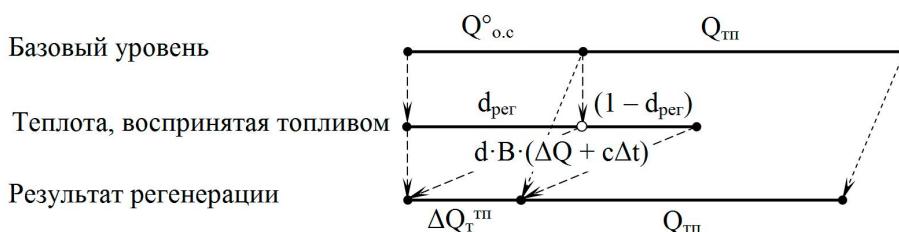


Рис. 2. Графическое пояснение к условию (8),  $d_{per} < 1$

Учесть  $Q_{or1}$  и  $Q_{or2}$  можно, так же как и в базовом варианте, путем применения параметра  $\eta_{KIT}$ . Однако первая часть топлива будет иметь свой  $\eta_{KIT1}$ , а нагретая вторая часть свой  $\eta_{KIT2}$  (рис. 3). Тогда тепловой баланс изменится так:

$$(1-d) \cdot B \cdot Q_{h1}^p \cdot d_{per}^p + d \cdot B \cdot (Q_{h1}^p + \Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot d_{per}^p = \\ = Q_{o.c}^0 - d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot d_{per} + \\ + Q_{tp} + d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot (1 - d_{per}). \quad (10)$$

На рис. 3 представлен график охлаждения продуктов сгорания единицы топлива. Видно, что при нагревании изменяется как температура горения, так и теплота его сгорания. Та часть теплоты, которая находится выше линии температурного уровня процесса, представляет собой теплоту, полезно используемую. Соответственно та часть теплоты, которая находится ниже линии температурного уровня процесса, представляет собой теплоту, которая теряется с отходящими газами.

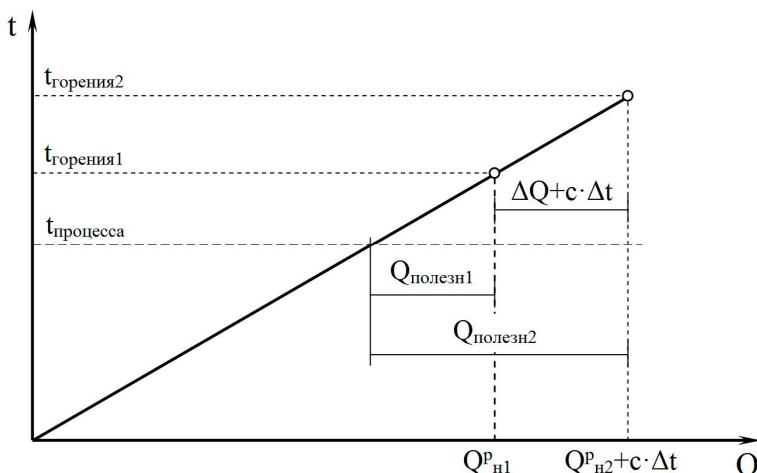


Рис. 3. Охлаждение продуктов сгорания единицы холодного и нагретого топлива

Анализируя рис. 3, можно записать выражение для коэффициента  $\eta_{KIT2}$  через известную долю  $\eta_{KIT1}$ . Получим следующее выражение:

$$\eta_{KIT1} = \frac{Q_{полезн1}}{Q_{h1}^p}; \quad Q_{полезн1} = Q_{h1}^p \cdot \eta_{KIT1};$$

$$\eta_{KIT2} = \frac{Q_{полезн2}}{Q_{h2}^p + c \cdot \Delta t};$$

$$Q_{полезн2} = Q_{полезн1} + \Delta Q + c \cdot \Delta t;$$

откуда

$$\eta_{KIT2} = \frac{Q_{h1}^p \cdot \eta_{KIT1} + \Delta Q + c \cdot \Delta t}{Q_{h1}^p + \Delta Q + c \cdot \Delta t}. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (10) и упрощая последнее, в результате получим расход топлива с учетом регенерации теплоты в окружающую среду:

$$B = \frac{Q_{o.c}^0 + Q_{tp}}{Q_{h1}^p \cdot \eta_{KIT1} + 2 \cdot d \cdot d_{per} \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t)}. \quad (12)$$

Отношение разницы базового расхода топлива и расхода с регенерацией к базовому показывает, какую долю топлива принципиально можно сэкономить:

$$b = \frac{B^0 - B}{B^0} = \\ = 1 - \frac{Q_{h1}^p \cdot \eta_{KIT1}}{Q_{h1}^p \cdot \eta_{KIT1} + 2 \cdot d \cdot d_{per} \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t)}, \\ b = 1 - \frac{1}{1 + 2 \cdot d \cdot d_{per} \cdot \frac{\Delta Q + c \cdot \Delta t}{Q_{h1}^p \cdot \eta_{KIT1}}}. \quad (13)$$

Введем следующее обозначение:

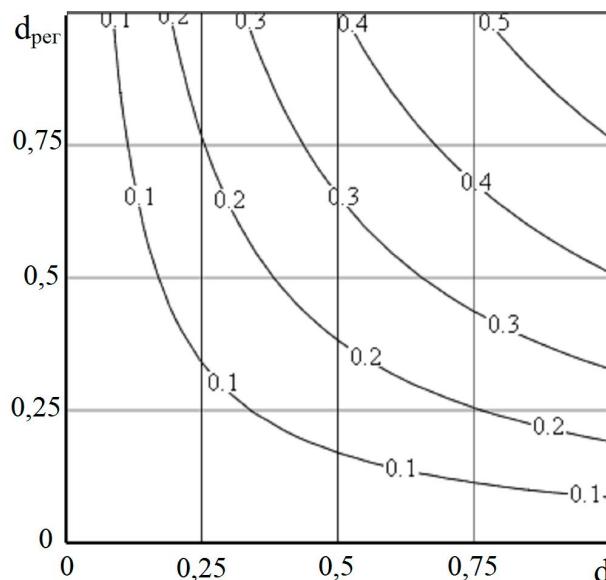
$$a = \frac{\Delta Q + c \cdot \Delta t}{Q_{h1}^p \cdot \eta_{KIT1}}, \text{ тогда относительный расход топлива запишется так:}$$

$$b = 1 - \frac{1}{1 + 2 \cdot d \cdot d_{per} \cdot a}. \quad (14)$$

Параметр « $a$ » характеризует физические свойства исходного топлива. Например, для метана  $Q_{h1}^p = 35800 \text{ кДж/м}^3$ , при его нагревании до температуры  $1600^\circ\text{C}$  потребуется теплоты около  $8900 \text{ кДж/м}^3 = \Delta Q + c \cdot \Delta t$ . Эта теплота пойдет на нагрев и разложение метана до сажеводородной смеси [9]. При условии, что температурный уровень процесса  $1600^\circ\text{C}$  должна полезного использования теплоты топлива

$\eta_{KIT1}$  составит 0,38 при коэффициенте избытка кислорода 0,55 (холодные метан и кис-

лород), что характерно для восстановительных условий организации процесса. Исходя из этого параметр « $a$ » для метана составит 0,65. При фиксированном параметре « $a$ » можно получить поле решений (рис. 4), так как относительный расход топлива есть функция от двух переменных  $d$  и  $d_{per}$ .



**Рис. 4. Поле возможных решений относительного снижения расхода топлива при регенерации теплоты  $Q_{o.c}$  при  $a = 0,65$**

Анализ выражения (14) показывает, что при  $a=0,65$ :

$$b = \begin{cases} 0, & \text{при } d = 0, \quad d_{per} = 1; \\ 0, & \text{при } d = 1, \quad d_{per} = 0; \\ 0,57, & \text{при } d = 1, \quad d_{per} = 1. \end{cases} \quad (15)$$

Полученное решение говорит о том, что в данном случае принципиально возможно максимально снизить суммарный расход топлива на 57% по сравнению с базовым вариантом. Таким образом, произве-

денные вычисления показывают целесообразность применения перфорированных ограждений или частичное их использование для целей снижения тепловых потерь через ограждения высокотемпературных технологических промышленных установок.

#### Список литературы

- Глинков М.А., Глинков Г.М. Общая теория тепловой работы печей: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 232 с.
- Андоньев С.М. Испарительное охлаждение metallurgических печей. М.: Металлургия, 1970. 424 с.
- Неуструев А.А., Ходоровский Г.Л. Вакуумные гарнисажные печи. М.: Металлургия, 1967. 272 с.
- Рафалович И.М. Теплопередача в расплавах, растворах и футеровке печей и аппаратов. М.: Энергия, 1977. 304 с.
- Руссо В.Л. Термофизика metallurgических гарнисажных аппаратов. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
- Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В. Вопросы энергоресурсосбережения при извлечении железа из руд: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 153 с.
- Нешпоренко Е.Г. Регенерация тепловых потерь через перфорированное ограждение высокотемпературных технологических установок // Вестник МЭИ. 2008. №1. С. 74-78.
- Нешпоренко Е.Г. Экспериментальное исследование гарнисажного режима регенерации теплоты через перфорированное ограждение // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. №4. С. 74-78.
- Картавцев С.В. Природный газ в восстановительной плавке. СВС и ЭХА: монография. Магнитогорск, МГТУ, 2000. 188 с.

#### References

- Glinkov M.A., Glinkov G.M. The general theory of heat furnaces: Textbook for universities. Moscow, Metallurgy, 1990. 232 p.
- Andoniev S.M. Isparitelnoe cooling metallurgical pehose. Moscow, Metallurgy, 1970. 424 p.
- Neustruev A.A., Hodorowsky G.L. Garnissag vacuum furnace. Moscow, Metallurgy, 1967. 272 p.
- Raphaelovich I.M. Heat transfer in fused, solutions and protection furnaces and devices. Moscow, Energy, 1977. 304 p.
- Russo V.L. Thermophysics metallurgical of garnissage apparatus. Moscow, Metallurgy, 1978. 248 p.
- Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V. Issues of energy saving when extracting iron from ore: monograph. Magnitogorsk: MSTU, 2007. 153 p.
- Neshporenko EG Regeneration of heat loss through a perforated barrier of high technological equipment // Bulletin of MEI. 2008. №1. Pp. 74-78.
- Neshporenko EG Experimental study garnissag mode of heat regeneration through the perforated fence // Vestnik of MG TU named after G.I. Nosova. 2010. №4. Pp. 74-78.
- Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V. Question savings of resources and energy at extraction of iron from ores: monography. Magnitogorsk: MGTU, 2007. 153 p.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 624.012.3/4

Кришан А.Л., Суровцов М.М.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ГИБКИХ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН

**Аннотация.** Приведены основные результаты экспериментальных исследований несущей способности трубобетонных колонн с учетом их гибкости. Получена статистическая зависимость для учета гибкости в расчетах прочности трубобетонных колонн.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, несущая способность, трубобетонные колонны, гибкость.

Krishan A.L., Surovtsov M.M.

### EXPERIMENTAL RESERCHES OF STRENGTH OF FLEXIBLE CONCRETE-FILLED TUBE (CFT) COLUMNS

**Abstract.** The paper presents the basic results of the experimental researches of the bearing capacity of the concrete – filled tube columns, taking into account their flexibility. Statistical relationship is received to account flexibility in the calculations of strength of the concrete-filled tube columns.

**Keywords:** experimental researches, bearing capacity, concrete-filled tube columns, flexibility.

Трубобетонные колонны (ТБК) представляют собой композитные конструкции, состоящие из стальной трубы и бетонного ядра, работающих совместно. Ввиду целого ряда преимуществ такие конструкции находят все большее применение в мировой строительной практике. Самый распространенный цилиндрический профиль рассматривается как наиболее прогрессивный и целесообразный, требующий минимального количества сварочных работ. Хорошая обтекаемость цилиндрической поверхности способствует меньшей осаждаемости грязи и влаги и повышению коррозионной стойкости и долговечности. Внутренняя поверхность стальной трубы надежно защищена от коррозии бетоном.

Особенно рационально использование ТБК в качестве вертикальных несущих элементов высотных и большепролетных зданий, так как при относительно малых поперечных сечениях они обладают высокой несущей способностью, что приводит к существенной экономии используемых материалов. Однако в случае увеличения эксцентрикитета приложения сжимающей нагрузки целесообразнее применение трубобетонных колонн квадратного сечения [1].

В то же время негативным фактором при работе ТБК может стать достижение первого предельного состояния вследствие больших необратимых деформаций и потери устойчивости.

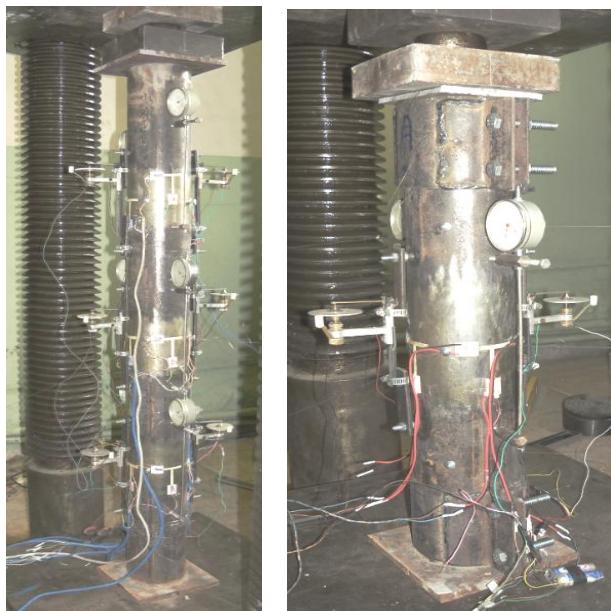
Методика расчета прочности и оценки напряженно-деформированного состояния коротких трубобетонных колонн при кратковременном и длительном сжатии, учитывающая физическую нелинейность компонентов, неоднородность их напряженного состояния, наличие предварительного обжатия бетона, разработана ранее и изложена в ряде публикаций [2,3]. Для

обеспечения возможности широкого использования ТБК в практике строительства необходимо разработать достоверную методику расчета их прочности с учетом гибкости.

Для определения закономерности влияния гибкости на прочность трубобетонных колонн были выполнены экспериментальные исследования 8 серий опытных образцов с различными геометрическими и конструктивными параметрами, имеющими гибкость  $\lambda = 20, 40, 60$  и  $80$ . Все образцы имели круглое поперечное сечение с диаметром 108 мм. В качестве внешней стальной оболочки для них использовались электросварные прямошовные трубы с толщиной стенки 5 мм из стали марки 09Г2С по ГОСТ 8732-78. Исходная прочность бетона, применяемого в качестве ядра ТБК, примерно соответствовала классам В35 и В55.

Все опытные элементы закрывались с торцов металлическими пластинами, выполненными из стали Ст.3 толщиной 10 мм и размерами 110x110 мм. Непосредственно перед проведением испытаний лабораторных образцов трубобетонных элементов определялись предел текучести и модуль упругости материала стальной трубы, кубиковая, призменная прочности и начальный модуль упругости исходного бетона конструкций.

Кратковременные испытания на центральное сжатие трубобетонных образцов с гибкостью  $\lambda = 20$  и 40 проводились на 500-тонном гидравлическом прессе марки 2ПГ500 (рис. 1). Для исследования прочности колонн с гибкостью  $\lambda = 60$  и  $80$  был изготовлен специальный испытательный стенд (рис. 2). Нагружение сжатых трубобетонных образцов осуществлялось до полной потери их несущей способности.



**Рис. 1. Образцы серий Ц.20.55 и Ц.40.55 перед испытаниями**



**Рис. 2. Образцы серий Ц.60.55 и Ц.80.55 перед испытаниями**

Основные численные результаты экспериментальных исследований центрально сжатых образцов ТБК приведены в **таблице**. В ней представлены осредненные по сериям данные по призменной ( $R_b$ ) прочности исходного бетона, а также экспериментально определенные значения нагрузок, соответствующие:

- пределу упругой работы  $N_{el}$ ;
- максимально достигнутой нагрузке  $N_u$ .

Для количественной оценки эффективности работы трубобетонных элементов под нагрузкой подсчитаны следующие соотношения:

$N_{el}/N_u$  – отношение предела упругой работы образца к разрушающей нагрузке;

$\varphi = N/N_{max}$  ( $N_{max}$  – прочность колонны с гибкостью  $\lambda = 20$ )

#### Основные результаты испытания образцов

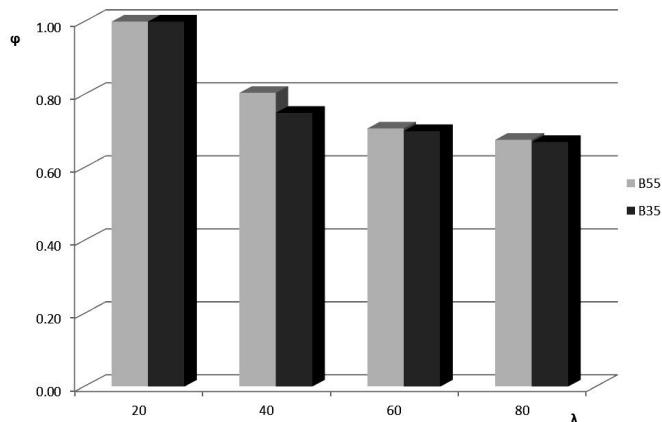
Серия	Высота [мм]	$R_b$ [МПа]	$N_{el}$ [кН]	$N_u$ [кН]	$N_{el}/N_u$	$\varphi$
1	2	3	4	5	6	7
Ц.20.55	560	55,0	752	1127	0,67	1,0
Ц.20.35	560	33,6	738	1100	0,67	1,0
Ц.40.55	1120	53,4	668	907	0,74	0,8
Ц.40.35	1120	30,4	570	760	0,75	0,75
Ц.60.55	1640	53,4	665	797	0,83	0,71
Ц.60.35	1640	30,4	632	735	0,86	0,7
Ц.80.55	2200	55,0	724	762	0,95	0,68
Ц.80.35	2200	33,6	685	714	0,96	0,67

Закономерность снижения несущей способности ТБК сростом их гибкости проиллюстрирована на **рис. 3**. В результате статистической обработки опытных данных получена зависимость, связывающая относительную величину прочности гибкой колонны  $\varphi = N/N_{max}$  ( $N_{max}$  – прочность колонны с гибкостью  $\lambda = 0$ ) и гибкость:

$$\varphi = (1 - 2,5 \times 10^{-3} \times \lambda)^2.$$

По результатам замера деформаций на поверхности стальной оболочки и в бетонном ядре построены зависимости « $n$ - $\varepsilon$ » ( $n$  – относительный уровень нагружения, определяемый отношением  $n = N/N_u$ ,  $\varepsilon$  – относительные продольные деформации трубобетонных элементов). Характерные зависимости для образцов серий Ц.20.55 и Ц.20.35 приведены на **рис. 4**. Причем положительные деформации соответствуют укорочению волокон.

#### Закономерность снижения несущей способности ТБК с увеличением гибкости



**Рис. 3. Опытная зависимость несущей способности ТБК от гибкости**

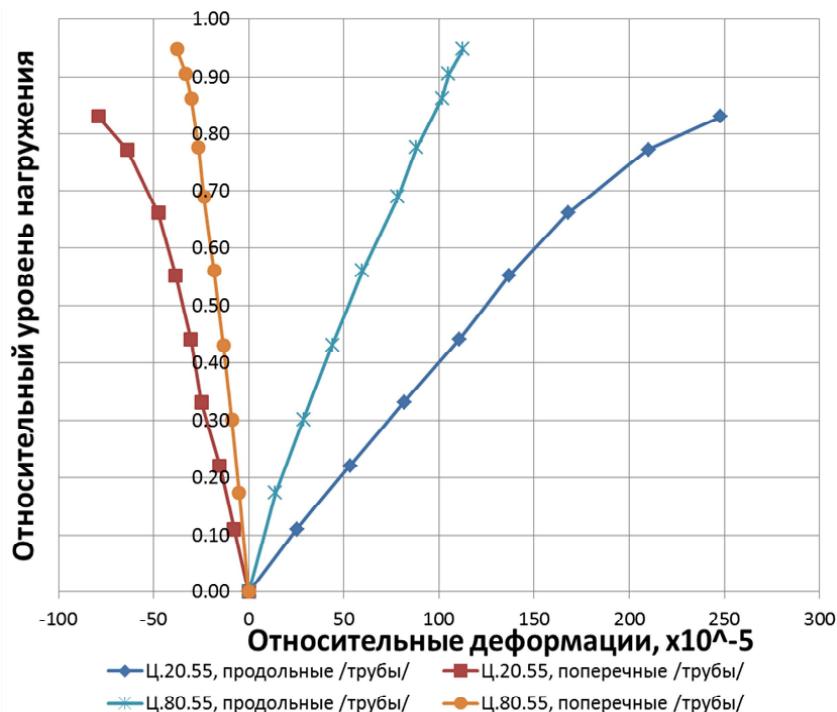


Рис. 4. Результаты испытаний образца серии Ц.20.55 и Ц.80.55

Из приведенных графиков видно, что предельная деформативность коротких образцов ТБК существенно больше, чем в традиционных железобетонных конструкциях. С увеличением гибкости колонн наблюдается снижение величины деформаций образцов при одинаковых относительных уровнях загружения. Так, продольные деформации образцов серии Ц.20.55 при  $n=0,8$  оказались почти в два раза меньше по сравнению с образцами серии Ц.80.55. Этот факт свидетельствует о повышении уровня упругой работы ТБК по отношению к предельной нагрузке при увеличении их гибкости.

По окончании испытаний с части разрушенных образцов разных серий срезались торцевые крышки, а их оболочка разрезалась вдоль и снималась (рис. 5).

При визуальном осмотре торцов бетонного ядра не было обнаружено видимых трещин. После разрезки оболочки бетонное ядро сохраняло свою форму, повторяя все деформации стальной оболочки, что свидетельствует о псевдопластичном характере его разрушения. Стальная оболочка при этом практически по всей поверхности загружаемых образцов находилась в стадии текучести и повторяла деформации ядра.

На боковой поверхности бетонного ядра центрально сжатых образцов при визуальном осмотре были обнаружены микротрещины. Максимальная концентрация их наблюдалась в зоне образования

складок. Ярко выраженной магистральной трещины не наблюдалось. Микротрещины в бетонном ядре ориентировались по отношению к вертикальной оси под углом 30-45°. Таким образом, разрушение ядра было сопряжено со срезом, что характерно для объемного напряженного состояния бетона.

В целом результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что в сжатых трубобетонных элементах гибкость оказывает большее влияние на несущую способность, чем в традиционных железобетонных конструкциях. Существенной особенностью работы ТБК является проявление псевдопластического характера их разрушения, обусловленного работой бетонного ядра и стальной оболочки в условиях объемного сжатия. Данные обстоятельства необходимо учесть при разработке методики расчета прочности трубобетонных колонн с учетом их гибкости.



Рис. 5. Образцы серии ЦН.108.20 после испытаний

#### Список литературы

1. Кришан А.Л., Мельничук А.С. Прочность трубобетонных колонн квадратного сечения при осевом сжатии // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 51-54.
2. Кришан А.Л., Заикин А.И. Расчет прочности трубобетонных колонн // Бетон и железобетон. 2011. № 3. С. 17-19.
3. Кришан А.Л., Мельничук А.С. Трубобетонные колонны квадратного сечения // Жилищное строительство. 2012. № 5. С. 19-22.

#### References

1. Krishan A.L., Melnichuk A.S. Strength of concrete-filled steel tubes with square cross-section under axial compression // Vestnik MGTU named after G.I. Nosov. 2012. № 3. P. 51-54.
2. Krishan A.L., Zaikin A.I. Calculation the strength of concrete-filled tube (CFT) columns // Concrete and reinforced concrete. 2011. № 3. P. 17-19.
3. Krishan A.L., Melnichuk A.S. Concrete-filled steel tubes with square cross-section // Housing Construction. 2012. № 5. P. 19-22.

# ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

УДК 669.1.02

Баскакова Н.Т., Песин И.А.

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ В ОПТИМИЗАЦИОННОМ ПЛАНИРОВАНИИ РЕМОНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ\*

**Аннотация.** В статье представлены результаты научно-исследовательской работы по оптимизации и систематизации планирования технического обслуживания и ремонтов metallurgических агрегатов на основе теории ограничений.

**Ключевые слова:** теория ограничений, система менеджмента качества, оптимальное планирование, ремонт.

Baskakova N.T., Pesin I.A.

### USING THE THEORY OF CONSTRAINTS IN PLANNING REPAIRING OF EQUIPMENT FOR METALLURGICAL PLANTS

**Abstract.** The research work results on the optimization of planning of maintenance and repairing of metallurgical aggregates are based on the Theory of constraints.

**Keywords:** theory of constraints, Quality Management System, optimal planning, repair.

Одной из особенностей metallurgической промышленности является довольно значительная величина расходов на качество. Согласно предлагаемым классификациям этих расходов они включают затраты на предупреждение, контроль качества и потери от внутренних и внешних несоответствий. Затраты на предупреждение потери качества для metallurgии, в первую очередь, связаны с ремонтами основного технологического оборудования.

Проблемы ремонтов в условиях metallurgического предприятия занимают особое положение и играют специфическую роль. Одной из важнейших особенностей metallurgических предприятий является необходимость постоянного проведения технического обслуживания и ремонтов. На эти цели предприятия вынуждены тратить значительные средства. Даже небольшая экономия является, несомненно, актуальной задачей. Главная проблема при планировании ремонтов – несоответствие между заявками на проведение работ и выделяемыми лимитами денежных средств. Возникает необходимость в ранжировании всех мероприятий по ремонтам с помощью критерия, способного решить эту проблему.

Стратегия развития любого metallurgического предприятия должна предусматривать создание системы оптимального планирования ремонтов metallurgического предприятия и ее интеграцию в корпоративную информационную систему.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1) разработать критерий приоритетности мероприятий по ремонту metallurgического оборудования;

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0499.

2) создать модель оптимального планирования ремонтов metallurgического предприятия на основе теории ограничений;

3) интегрировать разработанную модель в корпоративную информационную систему.

В основе представленной концепции лежат результаты исследований, выполненных Э.Голдрэттом и научной школой Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова по развитию теории ограничений и внедрению полученных результатов на metallurgических предприятиях.

Теория ограничений предлагает пять этапов для разработки критерия:

1 этап: *Определение ограничений системы* (схема технологического процесса → «узкое место» → объем производства).

2 этап: *Максимальное использование ограничений системы существующими средствами* (материальные, трудовые, финансовые ресурсы → «узкое место»).

3 этап: *Подчинение всех ресурсов «узкому месту», которое должно задавать ритм работы всех остальных подразделений* («узкое место» → загрузка оборудования → производительность).

4 этап: *Устранение ограничений системы путем дополнительного инвестирования* (инвестирование → «расшивка «узких мест»).

5 этап: *Не позволять инерции превратиться в ограничение. После устранения ограничения начинать сначала с 1 этапа.*

На основе предлагаемого перечня шагов теории ограничений этапы концепции планирования ремонтов оборудования и механизм принятия решений на основе использования ограничений выглядят следующим образом (рис. 1, 2).

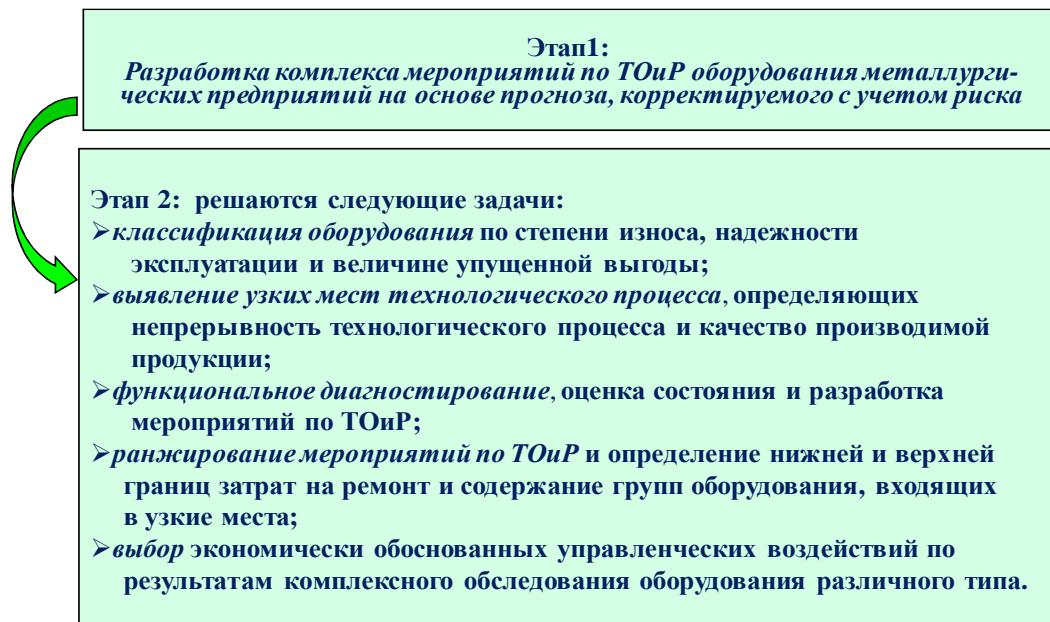


Рис. 1. Этапы концепции планирования ремонтов оборудования на основе использования ограничений

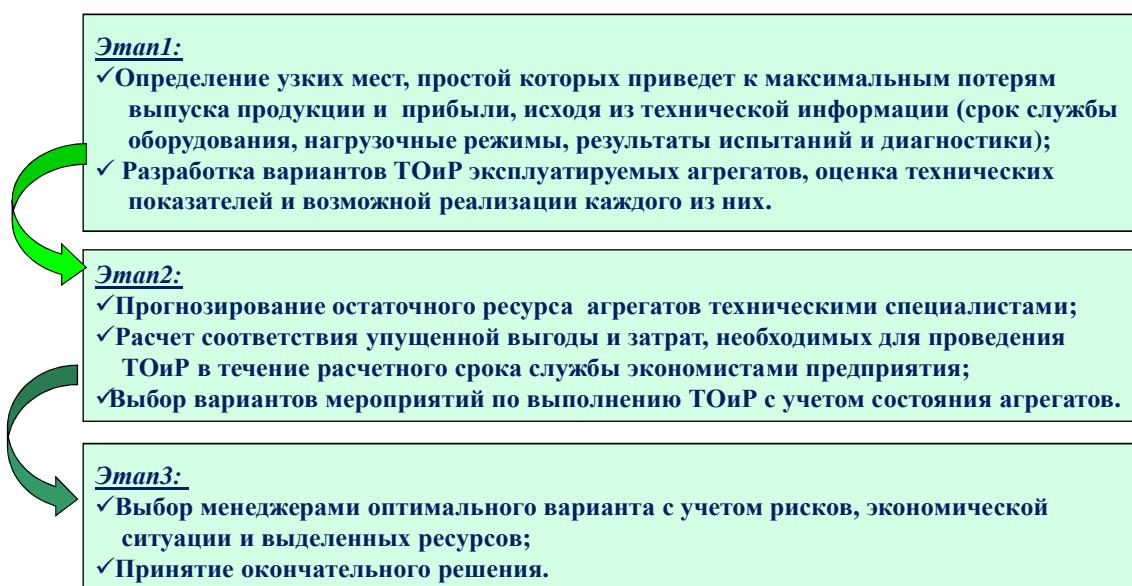


Рис. 2. Механизм принятия решений согласно концепции планирования ремонтов оборудования на основе использования ограничений

Для принятия решений оперативного характера теория ограничений предлагает использовать **дополнительные показатели**, позволяющие оценивать эффективность оперативных решений с точки зрения достижения основной цели. К ним относятся:

1) **Поток маржинальной прибыли (throughput)** – средства, генерируемые системой через продажи:

$$ПП = ОРП - МЗ, \quad (1)$$

где *ОРП* – объем реализованной продукции; *МЗ* – затраты на исходное сырье, материалы и полуфабрикаты, соответствующие реализованному объему продукции.

2) **Запасы (inventory)** – средства, затрачиваемые системой на приобретение компонентов, предназначенных для последующей продажи (исходное сырье,

материалы, полуфабрикаты, готовая продукция, товары для перепродажи):

$$З = \sum_{l=1}^z \sum_{k=1}^f З_{kl} U_{kl}, \quad (2)$$

где  $З_{kl}$  – величина запаса *l*-го вида сырья, полуфабриката или готовой продукции на *k*-м этапе (подразделении, технологической линии, агрегате, складе) производственного процесса;  $U_{kl}$  – цена единицы исходного сырья, материала, полуфабриката или готовой продукции *l*-го вида.

Важными характеристиками последнего показателя являются:

– во-первых, рассмотрение в качестве запасов всех запасных частей;

– во-вторых, оценка запасов вне зависимости от производственной стадии только по закупочным ценам, то есть по средствам, затраченным на их приобретение.

Таким образом, превышение темпа роста запасов над темпом роста объема продаж свидетельствует о том, что деньги компанией не зарабатываются, а оседают в запасах на складе.

**3) Операционные расходы (operating expense)** – средства, затрачиваемые системой для превращения запасов в продажи:

$$OP = T + A + \Pi + M, \quad (3)$$

где  $T$  – затраты на оплату труда всех категорий персонала с соответствующими отчислениями;  $A$  – затраты на амортизацию оборудования;  $\Pi$  – прочие затраты на производство и реализацию;  $M$  – топливно-энергетические затраты.

Таким образом, к операционным расходам теория ограничений относит все расходы на производство и реализацию продукции кроме расходов на исходное сырье, материалы и полуфабрикаты. Данные расходы рассматриваются как расходы периода, то есть признаются за условно-постоянные.

Для определения критерия выбора планируемых мероприятий при составлении графиков ремонта оборудования первоначально рассчитывают, к какой продолжительности простоя «узкого места» может привести отсутствие того или иного мероприятия.

Зная средний поток прибыли, проходящей через «узкое место», подсчитывают возможные потери прибыли от невыполнения этого мероприятия.

Учитывая все вышеперечисленные факторы, предлагается следующий укрупненный алгоритм планирования мероприятий по ремонту (рис. 3).

Для составления графика ремонтов и технического обслуживания предприятия в целом необходимо определить «узкие места», простой которых приведет к снижению прибыли.

Для планирования графика ремонтов и технического обслуживания цеха первоначально выбирается основное технологическое оборудование и вид планируемых ремонтных работ (техническое обслуживание, текущий ремонт, капитальный ремонт). Затем для выбранных позиций определяется перечень планируемых мероприятий. Для каждого мероприятия рассчитывается продолжительность простоя «узкого места» из-за отсутствия мероприятия (отклонение проведения планируемого ремонта), средний поток прибыли и возможные потери на «узком месте».

На основе полученных данных производится ранжирование мероприятий по среднему потоку прибыли и составляются таблицы приоритетности мероприятий по критерию максимизации потерь.

Затем рассчитывается стоимость проведения ремонтных работ и сравнивается с лимитом выделенных ресурсов экономической службой на эти цели.

В случае превышения стоимости предлагаемых операций запланированного лимита средств на ТОиР они исключаются из списка работ, и происходит переход либо к следующему шагу, либо к завершению планирования.

Такой алгоритм позволяет выбирать только те мероприятия, которые лимитируют выпуск продукции, не превышают объемов выделенных финансовых ресурсов, снижают степень риска потерь прибыли из-за простое «узких мест». Таким образом, предлагаемый алгоритм позволит последовательно отсеивать проблемное оборудование и оптимизировать процесс планирования ремонтов и затрат на их проведение.

Предлагаемая новая система оптимального планирования ремонтов metallurgического предприятия, отличительной особенностью которой является ранжирование всех мероприятий по критерию наименьших возможных потерь, позволит повысить конкурентоспособность предприятия.



Рис. 3. Укрупненный алгоритм оптимального планирования мероприятий по ТОиР

В настоящее время ведутся работы по созданию программного пакета «Система оптимального планирования ремонтов», который будет интегрироваться в корпоративную информационную систему.

Такой пакет может быть полезен всем металлургическим предприятиям России, а также работающим с ними консалтинговым организациям. Отличием такого пакета является новая опция ранжирования всех мероприятий по критерию наименьших возможных потерь. Это позволяет снизить затраты на ремонты и аварии не менее чем на 5%.

Заинтересованность в приобретении нового программного продукта уже выражали несколько инновационных и консалтинговых фирм.

#### Список литературы

1. Goldratt, Eliyahu M. The Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement. Delmar, Albany, NY (1995).
2. Реализация концепции производственного планирования на основе эффективного использования ограничений / Г.С. Сеничев, В.И. Шмаков, И.В. Виер, А.М. Песин и др. М.: Экономика, 2006. 210 с.
3. Баскакова Н.Т. Подсистема СМК планирования ремонтов // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова. 2009. №3. С. 55-57.
4. Подсистема менеджмента качества планирования ремонтов как рычаг роста конкурентоспособности металлопродукции / Песин А.М., Шмелев В.А., Баскакова Н.Т., Бойко Д.А., Леднева Г.А. // Сталь. 2011. №1. С. 79-84.
5. Баскакова Н.Т., Песин И.А. Совершенствование системы планирования ремонтов на основе теории ограничений // Литейные процессы. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. Вып. 10. С. 129-135.

#### References

1. Goldratt, Eliyahu M. The Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement. Delmar, Albany, NY (1995).
2. Senichev G.S., Shmakov V.I., Vier I.V., Pesin A.M. Implementation of the concept of the production planning based on effective use of constraints / Senichev G.S., Shmakov V.I., Vier I.V., Pesin A.M., etc. M.: Economy, 2006. 210 p.
3. Baskakova N.T. SMC subsystem of repairs planning. Vestnik MGTU after G.I.Nosov. 2009. №3. P.55-57.
4. Pesin A.M., Shmelyov V.A., Baskakova N.T., Boyko D.A., Ledneva G.A. Quality management subsystem of repairs planning as a lever of competitiveness of steel production output growth // Steel. 2011. № 1. P. 79-84.
5. Baskakova N.T., Pesin A.M. Improving of the repairs planning system based on the theory of constraints // Casting processes. Magnitogorsk: MSTU after G.I. Nosov, 2011. №10. P. 129-135.

УДК 004.7:339

Разинкин Е.И.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ

**Аннотация.** Рассмотрена концепция интероперабельности в области электронной коммерции, а также программный модуль, который позволит обеспечить интероперабельность на semanticическом уровне.

**Ключевые слова:** электронная коммерция, интероперабельность, XML.

Razinkin E.I.

## PROVIDING THE INTEROPERABILITY OF ELECTRONIC COMMERCE ON THE BASIS OF THE MODULE OF XML DATA EXCHANGE

**Abstract.** The interoperability conception in the field of electronic commerce is considered. The program module which will allow to provide interoperability at semantic level is offered.

**Keywords:** electronic commerce, interoperability, XML.

### Введение

Сфера электронной коммерции (англ. e-commerce) – одна из наиболее активно развивающихся областей деятельности человека. Электронная коммерция включает в себя все финансовые и торговые транзакции, осуществляемые при помощи компьютерных сетей, и бизнес-процессы, связанные с проведением таких транзакций. По оценке исследовательской лаборатории Bay.Ru, объем российского рынка электронной коммерции в 2011 году составил около 12-13 млрд долл. Эксперты считают, что в 2012 году его объем превысит отметку в 15 млрд долл, а количество пользователей, которые так или иначе занимаются электронной коммерцией, достигнет порядка 2,3 млн человек, и эта цифра будет неуклонно расти.

Существует большое количество барьеров, которые мешают развитию данной отрасли. Одним из таких барьеров считается проблема обеспечения интероперабельности. «Интероперабельность – это способность

двух или более систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена» (ISO/IEC 24765).

Проблема интероперабельности, согласно мировой практике, должна решаться на основе использования принципов и технологий открытых систем, использующих методы функциональной стандартизации (построение профилей стандартов). Журнал ИТиВС посвятил свой специальный выпуск проблеме интероперабельности [1]. Позже был опубликован обзор, посвященный данной проблеме [2]. В этих публикациях показано, что проблема интероперабельности возникает для ИС практически всех классов (различных областей применения и различного масштаба) и имеет особенности для ИС различных классов. В проблеме интероперабельности еще много нерешенных вопросов, начиная от определений и кончая выработкой единого подхода к обеспечению интероперабельности ИС широкого класса.

В статье рассмотрен разработанный и аprobированый автором программный модуль. Данный модуль позволяет обеспечить интероперабельность на семантическом уровне с использованием технологии XML.

### Концепция обеспечения интероперабельности в области электронной коммерции

В последние годы появилось большое количество архитектур, моделей, концепций в области электронной коммерции, которые были разработаны различными зарубежными организациями [3]. Хочется отметить, что все они узкоспециализированы, и созданы решать текущие задачи той или иной компании.

Поэтому нами был разработан универсальный модуль, который подходит для широкого класса систем в области электронной коммерции. На текущий момент данный модуль (кодовое название «E-commerce Interoperability Module» или EclIM) успешно прошел апробацию и используется уже в трех интернет-магазинах различного спектра деятельности (электронный доступ на 14.01.2013: <http://shop.bdberry.ru>, <http://deltasan.ru>, <http://alego.ru>). В дальнейшем планируется доработка модуля и его перевод на коммерческие рельсы.

В основу концепции модуля заложен единый подход к обеспечению интероперабельности [4, 5]. Единый подход можно представить в виде ряда последовательных этапов (рис. 1).



Для области электронной коммерции предлагается модель интероперабельности, учитывающая все архитектурные особенности области e-commerce (рис. 2).

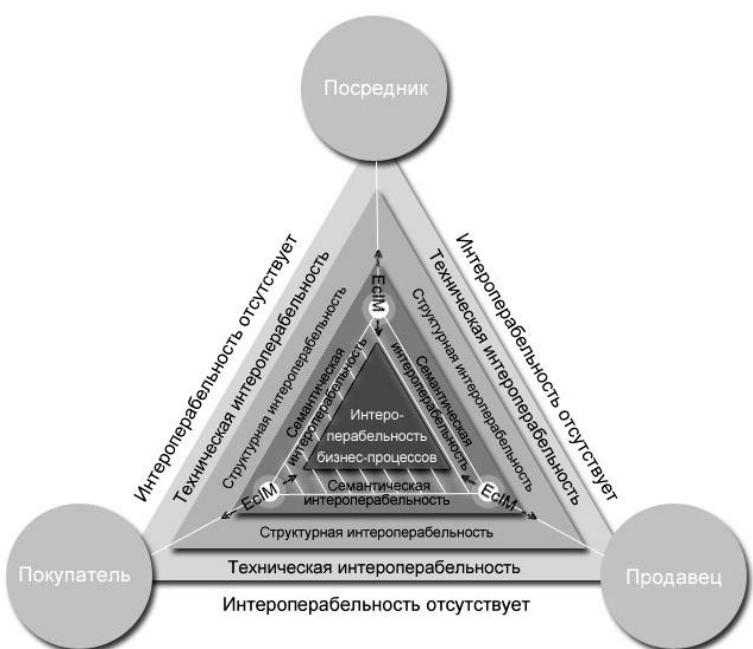


Рис. 2. Модель интероперабельности e-commerce

Профиль электронной торговли должен содержать как стандарты ИКТ общего назначения, такие как профили TCP/IP, для обеспечения интероперабельности на техническом уровне, так и специальные стандарты для обеспечения интероперабельности на более высоких уровнях. Разработка профиля с привязкой к конкретным уровням эталонной модели ещё предстоит, а пока в таблице приведены широкоиспользуемые международные стандарты электронной торговли.

### Стандарты в области e-commerce.

Стандарт	Область применения	Электронный доступ
UN/EDIFACT (ebXML)	Правила ООН для электронного обмена документами для гос. управления торговли и транспорта	<a href="http://www.unece.org/trade/untdid/texts/d100_d.htm">http://www.unece.org/trade/untdid/texts/d100_d.htm</a>
ANS X12	Область электронного обмена данными (EDI)	<a href="http://fedebiz.disa.mil/private/edit/document/resource/fp1.rtf">http://fedebiz.disa.mil/private/edit/document/resource/fp1.rtf</a>
An XML/EDI: Payment Order	Рекомендации по использованию XML для обмена данными в области электронной коммерции.	<a href="http://web.archive.org/web/20010707041610/http://www.cenorm.be/isss/workshop/ec/xmledi/documents_99/xml001_99.htm">http://web.archive.org/web/20010707041610/http://www.cenorm.be/isss/workshop/ec/xmledi/documents_99/xml001_99.htm</a>
XML DTD	Стандарт Documents Type Definitions для XML	<a href="http://web.archive.org/web/20010707041610/http://www.cenorm.be/isss/workshop/ec/xmledi/documents_99/xml001_99.htm">http://web.archive.org/web/20010707041610/http://www.cenorm.be/isss/workshop/ec/xmledi/documents_99/xml001_99.htm</a>
W3C XML E-commerce Standards	Стандарт описания структуры и содержимого XML документа	<a href="http://www.w3.org/TR/xmlschema-0/">http://www.w3.org/TR/xmlschema-0/</a>
Document Related Standards	Стандарты XSL, XSLT, XHTML, XML	<a href="http://www.w3.org/TR/">http://www.w3.org/TR/</a>

### Модуль электронного обмена данными

Программный модуль EcIM предназначен для электронного обмена данными XML между несколькими системами класса электронной коммерции. В качестве систем такого класса, с одной стороны, могут выступать электронные площадки, электронные каталоги, интернет-магазины, а с другой стороны, банковские сервисы, системы электронных торгов, системы типа Яндекс-Маркет, Прайс-Ру и др.

Ключевой особенностью данного модуля является его универсальность и быстрота обработки результатов. Модуль EcIM подойдет для любого интернет-магазина с предустановленной системой управления содержимым сайта (CMS), такой как: Битрикс, NetCat, Umi-Cms, Joomla и многие др. В основе данного модуля положены современные алгоритмы анализа базы данных сайта и обработки основных компонентов, необходимых для дальнейшего формирования результата, а именно XML-структуры каталога товаров. Даже в том случае, если интернет-магазин не имеет своей базы данных и представляет собой набор html-страниц, модуль EcIM позволяет максимально точно определить все ключевые параметры. Таким образом, данный модуль не зависит от платформы, на которую он будет установлен. Модуль EcIM состоит из двух частей (рис. 3).

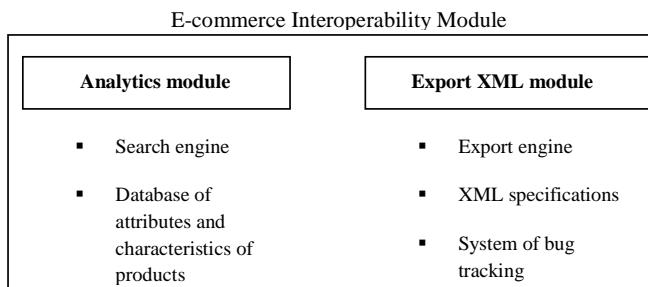


Рис. 3. Структура модуля EcIM

На рис. 3 изображены две части модуля: аналитическая часть, которая отвечает за сбор всей необходимой информации и ключевых параметров исследуемой электронной площадки, и практическая часть, отвечающая за результат, а именно конечную структуру товаров и их характеристик в формате XML.

Аналитическая часть (analytics module) включает в себя:

- поисковую систему (search engine), которая построена на алгоритме поиска товаров в интернет-магазине, как через mysql-запросы, так и анализируя конечный код html все страниц;

- обширную базу данных с возможными атрибутами и характеристиками товаров (database of attributes and characteristics of products). Данная база данных является основной составляющей поисковой системы и содержит в себе все возможные элементы описаний товаров.

Практическая часть (export XML module) включает в себя:

- систему формирования каталога в XML формате (export engine);
- спецификации XML (XML specifications), на основе которых строится результативный файл XML;
- систему отслеживания ошибок экспорта и формирования XML (system of bug tracking);
- возможность планирования процесса экспорта с использованием cron (cron planning).

Исходя из структурных особенностей модуля, его работа будет характеризоваться двумя этапами: этап анализа электронной площадки и формирования основных характеристик и этап выгрузки электронного каталога в формате XML.

### Заключение

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы и предложения:

– Одной из основных проблем в области электронной коммерции является проблема обеспечения interoperability разнородных информационных систем на основе использования ИТ-стандартов. Авторы при выполнении ряда проектов непосредственно столкнулись с этой проблемой.

– Концепция, разработанная и описанная авторами, позволяет выработать единый подход для создания interoperableных систем в области электронной коммерции.

– В работе описан модуль на основе языка XML. Планируется дальнейшее развитие модуля и его перевод на коммерческие рельсы.

### Список литературы

1. Информационные технологии и вычислительные системы. Темат. выпуск. Открытые системы. Интероперабельность. 2009. №5.
2. Гуляев Ю.В., Журавлев Е.Е., Олейников А.Я. Методология стандартизации для обеспечения interoperability информационных систем широкого класса // Радиоэлектроника. 2012. №3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar12/index.html>.
3. Разинкин Е.И. Обзор концептуальных документов, архитектур и моделей в области обеспечения interoperability в сфере e-commerce // Стандартизация, сертификация, обеспечение эффективности, качества и безопасности информационных технологий: сб. статей междунар. конф. Москва, 2011. С. 46-50.
4. Олейников А.И., Разинкин Е.И. Особенности подхода к обеспечению interoperability в области электронной коммерции // Информационные Технологии и Вычислительные Системы. 2012. Вып. №3. С. 82-92.
5. Разинкин Е.И. Концепция обеспечения interoperability в области электронной коммерции // Информационно-управляющие системы. 2012. Вып. №5. С. 82-88.

### References

1. Information Technologies and Computer Systems. Open systems. Interoperability. 2009. №5.
2. Gulyaev U.V., Juravlev E.E., Oleinikov A.I. Methodology for interoperability information systems. Analytical review. Journal of Radio Electronics №3. 2012. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar12/index.html>
3. Razinkin E.I. Review of conceptual documents, architectures and models in the field of interoperability of e-commerce // standardization, certification, ensuring efficiency, quality and safety of information technology – international conference, a collection of articles. Moscow. 2011. P. 46-50.
4. Oleinikov A.I., Razinkin E.I. Sensitive approach to interoperability in e-commerce, Journal of Information Technology and Computer Systems. 2012. Issue №3, P. 82-92.
5. Razinkin E.I. The concept of interoperability in e-commerce, Information and Control Systems. 2012. Issue №5. P. 82-88.

УДК 339.137:332.14

Горохова О.В.

## РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕРМИНА «КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ»

**Аннотация.** В современной рыночной среде вопросы, касающиеся конкурентоспособности хозяйствующих субъектов и конкурентоспособности регионов становятся актуальными. В статье проведен анализ имеющейся в научной литературе трактовки понятия термина «конкурентоспособность» и дано наиболее привлекательное с точки зрения современности определение этой научной категории, основанной на региональной специализации.

**Ключевые слова:** конкурентоспособность, инновации, региональная специализация.

Gorokhova O.V.

### A REGIONAL APPROACH TO THE DEFINITION OF COMPETITIVENESS

**Abstract.** In the modern market environment issues relating to the competitiveness of economic entities and competitiveness of the regions become more important. In the article the analysis of the available scientific literature the concept of the term competitiveness and given the most attractive from the point of view of the present definition of the science category, based on regional specialization.

**Keywords:** competitiveness, innovation, regional specialization.

Очевидно, что политическое и экономическое положение в том или ином регионе является основополагающим фактором при определении возможности этого региона в создании условий, позволяющих повышать потенциальную конкурентоспособность своих производителей.

Если проанализировать имеющиеся в научной литературе трактовки понятия термина «конкурентоспособность», можно сделать вывод о том, что многие авторы акцентируют внимание не на соперничестве конкурентов друг с другом, а на анализе структуры рынка и тех условий, в которых они существуют, то есть рассматривают конкурентоспособность не с точки зрения поведенческого подхода, а с точки зрения структурных составляющих региона: его экономические, политические, социальные, природные и иные факторы. Например, авторы В.И. Видяпин и М.В. Степанов понимают конкурентоспособность региона «как наличие и реализация конкурентного потенциала региона, то есть возможность участия региона в конкурентных отношениях» [1]. Чуб Б.А. понимает конкурентоспособность региона как «способность обеспечить высокий уровень жизни населения и возможность реализовать имеющийся в регионе экономический потенциал (финансовый, производственный, трудовой, инновационный, ресурсно-сырьевой) [2]. Унтура Г.А. считает, что конкурентоспособность конкретного региона определяется как конкурентоспособностью производимой в регионе продукции, так и региональными особенностями социально-экономического, научно-технического, кадрового потенциала и ресурсными возможностями для размещения новых или реконструкции и развития существующих производств [3]. Конкурентоспособность региона у В. М. Рябцева как «обусловленное экономическими, социальными, политическими и другими факторами положение региона и его отдельных товаропроизводителей на внутреннем и внешнем рынках» [4] отражает, можно сказать, ре-

зультат самой конкуренции в виде занимаемого регионом положения. Определение Л.С. Шеховцевой звучит следующим образом: «конкурентоспособность региона – это продуктивность (производительность) использования региональных ресурсов и в первую очередь рабочей силы и капитала по сравнению с другими регионами, которая результируется в величине валового регионального продукта на душу населения, а также в его динамике» [5]. Здесь автор показывает связь конкурентоспособности и продуктивности. Касательно Р.Г. Маннаповой и Л.Г. Ахтариевой, конкурентоспособность региона понимается ими как «сложная организационно-экономическая категория, отражающая его готовность и умение отвечать на вызовы внешней среды (национальной и глобальной) на основе сформированного специфического социально-экономического потенциала, инноваций и знаний, имеющихся и вновь созданных преимуществ, быстро адаптирующихся к изменяющимся рыночным и социальным условиям общественного прогресса и позволяющих обеспечить, в конечном счете, более высокое по сравнению с другими регионами качество жизни своего населения, причем как в текущем периоде, так и в перспективе» [6]. Все эти авторы рассматривают конкурентоспособность какого-то конкретного региона с точки зрения имеющихся у этого региона ресурсов.

Следующие авторы при определении термина конкурентоспособность региона затрагивают еще и поведенческий подход. Вот, например, Яковенко Н.Н. считает, что конкурентоспособность региона проявляется по отношению к другим регионам в ходе борьбы за привлечение инвестиционных ресурсов вообще и конкретных инвесторов в частности, за возможное размещение производственных мощностей на территории региона, за привлечение квалифицированной рабочей силы, за получение тех или иных бюджетных вливаний [7]. Костылева Н.Е. рассматривает данную категорию как «способность к внедрению инноваций

и осуществлению модернизации и структурных перемен в соответствии с прогрессивными тенденциями, что обеспечивает успешное продвижение региона... в определенных наиболее актуальных для конкретной территории направлениях, по которой развивается конкуренция в данный период времени» [8]. У В.В. Меркушова определение конкурентоспособности региона следующее: «способность обеспечивать производство конкурентоспособных товаров и услуг в условиях эффективного использования существующих факторов производства (экономического потенциала), задействования существующих и создания новых конкурентных преимуществ, сохранения (повышения) уровня жизни при соблюдении международных экологических стандартов» [9].

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод о том, что основополагающим фактором в определении конкурентоспособности предприятия все же является региональная специфика. Практика показывает, что наиболее успешными становятся предприятия, находящиеся внутри экономически сильных регионов. Вот, допустим, даже к примеру, максимальный вклад в сферу услуг наблюдается в Центральном федеральном округе – 70.5%. Это объясняется высоким уровнем экономического развития в этом округе, инвестиционной привлекательностью, сосредоточением деловой активности в большинстве регионов Центрального округа и т.д. Значит, региональная специфика влияет на конкурентоспособность предприятий сферы услуг и даже в целом на конкурентоспособность региона. Но и среди них наибольшей конкурентоспособностью обладают те предприятия, которые используют в своей деятельности какие-то инновации. Минимальный вклад в развитие сферы услуг вкладывают предприятия в Уральском федеральном округе – 39.8%. Это связано с размещением в этом регионе отраслей, связанных с тяжелой промышленностью, добычей полезных ископаемых и металлургией. Высока доля транспортных услуг на Дальневосточном рынке, так как он очень удален от центра. Опять же все это показывает зависимость конкурентоспособности предприятий сферы услуг от региональной специфики.

Таким образом, на сегодняшний день наиболее актуальным будет следующее определение термина конкурентоспособности: конкурентоспособность – это инновационный потенциал хозяйствующего субъекта в сочетании с реальными свойствами, создающими преимущества для этого субъекта относительно региональной специализации. Это определение наиболее полно отражает сущность экономической категории – конкурентоспособности. Здесь учтен и современный аспект, ведь роль инноваций в экономике сегодняшнего дня очень велика. Но инно-

вационная экономика должна строиться с учетом региональной специализации. Поэтому в данном определении конкурентоспособности учтен и территориальный аспект, который по существу включает в себя и политический, и географический, и производственный факторы. И для того, чтобы региону и бизнесу выжить и развиваться в новых условиях, на смену устаревшим подходам должны прийти новые технологии управления региональным развитием. К основным приоритетам регионального управления можно отнести обеспечение высокого уровня жизнедеятельности населения региона и создание благоприятных условий для развития конкурентоспособности предприятий. Необходимо четкое развитие прогрессивных механизмов управления регионом, ориентированное на стратегические цели и на создание устойчивых конкурентных преимуществ действующих в нем предприятий.

#### Список литературы

1. Региональная экономика: учебник / под ред. В.И. Видяпина и М.В. Степанова. М.: ИНФРА-М, 2005. 667 с.
2. Чуб Б.А. Управление инвестиционными процессами в регионе. М.: Буквица, 1999. 186 с.
3. Конкурентные позиции региона и их экономическая оценка / под ред. Г.А. Унтура. Новосибирск: ИЭ и ОПП СО РАН, 1997.
4. Рябцев В.М. Конкурентоспособность российских регионов: методология оценки и сравнительного анализа. Самара: СГЭА, 2002. 128 с.
5. Шеховцева Л.С. Методология формирования стратегических целей развития региона // Менеджмент в России и за рубежом. 2007. №3. С. 67-75.
6. Маннапов Р.Г., Ахтариева Л.Г. Организационно-экономический механизм управления регионом: формирование, функционирование, развитие: монография. М.: КНОРУС, 2008. 352 с.
7. Яковенко Н.Н. К вопросу о принципах формирования стратегии развития экономики региона // Региональная экономика: теория и практика. 2005. №12.
8. Костылева Н.Е. Инновационные методы повышения конкурентоспособности городов и регионов. СПб.: ИРЭ РАН, 2005.
9. Меркушов В.В. Интегральная оценка конкурентоспособности регионов. URL: <http://sopssecretary.narod.ru> (дата обращения: 07.01.2012).

#### References

1. Regional economy: the textbook / under the editorship of Vidyapin and M.V. Stepanova. M: INFRA-M, 2005. 666 pages.
2. Chub B.A. Upravleniye's forelock investment processes in the region. M: Drop cap, 1999. 186 pages.
3. Competitive positions of the region and their economic assessment / Under the editorship of Untur. Novosibirsk, IE and OPP of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 1997.
4. Ryabtsev V.M. Competitiveness of the Russian regions: methodology of an assessment and comparative analysis / Century M. Ryabtsev. Samara: SGEA, 2002. 128 pp.
5. Shekhovtseva L.S. Methodology of formation of strategic objectives of development of the region / Hp of Shekhovtsev // Management in Russia and abroad. 2007. №3. P. 67-75.
6. Mannapov R.G., Akhtariyev L.G. Organizational and economic mechanism of management of the region: formation, functioning, development: monograph. M: KNORUS, 2008. 352 pp.
7. Yakovenko N.N. To a question of the principles of formation of strategy of development of economy of the region // Regional economy: theory and practice. 2005. №12.
8. Kostyleva N.E. Innovative methods of increase of competitiveness of the cities, and regions. SPb.: IRE Russian Academy of Sciences, 2005.
9. Merkushov V.V. Integrated assessment of competitiveness of regions / Century V. Merkushov. URL: <http://sopssecretary.narod.ru> (date of the address 07.01.2012).

УДК 338.24

Красносельская Д.Х.

## БЕНЧМАРКИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ТЕРРИТОРИЙ\*

**Аннотация.** В статье раскрывается сущность ресурсно-процессно-результативного подхода к идентификации экономического профиля территорий с использованием концепции QFD, рассмотрена роль бенчмаркинга как инструмента совершенствования экономического профиля.

**Ключевые слова:** регион, бенчмаркинг, приоритетные направления развития, совершенствование, экономический профиль.

Krasnoselskaya D.Kh.

### BENCHMARKING AS A TOOL FOR IMPROVING THE ECONOMIC PROFILE OF TERRITORIES

**Abstract.** Article reveals the essence of a resource-process-result approach to the identification of an economic profile areas with the use concept of QFD, examined the role of benchmarking as a tool for perfection the economic profile.

**Keywords:** region, benchmarking, development priorities, perfection, economic profile.

Формирование современной системы управления региональным развитием в условиях турбулентной, неравновесной среды характеризуется необходимостью выработки эффективной стратегии развития территорий, способной адекватно отвечать на внешние агрессивные вызовы и угрозы, а также способствовать укреплению конкурентных преимуществ пространственных социально-экономических систем. Сущностной целью выработки стратегии развития территорий является выбор приоритетных направлений развития как ключевых элементов регионального стратегирования. Выбор приоритетных направлений развития территорий предполагает улучшение как отдельных структурных параметров экономики, так и системы региональных процессов в целом. На микроуровне одним из наиболее востребованных методов совершенствования деятельности организаций, ее ключевых бизнес-процессов является метод бенчмаркинга.

В рамках регионального подхода пространственный бенчмаркинг (ПБМ), по сути, представляет собой альтернативный инструмент стратегического планирования, при котором желаемый уровень социально-экономического развития рассматриваемого региона определяется исходя из достигнутого уровня региона-аналога. Использование инструментария ПБМ в практике регионального управления предполагает формирование целевой, точной и достоверной системы измерения, наиболее полно отражающей рассматриваемую проблемную область. Система измерений ПБМ представляет собой совокупность количественных индикаторов, число и состав которых определяются целевыми установками выполняемых аналитических разработок. В качестве примера системы измерений можно привести категорию «экономический профиль территории». При этом под «экономическим профилем» территории зарубежные ученые – регионалисты, как правило, понимают перечень показателей оценки социаль-

но-экономического положения территории [1-5 и др.], российские исследователи чаще всего отождествляют понятие экономический профиль территории с производственной специализацией региона [6-8 и др.]. С позиции регионального аспекта применения инструментария ПБМ экономический профиль территории представляет собой совокупность отличительных, ключевых параметров (бенчмарок) проблемной области, определяющей достижение территориями-аналогами приоритетных стратегических целей регионального развития.

Идентификация и анализ экономического профиля базируется на учете важнейших предпосылок и принципов исследуемой категории, в числе которых можно выделить:

1. В отличие от категории и показателей специализации экономический профиль территории должен характеризовать степень рациональности территориальной организации производства. В качестве «точки отсчета» (эталона, образа) рациональности могут быть приняты нормативные значения экономического профиля, идентифицируемые с помощью специального инструментария «профильного анализа» (использованием региона – аналога, бенчмаркинга, структурно-функционального анализа и т.д.).

2. Параметры экономического профиля территории при его первичном анализе могут быть определены по любому, доминантному для территории экономическому показателю, характеризующему как ресурсные, так и результативные стороны функционирования разноуровневых территориальных образований. В последующем детальной идентификации и оценке должны быть подвергнуты критичные для территории сектора экономики и сферы экономической деятельности, выявление которых может быть осуществлено исходя из задач, стоящих перед исследователем [9].

Рассмотрение первой из вышеперечисленных предпосылок обусловлено тем, что конкурентоспособность и устойчивое развитие региона в современных условиях хозяйствования зависит, прежде всего, от его роли в системе межрегиональных и субрегио-

\* Работа подготовлена при финансовой поддержке Российской гуманитарного научного фонда, проект № 12-12-02000а «Инструментарий идентификации экономического профиля территории и его использование для обоснования зон инновационного роста Республики Башкортостан».

нальных хозяйственных отношений, определяемой видами экономической деятельности, осуществляемых в рамках территории, rationalностью их пространственной организации и технологической комплементарностью с другими отраслями.

Что касается второго подхода, то в качестве доминантного показателя первичного анализа профиля территории автором предлагается использовать потоки добавленной стоимости между различными видами экономической деятельности с позиции производящих и потребляющих отраслей. Суть подхода заключается в выявлении тех видов экономической деятельности, расположение которых отвечает условиям обеспечения эффективной специализации, национальной структуры экономических взаимосвязей, т.е. обладающих эффектом технологической взаимодополнимости. Структурные показатели добавленной стоимости ключевых видов экономической деятельности территории определяют потенциал территории с позиции встраивания в национальные и глобальные цепочки добавленной стоимости, а также генерации собственных (локально-ориентированных) цепочек добавленной стоимости на основе привлечения дополнительных источников финансирования, создания инновационных продуктов, услуг. Универсальный характер показателя добавленной стоимости позволяет, как минимум, выявить следующие направления рефрагментации экономического пространства: во-первых, повышение роли и объема добавленной стоимости ключевых отраслей специализации региона; во-вторых, изменение состава участников (выбытие, появление новых, перегруппировка) и/или трансформация цепочки добавленной стоимости в целом.

С учетом выше рассмотренных подходов автором предлагается следующая модель идентификации экономического профиля территории, базирующаяся на учете двух основных положений.

Во-первых, принятие ресурсно-процессно-результативного подхода при формализации задачи идентификации профиля территории. Суть данного подхода заключается в комплексном учете:

а) источников развития, в качестве которых выступают индикаторы добавленной стоимости ключевых видов экономической деятельности региона в системе глобальных и локальных цепочек создания стоимости;

б) процесса развития, выражаемого спектром динамических параметров (темпами роста, и др.) различных сфер и секторов функционирования региона;

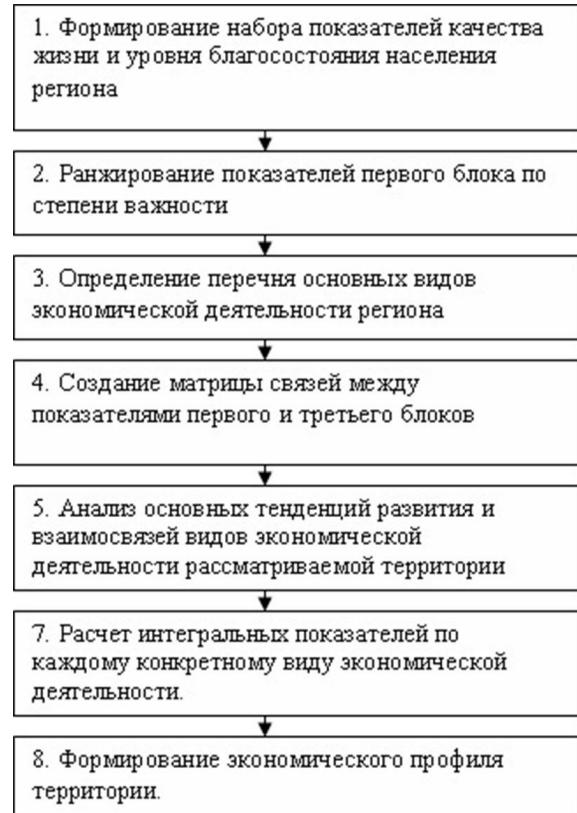
в) результирующих характеристик развития, представленных показателями качества жизни и уровня благосостояния населения территории.

Важным и необходимым условием процедуры идентификации является взаимосвязанность индикаторов профиля, характеризующих источники и результаты развития территориальных образований, поскольку учет данного условия позволит выявить обратную связь между «входами» и «выходами» ключевых процессов рассматриваемой предметной области, осуществить переход к процессно-ориентированной модели управления.

Для реализации этого условия нами предлагается использовать метод структурирования функции качества (QFD). В основе QFD лежит использование серии матриц, так называемых «домов качества» (houses of quality), позволяющих на уровне первичных хозяйствующих субъектов увязывать требования потребителей к уровню качества с параметрами продукта, параметры продукта с инженерными характеристиками компонентов, характеристики компонентов с производственными операциями, а производственные операции с требованиями производства [10]. В случае идентификации профиля региона будем считать, что регион – это товар, население региона – потребитель, требования потребителей – перечень важнейших социальных показателей, отражающих общий уровень качества жизни и «комфортности» проживания населения на данной территории, инженерные характеристики (параметры продукта) – индикаторы добавленной стоимости ключевых видов экономической деятельности региона.

Использование такого подхода позволит выявить те виды деятельности, успешное развитие которых в наибольшей степени будет способствовать повышению качества жизни и уровню благосостояния населения региона.

Общий механизм взаимосвязи исходных и результирующих характеристик развития при идентификации экономического профиля территории на основе концепции QFD представлен на **рис. 1**.



**Рис.1. Механизм взаимосвязи между источниками и результатами развития при формировании экономического профиля региона с использованием концепции QFD**

Ключевым элементом механизма является матрица взаимосвязей между показателями социальной составляющей регионального развития и видами экономической деятельности, осуществляющейся в рамках территории. В столбцах данной матрицы расположены показатели социального развития территории, в строках – индикаторы видов экономической деятельности. Рассмотрим механизм расчета интегрального показателя для каждого конкретного вида экономической деятельности.

Пусть  $i$  – номер показателя первого блока ( $i=1,2,\dots,n$ ),  $j$  – номер вида экономической деятельности ( $j=1,2,\dots,m$ ),  $W_i$  – вес  $i$ -го показателя первого блока,  $D_{ij}$  – величина коэффициента корреляции на пересечении строки, соответствующей  $i$ -му показателю первого блока и столбца, соответствующего  $j$ -му виду экономической деятельности. Тогда величина интегрального показателя для каждого отдельного  $j$ -го вида экономической деятельности определяется по формуле

$$R_{ij} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot D_{ij}.$$

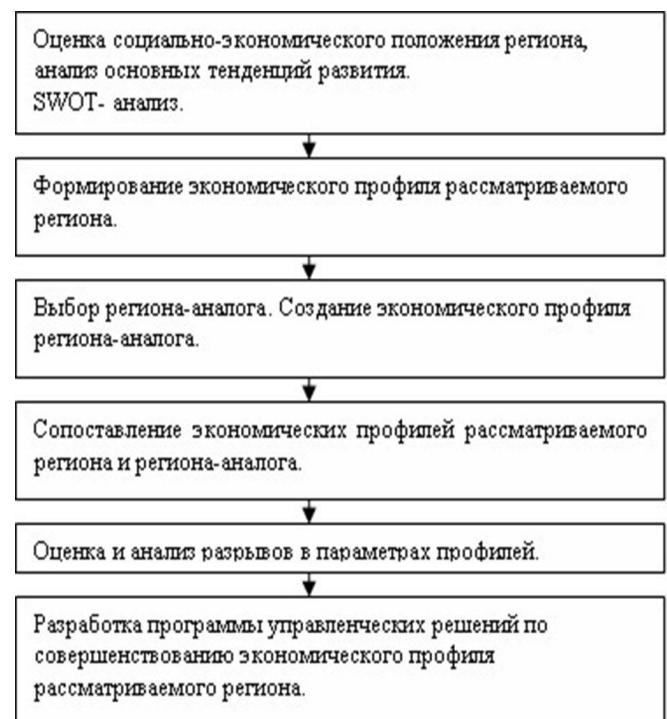
Для каждого вида экономической деятельности определяется числовая величина интегрального показателя, исходя из числовых значений которого в индикативную зону экономического профиля включают виды экономической деятельности, оказывающие наибольшее положительное влияние на показатели качества жизни и уровня благосостояния населения региона.

Во-вторых, использование концепции бенчмаркинга в качестве основополагающего инструментария совершенствования экономического профиля территории. Решение данной задачи сопряжено с определением конкретных приоритетных направлений развития, что в свою очередь связано со следующими практическими проблемами:

1. Невозможность одновременного «продвижения» множества
2. Перспективных направлений регионального развития ввиду ограниченности трудовых, финансовых и временных ресурсов. В связи с этим необходим выбор нескольких оптимальных векторов развития.
3. Необходимость моделирования наиболее точных, адекватных хозяйственной практике и управлению числовых показателей, описывающих достижение выбранных траекторий развития.
4. Разработка механизма достижения выбранных приоритетов территориального развития.
5. Необходимость оценки реального потенциала роста выбранных направлений, т.е. «разрыва» между текущим и желаемым уровнем развития.

Использование инструментария бенчмаркинга позволяет на основе анализа успешного опыта развития региона-аналога, либо прогнозных, нормативных значений экономического профиля самого рассматриваемого региона выявить оптимальные направления развития, установить «разрывы» между фактическими

и «эталонными» значениями показателей и их влияние на показатели социального характера. Кроме того, бенчмаркинг позволяет не только определить объемные и структурные параметры приоритетных видов экономической деятельности, но и сформировать программу для достижения уровня эффективно функционирующих территорий-аналогов. С учетом вышеприведенных аргументов представляется целесообразным использование инструментария бенчмаркинга при решении задачи совершенствования профиля пространственных социально-экономических систем. Общая схема совершенствования профиля территории с использованием инструментария бенчмаркинга представлена на **рис. 2**.



**Рис 2. Общая схема совершенствования экономического профиля территории с использованием инструментария бенчмаркинга**

В заключение можно отметить, что формирование экономического профиля региона-аналога является ключевым этапом ПБМ. С одной стороны, на основе анализа данных такого характера происходит ранжирование регионов по их уровню развития и определяется эффективность проводимой региональной политики, регионального планирования и прогнозирования. С другой стороны, профиль территории, характеризуемый различными параметрами, представляет собой количественное выражение результатов конкретных региональных процессов на выходе. Использование параметров профиля в качестве «отправной» точки для исследования региональных процессов позволит осуществить переход от анализа структурных параметров регионального развития к процессно-ориентированной модели управления, что в свою очередь соответствует оригинальным методологическим основам концепции бенчмаркинга.

## Список литературы

- | Список литературы   | References  |
|---|---|
| 1. Regional economic profile. Mackay-ISAAK-Whitsunday. March 2011.20 P. URL: <a href="http://www.mwredc.org.au/images/stories/regionalprofile/fullreport/mwi%20regional%20profile%20march%202011.pdf">http://www.mwredc.org.au/images/stories/regionalprofile/fullreport/mwi%20regional%20profile%20march%202011.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012).  | 1. Regional economic profile. Mackay-ISAAK-Whitsunday. March 2011.20 P. URL: <a href="http://www.mwredc.org.au/images/stories/regionalprofile/fullreport/mwi%20regional%20profile%20march%202011.pdf">http://www.mwredc.org.au/images/stories/regionalprofile/fullreport/mwi%20regional%20profile%20march%202011.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012).  |
| 2. Economic profile. Sacramento region. 2009/2010.52P. URL: <a href="http://www.rocklin.ca.us/civica/filebank/blobdload.asp?blobID=12536">http://www.rocklin.ca.us/civica/filebank/blobdload.asp?blobID=12536</a> (дата обращения: 29.12.2012).   | 2. Economic profile. Sacramento region. 2009/2010.52P. URL: <a href="http://www.rocklin.ca.us/civica/filebank/blobdload.asp?blobID=12536">http://www.rocklin.ca.us/civica/filebank/blobdload.asp?blobID=12536</a> (дата обращения: 29.12.2012).   |
| 3. Katherine. Economic profile. 2010. P. 40. URL: <a href="http://www.nt.gov.au/d/Content/File/p/rd/Katherine/ KEP.pdf">http://www.nt.gov.au/d/Content/File/p/rd/Katherine/ KEP.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012)/   | 3. Katherine. Economic profile. 2010. P. 40. URL: <a href="http://www.nt.gov.au/d/Content/File/p/rd/Katherine/ KEP.pdf">http://www.nt.gov.au/d/Content/File/p/rd/Katherine/ KEP.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012).   |
| 4. Industry and region economic profile. Centre for agricultural and Regional Economics and Gillespie Economics. NSW Western regional assessments. September 2002. P. 232. URL: <a href="http://www.environment.nsw.gov.au/resources/forestagreements/wra28.pdf">http://www.environment.nsw.gov.au/resources/forestagreements/wra28.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012).   | 4. Industry and region economic profile. Centre for agricultural and Regional Economics and Gillespie Economics. NSW Western regional assessments. September 2002. P. 232. URL: <a href="http://www.environment.nsw.gov.au/resources/forestagreements/wra28.pdf">http://www.environment.nsw.gov.au/resources/forestagreements/wra28.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012).   |
| 5. Economic profile: northern California region. October 2008. URL: <a href="http://www.co.mendocino.ca.us/econdev/pdf/Eco%20Profile%2008.pdf">http://www.co.mendocino.ca.us/econdev/pdf/Eco%20Profile%2008.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012).   | 5. Economic profile: northern California region. October 2008 URL: <a href="http://www.co.mendocino.ca.us/econdev/pdf/Eco%20Profile%2008.pdf">http://www.co.mendocino.ca.us/econdev/pdf/Eco%20Profile%2008.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012).  |
| 6. Магомадов Э.М., Решиев С.С. Оценка уровней экономического развития, специализации и комплексности развития хозяйства региона // Вестник ЮРГТУ (НПИ). 2012. №1. С. 75-83.   | 6. Magomadov E.M., Reshiyev S.S. Assessment of the levels of economic development, specialization and complexity of the development region's economy. The Bulletin of Yuzhnouralsky state university. 2012. №1. P. 75-83.   |
| 7. Грязнова М.А. Муллагалеева З.З. Анализ пропорций социально-экономического развития старопромышленного региона (на примере Кемеровской области) // Вестник Томского государственного университета. 2009. №322. С. 153-156.  | 7. Gryaznova M.A., Mullagaleyeva Z.Z. Analysis of the proportions of socio-economic development of old industrial region (for example, the Kemerovo region). The Bulletin of Tomsk state university. 2009. №322. P. 153-156.  |
| 8. Трофимова О.М. Формирование и развитие кластеров в экономике старопромышленного региона: автореф. дис. ...канд. экон. наук. Челябинск, 2012. 20 с. URL: <a href="http://www.dissters.ru /avtoreferat-kandidatskihdissertatsii1 /a654.php">http://www.dissters.ru /avtoreferat-kandidatskihdissertatsii1 /a654.php</a> (дата обращения: 29.12.12).  | 8. Trofimova O.M. The formation and development of clusters in old industrial economy of the region. avtoref. dis. ...cand. econ. science. Chelyabinsk, 2012. 20 p. // URL: <a href="http://www.dissters.ru /avtoreferat-kandidatskihdissertatsii1 /a654.php">http://www.dissters.ru /avtoreferat-kandidatskihdissertatsii1 /a654.php</a> (дата обращения 29.12.12).  |
| 9. Климова Н.И. Экономический профиль территории: сущность и экономическое содержание. URL: <a href="http://grant.rfh.ru/a=@2F@3Fbatch_apply_to_all@3D16840528@26context@3D_anonymous~@26field@3De_nb_filew@26in_db@3D1@26key_vals@3D_1fpG00JEnpx0E00ks2aLb00~~@26subop@3Dui@26table@3Dmain@2Eenpublication@26target@3Dlob.pdf">http://grant.rfh.ru/a=@2F@3Fbatch_apply_to_all@3D16840528@26context@3D_anonymous~@26field@3De_nb_filew@26in_db@3D1@26key_vals@3D_1fpG00JEnpx0E00ks2aLb00~~@26subop@3Dui@26table@3Dmain@2Eenpublication@26target@3Dlob.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012). | 9. Klimova N.I. Economic profile of the area: the nature and content of economic. // URL: <a href="http://grant.rfh.ru/a=@2F@3Fbatch_apply_to_all@3D16840528@26context@3D_anonymous~@26field@3De_nb_filew@26in_db@3D1@26key_vals@3D_1fpG00JEnpx0E00ks2aLb00~~@26subop@3Dui@26table@3Dmain@2Eenpublication@26target@3Dlob.pdf">http://grant.rfh.ru/a=@2F@3Fbatch_apply_to_all@3D16840528@26context@3D_anonymous~@26field@3De_nb_filew@26in_db@3D1@26key_vals@3D_1fpG00JEnpx0E00ks2aLb00~~@26subop@3Dui@26table@3Dmain@2Eenpublication@26target@3Dlob.pdf</a> (дата обращения: 29.12.2012). |
| 10. Пустов Л.Ю. Обзор современных методик сравнения конкурирующих систем при разработке новых продуктов. URL: <a href="http://www.metodolog.ru/00919/00919.html">http://www.metodolog.ru/00919/00919.html</a> (дата обращения: 29.12.2012).   | 10. Pustov L.Yu. Overview of modern methods of comparison of competing systems to develop new products // URL: <a href="http://www.metodolog.ru/00919/00919.html">http://www.metodolog.ru/00919/00919.html</a> (request date: 29.12.2012).  |

УДК 332.05:005

Пиньковецкая Ю.С.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКИХ СТРУКТУР В РЕГИОНАХ

**Аннотация.** В статье приведены производственная функция для совокупности предпринимательских структур субъектов Российской Федерации и оптимальная траектория расширения. Представлен алгоритм оценки эффективности предпринимательства с использованием этих зависимостей, а также результаты анализа, проведенного на его основе по данным за 2010 год.

**Ключевые слова:** предпринимательские структуры, производственная функция, оборот, инвестиции, заработка плата, кластеры, анализ эффективности.

Pinkovetskaya J.S.

### USING THE PRODUCTION FUNCTIONS FOR EVALUATING THE PERFORMANCE OF BUSINESS ENTREPRENEURIAL STRUCTURES IN THE REGIONS

**Abstract.** The article presents the production function for a set of entrepreneurial structures of the Russian Federation and the optimal line of expansion. Discuss the algorithm for evaluating the effectiveness of entrepreneurship with the use of these relationships, as well as the results of the analysis carried out on this basis according to data for 2010 year.

**Keywords:** entrepreneurial structures, production function, turnover, investment, wage, clusters, analysis of effectiveness.

Малое и среднее предпринимательство в нашей стране получило в последние годы значительное развитие. В этом секторе экономики страны в 2010 году работало более 23 млн человек. Общее количество предпринимательских структур составило около 4,5 млн. Объем производства продукции и услуг достиг 30,8 трлн руб. [1]. Вместе с тем уровень развития

предпринимательства в различных регионах существенно отличается, что обусловлено как объективными особенностями формирования этого сектора экономики, так и работой региональных органов по регулированию и поддержке предпринимательской деятельности. Сложившаяся в регионах значительная дифференциация выдвигает в число актуальных про-

блему оценки эффективности этой деятельности и научного обоснования рекомендаций по ее совершенствованию. Важность решения указанной проблемы подтверждается, в частности, указом Президента РФ от 10 сентября 2012 г. № 1276 [2].

Исследования основывались на рассмотрении трех типов предпринимательских структур – малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей в качестве единого структурно-системного комплекса, называемого в дальнейшем предпринимательские структуры или МСИП. Целесообразность такого подхода обусловлена тем, что для рассматриваемых типов структур характерны одинаковые основные виды экономической деятельности, они конкурируют на одних и тех же рынках, имеют во многом аналогичную технологию производства, ведут рисковую деятельность. При изменении институциональных и экономических условий функционирования может происходить переход указанных структур из одного типа в другой.

В процессе исследований была предложена следующая гипотеза: оценка эффективности деятельности предпринимательских структур в регионах возможна с использованием производственной функции и основанных на ней зависимостей. Отметим, что предложенная автором методика построения производственных функций, на примере совокупности малых предприятий, была рассмотрена в статье, опубликованной в «Вестнике МГТУ им. Г.И. Носова» [3]. Поэтому в настоящей статье представлены в основном методические аспекты анализа деятельности предпринимательских структур.

Исследования включали следующие этапы:

1. Разработка производственной функции по данным совокупности МСИП за 2010 год.
2. Построение зависимостей, описывающих взаимосвязь факторов.
3. Анализ эффективности деятельности предпринимательских структур в субъектах.
4. Формирование предложений и рекомендаций по итогам анализа.

При построении производственной функции в качестве исходных данных были использованы показатели, характеризующие совокупности предпринимательских структур во всех субъектах Российской Федерации. Рассматривались данные по 21 республике, 9 краям и 46 областям страны. При этом информационная база была создана на основе материалов сплошного наблюдения за деятельностью субъектов малого и среднего предпринимательства Федеральной службы государственной статистики [1]. В процессе исследования использовались методы логического, экономико-статистического анализа, математической статистики и эконометрики. Для решения поставленных задач и обработки информации применены компьютерные программы «Statistica», «Microsoft Excel», «Mathcad».

В процессе исследований построена производственная функция за 2010 год, которая отражает зависимость объема производства (оборота) совокупности малых, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей от двух факторов: инвестиций в

основной капитал и заработной платы работников. То есть речь идет о производственной функции, описывающей совокупности предпринимательских структур по всем субъектам страны с численностью работников до 250 человек вне зависимости от их организационно-правовой формы.

Такая функция, построенная по данным сплошного статистического наблюдения за 2010 год, имеет следующий вид:

$$y(x_1, x_2) = 6,431 \cdot x_1^{0,282} \cdot x_2^{0,819}, \quad (1)$$

где  $y$  – оборот совокупности предпринимательских структур, млрд руб.;  $x_1$  – инвестиции в основной капитал предпринимательских структур, млрд руб.;  $x_2$  – заработная плата работников предпринимательских структур, млрд руб.

Полученная функция (1) имеет высокое качество. Зависимость (1) статистически значима (расчетное значение критерия Фишера-Сnedекора равно 1059,89) и является тесной (коэффициент детерминации равен 0,967, а коэффициент корреляции – 0,983).

С использованием полученной функции были разработаны зависимости, отражающие взаимосвязь между ее факторами для фиксированных значений оборота: изокванты, изокости и траектория расширения.

Уравнение изокванты для производственной функции (1) имеет вид

$$x_2 = \frac{y^{1,221}}{9,703 \cdot x_1^{0,344}}. \quad (2)$$

К каждой из изоквант были построены изокости. Изокоста представляет собой касательную к изоквантам в точке, соответствующей минимальному суммарному значению обоих факторов производственной функции:

$$x_2 = \frac{y^{1,221}}{9,703 \cdot (x_k)^{0,344}} - \frac{0,035 \cdot y^{1,221}}{(x_k)^{1,344}} \times \\ \times (x_1 - x_k), \quad (3)$$

где  $x_k$  – значение инвестиций в основной капитал в точке касания уравнений изоквант и изокости.

Точки касания изоквант и изокост образуют траекторию расширения [4-6], называемую иначе оптимальной траекторией. Учитывая указанное выше, оптимальная траектория показывает наилучшие соотношения факторов для каждого значения объема производства.

Оптимальная траектория, отражающая зависимость заработной платы от инвестиций, с учетом принятых выше условных обозначений, имеет вид

$$x_2(x_1) = 2,94x_1 + 0,0013. \quad (4)$$

Условные обозначения аналогичны приведенным выше.

Решение задачи анализа эффективности деятельности МСИП основывалось на сравнении фактиче-

ских значений инвестиций в основной капитал и заработной платы работников по совокупности предпринимательских структур каждого субъекта Российской Федерации с оптимальным значением этих факторов, определяемым на основе производственной функции и оптимальной траектории расширения.

Авторский алгоритм решения этой задачи был реализован в следующей последовательности:

1. По МСИП каждого субъекта Российской Федерации, в соответствии с построенной производственной функцией (1) и оптимальной траекторией расширения (4), были оценены «расчетные» величины инвестиций в основной капитал и заработной платы работников, обеспечивающих достижение фактического оборота этих предприятий.

2. «Расчетные» значения факторов производства МСИП сравнивались с их фактической величиной, отражающей реальные затраты.

3. На основе кластерного анализа, по величине относительных отклонений фактических значений факторов от «расчетных», была произведена группировка субъектов Российской Федерации и сформированы выводы о направлениях повышения эффективности предпринимательства каждой из выделенных групп.

Расчеты основывались на следующих модифицированных функциях:

$$y^\phi = 6,431 \cdot (x_1^o)^{0,282} \cdot (x_2^o)^{0,819}; \quad (5)$$

$$x_2^o(x_1^o) = 2,94x_1^o + 0,0013, \quad (6)$$

где  $y^\phi$  – фактически достигнутый оборот МСИП по конкретному субъекту за год, млрд руб.;  $x_1^o$  – оптимальное значение инвестиций в основной капитал по субъекту за год, млрд руб.;  $x_2^o$  – оптимальное значение заработной платы работников по субъекту за год, млрд руб.

Для нахождения оптимальных величин  $x_1^o$  и  $x_2^o$  была построена зависимость оборота МСИП только от одного оптимального значения фактора:

$$\begin{aligned} y^\phi(x_1^o) &= 7,766 \cdot (x_1^o)^{0,139} \times \\ &\times (6,7098 \times x_1^o + 0,0041)^{0,930}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из зависимости (7) вычислялись значения инвестиций в основной капитал, а по ним определялись оптимальные значения заработной платы работников.

Далее проводился расчет относительных отклонений факторов по следующим формулам:

$$x_1^{OTKL} = \frac{(x_1^\phi - x_1^o)}{(x_1^o + x_2^o)}; \quad (8)$$

$$x_2^{OTKL} = \frac{(x_2^\phi - x_2^o)}{(x_1^o + x_2^o)}, \quad (9)$$

где  $x_1^{OTKL}$  – отклонение фактических значений инвестиций в основной капитал МСИП за год от их оптимальных значений;  $x_2^{OTKL}$  – отклонение фактических значений заработной платы работников МСИП за год от их оптимальных значений;  $x_1^\phi$ ,  $x_1^o$  – соответственно фактические и оптимальные значения инвестиций в основной капитал МСИП;  $x_2^\phi$ ,  $x_2^o$  – соответственно фактические и оптимальные значения заработной платы работников МСИП.

Затем по относительным отклонениям выполнялась оценка эффективности функционирования МСИП в субъектах Российской Федерации. Сложность анализа заключалась в том, что полученные отклонения фактических величины факторов от их оптимальных значений для разных субъектов различны. Причем по одному фактору отклонение может быть велико, а по другому – мало. Вместе с тем, группировка субъектов Российской Федерации, основанная на сопоставлении эффективности деятельности МСИП, требует одновременного учета двух этих факторов. Поэтому в процессе исследования проводился кластерный анализ, представляющий собой объединение аналогичных объектов (или объектов, имеющих аналогичные характеристики) в группы (кластеры). Кластерный анализ предполагает выполнение ряда вычислительных процедур, используемых при создании классификаций [7-9]. В процессе работы были рассмотрены различные методы объединения рассматриваемых субъектов в кластеры. Более высокое качество при этом было достигнуто при использовании метода k-средних. Результаты кластерного анализа рассмотрены далее.

Было выделено десять кластеров, в которые вошли все субъекты Российской Федерации. В таблице представлены результаты группировки субъектов страны по кластерам.

Наименьшие отклонения от оптимальной траектории отмечены для восьмого (11 субъектов) кластера. Чуть большие отклонения имеют предпринимательские структуры в 9 субъектах шестого кластера. Таким образом, к оптимальной траектории достаточно близки МСИП в 20 субъектах, которые характеризуются высокой эффективностью использования ресурсов.

В 24 субъектах страны имеются небольшие отклонения фактических значений от рассчитанных по оптимальной траектории, что свидетельствует об относительно эффективном использовании в них ресурсов. В частности, это относится к третьему кластеру (8 субъектов). В эту же группу можно включить субъекты, входящие во второй (7 субъектов) и седьмой (9 субъектов) кластеры, для которых характерно превышение заработной платы работников при недостаточной величине инвестиций в основной капитал. Для субъектов, входящих в первый, пятый и десятый кластеры, характерно несбалансированное использование ресурсов. При этом в первом кластере (6 субъектов) отмечено превышение расходов по заработной плате работников при недостаточной величине инвестиций в основной капитал. Для 15 субъектов пятого класте-

ра, при близком к оптимальному значению уровня заработной платы работников, имеется явный недостаток инвестиций. По 5 субъектам десятого кластера характерен недостаточный уровень инвестиций и заработной платы, поскольку в этих субъектах преобладают такие виды экономической деятельности, как строительство, обрабатывающие производства, транспорт и связь. Для субъектов, входящих в четвертый и девятый кластеры, имеет место неэффективное использование ресурсов, когда при высоком уровне заработной платы и инвестиций объемы производства МСИП существенно ниже оптимальных значений.

### Группировка субъектов Российской Федерации по кластерам

Номер кластера	Субъект Российской Федерации
1	Архангельская, Кемеровская, Магаданская области, Республика Саха (Якутия), Камчатский, Красноярский края
2	Волгоградская, Московская, Оренбургская, Томская области, Республики Башкортостан, Татарстан, Хакасия
3	г. Санкт-Петербург, Ивановская, Кировская, Курская, Нижегородская, Новосибирская, Рязанская области, Республика Марий Эл
4	Астраханская, Тюменская области
5	Владимирская, Калининградская, Новгородская, Омская, Пензенская, Ростовская, Самарская, Саратовская, Тверская, Тульская, Челябинская области, Республики Чувашская, Приморский, Ставропольский, Хабаровский края
6	Вологодская, Иркутская, Калужская, Курганская, Псковская, Свердловская области, Удмуртская Республика, Краснодарский, Пермский края
7	г. Москва, Амурская, Мурманская, Сахалинская области, Республики Бурятия, Карелия, Коми, Тыва, Забайкальский край
8	Белгородская, Воронежская, Липецкая, Орловская, Ульяновская области, Республики Адыгея, Кабардино-Балкарская, Калмыкия, Мордовия, Северная Осетия-Алания, Алтайский край
9	Ленинградская, Тамбовская области, Республики Алтай, Дагестан
10	Брянская, Костромская, Смоленская, Ярославская области, Карачаево-Черкесская Республика

Проведенными исследованиями выдвинутая гипотеза была подтверждена. Показана возможность использования производственных функций и вытекающих из них закономерностей для анализа эффективности функционирования МСИП. Проведенный вычислительный эксперимент позволил оценить уровень использования таких ресурсов, как инвестиции в ос-

новной капитал и заработка плата работников предпринимательскими структурами в каждом из субъектов страны. Сформированы группы субъектов с различным уровнем эффективности рассматриваемого сектора экономики. Определены пути перевода совокупностей МСИП в субъектах на траектории развития, близкие к оптимальным.

Представленные выше методический подход и алгоритм могут широко использоваться как для мониторинга уровня, достигнутого предпринимательскими структурами в субъектах страны, так и для обоснования наиболее эффективных пропорций между инвестициями в основной капитал и заработной платой работников, необходимых для достижения целевых показателей МСИП, формирования планов и прогнозов развития предпринимательских структур.

### Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики. Предварительные итоги сплошного наблюдения за деятельностью субъектов малого и среднего предпринимательства в 2010 году. URL: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/prom/small\\_business/pred\\_itog.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/small_business/pred_itog.htm) (дата обращения: 10 апреля 2012 года).
2. Об оценке эффективности деятельности руководителей федеральных органов исполнительной власти и высших должностных лиц (руководителей высших исполнительных органов государственной власти) субъектов Российской Федерации по созданию благоприятных условий ведения предпринимательской деятельности: Указ Президента РФ № 1276 от 10.09.2012 г.
3. Пиньковецкая Ю.С. Экономико-математическое моделирование оборота малых предприятий // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. №1. С. 88-91.
4. Пиндайк Р.С., Рубинфельд Д.Л. Микроэкономика. М.: ДЕЛО, 2001. 808 с.
5. Хайман Д.Н. Современная микроэкономика: анализ и применение. М.: Финансы и статистика, 1992. 384 с.
6. Варзиан Х.Р. Микроэкономика. Промежуточный уровень. Современный подход. М.: ЮНИТИ, 1997. 767 с.
7. Дюран Н., Одэлл П. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 128 с.
8. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка, М.С. Олдендерфер, Р.К. Блэшфилд. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
9. Мандель И.Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988. 176 с.

### References

1. Federal Agency of the state statistics. Preliminary results of the continuous monitoring of the activities of subjects small and medium entrepreneurship in 2010 year. Accessed: 10 April 2012 year. [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/prom/small\\_business/pred\\_itog.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/small_business/pred_itog.htm)
2. About performance evaluation of effectiveness activity heads of federal executive authorities and senior officials (heads of the highest executive authorities of state power) of subjects of the Russian Federation on the creation of good conditions of doing entrepreneurship activity: the Presidential of the Russian Federation Decree № 1276 of 10.09.2012.
3. Pinkovetskaya J.S. Economic-mathematical modeling turnover of small enterprises // Vestnik Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2012. №1. P. 88-91.
4. Pindyck R.S., Rubinfeld D.L. Microeconomics. M.: DELO, 2001. 808 p.
5. Haiman D.N. Modern microeconomics: analysis and use. M.: Finance and statistic, 1992. 384 p.
6. Varian H.R. Microeconomics. Intermediate level. Modern approach. M.: UNITI, 1997. 767 p.
7. Duran N., Odell P. Cluster analysis. M.: Statistic, 1977. 128 p.
8. Kim J.-O., Muller C.Y., Klekka U.R., Oldenfer M.S., Bleshfield R.K. Factor, discriminant and cluster analysis. M.: Finance and statistic, 1989. 215 p.
9. Mandel E.D. Cluster analysis. M.: Finance and statistic, 1988. 176 p.

# ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ. ОБРАЗОВАНИЕ

УДК 377.4

Варжапетян А.Г., Маркелова Н.В.

## УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ В СФЕРЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Аннотация.** На примере курсов дополнительного профессионального образования обнаружен ряд проблем, одной из которых является риск для обеих сторон: кто предоставляет образовательные услуги и кто их получает. Проанализированы риски в области дополнительного профессионального образования и система их оценки. Представлены схема процесса управления рисками и возможные методы реагирования.

**Ключевые слова:** потребители образовательных услуг, заказчики образовательных услуг, образовательный проект, риски дополнительного профессионального образования, критерии оценки рисков.

Varzhapetian A.G., Markelova N.V.

### RISK MANAGEMENT IN THE FIELD OF ADDITIONAL PROFESSIONAL EDUCATION PROJECTS

**Abstract.** On the example of Continuing Professional Education courses was detected a number of problems, one of them is the risk for both parties: who provides educational services, and who receives them. This article discusses the risks in the area of Continuing Professional education and system of their assessment. A scheme of the risk management process and the possible methods of responding are presented.

**Keywords:** Consumers of Educational Services, Customers of Educational Services, Educational Project, Risks APE, Criteria for Risk Assessment.

Усложнение всех видов человеческой деятельности, вызванное неопределенностью, вариабельностью и стохастичностью факторов внешней среды, привело к возникновению большого числа новых видов рисков. Реакцией на это стало появление группы стандартов по риск-менеджменту [1-3], подготовленных ИСО и регламентирующих идеологию,terminologию и методы исследования и нивелирования рисков. Очевидно, что риски присущи и сфере образования, в том числе и дополнительного.

Из года в год растет значение дополнительного профессионального образования (ДПО), увеличивается количество курсов, институтов и факультетов повышения квалификации. Это обусловлено важностью профессионализма не только для самих людей, но и для предприятий, организаций, где эти специалисты работают.

Дополнительное профессиональное образование обеспечивает работнику конкурентоспособность и мобильность на рынке труда, который насыщен молодыми специалистами «со свежими знаниями». Часто людей не устраивает собственный социальный статус, и они рассчитывают после обучения занять более значимую должность и иметь более высокую зарплату, сделать карьеру. Как и в любой сфере, есть определенного характера риски. Они проявляются везде по-разному. Сфера дополнительного профессионального образования, то есть ее система подготовки, переподготовки специалистов определенного профиля и повышения квалификации, не является исключением из правил. При этом с точки зрения наличия риска особый интерес представляет деятельность вуза в кон-

тексте качества образования (качества подготовки специалистов). Это достаточно специфическая область, для которой характерны свои особые риски, отличные от тех, которые традиционно рассматриваются в теории риск-менеджмента. В основе риск-менеджмента лежит целенаправленный поиск, создание риск-портфелей [4], организация работы по снижению степени риска, искусство получения и увеличения дохода (выигрыша, прибыли) в неопределенной хозяйственной ситуации.

Необходимо разрабатывать методики своевременного определения величины этих рисков и управления ими [5], а также учитывать их при создании целевых программ [6]. Но прежде чем приступить к активным корректирующим и предупреждающим действиям, необходимо идентифицировать и классифицировать имеющиеся риски [7-10].

Мы выделяем специфические для ДПО группы рисков с определенным набором критериев (**табл. 1**), с помощью которых можно рассчитать риски.

Используя **табл. 1**, можно оценить риск деятельности ДПО и принять решение о дальнейших действиях. Также существует определенный набор рисков организаций, направляющих своих сотрудников на обучение/повышение квалификации.

Имея определенный набор групп рисков и зная их составляющие, облегчается задача их анализа, расчета и управления ими. Ниже на **рис. 1** приводится схема процесса управления рисками в сфере дополнительного профессионального образования и **табл. 2**, описывающая основные методы управления рисками.

Оценка рисков ДПО

Таблица 1

№	Риски ДПО	Составляющие для расчета риска	Расчет риска
1	Риск недостаточного финансирования образовательной деятельности	Необходимо учитывать: весовые коэффициенты; риск недостатка бюджетного финансирования; риск недостатка других источников финансирования	$P_{\phi} = AP_{\phi} + BP_{\phi}$ , где $A$ и $B$ – некоторые весовые коэффициенты; $P_{\phi}$ – риск недостатка бюджетного финансирования; $P_{\phi}$ – риск недостатка других источников финансирования
2	Риск недостатка квалифицированных педагогических кадров	Необходимо учитывать: число преподавателей с недостаточной квалификацией на читаемую дисциплину; общее число преподавателей в вузе	$P_{nkp} = \frac{N_{nkp}}{N_p}$ , где $N_{nkp}$ – число преподавателей с недостаточной квалификацией; $N_p$ – общее число преподавателей в вузе
3	Риск недостаточного информационного обеспечения научно-образовательного процесса	Необходимо учитывать на одного слушателя: недостаток скоростных каналов доступа к информационным ресурсам; число скоростных каналов доступа к информационным ресурсам; недостаток литературы по определенной дисциплине; необходимое количество литературы по данной дисциплине; весовые коэффициенты; количество дисциплин или видов литературы	$P_{nio} = \frac{N_{nkd}}{N_{tkd}} + \sum_{i=1}^k A_i \cdot \frac{N_{nl_i}}{N_{l_i}}$ , где $N_{nkd}$ – количество недостающих скоростных каналов доступа к информационным ресурсам; $N_{tkd}$ – необходимое число скоростных каналов доступа к информационным ресурсам; $N_{nl_i}$ – количество недостающей литературы $i$ -го вида или по $i$ -й дисциплине; $N_{l_i}$ – необходимое количество литературы $i$ -го вида или по $i$ -й дисциплине; $A_i$ – весовой коэффициент; $k$ – число дисциплин или видов литературы
4	Риск несовершенства материально-технической базы	Необходимо учитывать: устаревшее оборудование определенного вида; количество необходимого оборудования на одного слушателя	1. $P_{no} = \sum_{i=1}^k A_i \cdot \frac{N_{uo_i}}{N_{tno_i}}$ , где $N_{uo_i}$ – количество устаревшего оборудования $i$ -го вида; $N_{tno_i}$ – количество имеющегося оборудования $i$ -го вида; $A_i$ – весовой коэффициент. 2. $P_{no} = \sum_{i=1}^k A_i \cdot \frac{N_{no_i}}{N_{to_i}}$ , где $N_{no_i}$ – количество недостающего оборудования $i$ -го вида; $N_{to_i}$ – количество необходимого оборудования $i$ -го вида
5	Риск несоответствия учебно-методического обеспечения современным требованиям	Необходимо учитывать на каждую дисциплину: количество несоответствий определенного объекта оценки; количество требований к каждому объекту оценки	$P_{pr} = \sum_{i=1}^k A_i \cdot \frac{N_{nq_i}}{N_{tq_i}}$ , где $N_{nq_i}$ – число несоответствий $i$ -го объекта оценки; $N_{tq_i}$ – число требований к $i$ -му объекту оценки
6	Риск отказа предприятий от сотрудничества с вузом	Необходимо учитывать: количество слушателей от предприятия – заказчика; время, затраченное на подготовку программы по заказанному направлению; количество необходимого оборудования на слушателя для прохождения практической подготовки	$P_{op} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot (C_{um} + C_{ao})$ , $C_{um}$ – стоимость разработки учебного модуля; $C_{ao}$ – стоимость аренды оборудования; $A_i$ – весовой коэффициент $i$ -го модуля; $n$ – количество модулей

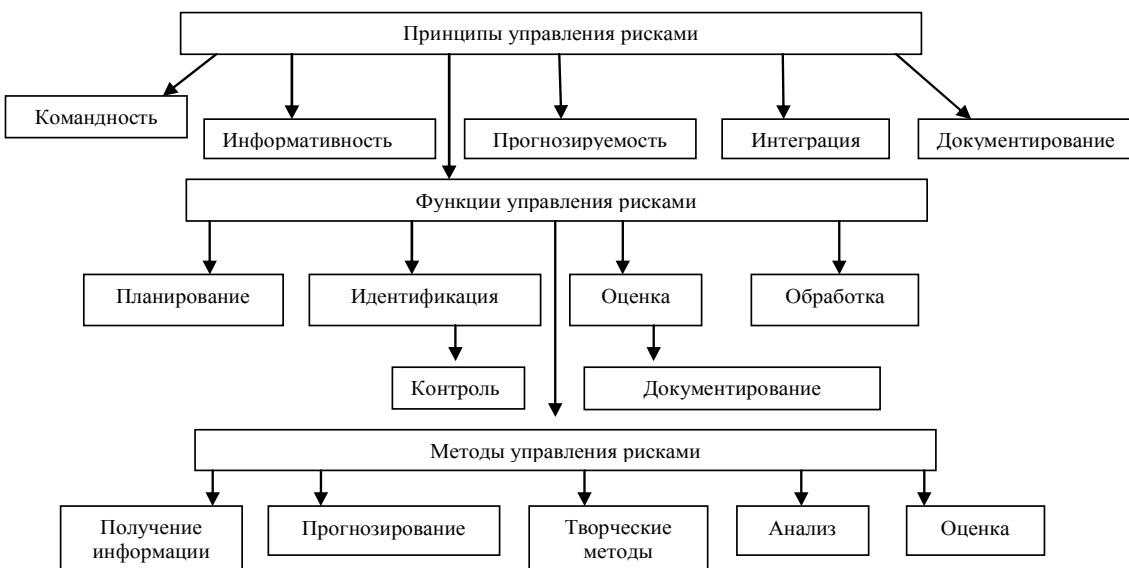


Рис. 1. Схема процесса управления рисками ДПО

Таблица 2

## Методы управления рисками

№	Категория	Метод	Краткое описание
1	Метод получения информации	Оценка рисков независимыми экспертами	Методы интервьюирования и/или анкетирования опытных специалистов по управлению рисками, которые выступают в роли экспертов и не являются участниками реализации оцениваемых проектов
2	Метод прогнозирования	Имитационное моделирование	Моделирование и анализ неопределенности в оценках основных показателей проектов (денежные и временные затраты)
3	Творческие методы	«Мозговая атака»	Дискуссии, на которых специалистами по управлению рисками с использованием методических пособий обсуждаются все аспекты данного механизма и осуществляется планирование, идентификация рисков, их оценка, обработка, контроль и документирование
4	Методы анализа	Контрольные списки источников рисков	Структурированные списки источников рисков, в основе которых лежит историческая информация об инцидентах, произошедших при реализации предыдущих проектов
5	Методы оценки	Калькуляция вероятных потерь	Методы, основанные на расчете математического ожидания убытка для каждого риска в отдельности и по проекту в целом

На базе представленной **табл. 1** (оценка рисков ДПО), схемы процесса управления рисками ДПО (см. **рис. 1**), а также предложенных методов для управления рисками и принятия стратегических решений в отношении дальнейших действий была разработана процедура управления оценкой рисков образовательных проектов ДПО (**рис. 2**).

В качестве показателей степени риска можно использовать коэффициенты риска, показывающие вероятность неблагоприятных исходов при достижении цели определенного уровня одной из заинтересованных сторон.

Таким образом, нестабильность уровня спроса и предложения, постоянно ужесточающаяся конкуренция, опережающие темпы развития техники и технологии, изменения валютных курсов, неконтролируемая инфляция, а также многие другие факторы, характерные для текущего состояния экономики, создают условия возникновения риска в деятельности вуза, поэтому непременной частью менеджмента качества является необходимость внедрения и использования системы управления рисками в образовательной деятельности.

Представленная процедура на **рис. 2**

визуализирует ту оценочную часть по рискам, которая является неотъемлемой составляющей в процессе планирования, разработки и реализации образовательных проектов ДПО.

Таким образом, прогнозирование и управление рисками способствует повышению оперативности и качеству принятия управлительских решений в вузе. Внедрение методики управления рисками позволит избежать ненужных затрат еще на начальной стадии подготовки образовательных проектов, провести количественную и качественную оценку выявленных рисков и выбрать методы реагирования на них.

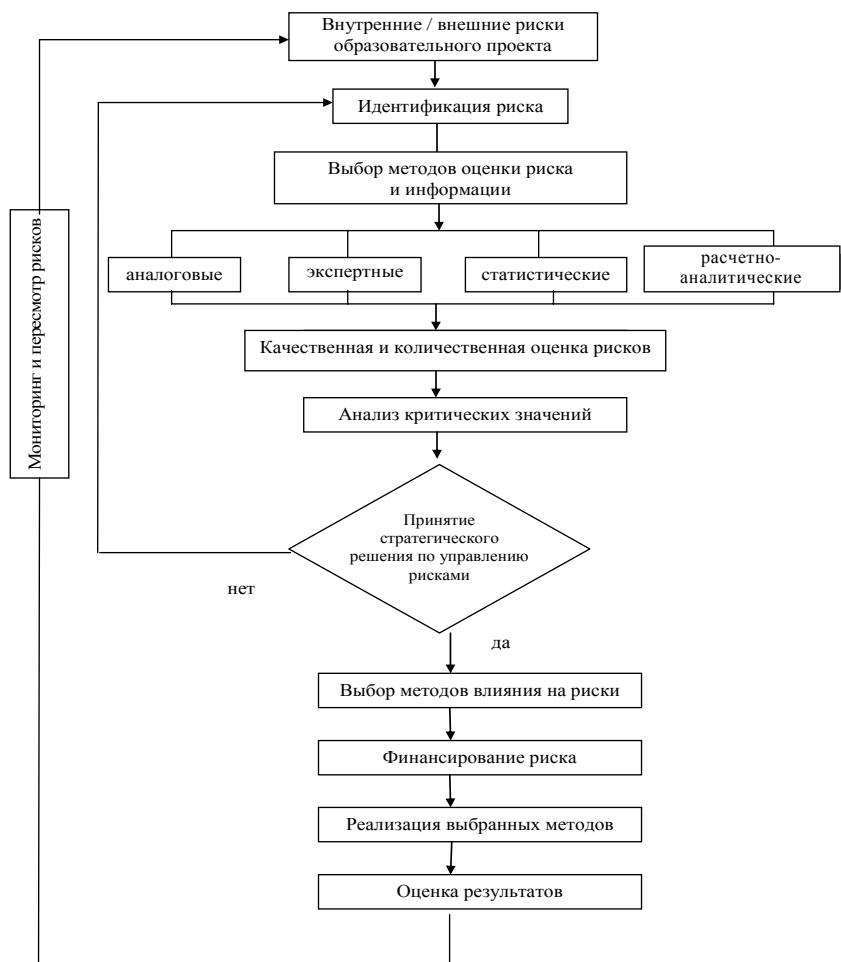


Рис. 2. Процедура управления оценкой рисков образовательного проекта ДПО

**Список литературы**

1. ГОСТ Р ИСО 31000-2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство. М.: Стандартинформ, 2010. 28 с.
2. ISO/IEC 31010:2009. Менеджмент рисков. Методики оценки рисков. М.: Стандартинформ, 2009. 94 с.
3. ГОСТ Р 51897-2011. Менеджмент риска. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.
4. Дубровский В.Ж., Кузьмин Е.А. Формирование риск-профиля проектов государственно-частного партнерства // Информационно-управляющие системы. 2011. № 3 (52). С. 76-82.
5. Костюкова Т.П., Лысенко И.А. Модель управления рисками образовательного учреждения // Информационно-управляющие системы. 2011. № 2 (51). С. 73-76.
6. Гейда А.С., Лысенко И.В., Силла Е.П. Задачи исследования качества и потенциала систем реализации целевых программ // Информационно-управляющие системы. 2011. № 4 (53). С. 77-83.
7. Риски образовательной деятельности в современных рыночных условиях / Антохина Ю.А., Варжапетян А.Г. и др. // Экономика и управление. 2012. № 8 (82). С. 43-49.
8. Карасев В.В., Соложенцев Е.Д. Тематика исследований по логико-вероятностному управлению риском и эффективностью в структурно-сложных системах // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4 (47). С. 72-74.
9. Соложенцев Е.Д., Яценко С. В. Логико-вероятностные модели риска неуспеха решения трудных экономических проблем // Информационно-управляющие системы. 2011. № 3 (52). С. 70-75
10. Бабенков А.Н., Соложенцев Е.Д. К вопросу построения ЛВ-модели риска неуспеха комплексной структурно-сложной экономической системы// Информационно-управляющие системы. 2011. № 4 (53). С. 70-76.

**References**

1. GOST R ISO 31000-2010. Risk management. Principles and guidelines. M.: Standartinform, 2010. 28 p.
2. ISO/IEC 31010:2009. Risk management -- Risk assessment techniques. M.: Standartinform, 2009. 94 p.
3. GOST R ISO 51897-2011. Risk management. Terms and definitions. M.: Standartinform, 2012. 16 p.
4. Dubrovsky V.Zh., Kuzmin E.A. Formation of the Risk-Profile of Public-Private Partnership // Informatsionno-upravlyayushie systemy (Information and Control Systems). 2011. № 3 (52). P. 76-82.
5. Kostyukova T.P., Lysenko I.A. Risk Management Model at Educational Institutions // Informatsionno-upravlyayushie systemy (Information and Control Systems). 2011. № 2 (51). P. 73-76.
6. Geida A.S., Lysenko I. V., Silla E. P.Quality and Capabilities Research of Conceptual Models of Special Public Programs Realization Systems under Risk Conditions// Informatsionno-upravlyayushie systemy (Information and Control Systems). 2011. № 4 (53). P. 77-83.
7. Antochina J.A., Varzahpetian A. G. etc. Risk education activities in modern market conditions // Economics and Management. 2012. № 8 (82). P. 43-49.
8. Karasev V.V., Solojentsev E. D. Research Issues in the Logical and Probabilistic Management of Risk and Efficiency in Structural Complex Systems// Informatsionno-upravlyayushie systemy (Information and Control Systems). 2010. № 4 (47). P. 72-74.
9. Solojentsev E.D., Yatsenko S. V. Logic and Probabilistic Models of Non-Success Risk of Solving Difficult Economic Problems // Informatsionno-upravlyayushie systemy (Information and Control Systems). 2011. № 3(52). P. 70-75.
10. Babenkov A.N., Solojentsev E.D. On Constructing a Logic-Probabilistic Model of Risk-Failure Structurally Complex Economic Systems// Informatsionno-upravlyayushie systemy (Information and Control Systems). 2011. № 4 (53). P. 70-76.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Аптуков Валерий Нагимович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой математического анализа Пермского государственного национального исследовательского университета, ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамической безопасности ОАО «Галургия», г.Пермь. Тел.: (342)2396819. E-mail: aptukov@psu.ru.

**Баскакова Надежда Тимофеевна** – канд. техн. наук, доц. кафедры экономики и управления ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: ремонты оборудования. Тел. 8(3519)23-04-28. E-mail: baskakovant@bk.ru.

**Бобылев Андрей Викторович** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технология машиностроения, станки и инструмент» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск. Направление исследований: формообразование криволинейных элементов из тонкостенных труб. Тел.: (3513) 63-43-78. E-mail: bavzlatoust@mail.ru.

**Варжапетян Артемий Георгиевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры инновации и управления качеством Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Направления исследований: исследование процессов функционирования сложных систем при накоплении нарушений, методы определения коэффициентов значимости компонентов сложных систем, использование методов имитационного моделирования при исследовании КЦФ, методы инжиниринга качества, в том числе методы робастного проектирования. Тел.: (812) 494-70-55. E-mail: vagbnm@gmail.com

**Вахитов Тимур Юрьевич** – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519)29-85-81.

**Вигриянов Павел Георгиевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры электрооборудования и автоматизации производственных процессов филиала ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) в г. Златоусте. Направление исследований: электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей в нормальных и аварийных режимах работы. Тел.: 8(3513)630172. E-mail: vpg\_postbox@mail.ru.

**Ворошилов Денис Сергеевич** – канд. техн. наук, ассист. кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. Тел.: (8391) 206-37-31.

**Вохмин Сергей Антонович** – канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Шахтное и подземное строительство» Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г.Красноярск. E-mail: svokhmin@mail.ru.

**Гельчинский Борис Рафаилович** – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лабораторией порошковых, композиционных и наноматериалов Института металлургии УрО РАН, г.Екатеринбург. Направление исследований: моделирование металлических и шлаковых систем. Тел.: 8(343)2678112. E-mail: brg47@list.ru.

**Герасимов Василий Яковлевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВПО «Курганский государственный университет». Тел.: (3522)469044. E-mail: rector@kgu.kurgan.ru.

**Гитман Михаил Борисович** – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры математического моделирования систем и процессов факультета прикладной математики и механики

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Направление исследований: управление сложными системами. E-mail: gmb@matmod.pstu.ac.ru, mgitman@netzero.net.

**Горохова Ольга Валерьевна** – ассист. кафедры экономики и управления ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519)23-04-28.

**Дёма Роман Рафаэлевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры МиТОД ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8 (3519) 29 84 36. E-mail: demarr78@mail.ru.

**Довженко Николай Николаевич** – д-р техн. наук, директор института нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», проф. кафедры обработки металлов давлением, г. Красноярск. Тел.: (8391) 293-78-46.

**Дроздова Татьяна Николаевна** – канд. техн. наук, доц. кафедры МиТОМ института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. Тел.: (8391) 206-36-75.

**Дюльдина Эльвира Владимировна** – канд. техн. наук, доц., проф. кафедры ХТИФХ ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: физико-химические процессы в расплавах. Тел.: 8(3519)298514. E-mail: dev@magtlu.ru.

**Елисеев Александр Сергеевич** – аспирант кафедры математического моделирования систем и процессов факультета прикладной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: alexandr.elyseev@gmail.com

**Ержанов Алмас Сатыбалдыевич** – ст. преп. кафедры «Обработка металлов давлением» Карагандинского государственного индустриального университета, г. Темиртау, Казахстан. Направление исследований – обработка металлов давлением. Тел.: +7 (701) 239 42 97. E-mail: kaf-omd@mail.ru

**Жиркин Юрий Васильевич** – канд. техн. наук, проф. кафедры МОМЗ ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: изучение области реализации режима эластогидродинамической смазки в подшипниках качения. Тел.: 8(3519) 29-85-07. E-mail: Girkin@yandex.ru.

**Загиров Наиль Хайбулович** – д-р техн. наук, проф. кафедры «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. E-mail: svokhmin@mail.ru.

**Зотов Алексей Викторович** – ст. преп. кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства». ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет». E-mail: Zottof@yandex.ru.

**Картавцев Сергей Владимирович** – д-р техн. наук, проф. кафедры теплотехнических и энергетических систем института энергетики и автоматики ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Направление исследований: научные основы, обоснование и разработка энергетически эффективных решений промышленных объектов. E-mail: kartavzw@mail.ru.

**Каскин Куат Камарович** – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Металлургия» Актюбинского государственного университета им. К. Жубанова, г.Актобе, Казахстан. Тел.: (7132) 511719. E-mail: kuatamarovich@rambler.ru.

**Козлов Александр Васильевич** – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Технология машиностроения, станки и ин-

струмент» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск. Направление исследований: формообразование криволинейных элементов из тонкостенных труб. Тел.: (3513) 63-43-78. E-mail: kozlov@zb-susu.ru.

**Колмогоров Герман Леонидович** – д-р техн. наук, проф., действительный член РАЕН, зав. кафедрой «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: dpm@psstu.ru.

**Константинова Светлана Александровна** – заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией геодинамической безопасности ОАО «Галургия», г.Пермь. Тел.: (342)2100848. E-mail: konstantinova@gallurgy.ru.

**Корнилов Геннадий Петрович** – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: оптимизация режимов работы энергоемких электротехнических комплексов черной металлургии. Тел. (3519) 29-84-79. E-mail: kogn\_mgn@mail.ru.

**Коротин Андрей Владимирович** – аспирант ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: физико-химические процессы в шлаковых расплавах. Тел.: 8(3519)298514.

**Красносельская Дина Хадимовна** – аспирант Института социально-экономических исследований УНЦ РАН, г.Уфа, Республика Башкортостан. Направление исследований: инструменты разработки перспектив развития социально-экономических систем. E-mail: dina-hamzina@mail.ru.

**Кришан Анатолий Леонидович** – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой строительных конструкций ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519) 29-84-41. E-mail: kris\_al@mail.ru.

**Кузбаков Жанаберген Иманкулович** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Металлургия» Актюбинского государственного университета им. К. Жубанова, г.Актобе, Казахстан. Тел.: (7132) 998578. E-mail: flora\_karim@mail.ru.

**Курчин Георгий Сергеевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Шахтное и подземное строительство» Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. E-mail: KurchinGS@mail.ru.

**Лозовский Евгений Павлович** – канд. техн. наук, инженер ЦЛК ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Направление исследований: непрерывная разливка стали. Тел.: 8(3519)256914. E-mail: alekseev\_vl@mmtk.ru.

**Майоров Евгений Сергеевич** – ст. преп. кафедры «Шахтное и подземное строительство» Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

**Маркелова Наталья Викторовна** – ассист. кафедры инновации и управления качеством Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Направление исследований: повышение качества образовательного процесса, методы оценки, контроля и управления в области качества образовательной деятельности. Тел.: (812) 494-70-55. E-mail: eclat2006@yandex.ru

**Мерзляков Андрей Федорович** – зав. лабораторией кафедры механики сплошных сред и вычислительных технологий Пермского государственного национального исследовательского университета. Тел.: (342)2396375. E-mail: merzlyakov@psu.ru.

**Митин Артём Николаевич** – аспирант кафедры «Горные машины и транспортно-технологические комплексы» Института горного дела и транспорта ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: геотехника;

добыча, обработка природного камня. Тел.: 8(3519)29-85-74. E-mail: lokomanru@mail.ru

**Найзабеков Абрахман Батырбекович** – академик, д-р техн. наук, проф., ректор Рудненского индустриального института, Казахстан. Направление исследований: обработка металлов давлением. Тел.: +7 (71431) 5 07 03.

**Нешпоренко Евгений Григорьевич** – канд. техн. наук, ассист. кафедры теплотехнических и энергетических систем института энергетики и автоматики ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: научные основы, обоснование и разработка энергетически эффективных решений промышленных объектов. E-mail: neshporenkoeg@mail.ru.

**Николаев Александр Аркадьевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: оптимизация режимов работы комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический компенсатор». Тел. (3519) 29-84-79. E-mail: alexniko@inbox.ru.

**Осинцев Никита Анатольевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры промышленного транспорта Института горного дела и транспорта ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: безопасность на транспорте. Тел.: (3519)298516. E-mail: osintsev@logintra.ru.

**Парышев Дмитрий Николаевич** – генеральный директор ЗАО «Курганстальмост», г. Курган. Тел.: (3522) 410050. E-mail: contact@kurganstalmost.ru.

**Перехожих Александр Александрович** – аспирант кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: развитие теории и технологии процессов симметричной и асимметричной прокатки. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: arsenicum.87@mail.ru.

**Першин Геннадий Дальтонович** – д-р техн. наук, проф. кафедры «Горные машины и транспортно-технологические комплексы» Института горного дела и транспорта ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: геотехника; добыча, обработка природного камня. Тел.: 8(3519)29-85-74.

**Песин Александр Моисеевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: развитие теории и технологии процессов симметричной и асимметричной прокатки. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

**Песин Илья Александрович** – студент группы ФГЭ-09 кафедры экономики и управления ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: теория ограничений. E-mail: Пша33392@bk.ru.

**Пиньковецкая Юлия Семеновна** – канд. экон. наук, доц. кафедры экономического анализа и государственного управления Ульяновского государственного университета. Направление исследований: предпринимательские структуры, экономико-математическое моделирование. E-mail: judy54@yandex.ru.

**Платов Сергей Иосифович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МИТОД ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8 (3519) 29 84 36. E-mail: psipsi@mail.ru.

**Пузик Екатерина Александровна** – инженер по качеству ЗАО «УралСпецМаш». Направление исследований: изучение области реализации режима эластогидродинамической смазки в подшипниках качения. E-mail: ekshalimova@mail.ru.

**Пустовойтов Денис Олегович** – канд. техн. наук, ассист. кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ

## Сведения об авторах

ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: развитие теории и технологии процессов симметричной и асимметричной прокатки». Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pustovoitov\_den@mail.ru.

**Разинкин Евгений Игоревич** – аспирант Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва. Направление исследований: открытые системы, интероперабельность систем, электронная коммерция. E-mail: Erazinkin@mail.ru.

**Рахмангулов Александр Нельевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры промышленного транспорта Института горного дела и транспорта ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: моделирование и оптимизация транспортных процессов. Тел: (3519)298516. E-mail: ran@logintra.ru.

**Рыбалко Ольга Федоровна** – науч. сотрудник Института металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург. Направление исследований: структура и свойства металлов и шлаков. Тел.: 8(343)2678906.

**Свердлик Михаил Константинович** – студент кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: развитие теории и технологии процессов симметричной и асимметричной прокатки. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: mikhail-sverdlik@hotmail.com.

**Селиванов Валентин Николаевич** – канд. техн. наук, доц., проф. кафедры МЧМ ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: непрерывная разливка стали. Тел.: 8(3519)298449. E-mail: mcm@magt.ru.

**Семашко Марина Юрьевна** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Машины и технологии обработки материалов давлением» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск. Направление исследований: обработка металлов давлением. Тел.: 8 (351) 267-92-24. E-mail: mara1979@mail.ru.

**Сидельников Андрей Сергеевич** – ассист. кафедры «Литейное производство» института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. Тел.(8391) 206-36-31.

**Сидельников Сергей Борисович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г.Красноярск. Тел.(8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yahoo.ru.

**Столбов Валерий Юрьевич** – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Направление исследований: управление сложными системами. E-mail: svu@matmod.pstu.ac.ru.

**Столяров Александр Михайлович** – д-р техн. наук, проф. кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. 8(3519)29-84-49. E-mail: mcm@magt.ru.

**Столяров Алексей Юрьевич** – главный технолог ЗАО «Уралкорд», г. Магнитогорск. Тел.: 8 (3519) 49-84-04. E-mail: Aleksey\_Stolyarov@uralcord.ru.

**Суровцов Максим Михайлович** – аспирант кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519) 29-84-41. E-mail: surovtsvo.maxim@yahoo.ru.

**Суханцев Сергей Станиславович** – аспирант кафедры высшей математики математического факультета Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. E-mail: s.suhantsev@gmail.com

**Сысуев Николай Евгеньевич** – магистрант кафедры теплотехнических и энергетических систем института энергетики и автоматики ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Направление исследований: разработка энергетически эффективных решений промышленных объектов. E-mail: sysuevne90@mail.ru.

**Талмазан Виталий Антонович** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Обработка металлов давлением» Карагандинского государственного индустриального университета, г. Темиртау, Казахстан. Направление исследований: обработка металлов давлением. Тел.: +7 (701) 405 86 76.

**Требуш Юрий Прокопьевич** – доц. кафедры «Шахтное и подземное строительство» Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. E-mail: trebush@yandex.ru.

**Трифоненков Леонид Петрович** – руководитель проекта департамента литейных проектов ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Красноярск. Тел.: (8391) 256-40-29.

**Трофимов Виктор Николаевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: fpm@pstu.ru.

**Федосеев Сергей Анатольевич** – д-р техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Направление исследований: управление сложными системами. E-mail: fsa@gelicon.biz.

**Харитонов Вениамин Александрович** – канд. техн. наук, проф. кафедры машиностроительных и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8 (3519) 29-84-82.

**Храмшин Тимур Рифхатович** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электротехника и электротехнические системы» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: повышение энергетической эффективности электроприводов промышленных установок. Тел. (3519) 29-84-16. E-mail: timur.hramshin@mail.ru.

**Чернова Татьяна Вячеславовна** – канд. техн. наук, доц. кафедры «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: fpm@pstu.ru.

**Чигинцев Павел Андреевич** – студент кафедры «Машины и технологии обработки материалов давлением» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск. Направление исследований: обработка металлов давлением. Тел.: 8 (351) 267-92-24. E-mail: 4iga90@mail.ru.

**Шаповалов Алексей Николаевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургических технологий Новотроицкого филиала НИТУ «МИСиС». E-mail: alshapo@yandex.ru.

**Шевченко Евгений Александрович** – аспирант кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. 8(3519) 29-84-49. E-mail: nfmisis-nis@yandex.ru.

**Шеркунов Виктор Георгиевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Машины и технологии обработки материалов давлением» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск. Направление исследований: обработка давлением сплошных и композиционных материалов. Тел.: (351) 267-92-24. E-mail: mitomd@susu.ru.

**Якимов Иван Александрович** – ст. преп. кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519)29-85-29.

# THE INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aptukov Valery Nagimovich** – D.Sc., Prof., Head of Mathematical Analysis Department of the Perm State National Research University, Leading Research Assistant of the Research Laboratory of Geodynamic Safety, JSC «The Ural Research & Development Institute of Hallurgy» (JSC Hallurgy), Perm. Phone: (342)2396819. E-mail: aptukov@psu.ru.

**Baskakova Nadezda Timofeevna** – candidate of technical sciences, associate professor at the chair of Economical and Management of the state general educational establishment the supreme professional association «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8(3519)23-04-28. E-mail: baskakovant@bk.ru.

**Bobylev Andrey Viktorovich** – the candidate of engineering science, senior lecturer of «Machine-building technology, machines and instruments» department FSFEI of HPE «South Ural State University» (National Research University). The area of scientific interest – forming curved elements in tubes with thin walls. Phone: (3513) 63-43-78. E-mail: bavzlatoust@mail.ru.

**Chernova Tatyana Vyacheslavovna** – candidate of technics, docent of chair «Dynamics and strength of machines» of Perm national researching polytechnic university, Perm. E-mail: dpm@pstu.ru

**Chigintsev Paul Andreevich** – Student Department of «Machines and Technologies of Handling Materials by Pressure» department of FSEI HPE «South Ural State University»(NRU). The area of scientific interest – handling materials by pressure. Phone: 8 (351) 2679224. E-mail: 4iga90@mail.ru.

**Dema Roman Rafayalevich** – candidate of science, «Magnitogorsk state technical university named G.I. Nosov». Phone: 8 (3519) 29 84 36. E-mail: demarr78@mail.ru.

**Dovzhenko Nikolay Nikolayevich** – Dr. of science, director of Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, FSEI HPE «Siberian Federal University», Professor of the Department of metal forming, Krasnoyarsk. Phone: (8391) 293-78-46.

**Drozdova Tatyana Nikolayevna** – Candidate of science, docent of Department of Metallurgy and heat treatment of metals, Institute of Nonferrous Metals and Materials Science FSEI HPE «Siberian Federal University», Krasnoyarsk. Phone: (8391) 206-36-75.

**Dyuldina Elvira Vladimirovna** – Cand. of Sc., Associate Prof., Prof. of the department of applied chemistry and physical chemistry of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8(3519)298514. E-mail: dev@magt.ru.

**Elyseev Alexander Sergeevich** – postgraduate student, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: alexandr.elyseev@gmail.com.

**Fedoseev Sergei Anatoljevich** – Ph.D, Dr. of Sciences; Associate professor of the systems and processes mathematical modeling department, State National Research Polytechnic University of Perm. E-mail: fsa@gelicon.biz.

**Gelchinski Boris Rafailovich** – Dr. of Sc., Prof., Chef of Laboratory of powder, composition and nanomaterials, Institute of metallurgy UrO RAN. Phone: 8(343)2678112. E-mail: brg47@list.ru.

**Gerasimov Vasiliy Yakovlevich** – doctor of technical sciences, professor, the professor of the department of theoretical mechanics and strength of materials of Kurgan State University. Phone: (3522) 469044. E-mail: rector@kgu.kurgan.ru.

**Gitman Mikhail Borisovich** – Ph.D, Dr. of Sciences, Professor of the systems and processes mathematical modeling department, State National Research Polytechnic University of Perm. E-mail: gmb@matmod.pstu.ac.ru, mgitman@netzero.net.

**Gorokhova Olga Valeryevna** – the assistant to chair of economy and management FGBOU VPO «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)23-04-28.

**Haritonov Veniamin Aleksandrovich** – Ph.D., professor of «Engineering and metallurgical technologies» FSEI HPE «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8 (3519) 29-84-82.

**Hramshin Timur Rifhatovich** – candidate of technical science, the senior lecture of chair of an electrical engineering and electro technical systems of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: improving energy efficiency of electric drive of industrial plants. Phone (3519) 29-84-16. E-mail: timur.hramshin@mail.ru.

**Jakimov Ivan Aleksandrovich** – the senior lecture of chair of automatic electric drive and mechatronics of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8(3519)29-85-29.

**Kartavtsev Sergey Vladimirovich** – Ph.D., professor of thermal engineering and energy systems of the Institute of Energy and Automation «Magnitogorsk state technical university of G.I. Nosov». The direction of investigations: scientific principles, rationale and development of energy-efficient solutions of industrial facilities. E-mail: kartavzw@mail.ru.

**Kaskin Kuat Kamarovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of «Metallurgy» Aktobe State University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan. Phone: (7132) 511719. E-mail: kuatkamarovich@rambler.ru

**Kholmogorov German Leonidovich** – doctor of technics, professor, valid member of RANS, head of chair «Dynamics and strength of machines» of Perm national researching polytechnic university. E-mail: dpm@pstu.ru

**Konstantinova Svetlana Aleksandrovna** – Merited Scientist of the Russian Federation, D. Sc., Prof., Head of the Research Laboratory of Geodynamic Safety, JSC «The Ural Research & Development Institute of Hallurgy» (JSC Hallurgy), Perm. Phone: (342)2100848. E-mail: konstantinova@gallurgy.ru.

**Kornilov Gennady Petrovich** – doctor of technical science, associate professor, head of the department «Power supply industrial enterprises» of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: operation modes optimization of power-intensive electrotechnical complex of ironworks. Phone: (3519) 29-84-79. E-mail: korn\_mgn@mail.ru.

**Korotin Andrei Vladimirovich** – post-graduate st., of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov»

**Kozlov Aleksandr Vasiljevich** – the doctor of engineering science, senior lecturer, the head of «Machine-building technology, machines and instruments» department FSFEI of HPE «South Ural State University» (National Research University). The area of scientific interest – forming curved elements in tubes with thin walls. Phone: (3513) 63-43-78. E-mail: kozlov@zb-susu.ru.

**Krasnoselskaya Dina Khadimovna** – post-graduate student of Institute social-economic research. Area of research: development tools prospects of socio-economic systems. E-mail: dina-hamzina@mail.ru.

**Krishan Anatoly Leonidovich** – Doctor of Technical Science, associate Professor, Head of the Chair of Building Construction department «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519) 29-84-41. E-mail: kris\_al@mail.ru.

**Kurchin George Sergeevich** – cand.tech.sci., the senior lecturer of chair «Mine and underground building» Institute of mining, geology and geotechnologies the Siberian federal university, Krasnoyarsk. E-mail: KurchinGS@mail.ru.

**Kuzbakov Zhanabergen Imankulovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of «Metallurgy» Aktobe State University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan. Phone: (7132) 998578. E-mail: flora\_karim@mail.ru.

**Lozovsky Eugeniy Pavlovich** – Cand. of Sc., the engineer Central Laboratory of Control, OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works». Phone: 8(3519)256914. E-mail: alekseev\_vl@mmk.ru.

**Maiorov Evgeniy Sergeevich** – the senior teacher of chair «Mine and underground building» Institute of mining, geology and geotechnologies of the Siberian federal university, Krasnoyarsk.

**Markelova Natalia Victorovna** – Assistant, Department of Innovation and Quality Management Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Research interests: improving the quality of the educational process, methods of assessment, monitoring and control of the quality of educational activities. Phone: (812) 494-70-55. E-mail: eclat2006@yandex.ru.

**Merzlyakov Andrey Fedorovich** – Head of Laboratory, Continuum Mechanics and Computational Technologies Department of the Perm State National Research University. Phone: (342)2396375. E-mail: merzlyakov@psu.ru.

**Mitin Artem Nikolaevich** – graduate student «Mining Machinery and transport technological systems» of the Institute of Mining and Transport FSEI HPE «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Direction of research: geotechnics, mining, processing of natural stone. Phone: 8(3519)29-85-74. E-mail: lokomanru@mail.ru.

**Naizabekov Abdrahman Batyrbekovich** – academician, dr.sci.tech., the professor, the rector Rudnensky industrial institute. A direction of explorations: plastic metal working. Phone: +7(71431) 5 07 03.

**Neshporenko Evgeny Grigorevich** – candidate of technical sciences, department of assistive stent thermal energy systems of the Institute of Energy and Automation and «Magnitogorsk state technical university of G.I. Nosov». The direction of investigations: scientific principles, rationale and development of energy-efficient solutions of industrial facilities. E-mail: neshporenko@mail.ru.

**Nikolaev Aleksandr Arkad'evich** – candidate of technical science, the senior lecture of chair of power supply industrial enterprises of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: operation modes optimization of complex «electric arc furnace – static compensator». Phone: (3519) 29-84-79. E-mail: alexniko@inbox.ru.

**Osintsev Nikita Anatolyevich** – Candidate of Science, Associate Professor of the Department Industrial Transport, SEI HPE Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova. Research Field: Transport safety. Phone: (3519)298516. E-mail: osintsev@logintra.ru.

**Paryshev Dmitry Nicolaevich** – General Director of «Kurganstalmost». Phone: (3522) 410050. E-mail: contact@kurganstalmost.ru.

**Perehogih Alexander Alexandrovich** – postgraduate student of the department «Metal Forming» Federal State Budgetary Education Institution of Higher Professional Education «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Area of research: the development of the theory and process technology of symmetric and asymmetric rolling. Phone: 8(3519)29-85-25. E-mail: arsenicum.87@mail.ru.

**Pershin Gennady Daltonovich** – Doctor of Science, Professor of «Mining Machinery and transport-technological systems» of the Institute of Mining and Transport FSEI HPE «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Direction of research: geotechnics, mining, processing of natural stone. Phone: 8(3519)29-85-74.

**Pesin Alexander Moiseevich** – Doctor of Technical Sciences, professor of the department «Metal Forming», Federal State Budgetary Education Institution of Higher Professional Education «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Area of research: the development of the theory and process technology of symmetric and asymmetric rolling. Phone: 8(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

**Pesin Ilya Alexandrovich** – student, group FGE-09, chair of Economical and Management of the state general educational establishment the supreme professional association «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: Ilya33392@bk.ru.

**Pinkovetskaya Julia Semenovna** – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Economic analysis and state management department, Ulyanovsk State University. Research field: entrepreneurial structures, economic-mathematical modeling. E-mail: judy54@yandex.ru.

**Platov Sergey Iosifovich** – doctor of technical science, professor «Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov». Phone: 8 (3519) 29 84 36. E-mail: psipsi@mail.ru.

**Pustovoitov Denis Olegovich** – Candidate of Technical Sciences, assistant of the department «Metal Forming», Federal State Budgetary Education Institution of Higher Professional Education «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Area of research: The development of the theory and process technology of symmetric and asymmetric rolling. Phone: 8(3519)29-85-25. E-mail: pustovoitov\_den@mail.ru.

**Puzik Kate Alexandrovna** – quality engineer JSC «Ural-SpetsMash». E-mail: ekshalimova@mail.ru.

**Rakhmangulov Alexander Nelyevich** – Candidate of Science, Associate Professor of the Department Industrial Transport SEI HPE Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova. Research Field: Modeling and optimization of transportation procedures. Phone: (3519)298516. E-mail: ran@logintra.ru.

**Razinkin Evgeniy Igorevich** – PhD-student, Institute of Radio-engineering and Electronics of RAS. Area of research: open system, interoperability of system, electronic commerce. E-mail: Erazinkin@mail.ru.

**Rybalko Olga Fedorovna** – researcher of Laboratory of powder, composition and nanomaterials, Institute of metallurgy UrO RAN. Phone: 8(343)2678906.

**Selivanov Valentin Nikolaevich** – Cand. of Sc., Associate Prof. of the department of Iron and Steel Metallurgy of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8(3519)298449. E-mail: mcm@magt.u.ru.

**Semashko Marina Yurevna** – Cand. Tech. Sci, associate professor of chair of «Machines and Technologies of Handling Materials by Pressure» department of FSEI HPE «South Ural State University» (NRU). The area of scientific interest: handling materials by pressure. Phone: 8 (351) 2679224. E-mail: mara1979@mail.ru.

**Shapovalov Alexey Nikolayevich** – assistant professor of metallurgical technology Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology «MISIS». E-mail: alshapo@yandex.ru.

**Sherkunov Viktor Georgievich** – the doctor of engineering science, professor, the head of «Machines and Technologies of Handling Materials by Pressure» department FSFEI of HPE «South Ural State University» (National Research University). The area of scientific interest: handling of solid and composite materials by rolling, pressing, dragging. Phone: (351) 267-92-24. E-mail: mitomd@susu.ru.

**Shevchenko Yevgeniy Alexandrovich** – postgraduate student, department of Metallurgy of ferrous metals Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov. Phone: 8 (3519) 29-84-49. E-mail: nfmisis-nis@yandex.ru.

**Sidelnikov Andrei Sergeevich** – assistant Department of foundry proceedings, Institute of Nonferrous Metals and Materials Science FSEI HPE «Siberian Federal University», Krasnoyarsk. Phone: (8391) 206-36-31.

**Sidelnikov Sergey Borisovich** – Dr. of science, Professor, Chief of the Department of metal forming, Institute of Nonferrous Metals and Materials Science FSEI HPE «Siberian Federal University», Krasnoyarsk. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Stolbov Valeriy Yurievich** – Ph.D, Dr. of Sciences, Professor of the systems and processes mathematical modeling department, State National Research Polytechnic University of Perm. E-mail: svu@matmod.pstu.ac.ru.

**Stolyarov Aleksey Yurevich** – chief technologist of JSC «Uralkord», Phone: 8 (3519) 49-84-04. E-mail: Aleksey\_Stolyarov@uralcord.ru.

**Stolyarov Alexander Mikhaylovich** – professor, department of metallurgy of ferrous metals Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov Phone: 8 (3519) 29-84-49. E-mail: mgtu@mgtu.ru.

**Sukhantsev Sergey Stanislavovich** – postgraduate student, Perm State Pedagogical University, Mathematical Faculty, Chair of Advanced Maths. E-mail: s.suhantsev@gmail.com.

**Surovtsov Maxim Mikhaylovich** – postgraduate student of Building Construction department «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519) 29-84-41. E-mail: surovtsov.maxim@yandex.ru.

**Sverdlik Mikhail Konstantinovich** – student of the department «Metal Forming» Federal State Budgetary Education Institution of Higher Professional Education «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Area of research: The development of the theory and process technology of symmetric and asymmetric rolling. Phone: 8(3519)29-85-25. E-mail: mikhail-sverdlik@hotmail.com.

**Sysuyev Nikolaj Evgenievich** – graduate department of thermal and energy systems of the Institute of Energy and Automation Automation «Magnitogorsk state technical university of G.I. Nosov». The direction of research: developing energetically effective solutions to industrial facilities. E-mail: sysuevne90@mail.ru.

**Talmazan Vitaly Antonovich** – cand.tech.sci., the senior lecturer chair «Plastic metal working» Karaganda state industrial university. A direction of explorations: plastic metal working. Phone: +7(701) 405 86 76.

**Trebush Yury Prokopevich** – the senior lecturer of chair «Mine and underground building» Institute of mining, geology and geotechnologies of the Siberian federal university, Krasnoyarsk. E-mail: trebus@yandex.ru.

**Trifonenkov Leonid Petrovich** – project manager of Department of casting projects «RUSAL ETC» Ltd., Krasnoyarsk.

Phone: (8391) 256-40-29.

**Trofimov Viktor Nikolaevich** – doctor of technics, professor of chair «Dynamics and strength of machines» of Perm national researching polytechnic university. E-mail: dpm@pstu.ru

**Vahitov Timur Jur'evich** – postgraduate student of power supply industrial enterprises of «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8(3519)29-85-81.

**Varzhapetian Artemiy Georgievich** – Professor, Doctor of Technical Sciences Department of Innovation and Quality Management Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Research interests: study the processes of complex systems in the accumulation of violations, methods for determining the coefficients are significant components of complex systems, the use of simulation techniques in the study of the QOF, quality engineering methods, including methods of robust design. Phone: (812) 494-70-55. E-mail: vagbnm@gmail.com.

**Vigriyanov Paul Georgievich** – cand. of techn. sciences, associate professor of department electrical and automation of production processes State Educational Institution of Higher Professional Education South Ural State University (National Research University), branch in Zlatoust. The direction of research: the electromagnetic processes of multiphase valve engine under normal and emergency operating modes. Phone: 8 (3513) 630172. E-mail: vpg\_postbox@mail.ru.

**Vokhmin Sergey Antonovich** – cand. tech. sci., the professor managing chair «Mine and underground building» Institute of mining, geology and geotechnologies of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: svokhmin@mai.ru.

**Voroshilov Denis Sergeevich** – Candidate of science, assistant Department of metal forming, Institute of Nonferrous Metals and Materials Science FSEI HPE «Siberian Federal University», Krasnoyarsk. Phone: (8391) 206-37-31.

**Yerzhanov Almas Satybaldyevich** – the higher teacher chair «Plastic metal working» Karaganda state industrial university. A direction of explorations: plastic metal working. Phone: +7(701) 239 42 97. E-mail: kaf-omd@mail.ru

**Zagirov Nail Haybulovich** – dr.tech.sci., the professor «Underground mining of mineral deposits» Institute of mining, geology and geotechnologies of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: svokhmin@mai.ru.

**Zhirkin Yuri Vasilievich** – candidate of science, professor of department of the mechanical equipment of metallurgical works, Magnitogorsk State Technical University. Research guidelines: Analysis of area of elasto-hydrodynamic lubrication in the rolling bearing. E-mail: Girkin@yandex.ru.

**Zotov Alexey Victorovich** – senior teacher of the Department «Equipment and technology of machine-building production» Federal Government budgetary institution of higher education «Togliatti State University». E-mail: Zotov@yandex.ru.

# УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей. Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ и др.

Раздел «Новые исследования» или «Краткие сообщения» предназначен для оперативной публикации работ преимущественно аспирантов. В журнал входят учебно-методический и библиографический разделы. Общее количество разделов и их объем может варьироваться от номера к номеру.

## ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

### I. Рекомендуемый объем статьи – не более 6–8 стр.

К статье прилагаются:

- 1) экспертное заключение о возможности опубликования;
- 2) рецензия;
- 3) сведения об авторах (на английском и русском языках): фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, полное название учреждения, направление исследований, контактный телефон и E-mail каждого автора (всё перечислить в одном абзаце);
- 4) аннотацию на английском и русском языках (аннотация должна содержать актуальность, постановку проблемы и пути решения проблемы; необходимо избегать лишних деталей и конкретных цифр; количество слов – 50-100);
- 5) список литературы на английском и русском языках;
- 6) ключевые слова на английском и русском языках.

### II. Текст статьи, сведения об авторах, реферат, список литературы и ключевые слова представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами Microsoft Word, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

**Внимание!** Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования представляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Магнитогорский государственный технический университет, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ» М. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

E-mail: rio\_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) **шрифт – Times New Roman**, размер – 14 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 2) при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками;
- 3) **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров). Рисунки предоставлять в виде распечатки на стандартных листах бумаги формата А4 и отдельным файлом в формате \*.TIF, \*.JPG, с разрешением **300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутона, максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисуночные надписи в местах размещения рисунков. Например:

Рис. 4. Расчетная зависимость  $\gamma(t)=I_h/I_{ho}$   
от времени и удалённости КЗ от выводов  
асинхронного двигателя