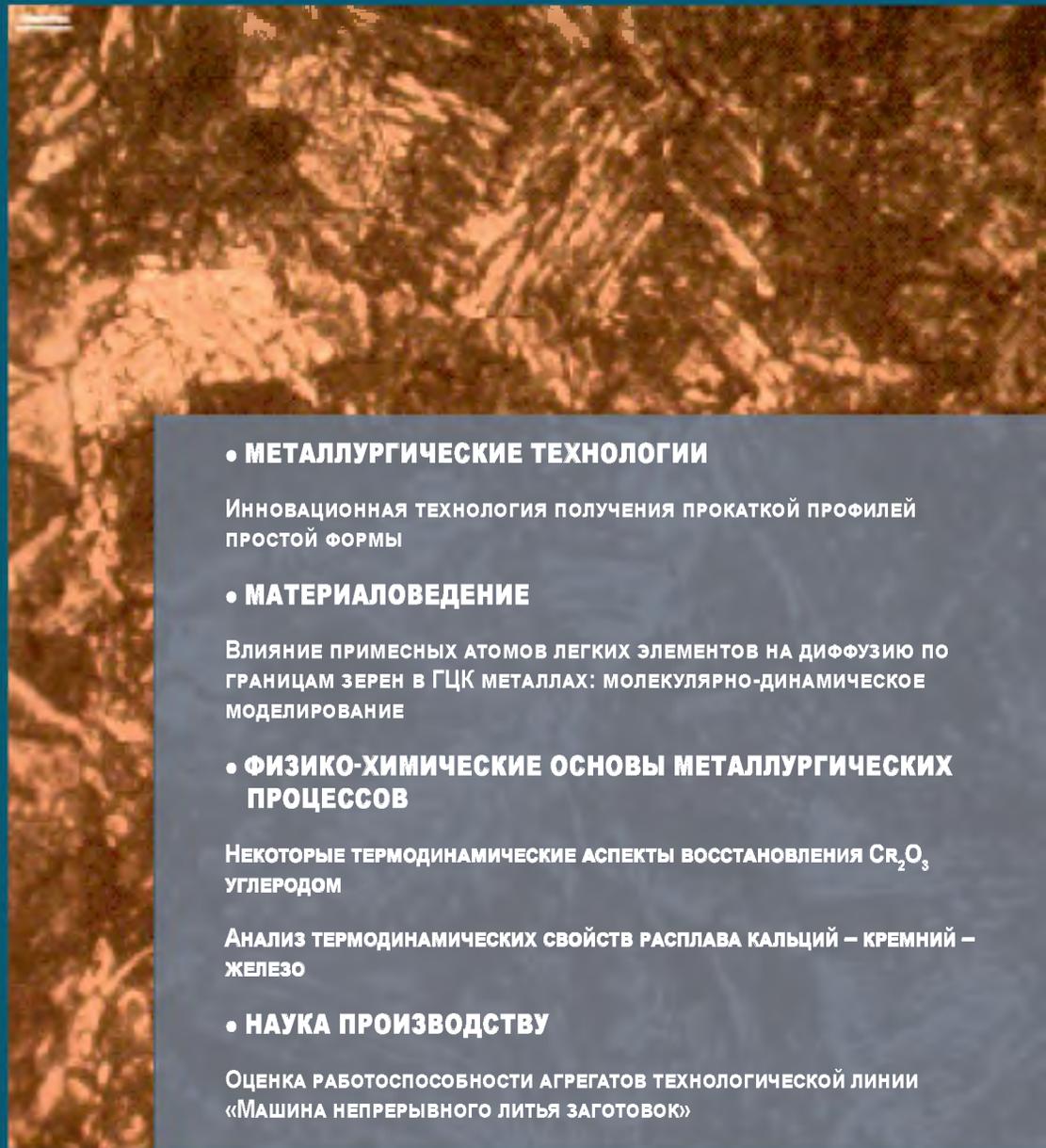


# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 62 Номер 12 2019



### • МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Инновационная технология получения прокаткой профилей простой формы

### • МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Влияние примесных атомов легких элементов на диффузию по границам зерен в ГЦК металлах: молекулярно-динамическое моделирование

### • ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Некоторые термодинамические аспекты восстановления  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  углеродом

Анализ термодинамических свойств расплава кальция – кремний – железо

### • НАУКА ПРОИЗВОДСТВУ

Оценка работоспособности агрегатов технологической линии «МАШИНА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК»



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 12, 2019

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 62

---

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

**Главный редактор:** ЛЕОНТЬЕВ Л.И.  
(Российская Академия Наук, г. Москва)

**Заместитель главного редактора:** ПРОТОПОПОВ Е.В.  
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

**Заместитель ответственного секретаря:** БАЩЕНКО Л.П.  
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

#### Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)

АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)

БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)

БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)

ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)

ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)

ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)

ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)

ЗОЛОТУХИН В.И. (Тулский государственный университет, г. Тула)

КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)

КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)

КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)

ЛИНН Х. (ООО «Линн Хая Терм», Германия)

ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)

МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)

ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом промышленном и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)  
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)

СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)

СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)

ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

#### Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати  
Сибирским государственным индустриальным университетом

#### Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».  
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27  
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru  
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,  
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42  
Сибирский государственный индустриальный университет,  
Тел.: (3843) 74-86-28  
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит 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».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

# IZVESTIYA

## VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

---

## IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

---

**Editor-in-Chief:** LEONT'EV L.I.  
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

**Deputy Editor-in-Chief:** PROTOPOPOV E.V.  
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

**Deputy Coordinating Editor:** BASHCHENKO L.P.  
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

---

### Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)  
G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute  
Tsvetmetobrabotka", Moscow)

M.V. ASTAKHOV (National Research Technological  
University "MISIS", Moscow)

S.O. BAISANOV (Abishevo Chemical-Metallurgical  
Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

V.D. BELOV (National Research Technological  
University "MISIS", Moscow)

A.A. BRODOV, Editor of the section "Economic  
efficiency of metallurgical production" (IP Baridin  
Central Research Institute for Ferrous Metallurgy,  
Moscow)

A.N. DMITRIEV (Institute of Metallurgy, Ural  
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal  
University, Ekaterinburg)

A.V. DUB (JSC "Science and Innovations", Moscow)

M.R. FILONOV, Editor of the section "Material  
science" (National Research Technological University  
"MISIS", Moscow)

A.M. GLEZER (National Research Technological  
University "MISIS", Moscow)

S.M. GORBATYUK (National Research Technological  
University "MISIS", Moscow)

K.V. GRIGOROVICH, Editor of the section "Metallurgical  
Technologies" (Baikov Institute of Metallurgy and  
Materials Science of RAS, Moscow)

V.E. GROMOV (Siberian State Industrial University,  
Novokuznetsk)

A.G. KOLMAKOV (Baikov Institute of Metallurgy and  
Materials Science of RAS, Moscow)

V.M. KOLOKOL'TSEV (Magnitogorsk State Technical  
University, Magnitogorsk)

M.V. KOSTINA (Baikov Institute of Metallurgy and  
Materials Science of RAS, Moscow)

K.L. KOSYREV (JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow)

YU.A. KURGANOVA (Bauman Moscow State  
Technical University, Moscow)

V.V. KURNOSOV (National Research Technological  
University "MISIS", Moscow)

S.S. LAZUTKIN (Group of Companies "MetProm",  
Moscow)

H. LINN (Linn High Therm GmbH, Hirschbach,  
Germany)

V.I. LYSAK (Volgograd State Technical University,  
Volgograd)

L.P. MYSHLYAEV (Siberian State Industrial  
University, Novokuznetsk)

S.A. NIKULIN (National Research Technological  
University "MISIS", Moscow)

O.I. OSTROVSKI (University of New South Wales,  
Sidney, Australia)

G.S. PODGORODETSKII, Editor of the section  
"Resources Saving in Ferrous Metallurgy" (National  
Research Technological University "MISIS", Moscow)

I.YU. PYSHMINTSEV, Editor of the section  
"Innovations in metallurgical industrial and  
laboratory equipment, technologies and materials"  
(Russian Research Institute of the Pipe Industry,  
Chelyabinsk)

TS.V. RASHEV, Editor of the section "Superduty steel"  
(Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria)

A.I. RUDSKOI (Peter the Great Saint-Petersburg  
Polytechnic University, Saint-Petersburg)

O.YU. SHESHUKOV (Ural Federal University,  
Ekaterinburg)

L.M. SIMONYAN, Editor of the section "Ecology  
Rational Use of Natural Resources" (National Research  
Technological University "MISIS", Moscow)

R.F. SINGER (Friedrich-Alexander University,  
Germany)

B.A. SIVAK (VNIIMETMASH Holding Company,  
Moscow)

L.A. SMIRNOV (OJSC "Ural Institute of Metals",  
Ekaterinburg)

S.V. SOLODOV, Editor of the section "Information  
Technologies and Automatic Control in Ferrous  
Metallurgy" (National Research Technological University  
"MISIS", Moscow)

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

N.A. SPIRIN (Ural Federal University, Ekaterinburg)

TANG GUOI (Institute of Advanced Materials of  
Tsinghua University, Shenzhen, China)

M.V. TEMLYANTSEV (Siberian State Industrial  
University, Novokuznetsk)

E.P. VOLYNKINA (Siberian State Industrial  
University, Novokuznetsk)

A.B. YUR'EV (OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)

V.S. YUSUPOV (Baikov Institute of Metallurgy and  
Materials Science of RAS, Moscow)

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

---

### Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

---

This issue of the journal was prepared by  
Siberian State Industrial University

### Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4  
National Research Technological University "MISIS",  
Tel.: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27  
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisis.ru  
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,  
Kirova str., 42  
Siberian State Industrial University,  
Tel.: +7 (3843) 74-86-28  
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

---

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

The journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is indexed in Scopus.

---

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered  
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications PI number FS77-35456

## СОДЕРЖАНИЕ

К 85-летию Леопольда Игоревича Леонтьева ..... 915

### МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Фастыковский А.Р., Базайкин В.И., Беляев С.В., Живаго Э.Я.  
Инновационная технология получения прокаткой профилей  
простой формы ..... 918

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Шекшеев М.А., Михайлицын С.В., Сычков А.Б., Емелюшин  
А.Н., Керимова Л.Ф. Исследование структуры и свойств  
сварных соединений арматурного проката класса проч-  
ности А500С ..... 925

Поletaев Г.М., Зоря И.В., Ракитин Р.Ю., Старостенков М.Д.  
Влияние примесных атомов легких элементов на диффузию  
по границам зерен в ГЦК металлах: молекулярно-динамичес-  
кое моделирование ..... 930

Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С. Исследования  
неметаллических включений в рельсах из электросталей, ле-  
гированных хромом ..... 936

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Дудоров М.В., Рощин В.Е. Моделирование роста кристаллов  
в многокомпонентных метастабильных сплавах ..... 943

Крыков Р.Е., Горюшкин В.Ф., Бендре Ю.В., Башенко Л.П., Ко-  
зырев Н.А. Некоторые термодинамические аспекты восста-  
новления  $Cr_2O_3$  углеродом ..... 950

Бердников В.И., Гудим Ю.А. Анализ термодинамических свойств  
расплава кальций – кремний – железо ..... 957

### НАУКА ПРОИЗВОДСТВУ

Кузнецов В.А., Полковников Г.Д., Громов В.Е., Кузнецова Е.С.,  
Перегудов О.А. Генератор мощных импульсов тока с исполь-  
зованием реверсивного тиристорного преобразователя ..... 964

Савельев А.Н., Северьянов С.С. Оценка работоспособности  
агрегатов технологической линии «Машина непрерывного  
литья заготовок» ..... 972

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Швыдкий В.С., Куделин С.П., Гурин И.А., Носков В.Ю. Раз-  
работка информационно-моделирующей системы инъекции  
пылеугольного топлива в фурмы доменной печи ..... 979

Указатель статей, помещенных в 2019 г., том 62 ..... 987

## CONTENTS

To the 85<sup>th</sup> Anniversary of Leopol'd Igorevich Leont'ev ..... 915

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

A.R. Fastykovskii, V.I. Bazaikin, S.V. Belyaev, E.Ya. Zhivago Inno-  
vative technology for production of rolled profiles with simple  
form ..... 918

### MATERIAL SCIENCE

M.A. Sheksheev, S.V. Mikhailitsyn, A.B. Sychkov, A.N. Emelyushin,  
L.F. Kerimova Structure and properties of welded joints of rein-  
forcing bars of A500C strength class ..... 925

G.M. Poletaev, I.V. Zorya, R.Yu. Rakitin, M.D. Starostenkov Effect  
of light elements impurity atoms on grain boundary diffusion in  
FCC metals: a molecular dynamics simulation ..... 930

A.A. Umanskii, A.V. Golovatenko, A.S. Simachev Nonmetallic inclu-  
sions in rails made of electro-steel alloyed with chromium ..... 936

### PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

M.V. Dudorov, V.E. Roshchin Simulation of crystal growth in multi-  
component metastable alloys ..... 943

R.E. Kryukov, V.F. Goryushkin, Yu.V. Bendre, L.P. Bashchenko,  
N.A. Kozyrev Thermodynamic aspects of  $Cr_2O_3$  reduction by  
carbon ..... 950

V.I. Berdnikov, Yu.A. Gudim Analysis of thermodynamic properties  
of Ca–Si–Fe melt ..... 957

### SCIENCE APPLICATION

V.A. Kuznetsov, G.D. Polkovnikov, V.E. Gromov, E.S. Kuznetsova,  
O.A. Peregudov High power current pulse generator based on re-  
versible thyristor converter ..... 964

A.N. Savel'ev, S.S. Sever'yanov Assessment of units' performance of  
CCM technological line ..... 972

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

V.S. Shvydkii, S.P. Kudelin, I.A. Gurin, V.Yu. Noskov Development  
of information modeling system of coal-dust fuel injection into  
tuyeres of blast furnace ..... 979

Index of articles "Izvestiya. Ferrous Metallurgy" for 2019. Vol. 62 .... 987

УДК 669.18.046.518:621.746.27

## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ АГРЕГАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ «МАШИНА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК»

*Савельев А.Н., к.т.н., доцент кафедры механики и машиностроения (Savelyev2000@mail.ru)  
Северьянов С.С., аспирант кафедры механики и машиностроения (Zhiha14@rambler.ru)*

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Для оценки эксплуатационной надежности работы технологических агрегатов машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) применен количественный показатель работоспособности. Этот показатель характеризует способность технического изделия выполнять работу с определенной вероятностью или вероятность того, что данный объем работы будет выполнен. Показатель интересен тем, что при переходе через оптимальное значение способность машины выполнить возложенный на нее объем работы начинает снижаться. Точка оптимума продолжительности работы машины ограничивает рациональный временной участок ее использования без ремонта с максимальной эффективностью. С использованием статистического материала, полученного в течение 15 лет эксплуатации машины непрерывного литья заготовок, оценена работоспособность входящих в МНЛЗ агрегатов как технологической линии. При этом все агрегаты разделены на три принципиально отличающиеся по условиям назначения группы: работающие с жидким, с затвердевающим и с затвердевшим металлом. Работоспособность агрегатов каждой группы оценена абсолютными и относительными величинами. При оценке работоспособности по абсолютным значениям наибольшей работоспособностью обладают агрегаты, работающие с жидким металлом. Рациональный срок службы от ремонта до ремонта составляет 270 ч с безотказностью 0,51. Наименьшая работоспособность (в пределах 150 ч) наблюдается у агрегатов, работающих с затвердевающим металлом, безотказность 0,6. Величина работоспособности в относительных единицах в среднем у агрегатов всех групп практически одна и та же, что позволяет использовать этот показатель на ранней стадии оценки работоспособности как МНЛЗ в целом, так и ее элементов.

**Ключевые слова:** работоспособность, технологическая линия, машина непрерывного литья заготовок, металл жидкий, металл затвердевающий, металл затвердевший.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-972-978

### ВВЕДЕНИЕ

Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) представляет собой производственную линию, состоящую из набора технологических агрегатов, которые выполняют различные технологические функции. В процессе работы МНЛЗ жидкая сталь непрерывно переводится в твердое состояние стальной заготовки заданной геометрической формы. Основным требованием к оборудованию этих технологических линий (ТЛ) является обеспечение таких режимов работы, которые позволили бы безотказно выполнять все технологические функции [1 – 8]. Обеспечить рациональный режим функционирования производственных технологических линий, когда показатели надежности всех без исключения входящих в них агрегатов имеют различные характеристики надежности, практически невозможно. Это связано с тем, что речь, прежде всего, идет о показателях безотказности и долговечности. Сочетание этих двух показателей для каждого из агрегатов, как правило, различное [9 – 16], но при создании линий нужно стремиться к тому, чтобы обобщенное сочетание этих показателей для ТЛ давало сопоставимые результаты. В этом случае при оценке надежности техно-

логической линии МНЛЗ удобнее пользоваться комплексными показателями функционирования агрегатов ТЛ.

Суть работы заключается в оценке эффективности использования в качестве параметра надежности работы агрегатов технологического оборудования МНЛЗ комплексного показателя, называемого «работоспособность» [17, 18]. В отличие от термина «работоспособное состояние» под работоспособностью  $M$  понимается способность технической единицы выполнить возложенный на нее объем работы  $A$  с вполне определенной вероятностью  $F$ . Как видно из определения, работоспособность включает в себя два показателя надежности: объем выполняемой работы (или эквивалентный ему срок работы элементов – долговечность) и безотказность. В настоящее время при наличии статистического материала эксплуатации технологических агрегатов оценка их работы ограничивается статистическими показателями в виде математического ожидания и дисперсии и вероятностными моделями, основанными на этом статистическом материале [19 – 26]. Эти показатели не позволяют выбрать рациональных значений сроков службы агрегатов. В такой ситуации очень важно иметь в наличии метод, позволяющий количественно ограничивать период оптимального использования эле-

ментов оборудования. Разрабатывать такие методы дает возможность теория работоспособности на основе критерия работоспособности [17, 18].

Цель работы – на примере МНЛЗ показать, каким образом с использованием статистическо-вероятностного материала можно получить показатели работоспособности технологических агрегатов непрерывной технологической линии; выявить, что собой представляют эти показатели и каким образом они могут быть использованы при оценке рационального этапа эксплуатации непрерывно действующих технических систем.

Задачи, выполняемые для достижения поставленной в настоящей работе цели, сводятся к определению оптимальных значений показателей работоспособности и их сравнению с математическим ожиданием сроков службы агрегатов технологической линии МНЛЗ. Решаются задачи с применением, с одной стороны, методов статистики и теории вероятности, а с другой – теории работоспособности. Статистический материал продолжительности службы между возникающими на агрегатах технологической линии МНЛЗ авариями используется для выполнения вероятностной оценки долговечности входящих в технологическую линию МНЛЗ агрегатов [27, 28] и далее на основе вероятностных моделей построения кривых работоспособности каждого из агрегатов и их анализа.

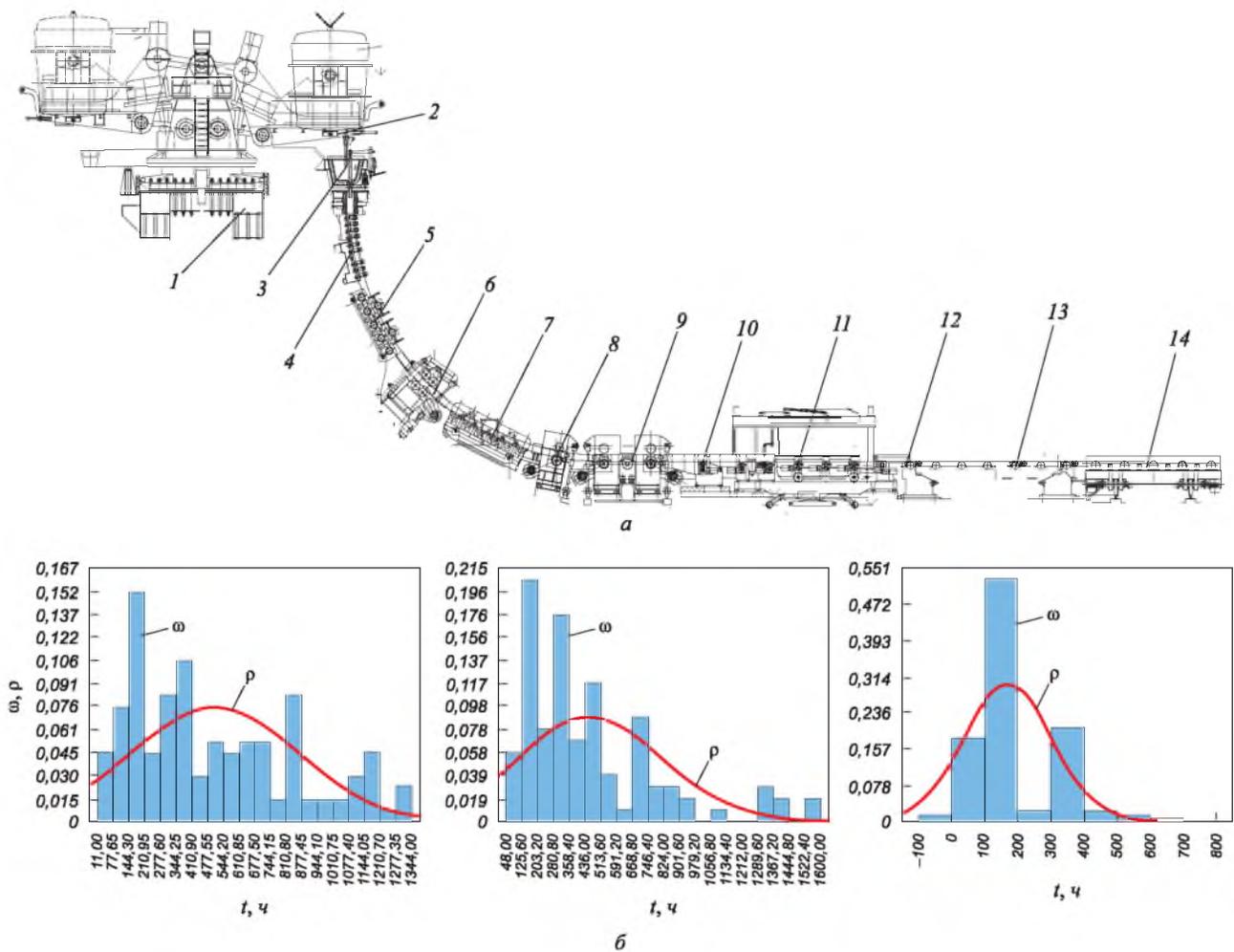
#### МЕТОД РЕШЕНИЯ

Выделенные в работе задачи решались на основе собранного в промышленных условиях за пятнадцать лет работы МНЛЗ (2001 – 2015 гг.) статистического материала. В качестве объекта исследования использовали агрегаты, входящие в машину непрерывного литья заготовок, изготовленную фирмой УЗТМ и эксплуатируемую в условиях АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») (рис. 1, *a*). Данная технологическая линия – МНЛЗ радиального типа с радиусом изгиба технологической оси (близким 12 м) и сечением отливаемой заготовки порядка 300×330 мм. В данной МНЛЗ используется кристаллизатор длиной 1000 мм с конусностью, обеспечивающей скорость разливки 0,40 – 0,75 м/мин. Применяется водяная система первичного охлаждения и водовоздушная система вторичного охлаждения. Средняя масса плавки, разливаемой на МНЛЗ, составляет 107 т, количество плавков, разливаемых на один промежуточный ковш, 6 – 12. Для сбора статистического материала была обработана цеховая документация об отказах МНЛЗ, сформирована выборка продолжительности службы каждого из агрегатов от отказа до отказа.

В настоящем исследовании из оборудования четырех ручьев МНЛЗ анализируется работа только одного. Для контроля общего состояния оборудования на протяжении всего периода сбора статистического материала осуществлялся контроль коэффициента техническо-

го использования МНЛЗ. Это комплексный показатель, характеризует уровень надежности всей ТЛ в целом; на протяжении всего срока сбора статистической информации, а также при проведении всех мелких, средних и крупных модернизаций оставался в пределах 0,95 – 0,97.

Анализ работоспособности МНЛЗ начинали с ее декомпозиции как целого. Согласно теории формирования сложных технических систем [29, 30] процесс декомпозиции реализуется путем многократного разложения элементов того или иного уровня сложности системы по качественному параметру на три составляющие этот уровень группы [29]; выделили три группы агрегатов технологической линии МНЛЗ. Особенностью каждой группы является то, что по мере продвижения металла от агрегатов одной группы к следующей свойства металла меняются в силу того, что он переходит от жидкой фазы к твердой. В связи с этим тот или иной агрегат линии должен выполнять свои функции в различных технологических условиях. От этого зависят его конструктивные особенности и характеристики эксплуатации, а значит, и показатель работоспособности. Так, агрегаты первой группы работают с жидким металлом, качественные характеристики этих агрегатов должны обеспечивать технологические операции в температурных условиях, соответствующих температуре жидкой стали. Эти агрегаты перемещают жидкую среду и в силу этого имеют свои конструктивные особенности, определяющие и вид, и методы проектирования. Агрегаты третьей группы работают уже с твердым металлом, испытывают воздействие твердой среды и в связи с этим должны обладать соответствующим набором технических параметров эксплуатации данного вида оборудования. Агрегаты второй группы работают с затвердевающим металлом, поэтому их параметры должны соответствовать значениям параметров агрегатов как первой, так и третьей группы. Исходя из вышесказанного (рис. 1, *a*): к первой группе относятся подъемно-поворотный стенд 1, промежуточный ковш 2; ко второй группе – агрегаты, формирующие твердую заготовку: кристаллизатор с механизмом его качания 3, секции вторичного охлаждения 4, 5, установка четырехвалковых клетей 6, секция поддерживающих роликов 7, установка клетей 8; третья группа агрегатов работает уже с твердой заготовкой и включает секцию правильно-тянущих клетей 9, рольганг до машины газовой резки заготовки 10, машину газовой резки 11, рольганг после машины газовой резки 12, спаренный рольганг 13 и ряд других агрегатов, расположенных за спаренным рольгангом. Для каждого из агрегатов с использованием статистического материала определен характер распределения срока службы до отказа агрегатов технологической линии МНЛЗ. Выполненная таким образом декомпозиция и статистическая оценка долговечности агрегатов позволяют не только определить показатели работоспособности входящих в ту или



1	$F(x) = \frac{1}{350\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-509)^2}{2 \cdot 350^2}} dx$	6	$F(x) = \frac{1}{404\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-347)^2}{2 \cdot 404^2}} dx$	11	$F(x) = \frac{1}{134\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-283)^2}{2 \cdot 134^2}} dx$
2	$F(x) = \frac{1}{349\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-463)^2}{2 \cdot 349^2}} dx$	7	$F(x) = \frac{1}{86\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-251)^2}{2 \cdot 86^2}} dx$	12	$F(x) = \frac{1}{137\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-283)^2}{2 \cdot 137^2}} dx$
3	$F(x) = \frac{1}{133\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-168,5)^2}{2 \cdot 133^2}} dx$	8	$F(x) = \frac{1}{408\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-422)^2}{2 \cdot 408^2}} dx$	13	$F(x) = \frac{1}{133\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-289)^2}{2 \cdot 133^2}} dx$
4	$F(x) = \frac{1}{92\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-216)^2}{2 \cdot 92^2}} dx$	9	$F(x) = \frac{1}{241\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-359)^2}{2 \cdot 241^2}} dx$	14	$F(x) = \frac{1}{369\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-528)^2}{2 \cdot 369^2}} dx$
5	$F(x) = \frac{1}{86\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-251)^2}{2 \cdot 86^2}} dx$	10	$F(x) = \frac{1}{316\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-459)^2}{2 \cdot 316^2}} dx$		

6

Рис. 1. Характер распределения статистических данных и вероятностных законов распределения:

*a* – агрегаты ТЛ МНЛЗ; *б* – частота встречаемости и плотность вероятности сроков службы агрегатов ТЛ МНЛЗ;

*в* – зависимости вероятности безотказной работы агрегатов ТЛ МНЛЗ; 1 – подъемно-поворотный стел; 2 – установка тележек под промежуточный ковш; 3 – кристаллизатор с механизмом качания; 4 – секция вторичного охлаждения; 5 – установка секций вторичного охлаждения; 6 – установка 4-х валковых клетей; 7 – секции поддерживающих роликов; 8 – установка клетей; 9 – тянуще-правильный механизм; 10 – рольганг до механизма горячей резки; 11 – механизм горячей резки; 12 – рольганг после механизма горячей резки; 13 – рольганг спаренный; 14 – ручей 1

Fig. 1. Nature of statistics distribution and probability laws of distribution:  
*a* – CCM TL aggregates; *б* – frequency of occurrence and density of probability of service life of CCM TL units; *в* – dependence of probability of trouble-free operation of units of CCM TL; 1 – tilt-up stand; 2 – installation of car trucks under the tundish; 3 – mold with a swing mechanism; 4 – section of the secondary cooling; 5 – installation of secondary cooling sections; 6 – installation of four-roll stands; 7 – sections of the supporting rollers; 8 – installation of stands; 9 – pull-correct mechanism; 10 – rolling table to the hot cutting mechanism; 11 – hot cutting mechanism; 12 – rolling table after the hot cutting mechanism; 13 – twin roller table; 14 – stream 1

иную группу агрегатов, но и сравнить и согласовать показатели работоспособности входящих в группы агрегатов между собой.

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

При анализе статистического материала, касающегося сроков службы каждого из рассматриваемых агрегатов ТЛ [27, 28], получены распределение частоты встречаемости сроков службы, распределение плотности вероятности сроков службы каждого из агрегатов и зависимости вероятности безотказной работы агрегатов МНЛЗ. Пример статистических данных и вероятностные модели по каждому из агрегатов технологической линии, входящих в ту или иную группу агрегатов сложной системы, приведены на рис. 1, б, в и в таблице.

Построение кривых работоспособности начиналось с определения зависимости между надежностью  $Q$  и объемом выполненной работы  $a$  или сроком службы  $t$ . На основе вероятностной модели при помощи программы STATISTIKA 6.0 были построены кривые  $Q(t)$ ,  $F(t) = 1 - Q(t)$  и продолжительности работы агрегата  $a(t)$  (рис. 2, а). При этом исходили из того, что продолжительность работы при непрерывном режиме эксплуатации технологической линии имеет линейный характер.

На основе полученных зависимостей определяется мера работоспособности  $M = F(t)a(t)$  и  $M = F(T)A(T)$  (где  $t$  и  $T$  – время в абсолютных единицах и относительных единицах). Показатель имеет параболическую форму с точкой максимума, позволяющей ограничить область рациональных значений срока службы агрегатов между ремонтами. При увеличении этого срока из-за аварийных остановок работоспособность начинает снижаться. Это значит, что разность между ожидаемым и реальным объемом работы агрегата будет возрастать. В процессе анализа функционирования ТЛ были построены кривые работоспособности каждого из агрегатов МНЛЗ, максимальная абсолютная  $M_a$  и относительная  $M_o$  работоспособности (где  $Q(t)$  – вероятность отказов технологического агрегата;  $F(t)$  – вероятность безотказной работы технологического агрегата;  $a(t)$  – продолжительность работы агрегата, ч). Максимальной работоспособностью (в среднем 270 ч и безотказностью  $F_1 = 0,51$ ) обладает первая группа агрегатов, работающих с жидким металлом (рис. 3). Третья группа агрегатов имеет среднюю рациональную работоспособность порядка 200 ч, средняя безотказность  $F_3 = 0,6$ . Агрегаты второй группы, работающие с затвердевающим металлом, имеют среднюю рациональную работоспособность 150 ч, среднюю безотказность  $F_2 = 0,6$ .

Для выявления общих закономерностей распределения работоспособности между агрегатами технологической линии МНЛЗ было выполнено определение работоспособности в относительных единицах: объем выполняемой объектом работы представлен в отно-

сительных единицах  $A = a/a_{max}$ . Пользуясь тем, что параметры  $F$  и  $A$  являются безразмерными величинами, удобней и время представить в безразмерном виде  $T = t/t^*$  (где  $t^*$  – максимальное время непрерывного функционирования агрегата). В этом случае построение кривой работоспособности начинается с нахождения зависимостей  $Q = Q(t)$  и  $a = a(t)$ . Эти кривые пересчитываются в зависимости с относительной временной координатой  $T$ , то есть в зависимости  $Q = Q(T)$  и  $A = A(T)$ , а затем находится  $F(T) = 1 - Q(T)$  и строится кривая изменения меры работоспособности  $M = F(T)A(T)$ .

Изменение работоспособности в относительных единицах также имеет максимальное значение, ограничивающее степень рационального использования каждого технологического агрегата МНЛЗ (рис. 3, в). Средние величины максимальных значений работоспособности агрегатов всех трех групп ТЛ близки. Это позволяет во время проектирования или реконструкции

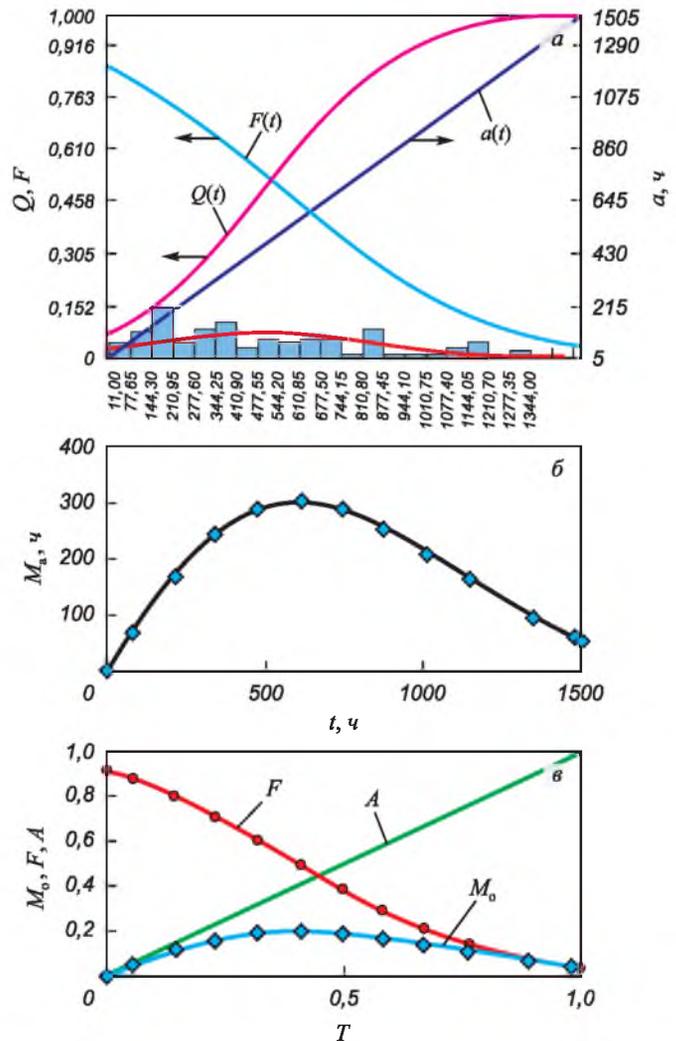


Рис. 2. Пример построения абсолютной  $M_a$  и относительной  $M_o$  кривых работоспособности технологического агрегата МНЛЗ

Fig. 2. Example of constructing absolute  $M_a$  and relative  $M_o$  curves of CCM performance

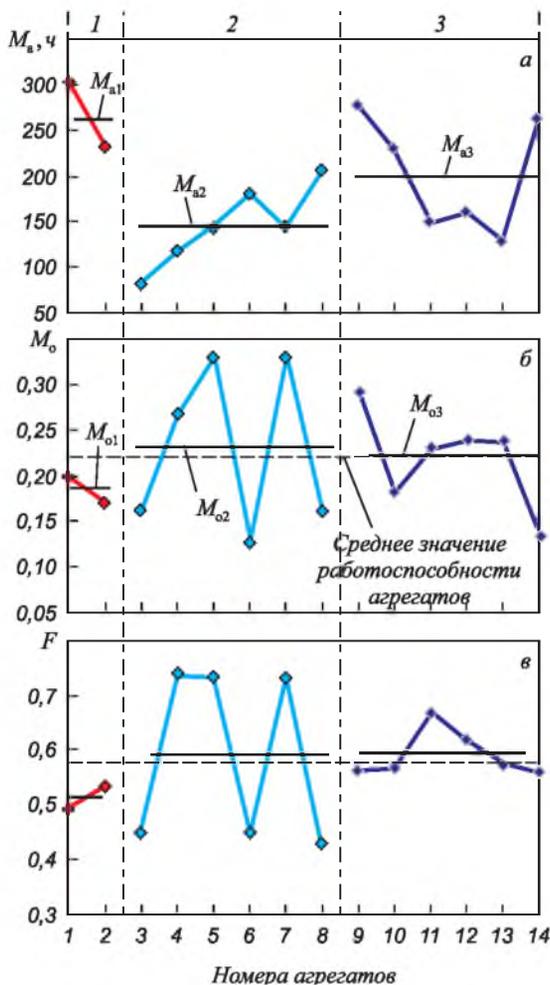


Рис. 3. Характер распределения оптимальной работоспособности (а, б) и соответствующей ей надежности (вероятности безотказной работы) (в):

1 – агрегаты, работающие с жидким металлом; 2 – агрегаты, работающие с затвердевающим металлом; 3 – агрегаты, работающие с затвердевшим металлом

Fig. 3. Nature of distribution of optimal performance (a, b) and corresponding reliability (probability of trouble-free operation) (c):  
 1 – units working with liquid metal; 2 – units working with solidifying metal; 3 – units working with solidified metal

МНЛЗ задавать общую для всей ТЛ работоспособность, а затем при проектировании каждого конкретного агрегата переходить от относительных к абсолютным координатам. Во время доводки и эксплуатации агрегатов абсолютная мера их работоспособности может меняться при сохранении относительного ее значения. Изменение величины абсолютной работоспособности при сохранении неизменной ее относительного значения позволяет судить о возможностях машины и на основании этого решать целый ряд практически важных задач.

### Выводы

Работоспособность как способность выполнять возложенную на агрегат работу или вероятность того, что данная работа будет выполнена, характеризует ка-

чество машины. Этот показатель имеет оптимальное значение, при переходе через которое способность машины выполнить возложенный на нее объем работы начинает снижаться. Оптимум продолжительности работы машины ограничивает рациональный временной участок ее использования без ремонта с максимальной эффективностью. Наибольшей абсолютной работоспособностью обладают агрегаты, работающие с жидким металлом, наименьшей – агрегаты, работающие с затвердевающим металлом. Относительная работоспособность в среднем у агрегатов всех групп практически одна и та же, что позволяет использовать этот показатель в ряде моментов при разработке МНЛЗ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фишер Л., Бауш И., Хюллен И., Фрелинг К., Ржепчик М., Брант Т., Кнопф И., Брасс Х.-Г. Концепции перспективной модернизации с применением апробированной технологии непрерывной разливки стали // Черные металлы. 2018. № 9. С. 40 – 47.
2. Guindani A., Venturini R., Jungbauer A., Linzer B., Gelder S., Bragin S., Bernhard C. Arvedi ESP – real endless strip production: The next generation of producing high-value steels started up, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Super High-Strength Steels, 17 – 20 Oct. 2010. – In book: International Conference Super-High Strength Steels. – Milano, 2010. P. 1 – 11.
3. Схиммель Р., Кирхнер М. Модернизация кристаллизаторов для повышения эффективности работы тонкостенной УНРС типа DSP на комбинате компании TataSteel // Черные металлы. 2018. № 3. С. 24 – 26.
4. Yamasaki J., Miyahara S., Kodama M., Matsukawa T., Matsuno J., Suzuki K. The control of the surface temperature in the continuous slab casting by the on-line digital computer. – In book: 8<sup>th</sup> IFAC World Congress on Control Science and Technology for the Progress of Society, Kyoto, Japan, 24-28 August 1981. – Kyoto, Japan: 1981. Vol. 14. No. 2. P. 2639 – 2644.
5. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. – In book: 5<sup>th</sup> Int. Iron and Steel. Congr. Proc. 6<sup>th</sup> Process Technol. Conf. (Apr. 6 – 9, 1986). – Warrendale, 1986. Vol. 6. P. 853 – 866.
6. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs // Metallurgical Society of AIME. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1747.
7. Evstigneev A.I., Odinkov V.I., Sviridov A.V., Dmitriev E.A., Petrov V.V. Theoretical prediction of crack formation in axisymmetric multilayer shell molds // Materials Science Forum. 2016. Vol. 857. P. 573 – 577.
8. Сотников А.Л., Нагорный В.М., Оробцев А.Ю., Птуха С.В., Родионов Н.А. Нормирование режимов работы и уровня вибрации механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 1. С. 44 – 54.
9. Гребеник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности). Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 592 с.
10. Augusti G., Baratta A., Casciati F. Probabilistic methods in structural engineering. – London: Chapman and Hall, 1984. – 556 p.
11. Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C. Methods of structural safety. – Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1986. – 403 p.
12. Barlow E.E., Proschan F., Hunter L.C. Mathematical Theory of Reliability. – New York-London-Sydney: Wiley, 1965. – 256 p.
13. Breipohl M. Probabilistic systems analysis. – New York-London-Sydney-Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1970. – 352 p.
14. Hahn G.J., Shapiro S.S. Statistical models in engineering. – New York-London-Sydney: John Wiley & Sons, Inc., 1994. – 376 p.

15. Зорин В.А., Бочаров В.С. Надежность машин. – Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2003. – 548 с.
16. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке. Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 432 с.
17. Савельев А.Н. Теория работоспособности технологических машин. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2008. – 225 с.
18. Савельев А.Н. Использование критерия работоспособности деталей в расчетах на долговечность. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 10. С. 84 – 86.
19. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика. Учебник / И.Н. Кравченко, Е.А. Пучин, А.В. Чепурин и др.; под ред. И.Н. Кравченко. – М.: Альфа-М; ИНФРА-М, 2012. – 336 с.
20. Светлитский В.А. Статистическая механика и теория надежности. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 504 с.
21. Cramer H. *Mathematical methods of statistics*. – Stockhol: Almqvist and Wiksells, 1946. – 575 p.
22. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
23. Barlow R.E., Proschan F. *Statistical theory of reliability and life testing probability models*. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1975. – 290 p.
24. Locks M.O. *Reliability, maintainability, and availability assessment*. – New York: Hayden Book Co., Inc., 1973.
25. Esary J.D., Proschan F. Reliability bound for systems of maintained and independent components // *Journal of the American Statistical Association*. 1970. Vol. 65. P. 329 – 338.
26. Henley E.J., Lynn J. *Generic techniques in reliability assessment components*. – Holland, Leyden: Noordhoff International, 1976. P. 26 – 35.
27. Савельев А.Н., Северьянов С.С., Прохоренко О.Д. // Особенности эксплуатационных режимов работы технологического оборудования МНЛЗ // *Черные металлы*. 2019. № 6. С. 15 – 22.
28. Савельев А.Н., Северьянов С.С., Савельева А.В. Моделирование эксплуатационной надежности агрегатов технологической линии МНЛЗ как сложной технической системы // *Вестник Сибирского Государственного индустриального университета* 2016. № 2 (16). С. 23 – 28.
29. Савельев А.Н. Структурные особенности устойчиво функционирующей сложной технической системы // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1996. № 12. С. 53 – 58.
30. Савельев А.Н., Тимошенко Ю.Г., Бич Т.А. Моделирование распределения элементов по надежности в машинах непрерывного литья заготовок // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2006. № 8. С. 46 – 49.

Поступила в редакцию 17 мая 2019 г.  
 После доработки 17 июня 2019 г.  
 Принята к публикации 20 июня 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 12, PP. 972–978.

## ASSESSMENT OF UNITS' PERFORMANCE OF CCM TECHNOLOGICAL LINE

*A.N. Savel'ev, S.S. Sever'yanov*

**Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia**

**Abstract.** To assess operational reliability of technological units of continuous casting machine (CCM), quantitative indicator of efficiency has been applied. This indicator of efficiency describes ability of technical product to perform work assigned to it with a certain probability, or expectancy that this amount of work will be performed. This indicator is interesting for its optimal value, which being surpassed decreases machine ability to perform the necessary amount of work. Thus, the optimum point of machine operating time limits rational time portion of its use without repair with maximum efficiency. Workability of CCM as technological line as well as operability of its units was evaluated using statistical material obtained during the 15 years of operation of billet CCM. So, all units were divided into three essentially different groups according to conditions of their appointment, i.e. a group of units working with liquid metal, a group of units working with solidifying metal and a group of units working with solidified metal. Performance of each group of units is estimated in absolute and relative values. When assessing performance of CCM units in absolute values, units operating with liquid metal have the greatest performance. Its rational service life from repair to repair is 270 hours with reliability of 0.51. The smallest efficiency was manifested in units working with solidified metal. Its performance lasts 150 hours with reliability of 0.6. Average efficiency in relative units of all groups of aggregates is almost the same, which makes it possible to use this indicator at an early stage of assessing efficiency of both machine units and CCM as a whole.

**Keywords:** performance, technological line, continuous casting machine, liquid metal, solidifying metal, solidified metal.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-972-978

## REFERENCES

1. Fischer L., Bausch J., Hüllen I., Fröhling C., Rzepczyk M., Brand T., Knopp I., Brass H.-G. The concepts of perspective modernization using tested and approved continuous casting technology. *Chemnyye Metally*. 2018, no. 9, pp. 40–47. (In Russ.).
2. Guindani A., Venturini R., Jungbauer A., Linzer B., Gelder S., Bragin S., Bernhard C. Arvedi. ESP – real endless strip production: The next generation of producing high-value steels started up. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Super High-Strength Steels, 17 – 20 Oct.* 2010. Milano, 2010, pp. 1–11.
3. Schimmel R., Kirschner M. Modernization of moulds to provide efficiency rise of continuous casting of 70mm thin slabs. *Chemnyye metally*. 2018, no. 3, pp. 24–26. (In Russ.).
4. Yamasaki J., Miyahara S., Kodama M., Matsukawa T., Matsuno J., Suzuki K. The control of the surface temperature in the continuous slab casting by the on-line digital computer. In: *8<sup>th</sup> IFAC World Congress on Control Science and Technology for the Progress of Society, Kyoto, Japan, 24-28 August 1981*. Kyoto, Japan: 1981, vol. 14, no. 2, pp. 2639–2644.
5. Ho K., Pehlke R. Modeling of steel solidification using the general finite difference method. In: *5<sup>th</sup> Int. Iron and Steel. Congress Proc. 6<sup>th</sup> Process Technol. Conf Apr 6 – 9, 1986. Warrendale*. Vol. 6. 1986, pp. 853–866.
6. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs. *Trans. Of The Metallurgical Society of AIME*. 1967, vol. 239, no. 11, pp. 1747.
7. Evstigneev A.I., Odnokov V.I., Sviridov A.V., Dmitriev E.A., Petrov V.V. Theoretical prediction of crack formation in axisymmetric multilayer shell molds. *Materials Science Forum*. 2016, vol. 857, pp. 573–577.
8. Sotnikov A.L., Nagornyi V.M., Orobtssev A.Yu., Ptukha S.V., Rodionov N.A. Standardization of operating modes and vibration level of CCM mold. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2013, no. 1, pp. 44–54. (In Russ.).

9. Grebenik V.M., Tsapko V.K. *Nadezhnost' metallurgicheskogo oborudovaniya (otsenka ekspluatatsionnoi nadezhnosti i dolgovechnosti)*. Spravochnik [Reliability of metallurgical equipment (estimation of operational reliability and durability). Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 592 p. (In Russ.).
10. Augusti G., Baratta A., Casciati F. *Probabilistic Methods in Structural Engineering*. London: Chapman and Hall, 1984, 556 p.
11. Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C. *Methods of Structural Safety*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1986, 403 p.
12. Barlow E.E., Proschan F., Hunter L.C. *Mathematical Theory of Reliability*. New York-London-Sydney: Wiley, 1965, 256 p.
13. Breipohl M. *Probabilistic Systems Analysis*. New York-London-Sydney-Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1970, 352 p.
14. Hahn G.J., Shapiro S.S. *Statistical Models in Engineering*. New York-London-Sydney: John Wiley & Sons, Inc., 1994, 376 p.
15. Zorin V.A., Bocharov V.S. *Nadezhnost' mashin* [Reliability of machines]. Orel: Izd-vo OrelGTU, 2003, 548 p. (In Russ.).
16. Severtsev N.A. *Nadezhnost' slozhnykh sistem v ekspluatatsii i otrabotke. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Reliability of complex systems in operation and working out. University manual]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 432 p. (In Russ.).
17. Savel'ev A.N. *Teoriya rabotosposobnosti tekhnologicheskikh mashin* [Theory of technological machines workability]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2008, 225 p. (In Russ.).
18. Savel'ev A.N. Use of the criterion of machine parts workability in calculation of their service life. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, vol. 36, no. 10, pp. 84–86. (In Russ.).
19. Kravchenko I.N., Puchin E.A., Chepurin A.V., etc. *Otsenka nadezhnosti mashin i oborudovaniya: teoriya i praktika. Uchebnik* [Reliability assessment of machines and equipment: theory and practice. Textbook]. Kravchenko I.N. ed. Moscow: Al'fa-M; INFRA-M, 2012, 336 p. (In Russ.).
20. Svetlitskii V.A. *Statisticheskaya mekhanika i teoriya nadezhnosti* [Statistical mechanics and reliability theory]. Moscow: izd. MG TU im. N.E. Baumana, 2002, 504 p. (In Russ.).
21. Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*. Stockhol: Almqvist and Wiksells, 1946, 575 p.
22. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh system* [Reliability and safety of structurally complex systems]. St.-Peterburg: Politekhnik, 2000, 248 p. (In Russ.).
23. Barlow R.E., Proschan F. *Statistical Theory of Reliability and Life Testing Probability Models*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1975, 290 p.
24. Locks M.O. *Reliability, Maintainability, and Availability Assessment*. New York: Hayden Book Co., Inc., 1973.
25. Esary J.D., Proschan F. Reliability bound for systems of maintained and independent components. *Journal of the American Statistical Association*. 1970, vol. 65, pp. 329–338.
26. Henley E.J., Lynn J. *Generic Techniques in Reliability Assessment Components*. Holland, Leyden: Noordhoff Int., 1976, pp. 26–35.
27. Savelyev A.N., Severyanov S.S., Prokhorenko O.D. Features of operating modes of continuous casting machine's technological equipment. *Chernye metally*. 2019, no. 6, pp. 15–22. (In Russ.).
28. Savel'ev A.N., Sever'yanov S.S., Savel'eva A.V. Modeling of operational reliability of CCM units as complex technical system. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2016, vol. 16, no. 2, pp. 23–28. (In Russ.).
29. Savel'ev A.N. Structural features of sustainably functioning complex technical system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996, vol. 39, no. 12, pp. 53–58. (In Russ.).
30. Savel'ev A.N., Timoshenkov Yu.G., Bich T.A. Modeling of distribution of CCM elements by their reliability. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, vol. 49, no. 8, pp. 46–49. (In Russ.).

**Information about the authors:**

*A.N. Savel'ev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (Savelyev2000@mail.ru)*  
*S.S. Sever'yanov, Postgraduate of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (Zhaha14@rambler.ru)*

Received May 17, 2019

Revised June 17, 2019

Accepted June 20, 2019

*Уважаемые коллеги, друзья!  
Поздравляем вас с самым  
сказочным праздником в году!  
Желаем вам чудес и волшебства  
в новогоднюю ночь,  
а в грядущем году вдохновения,  
смелых проектов, новых  
открытий и осуществления  
творческих замыслов!  
Крепкого здоровья, удачи,  
благополучия и процветания!*

**2020**  
С НОВЫМ ГОДОМ!

Над номером работали:

*Леонтьев Л.И., главный редактор*

*Протопопов Е.В., заместитель главного редактора*

*Ивани Е.А., заместитель главного редактора*

*Башенко Л.П., заместитель ответственного секретаря*

*Потапова Е.Ю., заместитель главного редактора по развитию*

*Олендаренко Н.П., ведущий редактор*

*Запольская Е.М., ведущий редактор*

*Расенец В.В., верстка, иллюстрации*

*Кузнецов А.А., системный администратор*

*Острогорская Г.Ю., менеджер по работе с клиентами*

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

TO THE 85TH ANNIVERSARY OF LEOPOL'D IGOREVICH LEONT'EV

INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF ROLLED PROFILES WITH SIMPLE FORM

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF REINFORCING BARS OF A500C STRENGTH CLASS

EFFECT OF LIGHT ELEMENTS IMPURITY ATOMS ON GRAIN BOUNDARY DIFFUSION IN FCC METALS: A MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION

NONMETALLIC INCLUSIONS IN RAILS MADE OF ELECTRO-STEEL ALLOYED WITH CHROMIUM

SIMULATION OF CRYSTAL GROWTH IN MULTICOMPONENT METASTABLE ALLOYS

THERMODYNAMIC ASPECTS OF  $Cr_2O_3$  REDUCTION BY CARBON

ANALYSIS OF THERMODYNAMIC PROPERTIES OF CA-SI-Fe MELT

HIGH POWER CURRENT PULSE GENERATOR BASED ON REVERSIBLE THYRISTOR CONVERTER

ASSESSMENT OF UNITS' PERFORMANCE OF CCM TECHNOLOGICAL LINE

DEVELOPMENT OF INFORMATION MODELING SYSTEM OF COAL-DUST FUEL INJECTION INTO TUYERES OF BLAST FURNACE

INDEX OF ARTICLES "IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY" FOR 2019. Vol. 62