

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

---

---

НАУКОВИЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЖУРНАЛ

**Металознавство**  
та  
термічна обробка металів

ЗАСНОВАНИЙ У 1997 РОЦІ

---

**№ 1 (88)**

---

---

ДНІПРО

2020



УДК 669017  
ББК 34.2  
М 54

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації **КВ № 2376** від 09.01.1997 р.

Свідоцтво – Серія ДК № 1291 від 20.03.2003 р. про внесення ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» як суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців та поширювачів видавничої продукції.

*Засновник журналу:*

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Позиція ректорату академії та редколегії може не збігатися з думками авторів журналу.

Рекомендовано до друку вченою радою ДВНЗ ПДАБА (протокол № 7 від 26.02.2020 р.).

Мови видання: українська, російська та англійська.

Згідно з додатком № 12 до наказу Міністерства освіти і науки України від 16.05.2016 р. № 515 журнал входить до переліку № 1 «Наукові фахові видання України», в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора та кандидата технічних наук.

Наукометричні бази та електронні бібліотеки, в яких зареєстрований науковий журнал: *Інформаційно-аналітичні системи – РІНЦ (eLibrary), ResearchBib; електронні бібліотеки та пошукові системи – Українські наукові журнали, Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського.*

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

головний редактор – д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро

**В. І. Большаков;**

заст. гол. редактора – д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро

**В. В. Данішевський;**

відповідальний секретар та випусковий редактор – к-т техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро

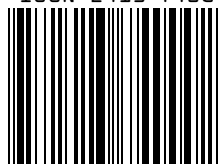
**О. А. Тимошенко.**

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:**

**О. І. Бабаченко**, д-р техн. наук, *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро.*

**О. В. Бєкстєв**, к-т техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **В. С. Вахрушева**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **В. М. Волчук**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **Т. О. Дергач**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **С. І. Губенко**, д-р техн. наук, *Національна металургійна академія України, м. Дніпро.* **В. З. Куцова**, д-р техн. наук, *Національна металургійна академія України, м. Дніпро.* **Д. В. Лаухін**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **Ю. Я. Мєшков**, д-р техн. наук, *Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ.* **А. Г. Пригунова**, д-р техн. наук, *Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ.* **М. В. Савицький**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **Г. Д. Сухомлин**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **І. Г. Узлов**, д-р техн. наук, *Інститут чорної металургії імені З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро.* **Х. А. Аскєров**, к-т техн. наук, *Університет Карабюк, м. Карабюк (Туреччина).* **В. І. Куксенко**, к-т техн. наук, *Управління з атомної енергетики Великобританії, м. Оксфорд (Великобританія).*

ISSN 2413-7405



9 772413 740002

Україна, 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а  
ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»  
☎ +38(050) 452-43-63  
e-mail : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com), [http : //www.mtom.pgasa.dp.ua](http://www.mtom.pgasa.dp.ua)

© ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2020

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ**  
**«ПРИДНИПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ**  
**СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»**

---

---

**НАУЧНЫЙ И ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ**

**Металловедение**  
**И**  
**термическая обработка металлов**

**О С Н О В А Н В 1 9 9 7 Г О Д У**

---

---

**№ 1 (88)**

---

---

**ДНИПРО**

**2020**



УДК 669017  
ББК 34.2  
М 54

Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации **КВ № 2376** от 09.01.1997 г.

Свидетельство – Серия ДК № 1291 от 20.03.2003 г. о внесении ГВУЗ «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры» как субъекта издательского дела в Госреестр издателей и распространителей издательской продукции.

*Основатель журнала:*

ГВУЗ «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры»

Позиция ректората академии и редколлегии может не совпадать с мнением авторов журнала.

Рекомендовано к печати ученым советом ГВУЗ ПГАСА (протокол № 7 от 26.02.2020 г.).

Языки издания: украинский, русский и английский.

В соответствии с приложением № 12 к приказу Минобразования и науки Украины от 16.05.2016 г. № 515 журнал входит в перечень № 1 «Научные специализированные издания Украины», в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук.

Наукометрические базы и электронные библиотеки, в которых зарегистрирован научный журнал: *Информационно-аналитические системы – РИНЦ (eLibrary), ResearchBib; электронные библиотеки и поисковые системы – Украинские научные журналы, Национальная библиотека Украины им. В. И. Вернадского*

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

главный редактор – д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro

**В. И. Большаков;**

зам. глав. редактора – д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro

**В. В. Данишевский;**

ответственный секретарь и выпускающий редактор – к-т техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro

**Е. А. Тимошенко.**

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

**А. И. Бабаченко**, д-р техн. наук, *Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, г. Днipro.*

**А. В. Бекетов**, к-т техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro.

**В. С. Вахрушева**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro.

**В. Н. Волчук**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro.

**Т. А. Дергач**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro.

**С. И. Губенко**, д-р техн. наук, *Национальная металлургическая академия Украины, г. Днipro.*

**В. З. Куцова**, д-р техн. наук, *Национальная металлургическая академия Украины, г. Днipro.*

**Д. В. Лаухин**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro.

**Ю. Я. Мешков**, д-р техн. наук, *Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев.*

**А. Г. Пригунова**, д-р техн. наук, *Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев.*

**Н. В. Савицкий**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro.

**Г. Д. Сухомлин**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днipro.

**И. Г. Узлов**, д-р техн. наук, *Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, г. Днipro.*

**Х. А. Аскеров**, к-т техн. наук, *Университет Карабюк, г. Карабюк (Турция).*

**В. И. Куксенко**, к-т техн. наук, *Управление атомной энергетики Великобритании, г. Оксфорд (Великобритания).*

Художественный редактор

**С. Б. Пономарев**  
Технический редактор и компьютерная верстка

**Е. А. Тимошенко**  
Переводчик

**Е. В. Соколова**  
Редактор, корректор

**В. Д. Маловик**

ISSN 2413-7405



9 772413 740002

Украина, 49600, г. Днipro, ул. Чернышевского, 24-а  
ГВУЗ «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры»

+38(050) 452-43-63

e-mail : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com), [http : //www.mtom.pgasa.dp.ua](http://www.mtom.pgasa.dp.ua)

© ГВУЗ «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», 2020

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

STATE HIGHER EDUCATION INSTITUTION  
“PRYDNIPROVSKA STATE ACADEMY OF CIVIL ENGINEERING  
AND ARCHITECTURE”

---

---

SCIENTIFIC AND INFORMATION JOURNAL

**Metal Science  
and  
Heat Treatment of Metals**

Established in 1997

---

**№ 1 (88)**

---

---

DNIPRO  
2020



UDC 669017  
LBC 34.2  
M 54

State Registration Certificate of Publication Media, series  
KB № 2376 dated on 09.01.1997.

Certificate – Series DK № 1291 dated on 20.03.2003  
about admitting SHEI “Prydniprovsk State Academy of  
Civil Engineering and Architecture” as the subject  
of publishing in the State Register of publishers  
and publishing products distribution

*Founder of the journal:*

SHEI “Prydniprovsk State Academy of Civil  
Engineering and Architecture”

The position of Rector of the Academy and editorial  
board can be at variance with the views of journal  
authors.

Recommended for publication by the Academic Council  
SHEI PSACEA (protocol No. 7 dated on 26.02.2020).

Languages: Ukrainian, Russian and English.

According to the annex to the order № 12 of the Ministry  
of Education and Science of Ukraine from 16.05.2016  
No. 515 the journal is listed to number 1 "Scientific  
Publications of Ukraine", in which can be published the  
dissertations for the degree of doctor and candidate  
of technical sciences results.

Scientometric databases and electronic libraries in which  
was the scientific journal: *Information and analytical  
systems* – Russian Science Citation Index (eLibrary),  
ResearchBib; *electronic libraries and search engines* –  
Ukrainian scientific journals, National library of Ukraine  
named V. I. Vernadskyi

**EDITORIAL STAFF:**

**V. I. Bolshakov**, Chief Editor, Doctor of Engineering  
Science, *SHEI PSACEA, Dnipro*

**V. V. Danyshevskiy**, Deputy Chief Editor, Doctor  
of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro*

**O. A. Tymoshenko**, Executive Secretary & Editor,  
Candidate of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro*

**MEMBERS OF EDITORIAL STAFF:**

**O. I. Babachenko**, Doctor of Engineering Science, *Iron  
and Steel Research Institute named Z. I. Nekrasov of the  
N. A. S. of Ukraine, Dnipro*. **O.V. Beketov**, Candidate  
of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro*.

**V. S. Vakhrusheva**, Doctor of Engineering Science,  
*SHEI PSACEA, Dnipro*. **V. M. Volchuk**, Doctor  
of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro*.

**T. O. Derhach**, Doctor of Engineering Science,  
*SHEI PSACEA, Dnipro*. **S. I. Gubenko**, Doctor  
of Engineering Science, *National Metallurgical Academy  
of Ukraine, Dnipro*.

**V. Z. Kutsova**, Doctor of Engineering  
Science, *National Metallurgical Academy of Ukraine,  
Dnipro*. **D.V. Laukhin**, Doctor of Engineering Science,  
*SHEI PSACEA, Dnipro*. **Yu. Ya. Mieshkov**, Doctor  
of Engineering Science, *G. V. Kurdyumov Institute for  
Metal Physics of the N. A. S. of Ukraine, Kyiv*.

**A. G. Pryhunova**, Doctor of Engineering Science, *Physico-  
Technological Institute of Metals and Alloys of the N. A. S.  
of Ukraine, Kyiv*. **M. V. Savyttskyi**, Doctor of Engineering  
Science, *SHEI PSACEA, Dnipro*. **H. D. Sukhomlyn**,  
Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro*.

**I. H. Uzlov**, Doctor of Engineering Science, *Iron and Steel  
Research Institute named Z. I. Nekrasov of the N. A. S.  
of Ukraine, Dnipro*. **Khanhardash Askerov**, Candidate  
of Engineering Science, *Karabük University, Karabük  
(Turkey)*. **V. I. Kuksenko**, Ph D in Physics (France),  
*UK Atomic Energy Authority, Oxford, Great Britain*.

**I. H. Uzlov**, Doctor of Engineering Science, *Iron and Steel  
Research Institute named Z. I. Nekrasov of the N. A. S.  
of Ukraine, Dnipro*. **Khanhardash Askerov**, Candidate  
of Engineering Science, *Karabük University, Karabük  
(Turkey)*. **V. I. Kuksenko**, Ph D in Physics (France),  
*UK Atomic Energy Authority, Oxford, Great Britain*.

Art Editor

**S. B. Ponomariov**

Technical Editor and Desktop Publishing

**O. A. Tymoshenko**

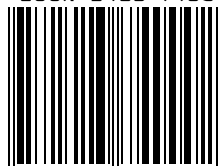
Translator

**K. V. Sokolova**

Editor and Proof-reader

**V. D. Malovyk**

ISSN 2413-7405



9 772413 740002

Ukraine, 49600, Dnipro 24-a, Chernyshevskoho St.,  
SHEI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”

☎ +38(050) 452-43-63

e-mail : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

http : [//www.mtom.pgasa.dp.ua](http://www.mtom.pgasa.dp.ua)

© SHEI “Prydniprovsk State Academy of Civil  
Engineering and Architecture”, 2020


**ЗМІСТ**

<b>Бобрик А. С.</b> Вплив складу та структури на властивості масивних виробів.....	13
<b>Волчук В. М.</b> Моделювання властивостей конструкційних матеріалів.....	21
<b>Губенко С. І., Беспалько В. М.</b> Поведінка гетерофазних включень «фази поруч» під час обробки сталей тиском.....	36
<b>Гуль Ю. П., Соболенко М.О., Чмельова В. С., Перчун Г. І.</b> Технологічні аспекти отримання холоднодеформованого дроту зі сталі Гадфільда.....	42
<b>Гуль Ю. П., Чмельова В. С., Соболенко О. В., Перчун Г. І.</b> Вакансії як легувальний елемент у металах.....	48
<b>Должанський А. М., Куцова В. З., Аюпова Т. А., Сторожко К. Д., Рибкін О. П.</b> Холодна прокатка ливарного алюмінієвого сплаву.....	55
<b>Опришко Л. В., Головняк Т. В.</b> Експлуатаційна надійність котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф виробництва ПрАТ НКМЗ.....	62
<b>Узлов О. В., Дрожевська Г. В., Пучиков О. В., Шпак О. А., Слупська Ю. С.</b> Підвищення ресурсу експлуатації дисків пилок гарячого різання металу шляхом термічної обробки.....	70

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Бобрик А. С.</b> Влияние состава и структуры на свойства массивных изделий.....	13
<b>Волчук В. Н.</b> Моделирование свойств конструкционных материалов.....	21
<b>Губенко С. И., Беспалько В. Н.</b> Поведение гетерофазных включений «фазы рядом» при обработке сталей давлением.....	36
<b>Гуль Ю. П., Соболенко М. А., Чмелева В. С., Перчун Г. И.</b> Технологические аспекты получения холоднодеформированной проволоки из стали Гадфильда.....	42
<b>Гуль Ю. П., Чмелева В. С., Соболенко А. В., Перчун Г. И.</b> Вакансии как легирующий элемент в металлах.....	48
<b>Должанский А. М., Куцова В. З., Аюпова Т. А., Сторожко К. Д., Рыбкин О. П.</b> Холодная прокатка литейного алюминиевого сплава.....	55
<b>Опрышко Л. В., Головняк Т. В.</b> Эксплуатационная надежность котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф производства ЧАО НКМЗ.....	62
<b>Узлов О. В., Дрожевская А. В., Пучиков А. В., Шпак О. А., Слупская Ю. С.</b> Повышение ресурса эксплуатации дисков пил горячей резки металла путем термической обработки.....	70



## CONTENT

<b>Bobryk A.S.</b> Impact of the composition and structures on the properties of massive products.....	13
<b>Volchuk V.M.</b> Modeling properties of structural materials.....	21
<b>Gubenko S.I., Bespalko V.M.</b> The behaviour of heterophase inclusions “phases are beside” under steel pressure forming.....	36
<b>Gul Yu.P., Sobolenko M.O., Chmeleva V.S., Perchun G.I.</b> Technology of producing cold deformable wire from Hadfield steel.....	42
<b>Gul Yu.P., Chmeleva V.S., Sobolenko O.V., Perchun G.I.</b> Vacancies as a metal alloying element.....	48
<b>Dolzhanskyi A.M., Kutsova V.Z, Ayupova T.A., Storozhko K.D., Rybkin O.P.</b> Cold rolling of aluminum foundry alloy.....	55
<b>Opryshko L.V., Golovniak T.V.</b> Operational reliability of forged boiler tubes of 15Cr1Mo1V steel produced by NKMZ PJSC.....	62
<b>Uzlov O.V., Drozhevskaya H.V., Puchikov O.V., Shpak O.A., Slupska Yu.S.</b> Service durability improvement of hot saws by heat treatment.....	70

## **XXX МІЖНАРОДНА науково-практична конференція**

**«СТАРОДУБОВСЬКІ ЧИТАННЯ – 2020»**

17 квітня 2020 р.

м. Дніпро

ДВНЗ ПДАБА

Щорічно у квітні, починаючи з 1991 року, в ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» проводиться Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті академіка НАН України, доктора технічних наук, професора, заслуженого діяча науки і техніки України, лауреата премії Ради Міністрів СРСР Кирила Федоровича Стародубова.

### **Результати наукових досліджень з МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА:**

- *Фазові та структурні перетворення в матеріалах;*
- *Термомеханічне зміцнення сталей та їх властивості;*
  - *Перспективні технології термічного і термомеханічного зміцнення матеріалів*

апробовані на XXX Міжнародній науково-практичній конференції «Стародубовські читання – 2020» та опубліковані в цьому номері журналу.

# **XXX МЕЖДУНАРОДНАЯ научно-практическая конференция**

**«СТАРОДУБОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2020»**

17 апреля 2020 г.  
г. Днепро  
ГВУЗ ПГАСА

Ежегодно в апреле, начиная с 1991 года, в ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» проводится Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти академика НАН Украины, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Украины, лауреата премии Совета Министров СССР Кирилла Федоровича Стародубова.

## **Результаты научных исследований в МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ :**

- *Фазовые и структурные превращения в материалах;*
- *Термомеханическое упрочнение сталей и их свойства;*
- *Перспективные технологии термического и термомеханического упрочнения материалов*

апробированы на XXX Международной научно-практической конференции «Стародубовские чтения – 2020» и опубликованы в данном номере журнала.

**XXX INTERNATIONAL  
*scientific and practical conference***

***"STARODUBOVSKYI READINGS – 2020"***

17<sup>th</sup> of April, 2020  
Dnipro  
SHEI PSACEA

Every year in April, since 1991, the SHEI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” held an international scientific and practical conference dedicated to the memory of Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of the USSR, Winner of the Prize of the USSR Council of Ministers – Kyryl Fedorovych Starodubov.

**The results of scientific research in MATERIAL SCIENCE:**

- *Phase and structural transformations in materials;*
- *Thermomechanical hardening of steels and their properties;*
  - *Advanced technologies of thermal  
and thermomechanical hardening of materials*

were tested at the XXX International Scientific-practical Conference "Starodubovskiy Readings – 2020" and published in this issue of the journal.

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.13.628

## ВПЛИВ СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ НА ВЛАСТИВОСТІ МАСИВНИХ ВИРОБІВ

БОБРИК А. С., *магістр*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [asuvorova32@gmail.com](mailto:asuvorova32@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3566-7676

**Анотація.** *Вступ.* Складність технології виробництва масивних металевих виробів, до яких належать чавунні прокатні валки, не дозволяє наперед точно прогнозувати їх механічні властивості. Тому більшість існуючих моделей прогнозування механічних властивостей прокатних валків засновані на статистичних даних експериментів та експертних оцінках. Запропоновано створити модель прогнозу механічних властивостей сортопрокатних валків шляхом оцінки їх хімічного складу та структури. *Матеріали та методика.* Як матеріал для дослідження обрано валковий чавун марки СПХН-49 та СПХН-45. Металлографічний аналіз структури валків проводився згідно з Державним стандартом 3443. Встановлено, що вміст карбідів перебував у межах 8...14 %, пластинчастого графіту – 0,5...1,3 %. Довжина включень пластинчастого графіту відповідала балам ПГд45...ПГд180. *Результати експерименту.* Отримано моделі прогнозу механічних властивостей чавунних валків СПХН-49 та СПХН-45 залежно від їх хімічного складу та структури. Максимальна похибка у прогнозі  $\sigma_B$  валків на основі аналізу елементів хімічного складу становить 2,40 %;  $\sigma_{згн}$  – 5,85 %; КС – 5,81 % та HSD – 3,19 %. В оцінюванні механічних властивостей валків на основі аналізу елементів їх структури максимальні похибки прогнозу становили для  $\sigma_B$  – 4,83 %;  $\sigma_{згн}$  – 4,58 %; КС – 5,74 % та HSD – 2,81 %. Коефіцієнти парної кореляції  $R^2$  отриманих моделей зафіксовані в межах 0,55...0,94, що свідчить про можливість застосування отриманих моделей як експрес-методики для оперативного визначення механічних властивостей валків СПХН-49 та СПХН-45 у робочій області параметрів. Побудовано гістограми впливу досліджуваних параметрів на механічні властивості. *Висновки.* В результаті дослідження робочої області параметрів хімічного складу та структури валків СПХН-49 та СПХН-45 отримано моделі прогнозу їх властивостей. Аналіз літературних джерел дозволив застосувати експертні оцінки для ранжування обраних параметрів.

**Ключові слова:** чавунні валки; хімічний склад; механічні властивості; структура; модель; прогноз

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА МАССИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

БОБРИК А. С., *магістр*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [asuvorova32@gmail.com](mailto:asuvorova32@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3566-7676

**Аннотация.** *Введение.* Сложность технологии производства массивных металлических изделий, к которым относятся чугунные прокатные валки, не позволяет заранее точно прогнозировать их механические свойства. Поэтому большинство существующих моделей прогнозирования механических свойств прокатных валков основаны на статистических данных экспериментов и экспертных оценках. Предлагается создать модель прогноза механических свойств сортопрокатных валков путем оценки их химического состава и структуры. *Материалы и методика.* В качестве материала для исследования выбран валковый чугун марки СПХН-49 и СПХН-45. Металлографический анализ структуры валков проводился согласно с Государственным стандартом 3443. Установлено, что содержание карбидов находилось в пределах 8...14 %, пластинчатого графита – 0,5...1,3 %. Длина включений пластинчатого графита соответствовала баллам ПГд45...ПГд180. *Результаты эксперимента.* Получены модели прогноза механических свойств чугунных валков СПХН-49 и СПХН-45 в зависимости от их химического состава и структуры. Максимальная погрешность при прогнозе  $\sigma_B$  валков на основе анализа элементов химического состава составляет 2,40 %;  $\sigma_{изг}$  – 5,85 %; КС – 5,81 % и HSD – 3,19 %. При оценке механических свойств валков на основе анализа элементов их структуры максимальные погрешности прогноза составляли для  $\sigma_B$  – 4,83 %;  $\sigma_{изг}$  – 4,58 %; КС – 5,74 % и HSD – 2,81 %. Коэффициенты парной корреляции  $R^2$  полученных моделей зафиксированы в пределах 0,55...0,94, что свидетельствует

о возможности применения полученных моделей в качестве экспресс-методики для оперативного определения механических свойств валков СПХН-49 и СПХН-45 в рабочей области параметров. Построены гистограммы влияния исследуемых параметров на механические свойства. **Выводы.** В результате исследования рабочей области параметров химического состава и структуры валков СПХН-49 и СПХН-45 получены модели прогноза их свойств. Анализ литературных источников позволил применить экспертные оценки для ранжирования выбранных параметров.

**Ключевые слова:** *чугунные валки; химический состав; механические свойства; структура; модель; прогноз*

## IMPACT OF THE COMPOSITION AND STRUCTURES ON THE PROPERTIES OF MASSIVE PRODUCTS

BOBRYK A.S., *Master of Engineering*

Department of Materials Science, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [asuvorova32@gmail.com](mailto:asuvorova32@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3566-7676

**Abstract. Introduction.** The complexity of production technology of massive metal products, which include cast iron rolls, does not allow predicting accurately their mechanical properties in advance. Therefore, most existing models for predicting the mechanical properties of rolling rolls are based on experiment statistics and expert estimates. It is proposed to create a model for forecasting the mechanical properties of rolling mills by evaluating their chemical composition and structure. **Materials and methodology.** Roller cast iron of the СПХН-49 and СПХН-45 brand was selected as the study material. Metallographic analysis of the rolls structure was carried out in accordance with the State Standard 3443. It was found that the carbide content was in the range of 8... 14 %, plate graphite – 0,5... 1,3 %. The length of inclusions of graphite corresponded to a score of ПГД45...ПГД180. **The results of the experiment.** Prediction models of mechanical properties of cast iron rolls СПХН-49 and СПХН-45 depending on their chemical composition and structure were obtained. The maximum error in the prediction of  $\sigma_B$  rolls based on the analysis of chemical composition elements is 2,40 %;  $\sigma_{изг}$  – 5,85 %; КС – 5,81 % and HSD – 3,19 %. When estimating the mechanical properties of the rolls, based on the analysis of the elements of their structure, the maximum prediction errors were 4,83 % for  $\sigma_B$  – 4,83 %;  $\sigma_{изг}$  – 4,58 %; КС – 5,74 % and HSD – 2,81 %. The pair correlation coefficients  $R^2$  of the obtained models are fixed within 0,55...0,94, which indicates the possibility of using the obtained models as an express method for the rapid determination of the mechanical properties of rolls СПХН-49 and СПХН-45 in the working range of parameters. Histograms of the influence of the studied parameters on the mechanical properties are constructed. **Conclusions.** As a result of the study of operating range parameters of the chemical composition and structure of the rolls СПХН-49 and СПХН-45, the forecast models of their properties are obtained. The analysis of the literature has allowed the use of expert estimates to rank the selected parameters.

**Keywords:** *cast iron rolls; chemical composition; mechanical properties; structure; model; forecast*

**Вступ.** Оцінювання механічних властивостей масивних виробів завжди ускладнене багатопараметричністю та багатокритерійністю технології їх виробництва [1; 2]. Стохастичні зміни критеріїв якості чавунних валків, що належать до масивних металевих виробів, залежать від зміни параметрів технології їх виробництва: хімічного складу; температури заливки чавуну, швидкості охолодження, способу виготовлення (наприклад, звичайне або відцентрове лиття), маси відливки (багатотонажний об'єкт, технологічний процес охолодження якого становить від 1 до 3 діб) [1–5]. Усі ці

параметри істотно впливають на критерії якості цільового продукту.

Хімічний склад і структура литих сортопрокатних чавунних валків – основні фактори, що визначають їх фізико-механічні властивості [3; 6; 7]. Тому для оперативного оцінювання властивостей масивних валків широко застосовують емпіричні моделі [8–10], включаючи фрактальне моделювання структури та властивостей різних матеріалів [11–14]. Наприклад, у [15; 16] для прогнозу критеріїв якості матеріалів застосовували системний підхід; експертний підхід [17; 18]. Для прогнозу критеріїв якості матеріалів користуються методикою планування експериментів [19–21]. Її застосування дає

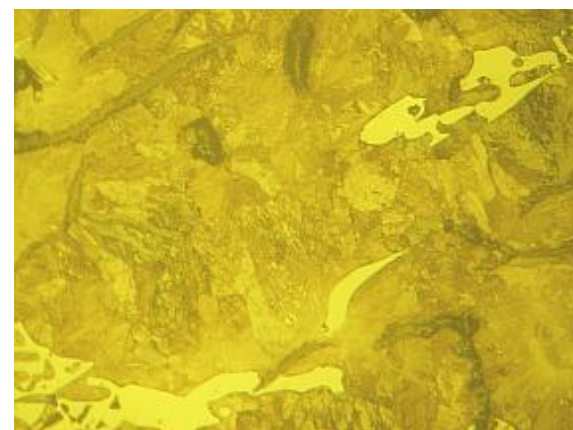
можливість досліджувати та оптимізувати багатопараметричні технології.

Із метою дослідження впливу хімічного складу та структури чавунних прокатних валків на їх механічні характеристики у статті запропоновано застосовувати математичне моделювання. Такий підхід дасть можливість визначити механічні властивості валків у робочій області параметрів та кількісно оцінити «вагу» їх впливу.

**Матеріали та методика.** Як матеріал для дослідження обирали по шість чавунних валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 виробництва Дніпровського заводу прокатних валків, м. Дніпро (рис. 1). Маса валків становила 3...5 т. Із цієї марки чавуну виробляють сортопрокатні (С) валки, що мають у структурі пластинчастий графіт – П. Для поліпшення експлуатаційних характеристик валків їх легують Сг (Х) та Ні (Н). Валки експлуатуються в основному в передчистових клітках крупносортих, трубпрокатних та рельсобалкових станів металургійних підприємств, тому мають витримувати значні перепади температури та тиску.



а



б (b)

Рис. 2. Мікроструктура робочого шару бочок валкового чавуну (10 мм від поверхні): пластинчастий графіт (а); колонії ледебуриту, пластинчастого графіту та перлітної матриці / Fig. 2. Microstructure of the working layer of roll cast iron barrels (10 mm from the surface): plate graphite (a); colonies of ledeburite, plate graphite and pearlite matrix

Структуру валкового чавуну виконання СПХН-49 та СПХН-45 вивчали за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-6 при збільшенні 200. В результаті

Досліджуваний хімічний склад валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 змінювався в таких межах згідно з ТУ У 27.5-24608640-002:2008: 3,10...3,30 %С; 0,70...0,85 %Si; 0,70...0,76 %Mn; 0,61...0,76 %Cr; 0,90...1,17 %Ni; 0,115...0,30 %P; 0,035...0,055 %S.



Рис. 1. Чавунні сортопрокатні валки СПХН / Fig. 1. Cast iron rolling mills СПХН

Під час визначення ударної в'язкості чавуну використовували зразки без надрізу, що мали розміри 10 × 10 × 55 мм. Показники міцності чавуну на згин визначали на зразках розмірами 10 × 10 × 90 мм, а для визначення міцності на розтяг – зразки розмірами 25 × 50 мм.

графіту – в діапазоні 0,5...1,3 %. Бал пластинчастого графіту перебував у межах ПГд45...ПГд180 згідно з Державним стандартом 3443.

**Результати експерименту.** Базуючись на літературному огляді багатопараметричної технології виробництва валків, прийняли обрати як параметри для

дослідження елементи їх хімічного складу та структури (рис. 3). Дослідження за допомогою математичного апарату робочої області обраних параметрів та критеріїв якості (в даному випадку механічних властивостей валкового чавуну виконання СПХН-49 та СПХН-45) дало можливість побудувати моделі прогнозу цих критеріїв.

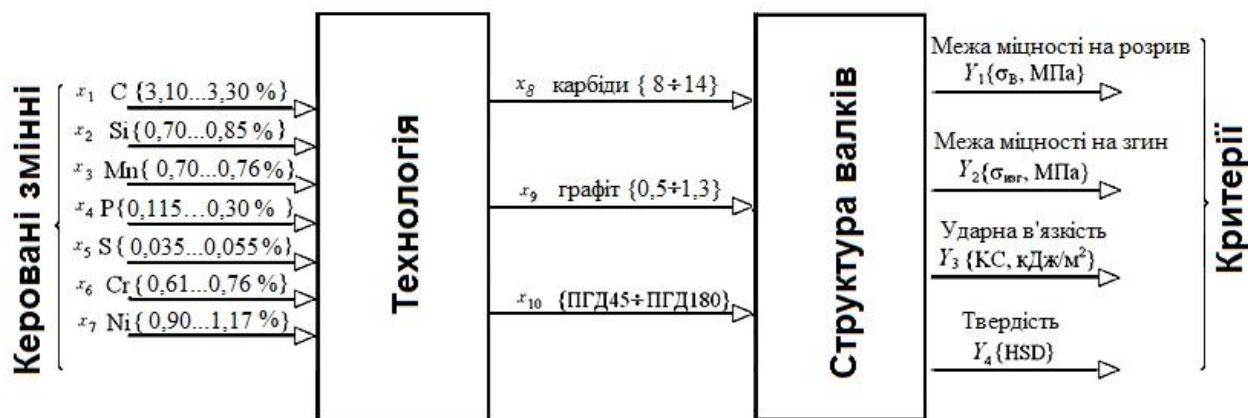


Рис. 3. Структурна схема вибору параметрів технології для дослідження /  
Fig. 3. Block diagram of the choice of technology parameters for research

З використанням регресійного аналізу отримано лінійні моделі прогнозу механічних властивостей  $Y_1, Y_2, Y_3$  та  $Y_4$  робочого шару валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 (1–8). Результати аналізу рівнянь (1–4) наведені в таблиці, де  $Y_{1ек},$

$Y_{2ек}, Y_{3ек}, Y_{4ек}$  – значення механічних властивостей, отриманих у результаті експерименту (натурних іспитів);  $Y_{1роз}, Y_{2роз}, Y_{3роз}, Y_{4роз}$  – розрахункові значення механічних властивостей, отриманих за допомогою рівнянь.

$$Y_1 = 273,12 - 24,59 \cdot x_1 + 29,86 \cdot x_2 - 229,18 \cdot x_3 + 18,66 \cdot x_4 - 605,28 \cdot x_5 + 325,49 \cdot x_6 + 54,65 \cdot x_7; \quad R^2=0,94 \quad (1)$$

$$Y_2 = 2242,65 - 47,16 \cdot x_1 - 505,41 \cdot x_2 - 965,44 \cdot x_3 - 382,59 \cdot x_4 - 5487,30 \cdot x_5 - 414,85 \cdot x_6 + 59,53 \cdot x_7; \quad R^2=0,87 \quad (2)$$

$$Y_3 = 1,33 - 0,62 \cdot x_1 + 7,19 \cdot x_2 + 28,17 \cdot x_3 - 15,59 \cdot x_4 + 63,49 \cdot x_5 - 2,13 \cdot x_6 - 3,38 \cdot x_7; \quad R^2=0,68 \quad (3)$$

$$Y_4 = 94,22 - 2,93 \cdot x_1 - 18,54 \cdot x_2 + 2,89 \cdot x_3 - 38,60 \cdot x_4 + 128,17 \cdot x_5 - 23,34 \cdot x_6 - 6,63 \cdot x_7; \quad R^2=0,70 \quad (4)$$

$$Y_1 = 283,30 + 6,51 \cdot x_8 - 56,90 \cdot x_9 + 0,02 \cdot x_{10}; \quad R^2=0,84 \quad (5)$$

$$Y_2 = 534,71 - 1,88 \cdot x_8 - 157,34 \cdot x_9 + 0,44 \cdot x_{10}; \quad R^2=0,78 \quad (6)$$

$$Y_3 = 20,84 + 0,12 \cdot x_8 - 2,10 \cdot x_9 + 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot x_{10}; \quad R^2=0,55 \quad (7)$$

$$Y_4 = 57,57 - 0,58 \cdot x_8 - 6,46 \cdot x_9 + 0,02 \cdot x_{10}. \quad R^2=0,59 \quad (8)$$

Із даних таблиці випливає, що максимальна відносна похибка у прогнозі  $\sigma_B$  становить 2,40 %;  $\sigma_{згин}$  – 5,85 %; КС – 5,81 % та HSD – 3,19 %. Під час оцінювання механічних властивостей чавуну на основі результатів моделей (5–8) установлено, що максимальні похибки прогнозу складають для  $\sigma_B$  – 4,83 %;

$\sigma_{згин}$  – 4,58 %; КС – 5,74 % та HSD – 2,81 %. За цих обставин коефіцієнти парної кореляції  $R^2$  моделей (1–8) змінювались від 0,55 до 0,94, що свідчить про можливість їх застосування для оперативного визначення механічних властивостей валків СПХН-49 та СПХН-45 в діапазоні значень обраних параметрів.



Результати натурних іспитів валків СПХН-49 і СПХН-45 та їх прогнозу /  
Results of field tests of rolls СПХН-49 and СПХН-45 and their forecast

n/n	$\sigma_B$ , МПа			$\sigma_{згин}$ , МПа			КС, кДж/м <sup>2</sup>			Твердість, HSD		
	$Y_{1ек}$	$Y_{1роз}$	Похибка, %	$Y_{2ек}$	$Y_{2роз}$	Похибка, %	$Y_{3ек}$	$Y_{3роз}$	Похибка, %	$Y_{4ек}$	$Y_{4роз}$	Похибка, %
1	320	321	0,33	440	441	0,14	21	21	0,37	49	49	0,52
2	320	318	0,69	435	435	0,01	21	21	0,01	49	49	0,29
3	310	311	0,18	430	430	0,09	20,5	20,2	1,25	48	48	0,48
4	300	303	0,88	420	417	0,68	20	20	1,96	48	48	0,66
5	300	297	0,99	420	419	0,31	20	20	0,74	47	48	1,40
6	290	289	0,36	390	408	4,52	21	20	5,81	47	47	0,73
7	280	287	2,40	440	414	5,85	19	20	3,40	46	47	3,19
8	350	349	0,29	480	484	0,77	21	21	0,16	46	46	0,52
9	290	292	0,59	390	382	2,04	20	20	0,63	47	47	0,79
10	280	278	0,55	380	388	2,12	20	20	1,04	47	47	0,62
11	290	291	0,22	400	397	0,84	19	19	0,58	46	46	0,34
12	280	275	1,61	380	391	2,85	19	19	1,13	46	47	2,18

Шляхом аналізу коефіцієнтів рівнянь регресії (1–8) та експертної оцінки [1; 2; 5] побудовані діаграми, що описують вплив

(«вагу») кожного обраного параметра  $x_1 \dots x_{10}$  на функцію мети  $Y_1 \dots Y_4$ .

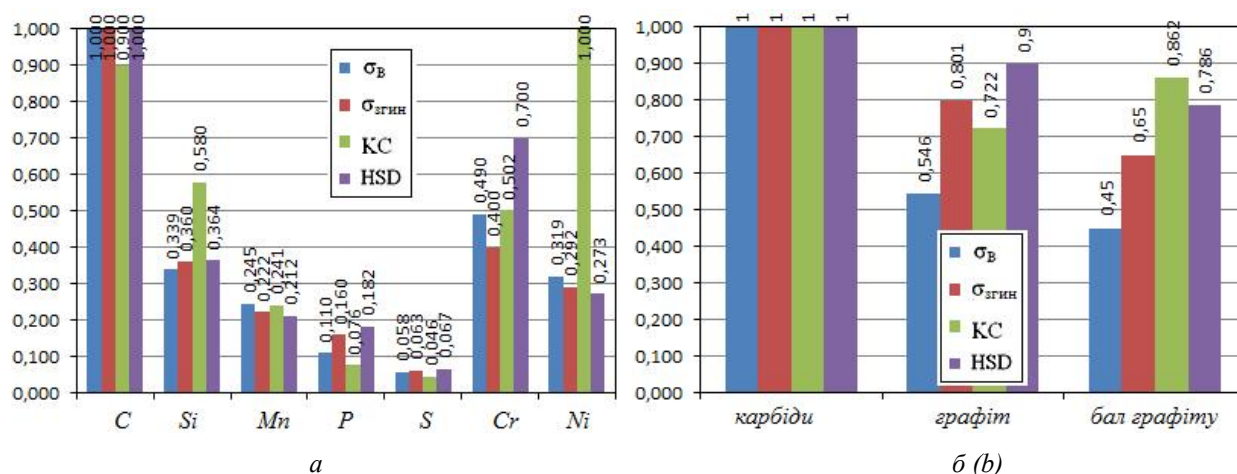


Рис. 4. Гістограми впливу елементів хімічного складу (а) та структури (б) валків СПХН-49 на їх механічні властивості / Fig. 4. Histograms of the influence of elements of chemical composition (a) and structure (b) of rolls СПХН-49 on their mechanical properties

Вплив кожного з параметрів  $x_1 \dots x_{10}$  на механічні властивості чавуну підтверджується механізмом їх фізико-хімічної взаємодії, що детально описана у працях [1–4].

**Висновки.** Проведено кількісне оцінювання впливу складу та структури сортопрокатних чавунних валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 на їх механічні

властивості ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС та HSD). Отримані моделі (1–4) та гістограму впливу хімічного складу на механічні властивості можна застосовувати на передпроектній стадії оцінювання цих властивостей, або в процесі виробництва валків. Після закінчення основного циклу виробництва валків результати прогнозу їх механічних властивостей можна коригувати шляхом

застосування отриманих моделей (5–8) та балової оцінки включень графіту). впливу елементів структури (карбідів, графіту)

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кривошеев А. Е. Литые валки : монография. Москва : Металлургиздат, 1957. 360 с.
2. Скобло Т. С., Воронцов Н. М., Будагьянц Н. А. и др. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей : монография. Москва : Металлургия, 1994. 336 с.
3. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2013. № 4. С. 5–11.
4. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях. *Доповіді НАН України*. 2014. № 11. С. 77–81. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
5. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ, 2014. № 5. С. 12–18. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
6. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 3. С. 21–25. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
7. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с. URL: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
8. Bolshakov V.I., Volchuk V.M., Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: DOI: [10.15407/mfint.40.09.1165](https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165)
9. Большаков Вад. И., Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. Системный анализ технології виробництва масивного металевого лиття. *Вісник НАН України*. 2015. № 9. С. 69–73. URL: <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>
10. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Применение теоретико-информационного подхода для идентификации структуры металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 8. С. 4–9. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134>
11. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018. Vol. 12. № 2. Pp. 93–97. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
12. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017. Т. 39. № 3. С. 949–957. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/130334>
13. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
14. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СПХНФ-47. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.241219.22.597>
15. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019. Vol. 10. № 19. Pp. 81–86. URL: <https://doi.org/10.13167/2019.19.8>
16. Lyashenko T., Voznesensky V., Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. *International symposium on brittle matrix composites*. 2000. Pp. 210–219. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=1141801>
17. Волчук В., Токосов С. Спосіб прогнозу механічних властивостей чавунних валків. *ScienceRise*. 2018. Т. 11. С. 57–61. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.150342>
18. Bolshakov V. I., Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19 : Fourth International Iron and Steel Symposium (April 4–6, 2019). Karabuk : Karabuk University, 2019 (Turkey). Vol. 4. Pp. 415–417. URL: <https://drive.google.com/open?id=1jfWwEhSuRl-3bGcv-dG7CzYnmMh7KcVT>
19. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества

матеріалів. *Перспективні задачі інженерної науки*. Вып. 2. Под общ. ред. акад. МИА, д. т. н., проф. В. И. Большакова. Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001. С. 203–208.

20. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте. *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества* : матер. к 45-му Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2006. С. 146–150.

21. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O., Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Technical Journal*. 2017. Vol. 11, № 3. Pp. 121–124. URL: <https://hrcak.srce.hr/186657>

## REFERENCES

1. Krivosheev A. E. Cast rolls. Moscow : Metallurgy, 1957, 360 p. (in Russian).
2. Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Budagyants N.A. and others. *Prokatnyye valki iz vysokouglerodistykh staley* [Rolling rolls made of high-carbon steels]. Moscow : Metallurgiya, 1994, 336 p. (in Russian).
3. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Identifikatsiya mnogoparametricheskikh, mnogokriterial'nykh tekhnologiy i puti ikh prakticheskoy realizatsii* [Multiparameter identification, multicriteria techniques and ways of their implementation]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no 4., pp. 5–11. (in Russian).
4. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).
5. Volchuk V.N. *Issledovaniya vliyaniya khimicheskogo sostava chugunnykh prokatnykh valkov na ikh mekhanicheskiye svoystva* [Studies of the influence of the chemical composition of cast iron rolls on their mechanical properties]. *Visnyk Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
6. Volchuk V.N. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By identifying areas compromise performance materials quality]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. (in Russian).
7. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
8. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no 9, pp. 1165–1171.
9. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva masynnoho metalevoho lyttya* [System analysis techniques of producing solid metal castings]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).
10. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye teoretiko-informatsionnogo podkhoda dlya identifikatsii struktury metalla* [The use of information – theoretic approach to identify the structure of the metal]. *Visnyk Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
11. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.
12. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
13. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
14. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkov СПХХ-43 та СШХХФ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers СПХХ-43 and СШХХФ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian)
15. Kroviakov S., Zavaloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019, vol. 10, no. 19, pp. 81–86.
16. Lyashenko T., Voznesensky V. and Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. In: *International symposium on brittle matrix composites*. 2000, pp. 210–219.

17. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohnozu mekhanichnykh vlastyvostey chavunnykh valkiv* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. ScienceRise. 2018, vol. 11. pp. 57–61. (in Ukrainian).

18. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium, (April 4–6, 2019). Karabuk University, Karabuk, Turkey, 2019, vol. 4, pp. 415–417.

19. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Deyneko L.N. and Dubrov Yu.I. *Kompozitsiya metoda planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov i ekspertnoy informatsii dlya formirovaniya sistemy prognoza kachestva materialov* [Composition of a method for planning extreme experiments and expert information for the formation of a material quality prediction system]. *Perspektivnyye zadachi inzhenernoy nauki* [Perspective Tasks of Engineering Science]. Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, vol. 2. pp. 203–208. (in Russian).

20. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovanii aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. The modeling and optimization in materials science : proc. of 40th Int. Conf. Odessa, 2001, pp. 25–26. (in Russian).

21. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. Technical Journal. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124.

Надійшла до редакції: 02.02.2020

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.21.629

## МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

ВОЛЧУК В. М., *докт. техн. наук, доц.*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

**Анотація. Актуальність роботи.** Пошук співвідношення між структурою та властивостями матеріалів залишається одним із пріоритетних завдань матеріалознавства. Оскільки процеси структуроутворення відбуваються для більшості матеріалів у відкритих системах, на їх властивості впливають багато параметрів технології. Елементи структури при цьому можуть мати складну геометричну конфігурацію. Наприклад, під час термічної обробки конструкційних сталей отримують різні структури. Виходячи з продуктів розпаду аустеніту, це можуть бути: відманштетів та голчастий ферит, мартенсит, бейніт та ін. Моделювання фігурами Евкліда елементів подібних структур має певні труднощі, що криються в пошуку адекватної метрики для їх апроксимації. Це впливає на точність результатів оцінювання властивостей матеріалів на основі аналізу їх структури. Тому зі спіранням на публікації останніх років, запропоновано для моделювання властивостей конструкційних матеріалів застосувати фрактальний підхід. **Матеріали та методики.** Досліджувався вплив феритно-бейнітної структури на механічні властивості конструкційної сталі Ст3 (0,16 % С). Такий підхід реалізовувався шляхом співставлення результатів обчислення фрактальної розмірності бейніту та механічних властивостей. Розрахунок фрактальної розмірності структури проводився за запатентованою методикою. Зразки сталі піддавалися термічній обробці. **Результати та їх обговорення.** Побудовано моделі прогнозу механічних властивостей сталі Ст3 на основі аналізу фрактальної розмірності бейніту та фериту. Встановлено кореляцію між цими характеристиками в межах  $R^2 = 0,39 \dots 0,81$ . Результати роботи свідчать про можливість застосування фрактального формалізму для оцінювання бейніту та фериту на мікроструктурному рівні ( $\times 500$ ). **Наукова новизна.** Зафіксовано чутливість відносного видовження та ударної в'язкості до фрактальної розмірності відманштетового фериту; межі плинності, границі міцності і відносного видовження до фрактальної розмірності бейніту. Показники міцності і твердості сталі найбільш чутливі до меж зерен. **Висновки.** Реалізовано підхід до прогнозу механічних властивостей конструкційної сталі Ст3 з феритно-бейнітною структурою шляхом фрактального моделювання.

**Ключові слова:** *сталь Ст3; мікроструктура; фрактал; механічні властивості; модель*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ВОЛЧУК В. Н., *докт. техн. наук, доц.*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

**Аннотация. Актуальность работы.** Поиск соотношения между структурой и свойствами материалов остается одной из приоритетных задач материаловедения. Поскольку процессы структурообразования проходят для большинства материалов в открытых системах, на их свойства влияют многие параметры технологии. Элементы структуры при этом могут иметь сложную геометрическую конфигурацию. Например, при термической обработке конструкционных сталей получают различные структуры. Исходя из продуктов распада аустенита, это могут быть: видманштеттов и игольчатый феррит, мартенсит, бейнит и др. Моделирование фигурами Евкліда элементов подобных структур имеет определенные трудности, заключающиеся в поиске адекватной метрики при их апроксимации. Это влияет на точность результатов оценки свойств материалов на основе анализа их структуры. Поэтому на основании публикаций последних лет предложено для моделирования свойств конструкционных материалов применить фрактальный подход. **Материалы и методики.** В работе исследовалось влияние ферритно-бейнитной структуры на механические свойства конструкционной стали Ст3 (0,16 % С). Такой подход реализовывался путем сопоставления результатов вычисления фрактальной размерности бейнита и механических свойств. Расчет фрактальной размерности структуры проводился по запатентованной методике. Образцы стали подвергались термической обработке. **Результаты и их обсуждение.** Построены модели прогноза механических свойств стали Ст3 на основе анализа

фрактальної розмірності бейніта і феррита. Установлена кореляція між цими характеристиками в межах  $R^2 = 0,39 \dots 0,81$ . Результати роботи свідчать про можливість застосування фрактального формалізму для оцінки бейніта і феррита на мікроструктурному рівні ( $\times 500$ ). **Научна новизна.** Зафіксована чутливість відносного подовження і ударної вязкості до фрактальної розмірності видманштетова феррита; межі текучості, межі міцності і відносного подовження до фрактальної розмірності бейніта. Показники міцності і твердості стали найбільш чутливими до меж зерен. **Висновки.** Реалізовано підхід до прогнозу механічних властивостей конструкційної сталі Ст3 з ферритно-бейнітною структурою шляхом фрактального моделювання.

**Ключові слова:** сталь Ст3; мікроструктура; фрактал; механічні властивості; модель

## MODELING PROPERTIES OF STRUCTURAL MATERIALS

VOLCHUK V.M., Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

Department of Materials Science, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

**Abstract. Relevance of the work.** The search for the relationship between the structure and properties of materials remains one of the priority tasks of materials science. Since the processes of structure formation take place for most materials in open systems, based on this, many parameters of the technology influence their properties. The elements of the structure may have a complex geometric configuration. For example, in the heat treatment of structural steels various structures are obtained. Proceeding from the decomposition products of austenite, they can be Widmanstett and needle ferrite, martensite, bainite, and others. Modeling Euclidean figures of elements of such structures encounters certain difficulties, which consists in finding an adequate metric for their approximation. This affects the accuracy of the results of evaluating the material properties based on their structure analysis. Therefore, based on recent publications, it is proposed to apply the fractal approach to modeling the properties of structural materials. **Materials and methods.** In the work the effect of ferrite-bainitic structure on the mechanical properties of Ст3 structural steel (0,16 % C) was studied. This approach was implemented by comparing the results of calculating the fractal dimension of bainite and mechanical properties. The calculation of the fractal dimension of the structure was carried out according to a patented method. Steel samples were heat treated. **Results and discussion.** Models for predicting the mechanical properties of Ст3 steel are constructed based on the analysis of the fractal dimension of bainite and ferrite. A correlation within  $R^2 = 0,39 \dots 0,81$  was established between these characteristics. The results of the work indicate the possibility of using the fractal formalism for evaluating bainite and ferrite at the microstructural level ( $\times 500$ ). **Scientific novelty.** The sensitivity of relative elongation and impact strength to fractal dimension of the abrasive ferrite, as well as yield strength, strength limit and elongation relative to the fractal dimension of bainite was recorded. The strength and hardness indices became the most sensitive to grain boundaries. **Conclusions.** An approach to forecasting the mechanical properties of Ст3 structural steel with a ferritic-bainitic structure by fractal modeling is implemented.

**Keywords:** steel Cm3; microstructure; fractal; mechanical properties; model

**Актуальність роботи.** Пошук взаємозв'язку між структурою конструкційних матеріалів та їх фізико-механічними властивостями постійно триває. Так, для оцінювання властивостей матеріалів застосовують, наприклад, різні підходи до планування експериментів [1–5], що дозволяє оптимізувати їх склад [6; 7] та визначати необхідні режими обробки [8; 9] для отримання заданих структур. Застосування системного підходу для прогнозу якісних характеристик матеріалів [10–12] дало можливість отримувати задовільні результати.

Однак застосування тільки традиційних підходів до оцінювання елементів структури матеріалів зі складною геометричною конфігурацією [13; 14] не завжди задовольняє очікуваним результатам моделювання їх властивостей [15]. У праці [16] наведено один із прикладів розходження результатів прогнозу показників твердості чавунних валків виконання СПХН із результатами натурних іспитів.

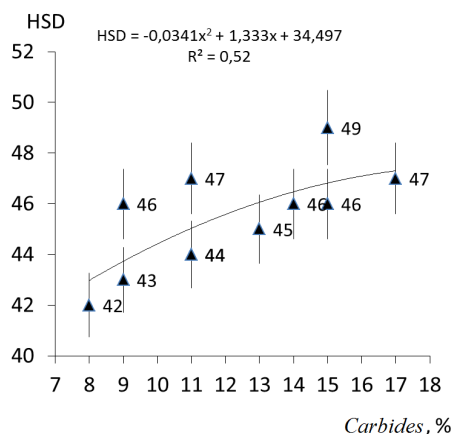


Рис. 1. Співвідношення між твердістю і вмістом карбідів, % [16] / Fig. 1. The ratio between the hardness and the content of carbides, % [16]

Одна з причин розходження результатів прогнозу якості матеріалів на основі аналізу їх структури традиційними методиками полягає в їх певній недосконалоості, що ідентифікує К. Гедель у праці [17] як неповноту використаного інструментарію для розв'язання певної задачі. При цьому важливу роль відіграє вибір метрики для ідентифікації об'єкта дослідження. Від вибору метрики залежить точність апроксимації фігур. Для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики, що виникає під час математичного опису досліджуваних структур матеріалів, у працях [18; 19] запропоновано використовувати фрактальний формалізм.

Ідея фрактального формалізму Б. Мандельброта базується на виборі довільної метрики для адекватного опису об'єкта дослідження [20]. Такий диференційований підхід дає можливість визначати проміжну (дробну) розмірність об'єктів для їх опису [21; 22]. Так, у [23–27] розглянуто можливості оцінювання прогнозу механічних властивостей металів на основі аналізу фрактальної розмірності елементів їх мікроструктури; у [28–30] встановлено зв'язок між властивостями матеріалів та спектром статистичних розмірностей елементів їх структури; в [31–33] наводиться методика ранжування критеріїв якості багатопараметричних технологій на основі аналізу області їх самоподібності та ін.

На основі аналізу літературного огляду для моделювання властивостей конструкційних матеріалів запропоновано застосовувати фрактальний підхід. Як матеріал для дослідження обрано конструкційну сталь Ст3пс, що широко використовується в будівництві. В роботі моделювання механічних властивостей цієї марки сталі з феритно-бейнітною структурою після термічної обробки проводилося з використанням мови фрактальної геометрії. Зв'язок між фрактальною розмірністю феритно-перлітної та мартенситної структури сталі Ст3пс з її механічними властивостями підтверджується результатами [34; 35].

**Матеріали та методики.** Конструкційна маловуглецева сталь Ст3пс (закордонні аналоги А284Gr.D, 1449-2723CR та ін.) широко використовується для виготовлення несних елементів зварних і незварних конструкцій і деталей, що експлуатуються, в основному, за температур вище 0<sup>0</sup>С.

Зразки металу для дослідження обиралися з круга діаметром 24 мм виробництва «Криворізьсталь». Хімічний склад сталі Ст3пс відповідає умовам Державного стандарту 380-2005 (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад сталі Ст3пс (в %) /  
Chemical composition of Ст3пс steel (in%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,16	0,07	0,61	0,009	0,022	0,02

Для зміни структури та властивостей цієї марки сталі зразки для дослідження піддавалися термічній обробці за такими режимами:

**Режим. 1.** Нагрівання до 930<sup>0</sup>С, охолодження у воді до 600<sup>0</sup>С, а потім охолодження на повітрі до кімнатної температури.

**Режим. 2.** Нагрівання до 930<sup>0</sup>С, охолодження у воді до 550<sup>0</sup>С, охолодження на повітрі до кімнатної температури.

Обчислення фрактальної розмірності фотознімків мікроструктури сталі за збільшення 500 велося за запатентованою методикою [36] згідно з такою схемою експерименту (рис. 2).

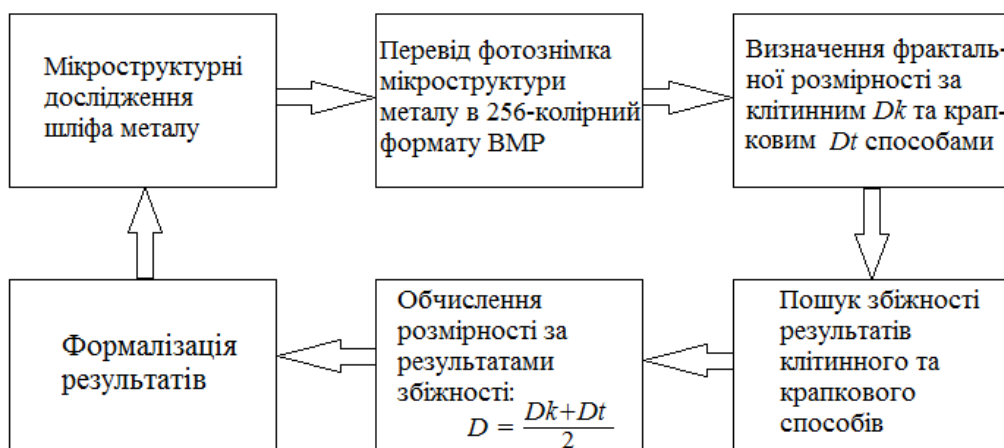


Рис. 2. Загальна схема методики визначення фрактальної розмірності /  
Fig. 2. General scheme of the method of determining fractal dimension

Приклад розрахунку фрактальної розмірності феритно-бейнітної структури конструкційної сталі Ст3пс наведено на рисунку 3. В основу запатентованої методики покладено пошук збіжності фрактальної розмірності  $D$  елементів структури, що визначена за методикою Ф. Хаусдорфа (1) [37], і розмірності, обчисленої за допомогою підрахунку точок (пікселів для ЕОМ) (2) [38]. Згідно з Ф. Хаусдорфом клітинний метод обчислення фрактальної розмірності об'єкта дослідження базується на такій формулі:

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta}, \quad (1)$$

де  $N(\delta)$  – кількість клітинок з розмірами сторони  $\delta$ , які наносяться для покриття

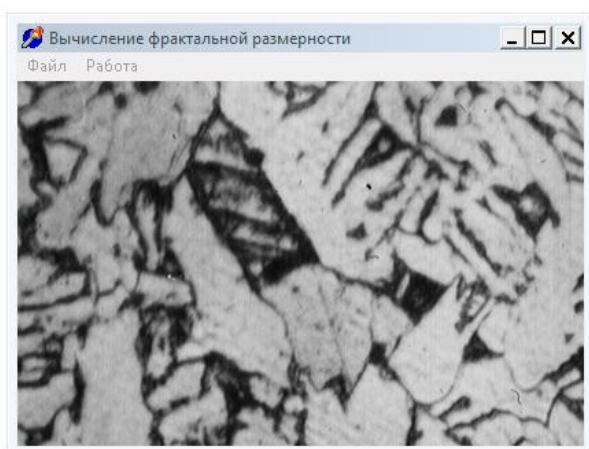
досліджуваної фази чи структурних елементів.

Для обчислення точкової розмірності використовували формулу (2):

$$\tilde{N}(L) = \sum_{m=1}^K (1/m) P(m, L), \quad (2)$$

де  $\tilde{N}(L)$  – середнє значення клітинок з лінійним розміром  $L$ , які наносяться на досліджувану структуру для її покриття. При цьому сума імовірностей  $P(m, L)$  кількості клітинок  $N$ , що містять в собі  $m$  крапок об'єкта дорівнює одиниці (3):

$$\sum_{m=1}^M P(m, L) = 1. \quad (3)$$



а



б (b)



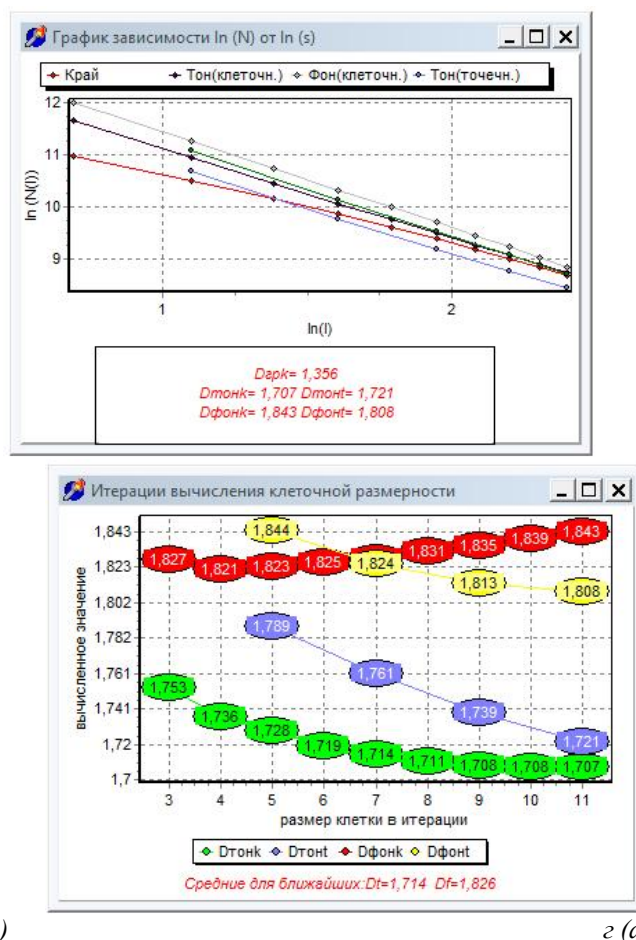


Рис. 3. Програмна реалізація методики розрахунку фрактальної розмірності структури /  
Fig. 3. Software implementation of the method of calculating the fractal dimension of the structure

На рисунку 3 а наведено фотознімок мікроструктури сталі Ст3пс в 256-колірному форматі *bmp* з відтінками сірого кольору після термічної обробки за першим режимом. В результаті програмного аналізу фотознімка встановлено межі кольорів структурних складових. У даному випадку діапазон зміни кольорів феритно-бейнітної структури зафіксовано в межах 0...212 (рис. 3 б).

Граничні розміри клітинок для покриття структури на фотознімку наведені в пікселях.  $D_{кр}$  – фрактальна розмірність меж зерен;  $D_{тонк}$  і  $D_{тонт}$  – розмірності бейніту, визначені за клітинним (1) і точковим (2) способами (рис. 3 в).  $D_{фонк}$  та  $D_{фонт}$  – фрактальні розмірності фериту, визначені за аналогічними формулами. На рисунку 3 з наведено графіки значень фрактальних розмірностей, обчислених клітинним і точковим способами. Найбільша збіжність

фрактальних розмірностей бейніту, обчислених за формулами (1) та (2), зафіксована на 11-му кроці обчислень, тобто за розміру клітинки покриття 11 *px*, що відповідає 7,76 *мкм*. Середнє значення фрактальної розмірності на цьому кроці обчислень дорівнює  $D_t = 1,714$ . Для фрактальної розмірності фериту найкраща збіжність результатів спостерігається на сьомому кроці ітерацій, тому:

$$D_f = \frac{D_{фонк} + D_{фонт}}{2} = \frac{1,828 + 1,824}{2} = 1,826.$$

Похибка визначення фрактальної розмірності елементів мікроструктури металу за наведеною методикою складає 0,1...0,3 % [39], що свідчить про адекватність отриманих результатів.

**Результати та їх обговорення.** Визначення механічних властивостей сталі та фрактальної розмірності її феритно-бейнітної структури: бейніту ( $D_b$ ), фериту

( $D_f$ ), меж зерен ( $D_{ep}$ ): проводилося в трьох контрольних точках: на відстані 0, 6 та 12 мм від центру зразка (табл. 2, 3). На периферії зразків у розрахунках фрактальної розмірності елементів структури не брався до уваги зневуглецьований шар. Для натурних іспитів у кожній контрольній точці виготовлялося по три зразки на розтяг та на удар згідно з Державним стандартом 9454. Ферит здебільшого мав нерівновісну та відманштетову форму, зміна геометричної конфігурації якої реєструвалась за допомогою значень фрактальної розмірності.

Для зменшення похибки обчислення фрактальної розмірності елементів мікроструктури сталі під час сканування розмір її електронних фотознімків складав  $8 \times 12$  см, що відповідає реальному розміру зображення через окуляр мікроскопа Неофот-2.

Для наступних досліджень обиралися середні значення фрактальних розмірностей та властивостей, що виділені в таблицях 2 та 3 напівжирним шрифтом.

Для встановлення зв'язку між фрактальною розмірністю мікроструктури та механічними властивостями завдяки розробленим основам організації фрактального моделювання в матеріалознавстві [40–42] експеримент розбито на чотири етапи:

1. Розрахунок фрактальної розмірності структури.

2. Установлення чутливості механічних властивостей до фрактальної розмірності структури.

3. Побудова моделей прогнозу механічних властивостей за результатами оцінювання коефіцієнтів чутливості.

4. Формалізація отриманих результатів досліджень.

Перший етап визначення фрактальної розмірності розглянуто в розділі «Матеріали та методики».

Для реалізації другого етапу досліджень використовували формулу (4) [26]:

$$K = |Y_i - Y_{i+1}| / |X_i - X_{i+1}|,$$

де  $Y_i$  і  $Y_{i+1}$  – нормовані значення властивостей матеріалу в двох точках структури;  $X_i$  і  $X_{i+1}$  – значення фрактальних розмірностей структурних елементів у цих точках.

У результаті аналізу значень коефіцієнтів чутливості механічних властивостей сталі СтЗпс до фрактальної розмірності структури отримані гістограми (рис. 4).

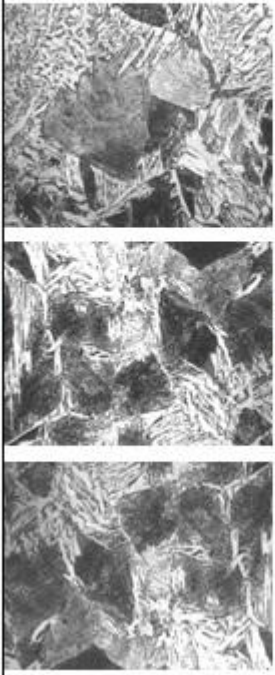
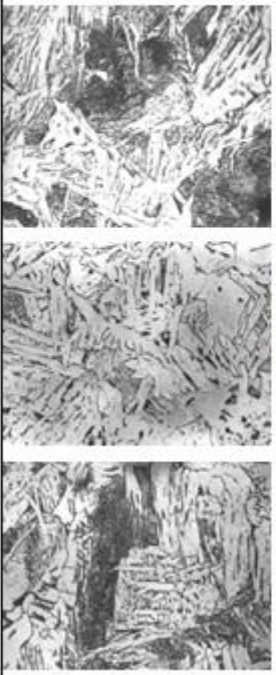

Під час дослідження впливу фрактальної розмірності феритної фази на механічні властивості встановлено, що найбільші коефіцієнти чутливості зафіксовані до зв'язків  $KCU^{+20}$  (33,333; 12,613 та 13,333) та пластичних  $\delta$  (5,952; 4,464 і 7,143) властивостей (рис. 4 а). Відносно високі показники чутливості 10,577 для  $\sigma_B$  та 14,085 для  $\sigma_T$  спостерігаються лише в одному випадку при  $R = 12$  мм. Це пояснюється тим, що ферит, завдяки невисокому вмісту вуглецю (до 0,02 %), має більш високі пластичні властивості в порівняно з іншими структурними складовими сталі [43].

Показники мікротвердості фериту при навантаженні індентора 10 гр змінювалися від середини до периферії шліфа від 1 280 до 1 540 МПа за термічної обробки за першим режимом. У випадку термічної обробки за другим режимом показники мікротвердості фериту змінювалися від 1 750 до 1 930 МПа. Зміна числових значень мікротвердості фериту пояснюється зміною його форми з нерівновісної до відманштетової по перетину шліфа, що пов'язано з різними швидкостями охолодження центральної частини шліфа та його периферії. Значення коефіцієнтів чутливості міцності та твердості ( $HRB$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ) не перевищували 2,657, крім позначки 5,122 в центрі шліфа для режиму 1 (рис. 4 а).

Чутливість механічних властивостей до фрактальної розмірності бейніту проявляється на її показниках як до пластичних властивостей  $\delta$  (6,260; 3,968 і 7,407), так і до характеристик міцності  $\sigma_B$  (5,952 та 11,111) і  $\sigma_T$  (6,481) (рис. 4 б).

Таблиця 2

Режим 1. Механічні властивості та фрактальна розмірність мікроструктури сталі Ст3пс /  
Mode 1. Mechanical properties and fractal dimension of microstructure of steel Ст3пс

$R$ (mm)	$D_c$		$D_T$	$D_{sp}$	КСУ <sup>-20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	HRB	$\sigma_B, МПа$	$\sigma_T, МПа$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
	Клітинний спосіб		Крапковий спосіб							
 $R = 0$	1,850	1,907	1,168	17	80	480	315	27	67	
	1,881	1,858	1,186	17	81	480	315	27	67	
	1,903	1,786	1,246	17	83	480	315	27	67	
	1,897	1,935	1,168	17	80	480	315	27	67	
	1,904	1,890	1,186	17	81	480	315	27	67	
	1,909	1,756	1,246	17	83	480	315	27	67	
	<b>1,891</b>	<b>1,855</b>	<b>1,200</b>	<b>17</b>	<b>81</b>	<b>480</b>	<b>315</b>	<b>27</b>	<b>67</b>	
 $R = 6$	1,886	1,721	1,189	14	84	485	325	28	66	
	1,898	1,694	1,210	14	85	485	325	28	66	
	1,858	1,789	1,213	14	86	485	325	28	66	
	1,916	1,780	1,189	14	84	485	325	28	66	
	1,936	1,751	1,210	14	85	485	325	28	66	
	1,885	1,816	1,213	14	86	485	325	28	66	
	<b>1,897</b>	<b>1,759</b>	<b>1,204</b>	<b>14</b>	<b>85</b>	<b>485</b>	<b>325</b>	<b>28</b>	<b>66</b>	
 $R = 12$	1,839	1,752	1,167	10	85	490	320	24	67	
	1,816	1,737	1,213	10	86	490	320	24	67	
	1,850	1,725	1,189	10	86	490	320	24	67	
	1,887	1,883	1,167	10	85	490	320	24	67	
	1,843	1,801	1,213	10	86	490	320	24	67	
	1,891	1,801	1,189	10	86	490	320	24	67	
	<b>1,854</b>	<b>1,783</b>	<b>1,190</b>	<b>10</b>	<b>86</b>	<b>490</b>	<b>320</b>	<b>24</b>	<b>67</b>	

Таблиця 3

Режим 2. Механічні властивості та фрактальна розмірність мікроструктури сталі Ст3пс /  
Mode 2. Mechanical properties and fractal dimension of microstructure of steel St3ps

Відстань від центра		Фрактальні розмірності				Механічні властивості					
R (мм)		D <sub>c</sub>	D <sub>T</sub>	D <sub>ep</sub>	KCU <sup>-20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	HRB	σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>T</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	
		Клітинний спосіб									
R = 0		1,882	1,689	1,165	17	89	465	305	305	26	67
		1,818	1,884	1,142							
		1,909	1,658	1,198							
		Крапковий спосіб									
		1,928	1,795	1,165							
		1,991	1,936	1,142							
R = 6		1,845	1,777	1,166	16	91	475	325	325	25	67
		1,872	1,764	1,179							
		1,883	1,692	1,266							
		Крапковий спосіб									
		1,891	1,851	1,166							
		1,904	1,839	1,179							
R = 12		1,888	1,732	1,266	16	90	475	325	325	25	67
		1,881	1,776	1,204							
		Клітинний спосіб									
		1,859	1,629	1,213							
		1,905	1,538	1,244							
		1,950	1,395	1,219							
R = 12		1,880	1,713	1,213	15	91	520	355	355	28	66
		1,902	1,596	1,244							
		1,934	1,380	1,219							
		Крапковий спосіб									
		1,905	1,542	1,225							
		1,905	1,380	1,219							

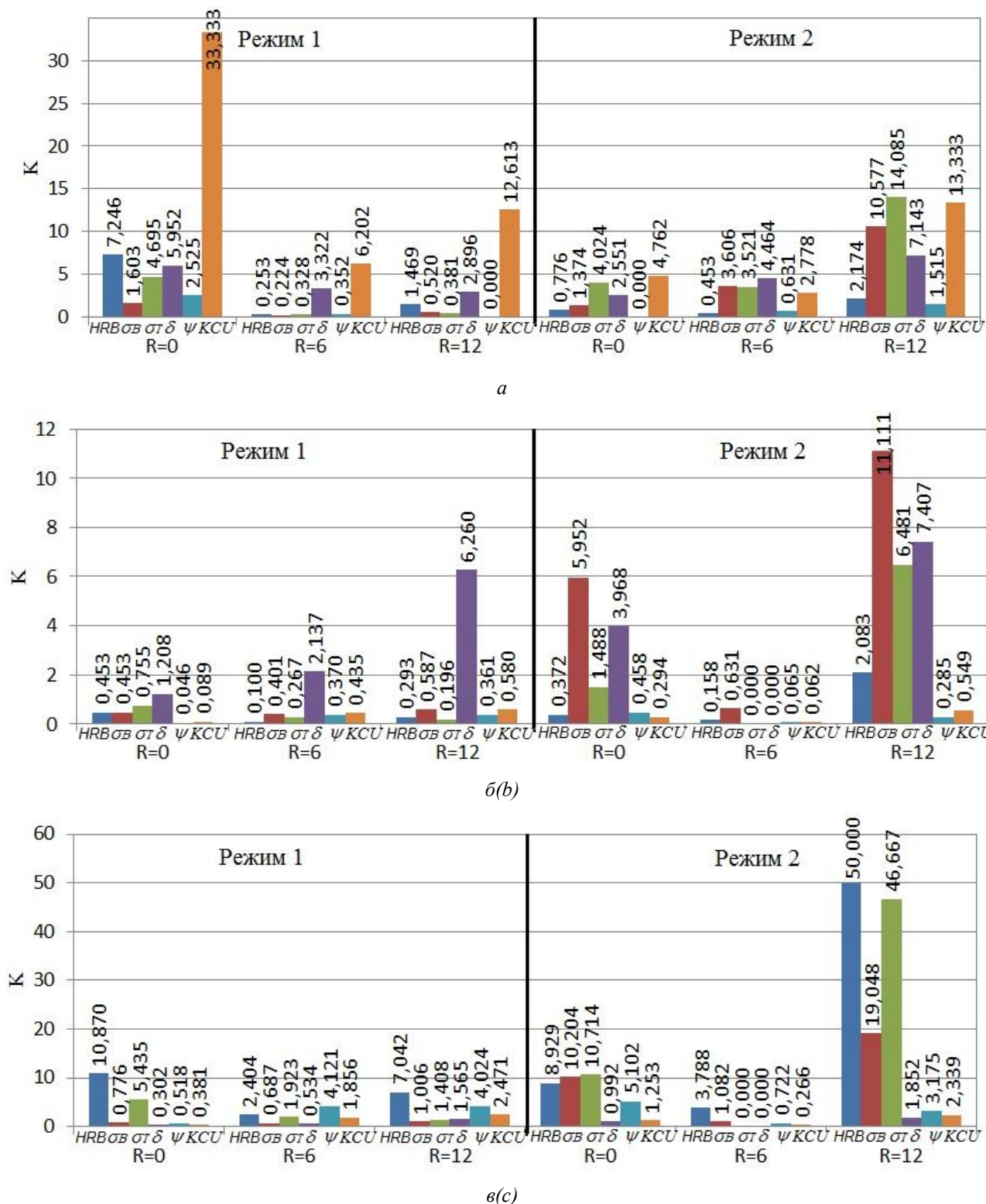


Рис. 4. Гістограми впливу фрактальної розмірності фериту (а), бейніту (б) та меж зерен (в) на механічні властивості сталі Cm3nc / Fig. 4. Histograms of the influence of fractal dimension of ferrite (a), bainite (b) and grain boundaries (c) on the mechanical properties of Cm3nc steel

Чутливість між фрактальною розмірністю бейніту та пластичними показниками і показниками міцності зумовлена тим, що бейніт формується за

проміжного механізму перетворення між дифузійним та механізмом зсуву, і тому має більш високі показники міцності, ніж ферит,

але поступається останньому меншою пластичністю [44].

Межі зерен являють собою основний дефект у металах (перехідна область між зернами шириною в декілька атомних розмірів), тому мають відповідний вплив на їх властивості, наприклад, на в'язкість та пластичність [45]. Зменшення розмірів зерен сталей зумовлює підвищення їх механічних властивостей, оскільки межі зерен служать основними перепонами до поширення тріщин та мікротріщин, що спричинюють руйнування металів. Високі коефіцієнти чутливості зафіксовані між твердістю *HRB* та фрактальною розмірністю меж зерен феритно-бейнітної структури, де їх значення мали високі показники: 10,870; 7,042; 8,929 та 50,000 (рис. 4 в).

Також високі показники чутливості спостерігаються між фрактальною розмірністю меж зерен та межею міцності  $\sigma_B$  (тимчасовим опором матеріалу), що становлять 10,204 та 19,048 для режиму обробки 2. Для межі плинності  $\sigma_T$  найбільші показники коефіцієнтів чутливості становлять 10,714 та 46,667 також для другого режиму термічної обробки.

Для реалізації третього етапу досліджень у побудові моделей прогнозу механічних властивостей використовували результати оцінювання коефіцієнтів чутливості. Будувалися моделі прогнозу властивостей, для параметрів яких значення коефіцієнтів чутливості були високими.

На рисунку 5 наведено отримані моделі прогнозу.

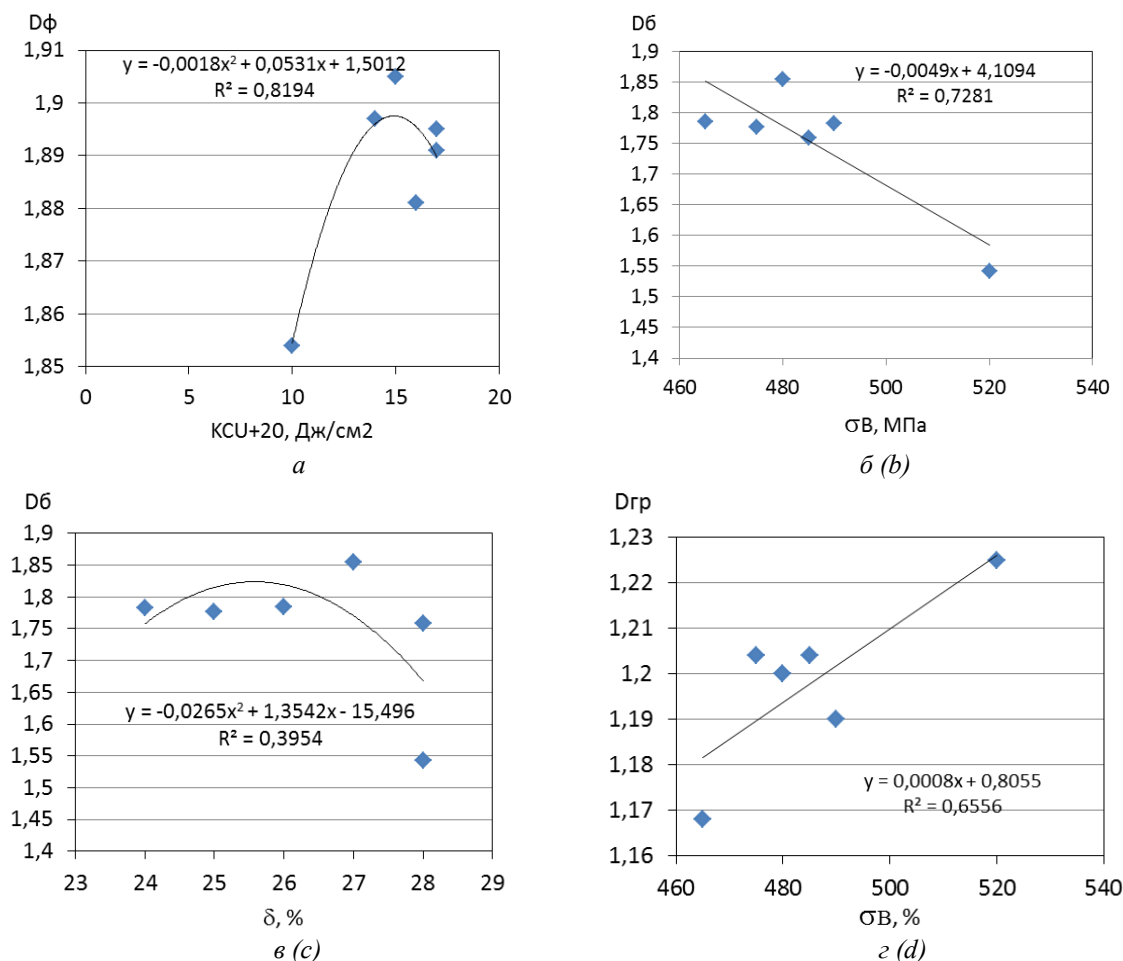


Рис. 5. Співвідношення між фрактальними розмірностями фериту (а), бейніту (б) і меж зерен (в) та механічними властивостями сталі Ст3пс / Fig.5. Relationship between fractal dimensions of ferrite (a), bainite (b) and grain boundaries (c) and mechanical properties of St3ps steel

Відносно формалізації результатів слід зазначити, що коефіцієнти кореляції рівнянь регресії, крім випадку моделі, наведеної на рис. 5 в, свідчать про можливість їх застосування для оцінювання показників міцності і пластичності сталі СтЗпс.

**Наукова новизна.** Феритно-бейнітна структура сталі СтЗпс, отримана в результаті термічної обробки, за  $\times 500$  володіє фрактальними властивостями. Встановлено чутливість відносного видовження (коефіцієнти 5,952; 4,464 і 7,143) та ударної в'язкості (33,333; 12,613 і 13,333) до фрактальної розмірності феритної фази; границі плинності (6,481), границі міцності (5,952 та 11,111) і відносного видовження (6,260; 3,968 і 7,407) до фрактальної розмірності бейніту, що підтверджується механізмом їх фізико-хімічного впливу на ці

механічні властивості. До фрактальної розмірності меж зерен чутливі показники твердості  $HRB$  (коефіцієнти 10,870; 7,042; 8,929 50,000); межі плинності  $\sigma_T$  (10,714 та 46,667) і межі міцності  $\sigma_B$  (10,204 та 19,048).

**Висновки.** Розглянуто можливість моделювання механічних властивостей конструкційної сталі СтЗпс на основі фрактального аналізу її феритно-бейнітної структури. Встановлені фрактальні властивості феритно-бейнітної структури конструкційної сталі СтЗпс за  $\times 500$ .

Розрахунок коефіцієнтів чутливості механічних властивостей до фрактальної розмірності фериту, бейніту та меж зерен дозволив провести відбір моделей прогнозу властивостей з найбільш високими серед розглянутих коефіцієнтами кореляції  $R^2$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O., Soldo B. Modified expanded clay light weight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Tehnički glasnik-Technical Journal*. 2017. Vol. 11. № 3. Pp. 121–124.
2. Kroviakov S., Mishutin A., Pishev O. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. [S.l.]. Vol. 7. № 3.2. Pp. 245–249.
3. Kroviakov S., Mishutin A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia*. 2017. Vol. 1. № 4. Pp. 2–10.
4. Uzlov O., Bolshakov V. Investigation of acicular ferrite structure in HSLA steel. *Proceedings of the "Materials Week 2002"*. Frankfurt : Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2002. Pp. 14–20. URL: [www.irbis-nbuv.gov.ua/.../cgiirbis\\_64.exe?](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/.../cgiirbis_64.exe?)
5. Дубров Ю. И., Волчук В. Н., Большаков В. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении. Моделирование и оптимизация в материаловедении : матер. к 40-й междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.
6. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L., Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019. Vol. 10. № 19. Pp. 81–86. URL: <https://doi.org/10.13167/2019.19.8>
7. Lyashenko T., Voznesensky V., Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. *International symposium on brittle matrix composites*. 2000. Pp. 210–219. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=1141801>
8. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества материалов. *Перспективные задачи инженерной науки*. Вып. 2. Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001. С. 203–208.
9. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте. *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества* : матер. к 45-му Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2006. С. 146–150.
10. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях. *Доповіді НАН України*. 2014. № 11. С. 77–81. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
11. Большаков Вад. І., Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого лиття. *Вісник НАН України*. 2015. № 9. С. 69–73. URL: <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>

12. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с. URL: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
13. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О применении фрактального формализма при математическом описании структур. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 2. С. 26–33. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/27-33>
14. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. К вопросу о постановке задачи идентификации фрактальной структуры металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 5. С. 35–39. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995>
15. Большаков В., Волчук В., Дубров Ю. Пути применения теории фракталов : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. 146 с.
16. Volchuk V., Dubrov Yu. Ways of compensation of incomplete formal axiomatics in identification of complex objects. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 4. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.261218.31.562>
17. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. 1931. Vol. 38. № 1. Pp. 173–198.
18. Большаков Вад. І., Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу. *Вісник НАН України*. 2014. № 12. С. 45–48. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>
19. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 5. С. 10–16. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497>
20. Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature* : monograph. Nev-Yuork, San Francisco : Freeman, 1982. 480 p. URL: <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
21. Zhuravel' I. M., Svirs'ka L. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*. 2010. Vol. 46. № 3. Pp. 418–420.
22. Zhuravel' I. M. Computer Analysis of the Distribution of Grain Sizes in the Structure of 12Kh1MF Steel After Operation. *Materials Science*. 2019. Vol. 55. № 2. Pp. 187–192.
23. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials* : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
24. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Металлофізика і Новеішіє Технолоґії*. 2018, vol. 40, no 9, pp. 1165–1171. URL: [DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165](https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165)
25. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла. *Доповіди НАН України*. 2017. № 4. С. 42–48. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
26. Волчук В. Н. Разработка и исследование метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры : дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.02.01. Днепропетровск, 2003. 186 с.
27. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Применение фрактального моделирования при оценке структуры и свойств металлов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 1. С. 50–55. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.240418.50.105>
28. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018. Vol. 12. № 2. Pp. 93–97. URL: <https://hrcak.srce.hr/202359>
29. Волчук В. Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла / В. Н. Волчук // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2014. – № 3. – С. 12–19. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>
30. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СШХНФ-47. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.241219.22.597>
31. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. 2019. Vol. 968. Pp. 20–25. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>
32. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий. *Металлофізика і новеішіє технолоґії*. 2017. Т. 39. № 3. С. 949–957. URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>



33. Волчук В. Н., Дубров Ю. И., Большаков В. И. Ранжирование показателей качества металла. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 2. С. 10–16. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.10.261>
34. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2004. № 1. С. 43–54.
35. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Фрактальное моделирование структуры малоуглеродистой стали. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 2. С. 45–51. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.45.266>
36. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Криулін Ф. В., Волчук В. М. Патент на винахід № 51439А України. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення. Заявл. 15.11.2002; Бюл. № 11. URL: <http://uapatents.com/3-51439-sposib-viznachennya-fraktalno-rozmirnosti-zobrazhennya.html>
37. Hausdorff G. Dimension und aueres Mab. *Mathematische Annalen*. 1919. Vol. 79. Pp. 157–179. URL: <http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/img/?PID=GDZPPN002266989>.
38. Crownover R. M. Introduction to Fractals and Chaos : monograph. Boston, London : Jones and Bartlett Publishers, Inc., 1995. 306 p.
39. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Фракталы в материаловедении : учеб. пособ. Днепрпетровск : ПГАСА, 2006. 253 с.
40. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Основы организации фрактального моделирования : монография. Киев : Академперіодика НАН України, 2017. 170 с.
41. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Организация фрактального моделирования. *Доповіди НАН України*. 2018. № 6. С. 67–72. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.067>
42. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении. *Доповіди НАН України*. 2008. № 11. С. 99–107. URL: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
43. Бунин К. П., Баранов А. А. Металлография : монография. Москва : Металлургия, 1970. 256 с.
44. Bhadeshia H. K. D. H. Bainite in Steels: Transformations, Microstructure and Properties. London, UK : 2nd ed.; IOM Communications, 2001. 735 p.
45. Berns H., Theisen W. Ferrous materials: Steel and Cast Iron : monograph. Berlin Heidelberg : Springer, 2008. 418 p.

## REFERENCES

1. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. Modified expanded clay light weight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124.
2. Kroviakov S., Mishutin A. and Pishev O. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, [S.l.], vol. 7, no. 3.2, pp. 245–249.
3. Kroviakov S. and Mishutin A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimania*. 2017, vol. 1, no. 4, pp. 2–10.
4. Uzlov O. and Bolchakov V. Investigation of Acicular Ferrite Structure in HSLA Steel. *Proceedings of the "Materials Week 2002"*. Frankfurt : Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2002. Pp. 14–20.
5. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovaniy aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Modelirovanie i optimizaciya v materialovedenii : mater. k 40-j mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : proc. of 40th Int. Conf.]. Odessa, 2001, pp. 25–26. (in Russian).
6. Kroviakov S., Zavaloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019, vol. 10, no. 19, pp. 81–86.
7. Lyashenko T., Voznesensky V. and Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. In: *International symposium on brittle matrix composites*. 2000, pp. 210–219.
8. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Deyneko L.N. and Dubrov Yu.I. *Kompozitsiya metoda planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov i ekspertnoy informatsii dlya formirovaniya sistemy prognoza kachestva materialov* [Composition of a method for planning extreme experiments and expert information for the formation of a material quality prediction system]. *Perspektivnyye zadachi inzhenernoy nauki* [Perspective tasks of engineering science]. Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, vol. 2. pp. 203–208. (in Russian).
9. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. and Deyneko L.N. *Formirovanie modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoy na `ekspertnoj ocenke i aktivnom `eksperimente* [Formation of a model for predicting the quality of a material based on expert judgment and an active experiment]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie*

*kachestva : mater. k 45-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [Computer Science and Quality Assurance : mater. to the 45th Intern. Sem. on modeling and optimization of composites]. Odessa : AstroPrint, 2006, pp. 146–150. (in Russian).

10. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).

11. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnystva masyvnoho metalevoho lyttya* [System analysis techniques of producing solid metal castings]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).

12. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).

13. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii fraktal'nogo formalizma pri matematicheskom opisani struktur* [The fractal application formalism in mathematical description of the structure]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 2. pp. 26–33. (in Russian).

14. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K voprosu o postanovke zadachi identifikatsii fraktal'noy struktury metalla* [Statement on the issue of the problem identification of fractal metal structures]. *Visnyk Prydniprovsk'oyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5, pp. 35–39. (in Russian).

15. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).

16. Volchuk V. and Dubrov Y. Ways of compensation of incomplete formal axiomatics in identification of complex objects. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 4, pp. 31–35.

17. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 1931, vol. 38, no. 1, pp. 173–198. (in Germany).

18. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).

19. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya chastichnoy kompensatsii nepolnoty formal'noy aksiomatiki* [Material aspects of use of partial compensation of incompleteness of formal axiomatics]. *Visnyk Prydniprovsk'oyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 5, pp. 10–16. (in Russian).

20. Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. Nev-Yuork, San Francisco Freeman, 1982, 480 p.

21. Zhuravel' I.M. and Svirs'ka L.M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*. 2015, vol. 46, no. 3, pp. 418–420.

22. Zhuravel' I.M. Computer Analysis of the Distribution of Grain Sizes in the Structure of 12Kh1MF Steel After Operation. *Materials Science*. 2019, vol. 55, no. 2, pp. 187–192.

23. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.

24. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no 9, pp. 1165–1171.

25. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskkiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).

26. Volchuk V.M. *Rozroblennia i doslidzhennia metodu vyznachennia yakisnykh kharakterystyk metalu na osnovi analizu fraktalnoi rozmirnosti yoho mikrostruktury : diss. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk : 05.02.01* [Development and research of the method for determining the qualitative characteristics of a metal on the basis of an analysis of the fractal dimension of its microstructure : Candidate Dissertation for Technical Sciences (05.02.01 – Materials Science)]. Dnipropetrovsk, 2003, 186 p. (in Ukrainian).

27. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye fraktal'nogo modelirovaniya pri otsenke struktury i svoystv metallov* [Application of fractal modelling at the estimation of the structure and properties of metals]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 1, pp. 50–55. (in Russian).

28. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.

29. Volchuk V.N. *K voprosu o primenenii teorii mul'tifraktalov dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv metalla* [On the application of the theory of multifractals for the evaluation of the mechanical properties of a metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
30. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv СІХХ-43 ta СІХХФ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers СІХХ-43 and СІХХФ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
31. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., and Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019, vol. 968, pp. 20–25.
32. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
33. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Ranzhironiye pokazateley kachestva metalla* [The ranking of the quality criteria of the metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 2, pp. 10–16. (in Russian).
34. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Razrabotka i issledovaniye metoda opredeleniya mekhanicheskikh svoystv metalla na osnove analiza fraktal'noy razmernosti yego mikrostruktury* [Development and study of the method for determining the mechanical properties of a metal based on an analysis of the fractal dimension of its microstructure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2004, no. 1, pp. 43–54. (in Russian).
35. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Fraktal'noye modelirovaniye struktury malouglerodistoy stali* [Fractal modeling of the structure of low-carbon steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 2, pp. 45–51. (in Russian).
36. Bol'shakov V.I., Dubrov Yu.I., Kryulin F.V. and Volchuk V.N. *Sposib vyznachennya fraktal'noy rozmirnosti zobrazhennya* [Method for Determining the Dimensionality of Images]. Patent product no. 51439A, UA. MPK 7 G06K9/00, bulletin no. 11, 2002. (in Ukrainian).
37. Hausdorff G. Dimension und aueres Mab. *Mathematische Annalen*. 1919, vol. 79, pp. 157–179. (in German).
38. Crownover R.M. *Introduction to Fractals and Chaos*. Boston, London : Jones and Bartlett Publishers, Inc., 1995, 480 p.
39. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Fraktaly v materialovedenii* [Fractals in materials]. Dnepropetrovsk : PSACEA, 2005, 253 p. (in Russian).
40. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fundamentals of fractal modeling*. Kyiv, Ukraine : PH "Akadempriodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
41. Bolshakov V.I., Volchuk V. M. and Dubrov Yu.I. *Organizatsiya fraktal'nogo modelirovaniya* [Organization of fractal modeling]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2018, no. 6, pp. 67–72. (in Russian).
42. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Osobennosti primeneniya mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii* [Features of the multifractal formalism in materials]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp. 99–107. (in Russian).
43. Bunin K.P. and Baranov A.A. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1970, 256 p. (in Russian).
44. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in Steels : Transformations, Microstructure and Properties*. London, UK : 2nd ed.; IOM Communications, 2001, 735 p.
45. Berns H., Theisen W. *Ferrous materials: Steel and Cast Iron*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008, 418 p.

Надійшла до редакції: 18.01.2020 р.

УДК 669.018.294:620.19

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.36.630

## ПОВЕДЕНИЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ «ФАЗЫ РЯДОМ» ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ

ГУБЕНКО С. И.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
БЕСПАЛЬКО В. Н.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

**Аннотация.** Технологическая пластичность сталей во многом определяется поведением неметаллических включений при разных температурах деформации. **Цель работы** – изучение формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» при разных условиях обработки сталей давлением. **Методика.** Идентификацию включений «фазы рядом» до и после деформации по разным режимам проводили несколькими методами: металлографический, петрографический, микрорентгеноспектральный анализ. **Результаты.** Установлено, что фазово-минералогический состав гетерофазных включений «фазы рядом» определяет процессы их формоизменения при горячей и холодной деформации. Уровень пластичности фаз включений определяет характер их взаимодействия между собой и стальной матрицей при их совместной деформации. Различное сочетание фаз во включениях «фазы рядом» предполагает разное формоизменение включения как целого при горячей или холодной прокатке сталей. **Научная новизна.** Установлены особенности формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» при горячей и холодной деформации. Показана важная роль процессов межфазного трения, которое развивается на участках границ включения – матрица (с разными фазами включения) и на внутренних границах во включениях, фазы которых имеют различную пластичность. Показано, что характер формоизменения включений «фазы рядом» определяется взаимным влиянием фаз включений на их совместную деформацию. Показана возможность трансформации включений «фазы рядом» в процессе горячей и холодной деформации при обработке сталей давлением. **Практическая значимость.** Полученные результаты исследования особенностей формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» могут быть использованы при разработке технологий получения сталей с регламентированным содержанием гетерофазных неметаллических включений, в том числе типа «фазы рядом». Эти результаты вносят вклад в решение важных проблем, связанных с повышением технологической пластичности сталей различного назначения, а также с предупреждением образования дефектов при обработке сталей давлением.

**Ключевые слова:** сталь; гетерофазные неметаллические включения «фазы рядом»; обработка давлением

## ПОВЕДІНКА ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕНЬ «ФАЗИ ПОРУЧ» ПІД ЧАС ОБРОБКИ СТАЛЕЙ ТИСКОМ

ГУБЕНКО С. І.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
БЕСПАЛЬКО В. М.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

**Анотація.** Технологічна пластичність сталей багато в чому визначається поведінкою неметалевих включень за різних температур деформації. **Мета роботи** – вивчення формозміни гетерофазних включень «фазы поруч» у різних умовах обробки сталей тиском. **Методика.** Ідентифікацію включень «фазы поруч» до і після деформації за різними режимами проводили декількома методами: металографічний, петрографічний, микрорентгеноспектральний аналіз. **Результати.** Встановлено, що фазово-мінералогічний склад гетерофазних включень «фазы поруч» визначає процеси їх формозміни під час гарячої і холодної деформації. Рівень пластичності фаз включень визначає характер їх взаємодії між собою і сталеву матрицю при їх спільній деформації. Різні поєднання фаз у включеннях «фазы поруч» передбачає різну формозміну включення як цілого

під час гарячої або холодної прокатки сталей. **Наукова новизна.** Встановлено особливості формозміни гетерофазних включень «фазы поруч» під час гарячої та холодної деформації. Показано важливу роль процесів міжфазного тертя, яке розвивається на ділянках включення – матриця (з різними фазами включення) і на внутрішніх межах у включеннях, фази яких мають різну пластичність. Показано, що характер формозміни включень «фазы поруч» визначається взаємним впливом фаз включень на їх спільну деформацію. Показано можливість трансформації включень «фазы поруч» у процесі гарячої і холодної деформації під час обробки сталей тиском. **Практична значимість.** Отримані результати дослідження особливостей формозміни гетерофазних включень «фазы поруч» можуть бути використані для розроблення технологій отримання сталей з регламентованими умістом гетерофазних неметалевих включень, в тому числі типу «фазы поруч». Ці результати допомагають у вирішенні важливих проблем, пов'язаних із підвищенням технологічної пластичності сталей різного призначення, а також попередженням утворення дефектів під час обробки сталей тиском.

**Ключові слова:** сталь; гетерофазні неметалеві включення «фазы поруч»; обробка тиском

## THE BEHAVIOUR OF HETEROPHASE INCLUSIONS “PHASES ARE BESIDE” UNDER STEEL PRESSURE FORMING

GUBENKO S.I.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
BESPALCO V.M.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

**Abstract. Purpose.** The technological ductility of steels is largely determined by the behavior of non-metallic inclusions at different deformation temperatures. The aim of the work was to study the shape change of heterophase inclusions of the “phases are beside” under different conditions of steel processing by pressure. **Methods.** Identification of inclusions of the “phases are beside” before and after deformation according to different modes was carried out by several methods: metallographic, petrographic, X-ray spectral analysis. **Results.** It has been established that the phase-mineralogical composition of the heterophase inclusions of the “phases are beside” determines the processes of their change under hot and cold deformation. The level of plasticity of the phases of inclusions determines the nature of their interaction between themselves and the steel matrix during their joint deformation. A different combination of phases in the inclusions of the “phases are beside” implies a different shape change of the inclusion as a whole during hot or cold rolling of steels. **Scientific novelty.** The shape-changing features of heterophase inclusions of the “phases are beside” during hot and cold deformation were established. The important role of interfacial friction processes was shown, which develops on sections of the inclusion-matrix boundaries (with different inclusion phases) and on the internal boundaries in inclusions whose phases have different plasticity. It was shown that the character of the shape change of the “phases are beside” inclusions is determined by the mutual influence of inclusions phases on their joint deformation. The possibility of transforming the inclusion of “phases are beside” in the process of hot and cold deformation when machining steel with a vice is shown. **Practical significance.** The obtained results of the study dedicated to features formation of heterophasic inclusions of the “phases are beside” can be used in the development of technologies for producing steels with the regulated content of heterophase non-metallic inclusions, including the type of “phases are beside”. These results contribute to solving important problems associated with improving the technological ductility of steels for various purposes, as well as preventing the formation of defects during the processing of steels by pressure.

**Keywords:** steel; heterophase nonmetallic inclusions “phases are beside”; pressure forming

**Введение.** Неметаллические включения нередко вызывают образование дефектов и разрушение стальных слитков и заготовок в процессе производства металлопродукции при обработке давлением [1–5]. Известно, что доля гетерофазных включений в сталях может составлять до 10...30 % от их общего количества [6–8]. Необходимы исследо-

вания влияния гетерофазных включений на технологическую пластичность сталей.

**Цель работы** – изучение формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» при разных условиях обработки сталей давлением.

**Материалы и методики.** Поведение гетерофазных включений «фазы рядом» изучали при горячей прокатке или ковке

(1 200...800 °С) сталей типа 08, колесной, рельсовой и подшипниковой сталей, а также при холодной прокатке ( $\epsilon = 35...75\%$ ). Фазовый состав включений определяли металлографическим (Neophot-21) и петрографическим методом, а также путем микрорентгено-спектрального анализа на установке МС-46 «Самеса».

**Результаты исследования и их обсуждение.** Уровень пластичности и хрупкости гетерофазных неметаллических включений при обработке стали давлением определяют многие факторы (температура плавления или размягчения фаз включений, способ, температура и степень деформации, соотношение физико-механических свойств фаз включений и стальной матрицы) [1–5]. Поскольку фазы в гетерофазных включениях обладают различным уровнем пластичности и прочности, в процессе нагружения на границах включение – матрица возникают межфазные напряжения. Следует отметить, что склонность к пластическому формоизменению отдельных фаз гетерофазных включений такая же, как и у однофазных включений соответствующего типа и состава. В то же время совместное деформирование фаз, отделенных внутренними межфазными границами, и стальной матрицы должно вносить определенные особенности в поведение гетерофазных включений при пластической деформации.

Во включениях типа «фазы рядом» обе фазы  $\phi_1$  и  $\phi_2$  контактируют со стальной матрицей и образуют с ней межфазную границу включения – матрица, которая состоит из двух участков:  $\phi_1 \leftrightarrow м$  и  $\phi_2 \leftrightarrow м$ . Пластическое поведение таких включений зависит от уровня пластичности каждой из фаз включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , а также от температуры деформации. Гетерофазные включения, состоящие из фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$  с разным уровнем пластичности, проявляют неоднородную деформируемость при горячей деформации.

Включения, состоящие из недеформируемых фаз оксидов, шпинелей, нитридов и оксидов титана  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , пластически не деформируются (рис. 1 а, з). Если одна из фаз слабо пластична, например фаза  $FeO \cdot TiO_2$  во включении  $TiCN + FeO \cdot TiO_2$ , либо пластична, как  $(Fe, Mn)S$  во включении  $TiCN + (Fe, Mn)S$ , она вытягивается в направлении течения стали (рис. 1 е). При деформации двух силикатных либо сульфидных фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , а также сульфидной и силикатной фаз они удлиняются в направлении течения стальной матрицы (рис. 1 б, в, д). При этом пластичность деформирующихся фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$  различна, что обусловлено различием их химического состава и кристаллического строения [1–3].

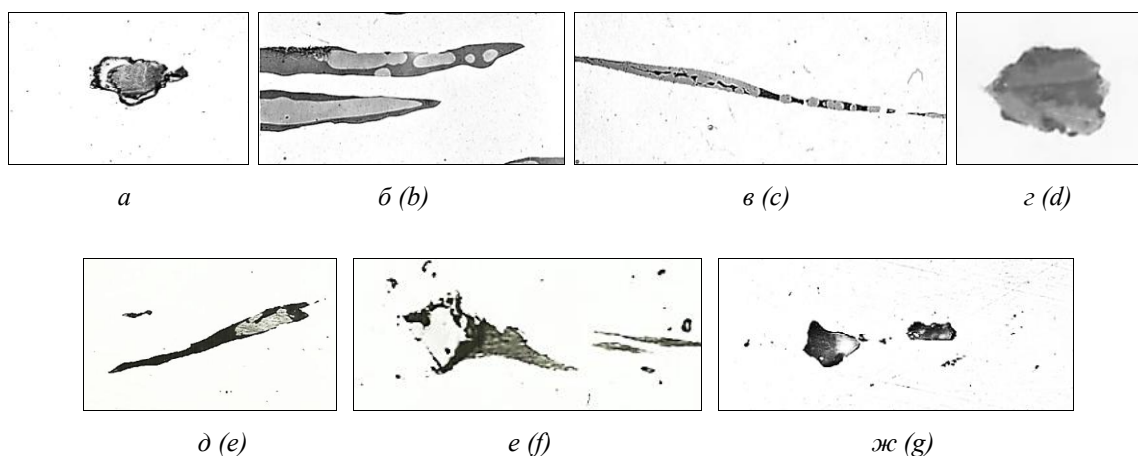


Рис. 1. Гетерофазные включения «фазы рядом» после горячей прокатки: а, з –  $TiN + TiCN$ , б –  $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$ , в, д –  $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$ , е –  $TiCN + (Fe, Mn)S$ , ж –  $TiO + TiO_2$ ;  $\times 500$  / Fig. 1. Heterophase inclusions of “phases are beside” after hot rolling: а, d –  $TiN + TiCN$ , б –  $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$ , в, д –  $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$ , е –  $TiCN + (Fe, Mn)S$ , ж –  $TiO + TiO_2$ ;  $\times 500$

Иногда включения разрушались по границе раздела фаз, что чаще наблюдали в случаях недеформируемых фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$  (рис. 1 *г, ж*), когда под действием сил трения со стороны матрицы благодаря различному поведению фаз включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$  происходит разделение вдоль поверхности их раздела; фазы разобщаются и существуют самостоятельно. Это приводит к изменению типа включений в процессе деформации: вместо сложных гетерофазных включений второго типа в стали существуют два разных по составу, структуре и свойствам вида однофазных включений.

В процессе трансформации включений между фазами включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$  и стальной матрицей развивается контактное трение, что обусловлено взаимодействием их поверхностей, препятствующим их относительному перемещению. Характер контактного трения на участках границы включения – матрица  $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$  и  $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$  различен, что создает дополнительную неоднородность в распределении сил трения вдоль межфазной границы с матрицей (наряду с факторами, изложенными в работах [8–13]). Кроме того, в стыках участков межфазных границ с матрицей  $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$ ,  $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$  и межфазной границы во включении  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  должны возникать концентрации контактных напряжений, что может вызвать образование микротрещин в матрице вблизи включений и вдоль указанных межфазных границ. Рассматриваемое контактное трение является кинематическим сухим трением скольжения. Силы трения на участках поверхности включения ( $\phi_1$  и  $\phi_2$ )-матрица при обработке давлением имеют также составляющие, обусловленные различными типом и строением участков межфазных границ ( $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$ ,  $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$ ) и связанные с определенной поверхностной энергией, а также с трением, возникающим при перемещении (скольжении) межфазных дефектов кристаллического строения [8–13]. Силы трения сдерживают течение матрицы вокруг включения типа «фазы ядр» и распределены на разных участках

межфазной границы включение-матрица  $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$  и  $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$  неравномерно, что связано с неравномерным распределением нормальных напряжений, действующих на включение.

Следует отметить, что наличие внутренней межфазной границы  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  во включении предполагает взаимодействие между поверхностями фаз включения и возникновение на этих границах контактного трения, способствующего сдерживанию пластического течения фаз включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$  (если одна из них либо обе пластичны). Силы трения на границе  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  определяются температурой и степенью деформации, а также уровнем пластичности фаз включения первого типа [8–13].

Максимальная величина касательного напряжения на межфазной границе  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  по условию пластичности ограничивается величиной пределов текучести фаз включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , поэтому контактное трение может возбудить на межфазной границе касательное напряжение, величина которого ограничена.

Очевидно, рассматривая особенности развития пластической деформации системы фаз в гетерофазном включении типа «фазы рядом», следует учитывать не только взаимодействие участков поверхностей фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$  включения и стальной матрицы, но также взаимодействие поверхностей фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$  в условиях контактного трения, приводящее к сглаживанию шероховатостей на межфазных границах  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ , что способствует прирабатываемости рассматриваемых пар трения  $\phi_1$ – $\phi_2$ ,  $\phi_1$ –стальная матрица и  $\phi_2$ –стальная матрица. Очевидно, для пластичных фаз включений этот процесс выражен сильнее, чем в случаях недеформируемых фаз включений.

При холодной деформации изменяются физико-механические свойства фаз включений и стальной матрицы. Включения, состоящие из фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$ -оксидов, шпинелей, нитридов и карбонитридов титана, пластически не деформируются (рис. 2 *а, б*). В крупных

включениях заметны трещины, кроме того, происходит разрушение включений вдоль межфазных границ  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ . Силикатные фазы  $\phi_1$  и  $\phi_2$  включений пластически не деформируются (рис. 2 в) и хрупко разрушаются. При деформации двух сульфидных фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$  они удлиняются в направлении течения стальной матрицы. При этом пластичность сульфидных фаз различна, что обусловлено различием их

химического состава и кристаллического строения [7; 8].

Гетерофазные включения, состоящие из сульфидной и силикатной фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$  с разным уровнем пластичности, проявляют неоднородную деформируемость при холодной деформации (рис. 2 з, д). При этом пластичная сульфидная фаза может сдерживать разрушение хрупкой силикатной фазы (рис. 2 з).

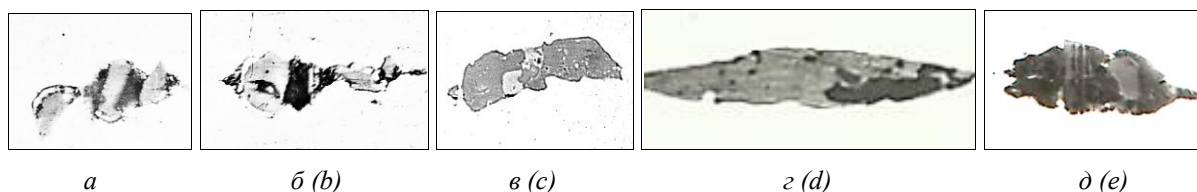


Рис. 2. Гетерофазные включения «фазы рядом» после холодной прокатки: а –  $TiN + TiCN$ , б –  $MnO \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$ , в –  $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$ , з, д –  $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$ ;  $\times 500$  / Fig. 2. Heterophase inclusions of “phases are beside” after cold rolling: а –  $TiN + TiCN$ , б –  $MnO \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$ , в –  $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$ , д, е –  $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$ ;  $\times 500$

При холодной прокатке в процессе трансформации гетерофазных включений между фазами включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$  и стальной матрицей развивается контактное трение, препятствующее их относительному перемещению. Силы трения сдерживают течение матрицы вокруг включения и распределены на разных участках межфазной границы включения – матрица  $\phi_1 \leftrightarrow m$  и  $\phi_2 \leftrightarrow m$  неравномерно, что связано с неравномерным распределением нормальных напряжений, действующих на включение. На внутренней межфазной границе  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  во включении происходит взаимодействие между поверхностями фаз включения и возникновение на этих границах контактного трения, способствующего сдерживанию пластического

течения фаз включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$  (это актуально при наличии одной либо двух сульфидных фаз). Максимальная величина касательного напряжения на межфазной границе  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  по условию пластичности ограничивается величиной пределов текучести сульфидных фаз включения  $\phi_1$  и  $\phi_2$ .

В холоднокатаной стали с увеличением степени деформации увеличивается дисперсность включений второго типа «фазы рядом» в результате их хрупкого разрушения.

**Выводы.** Исследовано поведение гетерофазных включений «фазы рядом» в процессе горячей и холодной деформации. Показано взаимное влияние фаз включений на их совместную деформацию.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноград М. И., Громова Г. П. Включения в легированных сталях и сплавах : монография. Москва : Металлургия, 1972. 216 с.
2. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей : монография. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
3. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.
4. Губенко С. И., Беспалько В. Н., Жиленкова Е. В. Влияние температуры и степени деформации на характер изменения эвтектических боридов в высокохромистой стали с бором. *Теория и практика металлургии*. 2006. № 4–5. С. 158–160.



5. Губенко С. И. Межфазные границы включение – матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение – матрица и свойства сталей : монография. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017. 506 с.
6. Кисслинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали : монография. Москва : Metallurgia, 1968. 124 с.
7. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2019. №1 (84). С. 30–35.
8. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях : монография. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
9. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей : монография. Саарбрюккен (Saarbrücken) : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. 476 с.
10. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений : монография. Днепрпетровск : НМетАУ, ИЦ Системные технологи, 2014. 301 с.
11. Губенко С. И., Исков М. В. Структура и сопротивление разрушению межфазных границ неметаллическое включение – матрица стали. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 5. С. 30–38.
12. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
13. Губенко С. И., Парусов Э. В. Пластичность сплавов с различной структурой : учеб. пособ. по физическим основам пластичности. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2017. 185 с.

## REFERENCES

1. Vinograd M.I. and Gromova G.P. *Vkluchenia v legirovannih staliakh I splavah* [Inclusions in alloy steels and alloys]. Moscow : Metallurgy, 1972, 216 p. (in Russian).
2. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016, 549 p. (in Russian).
3. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskih vklucheniy pri prokatke stali*. [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84. (in Russian).
4. Gubenko S.I., Bepalko V.N. and Zhilenkova Ye.V. *Vliyaniye temperatury i stepeni deformatsii na kharakter izmeneniya evtekticheskikh boridov v vysokokhromistoy stali s borom* [Influence of temperature and degree of deformation on the nature of changes in eutectic borides in high-chromium steel with boron]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and practice of metallurgy]. 2006, no. 4–5, pp. 158–160. (in Russian).
5. Gubenko S.I. *Mezhfaznye granitsy vklucheniya – matritsa I svoystva staley* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany – Mauritius : Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).
6. Kiessling R. and Lange N. *Nemetallicheskiye vklucheniya v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Moscow : Metallurgy Publ., 1968, 124 p. (in Russian).
7. Gubenko S.I. and Bepalko V.N. *Vidy i struktura geterofaznykh vklucheniy v stalyakh* [Types and structure of heterophase inclusions in steels]. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*. 2019, no. 1 (84), pp. 30–35. (in Russian).
8. Gubenko S. *Geterofaznyye mikrokompozitnyye vklucheniya v stalyakh*. [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
9. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklucheniya i prochnost' stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015, 476 p. (in Russian).
10. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklucheniy*. [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
11. Gubenko S.I. and Iskov M.V. *K voprosu o stroenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklucheniya – matritsa v stali* [the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2004, no. 5, pp. 30–38. (in Russian).
12. Gubenko S.I. *K voprosu o stroenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklucheniya – matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
13. Gubenko S.I. and Parusov E.V. *Plastichnost' splavov s razlichnoy strukturoy. Uchebnoye posobiye po fizicheskim osnovam plastichnosti* [Plasticity of alloys with various structures. Study Guide on the Physical Basics of Plasticity]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2017, 185 p. (in Russian).

Поступила в редакцию : 15.02.2020 г.

УДК 621.78:669.15'74-194

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.42.631

## ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОТРИМАННЯ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНОГО ДРОТУ ЗІ СТАЛІ ГАДФІЛЬДА

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
СОБОЛЕНКО М. О.<sup>2</sup>, асист.,  
ЧМЕЛЬОВА В. С.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ПЕРЧУН Г. І.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8653-5262.

<sup>3</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 698-21-52, ORCID ID: e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID 0000-0001-9013-4659

**Анотація.** *Мета дослідження* – розроблення удосконаленої технології виробництва дроту малих перетинів із високоміцної аустенітної сталі із застосуванням методів гарячої і холодної пластичної деформації і термічної обробки. *Методика.* Структурні дослідження сталі Гадфільда 110Г13Л проводили методом світлової металографії. Гарячу деформацію литої заготовки здійснювали куванням на молоті типу МА 4134 і гарячою прокаткою на однокільовому двовалковому стані за температури 1 000...1 030 °С. Термічну обробку виконували в потоці волочильного стану з нагріванням в індукторі до температур рекристалізаційного відпалу і подальшим гарту. *Результати.* Аналіз експериментальних досліджень показав принципову можливість отримання зі сталі Гадфільда холоднодеформованого дроту діаметром 2...5 мм, який може бути використаний в автоматах для зварювання та наплавлення. *Наукова новизна.* Розроблено режим, що включає нагрівання, комбінацію деформаційних операцій, а також регламентоване нагрівання і водяне охолодження за принципом вакансійного гарту, що в комплексі дає ефект дрібнозернистої структури, істотно знижуючи інтенсивність деформаційного зміцнення тонкого дроту з високоміцних сталей аустенітного класу. *Практична значимість.* Розроблена технологічна схема значно знижує циклічність виробництва, зменшує час циклу і забезпечує суттєву економію ресурсів.

**Ключові слова:** дріт; сталь Гадфільда; гаряча і холодна деформація; деформаційне зміцнення; вакансійний гарт; відпал рекристалізаційний, технологічна схема

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
СОБОЛЕНКО М. А.<sup>2</sup>, ассист.,  
ЧМЕЛЛЕВА В. С.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ПЕРЧУН Г. И.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8653-5262

<sup>3</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Аннотация.** *Цель исследования* – разработка усовершенствованной технологии производства проволоки малых сечений из высокопрочной аустенитной стали с использованием горячей и холодной деформации и термической обработки. *Методика.* Структурные исследования стали Гадфильда 110Г13Л проводили методом световой металлографии. Гарячую деформацию литой заготовки осуществляли ковкой на молоте типа МА 4134

и горячей прокаткой на одноклетевом двухвалковом стане при температуре 1 000...1 030 °С. Термическую обработку выполняли в потоке волочильного стана с нагревом в индукторе до температур рекристаллизационного отжига и последующей закалкой. **Результаты.** Анализ экспериментальных исследований показал принципиальную возможность получения из стали Гадфильда холоднодеформированной проволоки диаметром 2...5 мм, которая может быть использована в автоматах для сварки и наплавки. **Научная новизна.** Разработан режим, включающий нагрев, комбинацию деформационных операций, а также регламентированный нагрев и водяное охлаждение по принципу вакансионной закалки, что в комплексе дает эффект мелкозернистой структуры, значительно снижая интенсивность деформационного упрочнения тонкой проволоки из высокопрочных сталей аустенитного класса. **Практическая значимость.** Разработанная технологическая схема существенно снижает цикличность производства, сокращает время цикла и обеспечивает значительную экономию ресурсов.

**Ключевые слова:** проволока; сталь Гадфильда; горячая и холодная деформация; деформационное упрочнение; рекристаллизационный отжиг; вакансионная закалка; технологическая схема

## TECHNOLOGY OF PRODUCING COLD DEFORMABLE WIRE FROM HADFIELD STEEL

GUL Yu.P.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
SOBOLENKO M.O.<sup>2</sup>, *Assist.*,  
CHMELEVA V.S.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
PERCHUN G.I.<sup>4\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8653-5262

<sup>3</sup> National Metallurgical Academy of Ukraine National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave. 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Abstract. Purpose.** Development of an improved technology for the production of small cross-section wire from high-strength austenitic steel using hot and cold deformation and heat treatment. **Methodology.** Structural studies of Hadfield steel 110G13L were carried out by light metallography. Hot deformation of the cast billet was carried out by forging on a hammer of type MA 4134 and hot rolling on a single-strand two-roll mill at a temperature of 1 000...1 030 °C. Heat treatment was performed in a drawing mill stream with heating in the inductor to the temperatures of recrystallization annealing and subsequent quenching. **Results.** An analysis of experimental studies showed the fundamental possibility of producing cold-deformed wire from Hadfield steel with a diameter of 2...5 mm, which can be used in automatic machines for welding and surfacing. **Originality.** A mode has been developed that includes heating, a combination of deformation operations, as well as regulated heating and water cooling according to the principle of vacancy hardening, which together gives the effect of a fine-grained structure, significantly reducing the intensity of strain hardening of thin wires from high-strength austenitic steel. **Practical value.** The developed technological scheme significantly reduces the production cycle, reduces the cycle time and provides significant resource savings.

**Keywords:** wire; Hadfield steel; hot and cold deformation; strain hardening; recrystallization annealing; vacancy hardening; technological scheme

**Вступ.** Поєднання високої в'язкості і зносостійкості забезпечило широке застосування сталі Гадфілда в машинобудуванні, гірничовидобувній, металургійній, хімічній, будівельній, автомобілебудівній та інших галузях промисловості [1]. Відомо, що ця сталь застосовується, як правило, в литому стані, оскільки її пластичні властивості і,

особливо, висока швидкість деформаційного зміцнення істотно ускладнюють процеси формозміни шляхом гарячої і, тим більше, холодної деформації [2–6]. У той же час, ефективно застосування сталі Гадфілда як наплавного матеріалу і для зварювання з використанням високошвидкісного автоматизованого обладнання може бути забезпечене тільки у разі отримання дроту з

неї діаметром до 2 мм. Слід зазначити, що в ГОСТ 977-88 передбачено використання сталей типу 110Г13Л у вигляді холоднодеформованого дроту саме зазначених діаметрів. Однак аналіз існуючої науково-технічної інформації не дав результатів відносно існування стабільної технології виробництва електродного дроту з подібних марок сталі.

**Мета дослідження,** результати якого наведені у статті, – розроблення вдосконаленої технології отримання з високоміцної аустенітної сталі дроту малих перетинів із застосуванням гарячої і холодної пластичної деформації та термічної обробки.

**Матеріал і методика дослідження.** Вихідним матеріалом стали циліндричні заготовки діаметром 20 мм і квадратні заготовки розміром 20 × 20 мм зі сталі 110Г13Л, отримані шляхом розливання в спеціальні земляні форми. Хімічний склад сталі наведено в таблиці. Структуру сталі вивчали методом світлової металографії.

**Експериментальна частина.** В основу експериментальної схеми були покладені

принципи наскрізної технології виробництва металопродукції, починаючи з раціонального формування структури литих заготовок, урахування пластифікувального впливу збільшення відношення вільної поверхні до об'єму заготовки, а також використання у процесі термічної обробки вакансійного гарту, що істотно знижує інтенсивність деформаційного зміцнення під час холодної деформації сталей аустенітного класу [7].

Кристалізація у відливках малого перетину відбувається за більш високих швидкостей охолодження, ніж у великих, що забезпечувало певне диспергування отриманої структури, хоча не усувало виділення карбідів по межах зерен аустеніту. Тому перед гарячою деформацією виконували термічну обробку литих заготовок за режимом, який включав нагрів до 1 050 °С з витримкою 30 хв і наступне охолодження у воді. Після такої обробки отримували практично гомогенну аустенітну структуру сталі (рис. 1б).

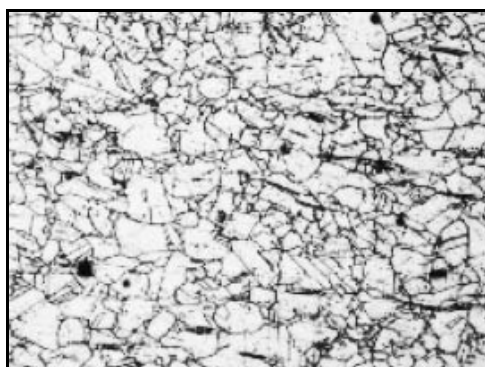
Таблиця

Хімічний склад дослідженої сталі 110Г13Л / Chemical composition of the investigated steel 110Г13Л

№ заготовки	Масова частка елементів, %						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu
I	1,49	10,9	1,68	0,055	0,011	0,81	0,10
II	1,10	12,4	0,92	0,055	0,004	0,11	0,03



a



б

Рис. 1. Мікроструктура заготовок зі сталі 110Г13Л: а – у вихідному литому стані; б – після термічної обробки, ×500 / Fig. 1. Microstructure of steel billets : 110Г13Л: a – in the original cast condition; b – after thermal processing, ×500

Гарячу пластичну деформацію заготовок проводили двома способами: куванням на молоті типу МА 4134 і гарячою прокаткою на одноклітьовому двовалковому стані за температури 1 000...1 030 °С. Таким чином отримували заготовки діаметром 8,5 мм і довжиною 1 700 мм з використанням одиничних деформацій від 5 до 17 %. Перед кожною наступною деформацією здійснювали термічну обробку з метою розчинення карбідів, що виділяються під час

деформації, і отримання однорідної аустенітної структури. Холодну деформацію заготовок волочінням проводили на стані SKET 2500/1 зі швидкістю 195...280 м/хв за схемою, наведеною на рисунку 2. Дріт діаметром 2 мм отримували за 4...5 циклів деформації з проміжними термічними обробками. Послідовне виконання вказаних операцій дало в результаті дріт діаметром 2 мм без обривів та з високою чистотою поверхні.

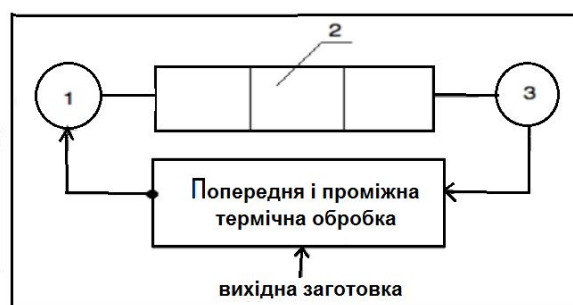


Рис. 2. Технологічна схема отримання дроту зі сталі 110Г13Л холодним волочінням :  
1 – розмотувальний пристрій, 2 – деформувальний пристрій, 3 – намотувальний пристрій /  
Fig. 2. Technological scheme of cold wire drawing of steel 110G13L:  
1 – unwinding device, 2 – deforming device, 3 – winding device

### Результати експерименту та їх аналіз.

На основі аналізу проведених експериментальних досліджень показано принципову можливість виготовлення зі сталі Гадфільда 110Г13Л холоднодеформованого дроту шляхом використання литих заготовок малого поперечного перетину і поєднання гарячої і холодної пластичної деформації з проміжними термічними обробками, які «відновлюють» однорідну аустенітну структуру перед наступним циклом деформації. Недолік застосованого способу полягає в тому, що він характеризується порівняно малими значеннями одиничних деформацій і вимагає великої кількості проміжних термічних обробок. Здійснення деформації заготовки поза технологічним потоком істотно зменшує продуктивність процесу і підвищує витрати на його здійснення.

Тому пропонується у промисловому варіанті отримання холоднодеформованих виробів (наприклад, дроту зі сталі Гадфільда) здійснювати за такою технологічною схемою.

1. *Отримання литих заготовок* із розміром поперечного перетину 20...30 мм. Для подальшої гарячої деформації цю операцію слід здійснювати з використанням машин безперервного розливання вертикального типу.

2. *Примусове охолодження.* Режим охолодження в кристалізаторі повинен забезпечувати однорідну аустенітну структуру, що дозволить відмовитися від попередньої термічної обробки.

3. *Гаряча деформація* на сортовому стані, зазвичай розташованого в безпосередній близькості до пристроїв, які транспортують заготовки, що виходять з кристалізатора.

4. *Істотна відмінність* технології гарячої деформації в зазначеному стані – це наявність пристроїв для швидкісного нагрівання (індуктора) і охолодження заготовок між клітьми. Функція швидкісного високотемпературного нагрівання полягає у швидкому розчиненні частинок карбідів, що виділяються під час деформації, а швидкісне охолодження забезпечує деформацію за оптимальної

температури і, певною мірою, – ефект вакансійного гартування [8]. У сукупності така термічна обробка позитивно впливає на пластичність заготовки, яка деформується, що дозволяє збільшити величини одиничних обтиснень і зменшити їх кількість.

5. *Холодна деформація.* Її доцільно також виконувати циклічно (деформація + нагрів) безпосередньо в потоці волочильного стану. Термічна обробка проводиться за режимом швидкісного рекристалізаційного відпалу з використанням нагріву внутрішнім теплоносієм (наприклад, в індукторі), і наступного охолодження зі швидкістю, яка забезпечує ефект вакансійного гарту і отримання чистої поверхні заготовки.

Така операція дає можливість скорочення понад удвічі кількості «деформаційних» проходів, – внаслідок зменшення інтенсивності деформаційного зміцнення після вакансійного гартування, а збереження чистої поверхні з тонкою оксидною плівкою, що відіграє роль мастила, дозволяє відмовитися від традиційної підготовки поверхні заготовки перед волочінням.

Описана технологічна схема істотно знижує циклічність виробництва, зменшує

час циклу і дає значну економію інших ресурсів.

### Висновки

Показано принципову можливість отримання зі сталі Гадфільда холодно-деформованого дроту діаметром до 2 мм шляхом використання литих заготовок малого поперечного перетину і поєднання гарячої і холодної пластичної деформації з проміжними термічними обробками.

Розроблено і запропоновано схематичне рішення наскрізної технології для отримання дроту зі сталі Гадфільда, яке включає: отримання литих заготовок необхідного поперечного перетину на машині безперервного розливання; гарячу деформацію з проміжними термічними обробками в потоці сортопрокатного стану; холодну деформацію волочінням із термічною обробкою в потоці волочильного стану з рекристалізаційним відпалом в індукторі і вакансійним гартуванням.

Запропонована технологія істотно знижує інтенсивність деформаційного зміцнення сталей аустенітного класу і розширює можливості їх застосування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шульте Ю. А. *Электрометаллургия стального литья* : монография. Москва : Metallurgy, 1970. 224 с.
2. Тен Э. Б., Базлова Т. А., Лихолобов Е. Ю. Влияние внепечной обработки на структуру и механические свойства стали 110Г13Л. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 3. С. 26–28.
3. Черняк С. С., Бройдо В. Л., Агрызков Л. Е. Влияние дополнительного легирования и упрочняющих обработок (ВТМО, НТМО, ТЦО, ИМО) на структуру и свойства высокомарганцевых сталей. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016. № 1 (49). С. 79–88.
4. Сеницкий Е. В., Нефедьев А. А., Ахметова А. А., Овчинникова М. В., Хренов И. Б., Дерябин Д. А. Обзор результатов исследований, направленных на улучшение свойств отливок из высокомарганцевой стали. *Теория и технология металлургического производства. Литейное производство*. 2016. № 2 (19). С. 45–57.
5. Вдовин К. Н., Горленко Д. А., Феоктистов Н. А. Исследование влияния скорости охлаждения в интервале выделения избыточных фаз на литую микроструктуру стали Гадфильда. *Металлургия : технологии, инновации, качество*. Под общ. ред. Е. В. Протопопова. Москва, 2015. С. 125–129.
6. Гуль Ю. П., Соболенко М. А. Основы технологической деформируемости стали 110Г13Л при горячей и холодной пластической деформации. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2011. № 4. С. 31–36.
7. Гуль Ю. П., Лещенко А. Н., Пилипченко В. Ю. Роль вакансионной закалки при термопластическом упрочнении сталей аустенитного класса. *Металлы*. 1990. № 4. С. 77–83.
8. Gul Yu., Ivchenko A., Perchun G., Chmelova V., Kondratenko P. Basic principles of the new technology project of manufacturing steel products hardened by the cold deformation. Scientific development and achievements: monograph. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, N1 7GU, 2018. Vol. 5. Pp. 225–244.

### REFERENCES

1. Shulte Yu.A. *Elektrometallurgiya stalnogo litya* [Steel casting electrometallurgy]. Moscow : Metallurgy, 1970, 224p. (in Russian).

2. Ten E.B., Bazlova T.A. and Liholobov E.Yu. *Vliyanie vnepechnoy obrabotki na strukturu i mehanicheskie svoystva stali 110G13L* [The effect of out-of-furnace treatment on the structure and mechanical properties of 110G13L steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 26–28. (in Russian).
3. Chernyak S.S., Broydo V.L. and Agrizkov L.E. *Vliyanie dopolnitelnogo legirovaniya I uprochnyauchih obrabotok (VTMO, NTMO, TZO, IMO) na strukturu I svoystva visokomargancevih staley* [The effect of additional alloying and hardening treatments (HTMO, NTMO, TTZO, IMO) on the structure and properties of high manganese steels]. *Sovremennii tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2016, no. 1 (49), pp. 79–88. (in Russian).
4. Sinit'skiy Ye.V., Nefedev A.A., Ahmetova A.A., Ovchinnikova M.V., Hrenov I.B. and Deryabin D.A. *Obzor rezultatov issledovaniy, napravlennykh na uluchshenie svoystv otlivok iz vyisokomargantsevoy stali* [Обзор результатов исследований, направленных на улучшение свойств отливок из высокомарганцевой стали]. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. Liteynoe proizvodstvo* [Theory and technology of metallurgical production. Foundry]. 2016, no. 2 (19), pp. 45–57. (in Russian).
5. Vdovin K.N., Gorlenko D.A. and Feoktistov N.A. *Issledovanie vliyaniya skorosti ohlazhdeniya v intervale vyideleniya izbyitochnykh faz na lituyu mikrostrukturu stali Gadfilda* [Investigation of the effect of the cooling rate in the interval of the allocation of excess phases on the cast microstructure of Hadfield steel]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: technology, innovation, quality]. Edited by. Ye.V. Protopopova. Moscow, 2015, pp. 125–129. (in Russian).
6. Gul Yu.P. and Sobolenko M.A. *Osnovniy tekhnologicheskoy deformiruемости stali 110G13L pri goryachey i holodnoy plasticheskoy deformatsii* [Fundamentals of technological deformability of steel 110G13L during hot and cold plastic deformation]. *Metalloznavstvo ta termichna obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2011, no. 4, pp. 31–36. (in Russian).
7. Gul Yu.P., Leschenko A.N. and Pilipchenko V.Yu. *Rol vakantsionnoy zakalki pri termoplasticheskom uprochnenii staley austenitnogo klassa* [The role of vacancy hardening in thermoplastic hardening of austenitic steels]. *Metallyi* [Metals]. 1990, no. 4, pp. 77–83. (in Russian).
8. Gul Yu., Ivchenko A., Perchun G., Chmeliova V. and Kondratenko P. Basic principles of the new technology project of manufacturing steel products hardened by the cold deformation. Scientific development and achievements: monograph. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, N1 7GU, 2018, vol. 5, pp. 225–244.

Надійшла до редакції: 09.02.2020 р.

УДК 669.15-194

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.48.632

## ВАКАНСІЇ ЯК ЛЕГУВАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ У МЕТАЛАХ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 ЧМЕЛЬОВА В. С.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 СОБОЛЕНКО О. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 ПЕРЧУН Г. І.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>3</sup> Кафедра прикладної математики та обчислювальної техніки, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 917-88-95, e-mail: [avsobol.1651@gmail.com](mailto:avsobol.1651@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7813-6819

<sup>4\*</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Анотація.** *Мета дослідження* – вивчення і розроблення способів нового виду екологічно чистого легування металів контрольованою нерівноважною концентрацією вакансій. *Методика.* Системний аналіз способів легування металів нерівноважною концентрацією вакансій і механізмів впливу цього легування на структуру і властивості металів. *Результати.* Розроблено теоретичні основи легування нерівноважною концентрацією вакансій шляхом вакансійного гарту, гідростатичного стиснення, циклічної деформації, спеціальної деформаційно-термічної обробки за типом швидкісного рекристалізаційного відпалу холоднотермічного металу, а також комбінацією зазначених методів. *Наукова новизна.* Визначено процеси, внаслідок яких відбувається взаємодія вакансій з рухомими дислокаціями, що істотно змінює траєкторії руху дислокацій і формує дислокаційну субструктуру з особливими квазірівноважними межами, близькими за властивостями до меж, що формуються під час високотемпературної термомеханічної обробки. *Практична значимість.* Вказано принципи регламентації параметрів вакансійного легування, що забезпечують його ефективність і контрольовані параметри способів легування.

**Ключові слова:** *вакансійний гарт; гідростатичне стиснення; дислокаційна субструктура; деформаційно-термічна обробка; нерівноважна концентрація вакансій; циклічна деформація; швидкісний рекристалізаційний відпал*

## ВАКАНСИИ КАК ЛЕГИРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ В МЕТАЛЛАХ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 ЧМЕЛЕНОВА В. С.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 СОБОЛЕНКО А. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 ПЕРЧУН Г. И.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>3</sup> Кафедра прикладной математики и вычислительной техники, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 917-88-95, e-mail: [avsobol.1651@gmail.com](mailto:avsobol.1651@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7813-6819

<sup>4\*</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Аннотация.** *Цель исследования* – изучение и разработка способов нового вида экологически чистого легирования металлов контролируемой неравновесной концентрацией вакансий. *Методика.* Системный анализ способов легирования металлов неравновесной концентрацией вакансий и механизмов влияния этого легирования на структуру и свойства металлов. *Результаты.* Разработаны теоретические основы легирования неравновесной концентрацией вакансий путем вакансионной закалки, гидростатического сжатия, циклической деформации, специальной деформационно-термической обработки по типу скоростного



рекристаллізаційного отжига холоднодеформованого металу, а також комбінацією вказаних методів. **Научна новизна.** Определены процессы, в результате которых происходит взаимодействие вакансий с подвижными дислокациями, что существенно изменяет траектории движения дислокаций и формирует дислокационную субструктуру с особыми квазиравновесными границами, близкими по свойствам к границам, которые формируются при высокотемпературной термомеханической обработке. **Практическая значимость.** Указаны принципы регламентации параметров вакансионного легирования, обеспечивающие его эффективность и контролируемые параметры способов легирования.

**Ключевые слова:** вакансионная закалка; гидростатическое сжатие; дислокационная субструктура; деформационно-термическая обработка; неравновесная концентрация вакансий; циклическая деформация; скоростной рекристаллизационный отжиг

## VACANCIES AS A METAL ALLOYING ELEMENT

GUL Yu.P.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
 CHMELEVA V.S.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
 SOBOLENKO O.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
 PERCHUN G.I.<sup>4\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>3</sup> Department of Applied Mathematics and Computing Engineering, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 917-88-95, e-mail: [avsobol.1651@gmail.com](mailto:avsobol.1651@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7813-6819

<sup>4\*</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave. 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Abstract. Purpose.** The study and development of methods for a new type of environmentally friendly alloying of metals with a controlled nonequilibrium concentration of vacancies. **Methodology.** System analysis of methods of alloying metals with a nonequilibrium concentration of vacancies and the mechanisms of the influence of this alloying on the structure and properties of metals. **Results.** The theoretical foundations of doping with a nonequilibrium concentration of vacancies by means of vacancy hardening, hydrostatic compression, cyclic deformation, special deformation-heat treatment according to the type of high-speed recrystallization annealing of cold-deformed metal, as well as a combination of these methods are developed. **Originality.** The processes that result in the interaction of vacancies with moving dislocations, which significantly changes the trajectories of the dislocations and forms a dislocation substructure with special quasi-equilibrium boundaries that are close in properties to the boundaries formed during high-temperature thermomechanical processing. **Practical value.** The principles of regulating the parameters of vacancy doping, ensuring its effectiveness and the controlled parameters of doping methods, are indicated.

**Keywords:** *vacancy hardening; hydrostatic compression; dislocation substructure; deformation-heat treatment; nonequilibrium concentration of vacancies; cyclic deformation; high-speed recrystallization heating*

Традиційні способи легування металів вимагають введення в них матеріальних носіїв легування – атомів легувальних елементів. У той же час можливе легування металів вакансіями, які є, за Шотткі, елементарними носіями «порожнечі». Урахування інших характеристик вакансій допускає, ймовірно, їх розгляд як елементарних частинок іншої, особливої речовини [1].

Порівняно давно відомо про роль вакансій як легувальних компонентів у твердих розчинах віднімання, особливо інтерметалідах і фазах упровадження [2].

Є спроби побудувати діаграму стану «метал – вакансія» [3]. Розглянуто можливості легування чистих металів нерівноважною концентрацією вакансій (НКВ) шляхом їх гарту з подальшим гартівним старінням або механіко-термічною обробкою типу деформаційного старіння [4]. Відомі ефекти знеміцнення деформованих металів за циклічної деформації [5], фактично також пов'язані з легуванням НКВ. Вказується на можливість значного підвищення пластичності металів шляхом насичення НКВ [6].

У статті наведено результати системного аналізу способів легування металів НКВ і механізмів впливу цього легування на структуру і властивості металів. Легування НКВ може здійснюватися шляхом вакансійного гартування (ВГ), гідростатичного стиснення (ГС), циклічної деформації (ЦД), спеціальної деформаційно-термічної обробки за типом швидкісного рекристалізаційного відпалу холодно-деформованого на значний ступінь металу (ШРВ), а також комбінацією зазначених методів. Метод ВГ заснований на відомій температурній залежності рівноважної концентрації вакансій (РКВ) і визначенні можливості фіксації необхідної концентрації вакансій (НКВ) в реальних перетинах. Рівнянням (1) визначається вихідна концентрація вакансій за температури нагріву під загартування  $T_0$ , якщо відомі значення: енергії утворення вакансій  $U_B$ , тиску  $P$  і релаксованого атомного об'єму  $\theta_a$ .

$$C_{BP} \approx \exp\left(-\frac{U_B}{kT_0}\right) \exp\left(-\frac{P\theta_a}{kT_0}\right). \quad (1)$$

За атмосферний тиск значенням другої експоненти можна знехтувати.

На фіксовані в результаті ВГ значення НКВ впливають значення  $T_0$  та режим гартувального охолодження. Останній визначається швидкістю відпалу вакансій за відомим рівнянням:

$$dC_B/d\tau = -C_\tau (av/\bar{r}) \exp(-U_m/kT_\tau), \quad (2)$$

де  $C_\tau$  – концентрація вакансій до часу охолодження  $\tau$ ,  $a$  – параметр кристалічної ґратки,  $v$  – дебаївська частота теплових коливань,  $\bar{r}$  – середня відстань до місця стоку вакансій,  $U_m$  – енергія міграції вакансій,  $T_\tau$  – поточна температура,  $k$  – постійна Больцмана.

Спільне рішення рівнянь (1) і (2) показує, що як абсолютні значення НКВ при ВГ –  $C_B'$ , так і ступінь пересичення вакансіями твердого розчину за температури кінця загартування –  $C_B'/C_{BP}$  у функції від  $T_0$  описуються екстремальними залежностями [7]. Якщо режимом обробки після ВГ передбачено пластичну деформацію або поліморфне перетворення за мартенситним

типом, основний вплив на формівну дислокаційну субструктуру чинить зведене відносно пересичення аустеніту ( $A$ ), яке визначає відношення осмотичної сили  $F_S$  та яке сприяє швидкому переповзанням крайової компоненти дислокації до значення сили  $F_P$ , що перешкоджає переповзанням [8]:

$$A = \frac{F_S}{F_P} = (kT/U_B) \ln(C_B'/C_{BP}). \quad (3)$$

Аби отримати необхідний ефект для формування дислокаційної субструктури в умовах пересичення вакансіями, що забезпечується ВГ, необхідне отримання значення  $A \geq 0,5$  [7]. Значення  $A$  можна обчислити як міру вакансійної загартованості металу. Важливо, що необхідна величина  $C_B'$  значно (на кілька порядків) менша значення рівноважної концентрації вакансій за температури гарту  $T_0$ . Це знімає теоретичні обмеження на практичну реалізацію ВГ [9].

У загальному вигляді середня критична швидкість загартування  $\bar{V}_{кр}$  в інтервалі  $T_0...T$  як швидкість охолодження, що забезпечує легування металу необхідної НКВ, визначається з виразу:

$$\bar{V}_{кр} = \frac{n-1}{[(n-1)/n]-A} \cdot \frac{kT^2}{U_B} \cdot \frac{v \cdot a}{\bar{r}} \exp\left[-\frac{2U_m}{k(nT+77)}\right], \quad (4)$$

де  $n = \frac{T_0}{T}$ .

Розрахункові й експериментальні оцінки для технічного заліза і сплавів на залізній основі показали, що значення  $\bar{V}_{кр}$  знаходяться в інтервалі 100...1 000 град/с, а наскрізна вакансійна прогартованість забезпечується в перетинах до 10 мм. Значення поточної швидкості  $V_T$  в підінтервалі температур  $T_1 - T_2$ , на які розбивається загальний інтервал охолодження  $T_0...T$ , можна обчислити за рівнянням:

$$V_T = \frac{T_1 - T_2}{\beta(T)} \cdot \frac{av \exp\left(-\frac{U_m}{kT}\right)}{\bar{r} \left\{1 - \exp\left[\frac{U_B}{k} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right)\right]\right\}}, \quad (5)$$

де  $\beta(T)$  – коефіцієнт «вакансійної прогартованості», який залежить від середньоінтервального значення температури  $\bar{T}$ .

Для здійснення ВГ перспективне охолодження швидко рухомими потоками диспергованого охолоджувача в турбулентному режимі, де закономірності температурної залежності поточних швидкостей охолодження близькі до вказаних вище [10].

Використання отриманої регламентованої НКВ для формування особливої дислокаційної субструктури в процесі подальшої деформації забезпечується: 1) обмеженням часу між закінченням ВГ і початком деформації і 2) регламентацією швидкості деформації  $\dot{\epsilon}$ .

Значення останнього параметра обчислюється рівнянням:

$$\dot{\epsilon} \geq \frac{\epsilon \cdot v \cdot \exp(-U_m/kT_B)}{\bar{r}(\epsilon)[1 - \exp(U_B/kT_B) \cdot (0,5 - A)]} \quad (6)$$

де  $\epsilon$  – ступінь деформації,  $T_B$  – температура деформації,  $\bar{r}(\epsilon)$  – середня відстань до місця стоку вакансій, яка залежить від ступеня деформації.

Експериментально показано, що ефекти легування НКВ сплавів на залізній основі методом ВГ стійко фіксуються у разі післягартівної деформації за кімнатної температури зі швидкостями  $10^{-3} \dots 10^{-1} \text{ c}^{-1}$  в діапазоні  $\epsilon = 0,05 \dots 0,25$ .

Легування НКВ методом ВГ може бути ефективним і, так би мовити, в чистому вигляді, коли післягартівна обробка полягає у післягартівному вилежуванні, своєрідному гартівному старінні, механізмом якого постає взаємодія вакансій між собою і (або) зі стаціонарними дислокаціями, що існують у металі після ВГ. Про наявність таких ефектів є досить багато відомостей в літературі, переважно для ГЦК-металів [8; 11; 12]. Взаємодія між нерівноважними вакансіями зумовлює утворення дислокаційних петель і тетраєдрів дефектів упаковки, пов'язаних із формуванням «сидячих» дислокацій Франка в щільноупакованих кристалографічних площинах, а також утворення субмікропор [8; 11; 12].

Відомості про кількісне регулювання зазначених ефектів шляхом зміни режимів із позицій, описаних вище, у відомій

літературі відсутні. У той же час таке регулювання цілком можливе.

Умова утворення дислокаційних петель визначається ступенем відносного пересичення вакансіями [8]:

$$\ln \frac{C'_B}{C_{BF}} \geq 0,125 \frac{G \cdot b^3}{kT}, \quad (7)$$

де  $G$  – модуль зсуву,  $b$  – вектор Бюргерса.

Права частина рівняння (7) для сплавів на залізній основі і кімнатній температурі близько  $10^0 \text{ C}$ . Отже, умова (7) виконується, якщо забезпечується необхідне значення  $A$  згідно з рівняннями (3) і (4). Однак одержувані кількісні ефекти з точки зору зміни властивостей залежать, у даному випадку, від абсолютного значення НКВ, тобто від величини  $C'_B$ . Щоб забезпечити щільність вакансійних утворень в інтервалі  $10^{12} \dots 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , значення  $C'_B$  має бути в межах відповідно  $10^{-8} \dots 10^5$ . Розрахунок необхідних параметрів режиму ВГ може бути проведений за допомогою рівняння (4) з урахуванням того, що, згідно з рівнянням (3):

$$\ln C'_B = \frac{AV_B}{kT} + \ln C_{BF}. \quad (8)$$

Зазначена вище об'ємна щільність вакансійних утворень достатня для отримання помітного зміцнення за аналогією зі зміцненням дисперсійно твердіючих сплавів зонами або когерентними виділеннями: наприклад, за об'ємної щільності дислокаційних петель порядку  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  межа плинності чистого алюмінію зростає в 5 разів [12], що рівноцінно легуванню кількома відсотками міді.

У разі легування металу НКВ за допомогою ГС враховуються обидва експоненти в рівнянні (1). Підвищення тиску за тієї самої температури робить раніше РКВ нерівноважною і, таким чином, робить можливим за тиску не менше певного  $P_{\min}$  досягти ступеня пересичення металу вакансіями, що допускає швидке переповзання дислокацій за Фріделем, так само як розглянуте вище легування методом ВГ.

Таким чином, на нашу думку, досягається відомий ефект «барополігонізації» за ГС, механізм якого раніше, наприклад, авторами роботи [13] уявлявся дещо іншим. Якщо виходити з одних позицій впливу НКВ на прискорену полігонізацію в деформованих металах як після ВГ, так і за ГС, значення  $P_{\min}$  для «барополігонізації» обчислюється виразом:

$$P_{\min} \geq 0,5 \frac{U_B}{\vartheta_a} \quad (9)$$

Розрахунок за цим виразом для різних металів дає цілком порівняльні значення тисків із використовуваними на практиці. Значення використовуваних за ГС тисків досить великі, а ефект «барополігонізації» досягається не для всіх металів зі зменшенням значення енергії дефектів упаковки (ЕДУ). Останнє робить у низці випадків процес обробки нестабільним, що супроводжується стрибками тиску, що, зокрема, позбавляє процес однієї з важливих переваг: високої точності розмірів і низької шорсткості поверхні.

Комбінування легування шляхом гідростатичного стиснення (ГС) з попереднім легуванням НКВ методом ВГ дозволяє отримати переваги для обох способів:

$$P_{\min} = \frac{kT}{\vartheta_a} \ln \frac{c'}{\beta} - \frac{U_B}{\vartheta_a} \left(1 - \frac{1}{n}\right), \quad (10)$$

де  $c'$  – ступінь пересичення вакансіями в результаті ВГ,  $\beta$  – те саме – в результаті ГС.

Як впливає з рівняння (10), попереднє легування НКВ шляхом ВГ дозволяє знизити необхідний тиск і отримати ефект «барополігонізації». При цьому може бути досягнутий ефект неконсервативного ковзання дислокацій навіть для металів із низькою  $E_{\text{дп}}$ .

Легування НКВ шляхом циклічної деформації (ЦД) засноване на експериментально встановленому і потім теоретично обґрунтованому ефекті отримання істотно великих значень НКВ порівняно з активною деформацією [5; 14]. Доцільне використання легування НКВ шляхом ЦД для металів із високою щільністю місць стоку вакансій, особливо

для деформованих металів із високою щільністю дислокацій, що є характерною особливістю отримання позитивних ефектів за вакансійного легування шляхом ЦД.

Значення НКВ, що вводиться у метал за високочастотної ЦД, можна оцінити за виразом [15]:

$$C'_B \approx \frac{f \cdot Q^{-1} \cdot \varepsilon_A}{m D_B}, \quad (11)$$

де  $f$  – частота коливань,  $Q^{-1}$  – добротність коливальної контури,  $\varepsilon_A$  – амплітудна деформація,  $m$  – щільність дислокацій,  $D_B$  – коефіцієнт дифузії вакансій.

Зі зміною частоти ЦД і значення  $\varepsilon_A$  ця залежність зберігається. Загалом можна прийняти, що значення  $C'_B = f(N_A \cdot \varepsilon_A)$ ,  $N_A$  – число циклів деформації з амплітудою  $\varepsilon_A$ , якщо щільність дислокації (вихідна) і значення  $D_B$  – приблизно постійні.

Можливість легування металів НКВ за допомогою швидкісного рекристалізаційного відпалу (ШРВ) вперше була показана, мабуть, у праці [16]. Пізніше запропоновано вираз для кількісної оцінки значення НКВ при цьому [6]:

$$C'_B \approx \frac{m \rho_M}{b \rho N_A}, \quad (12)$$

де  $\rho_M$  – мольна маса,  $\rho$  – щільність металу,  $N_A$  – число Авогадро.

За щільність дислокацій, які анігілюють у процесі ШРВ  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , величина  $C'_B$  досягає  $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ см}^{-2}$ , тобто дуже великих значень. Таке легування НКВ може бути використане безпосередньо за температури кінця рекристалізації, а також шляхом часткової фіксації за більш низької температури методом ВГ. В останньому випадку відкривається можливість знизити оптимальну температуру нагрівання під ГЗ із фіксацією тієї ж або вищої НКВ у разі знижених швидкостей гартування.

**Висновок.** Розглянуто та обґрунтовано способи нового виду легування металів – вакансійного. Як такі способи запропоновано: вакансійне гартування, гідростатичне стиснення, циклічна деформація і швидкісний рекристалізаційний відпал, як кожен окремо, так і в комбінації. Вказані принципи регламентації параметрів вакансійного легування

забезпечують його ефективність і контрольовані параметри способів легування.

Вакансійне легування належить, в основному, до структурного типу легування і його вплив на властивості пов'язаний зі зміною структурного стану металу на рівні тонкої структури. Структурні зміни, що викликаються вакансійним легуванням у поєднанні з подальшими діями – тимчасовими або деформаційними, фактично можна описати як процеси своєрідного гартувального, статичного деформаційного і динамічного деформа-

ційного старіння. При цьому гартівне старіння пов'язане із взаємодією нерівноважних вакансій між собою, статичне деформаційне – із взаємодією цих вакансій зі стаціонарними, а динамічне деформаційне – з рухомими дислокаціями.

Особливий інтерес і новизну становить останній процес, в ході якого істотно змінюються траєкторії руху дислокацій і формується дислокаційна субструктура з особливими квазірівно-важними межами, близькими за властивостями до меж, що формуються під час високотемпературної термомеханічної обробки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Владимиров В. И. Физическая теория прочности и пластичности металлов : учеб. пособ. Ленинград : ЛПИ, 1975. 224 с.
2. Physical metallurgy. Edited by R. W.Cahn; chapters XII–XX. North-Holland Publishing Co, Amsterdam, 1965.
3. Габидуллин Р. М., Колачев Б. А. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. 1976, № 4. С. 87–91.
4. Камышанченко Н. В. Влияние механико-термического воздействия на структуру и свойства закаленных чистых металлов : монография. Белгород, 1984. 197 с. Деп. ВИНТИ № 5979-84.
5. Херцберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. Москва : Металлургия, 1979. 576 с.
6. Колбасников Н. Г. О роли вакансий в формировании свойств металлов. *Металлы*. 1998. № 6. С. 80–90.
7. Гуль Ю. П., Лещенко А. Н., Пилипченко В. Ю. Роль вакансионной закалки при термопластическом упрочнении сталей аустенитного класса. *Известия АН СССР. Металлы*. 1990, № 4. С. 77–83.
8. Фридель Ж. Дислокации. Москва : Мир, 1967. 644 с.
9. Бюрен Ван. Дефекты в кристаллах. Москва : Изд-во иностр. лит., 1962. 574 с.
10. Гуль Ю. П., Чмелева В. С., Кириченко В. В. Современные аспекты закалочного охлаждения стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1989, № 9. С. 2–6.
11. Такамура Д. И. Точечные дефекты. Под ред. Р. У. Кана. *Физическое металловедение*. Вып. 3. Москва : Мир, 1968. С. 87–105.
12. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. Москва : Мир, 1972. 408 с.
13. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. Москва : Атомиздат, 1972. 600 с.
14. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. Москва : Металлургиздат, 1965. 432 с.
15. Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. Москва : Мир, 1966. 291 с.
16. Блантер М. Е., Горелик С. С. Образование вакансий при рекристаллизации. *Известия АН СССР. Металлы*. 1982. № 2. С. 90–93.

### REFERENCES

1. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya teoriya prochnosti i plastichnosti metallov* [Physical Theory of Strength and Plasticity of Metals]. Leningrad : LPI, 1975, 224 p. (in Russian).
2. Physical metallurgy. Ed. by R.W.Cahn, chapters XIII–XX. North-Holland Publishing Co, Amsterdam, 1965.
3. Gabidullin R.M. and Kolachev B.A. *Izvestiya VUZov. Zvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy. University News]. 1976, no. 4, pp. 87–91. (in Russian).
4. Kamishanchenko N.V. *Vliyanie mekhaniko-termicheskogo vozdeystviya na structure i svoystva zakalennih chistyh metallov* [The influence of mechanical and thermal effects on the structure and properties of hardened pure metals]. Belhorod, 1984, 197 p.; Dep.VINITI № 5979-84. (in Russian).
5. Herzberg R.V. *Deformaziya i mekhanika razrusheniya konstrukzionnih materialov* [Deformation and fracture mechanics of structural materials]. Moscow : Metallurgiya, 1979, 576 p. (in Russian).
6. Kolbasnikov N.G. *O roli vakansiy v formirovanii svoystv metallov* [On the role of vacancies in the formation of the properties of metals]. *Metally* [Metals]. 1998, no. 6, pp. 80–90. (in Russian).

7. Gul' Yu.P., Leschenko A.N. and Pilipchenko V.Yu. *Rol' vakansionnoy zakalki pri termoplasticheskom uprochnenii staley austenitnogo klassa* [The role of vacancy hardening in thermoplastic hardening of austenitic steels]. *Metally* [Metals]. 1990, no. 4, pp.77–83. (in Russian).
8. Fridel' G. *Dislokazii* [Dislocations]. Moscow : Mir, 1967, 644 p. (in Russian).
9. Buren Van. *Defekty v kristallah* [Crystal defects]. Moscow : Izdat. Inostr. lit., 1962, 574 p. (in Russian).
10. Gul' Yu.P., Chmeleva V.S. and Kirichenko V.V. *Sovremenniy aspekt zakalochnou ohlagdeniya staly* [Modern aspects of the quench cooling of steel]. *MiTOM* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1989, no. 9, pp. 2–6. (in Russian).
11. Takamura D.I. *Tochechnie defekty* [Point defects]. Ed. by R.U.Kana. *Fizicheskoe metallovedenie* [Physical metallurgy]. Moscow : Mir, 1968, vol. 3, pp.87–105. (in Russian).
12. Honikomb R. *Plasticheskaya deformaciya metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow : Mir, 1972, 408 p. (in Russian).
13. Hirt Dg. and Lote I. *Teoriya dislokaziy* [Dislocation theory]. Moscow : Atomizdat, 1972, 432 p. (in Russian).
14. Mak Lin D. *Mechanicheskie svoystva metallov* [The mechanical properties of metals]. Moscow : Metallurgizdat, 1965, 432 p. (in Russian).
15. Damask A. and Dins Dg. *Tochechnie defekty v metallah* [Point defects in metals]. Moscow : Mir, 1966, 291 p. (in Russian).
16. Blanter M.E. and Gorelik S.S. *Obrazovanie vakansiy pri rekristallizacii* [Vacancy formation during recrystallization]. *Izvestiya AN USSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1982, no. 2, pp. 90–93. (in Russian).

Надійшла до редакції : 08.02.2020 р.

УДК 621.771

DOI : 10.30838/J.PMHTM.2413.260222.51.633

## COLD ROLLING OF ALUMINUM FOUNDRY ALLOY

DOLZHANSKYI A.M.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
 KUTSOVA V.Z.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
 AYUPOVA T.A.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
 STOROZHKO K.D.<sup>4</sup>, *Student*,  
 RYBKIN O.P.<sup>5</sup>, *Student*

<sup>1</sup> Department of Quality, Standardization and Certification, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 746-05-49, e-mail: [tk136@ua.fm](mailto:tk136@ua.fm), ORCID ID:0000-0002-7552-3012

<sup>2</sup> Department of Material Science named after Yu.M.Taran-Zhovnir, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-89-36, e-mail : [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-2413-679X

<sup>3\*</sup> Department of Material Science named after Yu.M.Taran-Zhovnir, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-89-36, e-mail : [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID : 0000-0002-5706-4211

<sup>4</sup> Department of Material Science named after Yu.M.Taran-Zhovnir, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-89-36, e-mail : [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>5</sup> Department of Material Science named after Yu.M.Taran-Zhovnir, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-89-36, e-mail : [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

**Abstract. Purpose.** The aim of the study is to improve the methodology for determining the limit degree of technological deformability of metals during the rolling of wedge-shaped samples, as well as to determine the patterns of the complex melt treatment influence on the AlSi7 alloy deformability limit degree when rolling wedge-shaped samples. **Methodology.** The object of the study is an AlSi7 alloy, modified with complex 0,1 % Sr + 0,5 % Sc in cast and Hydrogen melt treated state. The laws of influence of complex melt treatment on the structure and limit deformability of AK7h alloy are investigated. An improved mode is proposed for determining the ultimate degree of metal deformation during the rolling of wedge-shaped samples. An improved technique was used when rolling at a speed of 0,3 m/s at the laboratory mill duo 180. Steel hardened rolls with a roughness  $R \sim 1$  mkm and an ungreased surface were installed. The sizes of the initial samples are  $h_{01} = 3$  mm,  $h_{02} = 11$  mm,  $b_0 = 10$ mm,  $l_0 = 46$  mm. The microstructure was studied by standard methods on equipment that passed state verification. **Originality.** A technique for determining the limiting degree of technological deformation of metals during rolling of wedge-shaped samples has been developed. The developed technique is calculated and does not require marking on the lateral surfaces of samples. Parameters of complex treatment of AlSi7 melt alloy (microalloying with Sr – Sc + hydrogen melt treatment) were at first determined. The structure and phase composition of the cast aluminum alloy which ensured its rolling with the degrees of the total logarithmic (“true”) deformation up to 1,19 were first determined. **Practical value.** The improved mode of metal deformability limiting degree definition at rolling process of wedge-shaped samples made possible to increase clarity and simplify the experiment. The modification composition and the hydrogen treatment time parameters optimization allows obtaining rolled products from the AlSi7 cast alloy.

**Keywords:** *technological deformability limiting degree; rolling; wedge-shaped samples; cast AlSi7 alloy; hydrogen melt treatment*

## ХОЛОДНА ПРОКАТКА ЛИВАРНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

ДОЛЖАНСЬКИЙ А. М.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
 КУЦОВА В. З.<sup>2</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
 АЮПОВА Т. А.<sup>3\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
 СТОРОЖКО К. Д.<sup>4</sup>, *студ.*,  
 РИБКІН О. П.<sup>5</sup>, *студ.*

<sup>1</sup> Кафедра якості, стандартизації та сертифікації, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-05-49, e-mail: [tk136@ua.fm](mailto:tk136@ua.fm), ORCID ID:0000-0002-7552-3012

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства ім. Ю. М. Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-89-36, e-mail [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-2413-679X

<sup>3\*</sup> Кафедра матеріалознавства ім. Ю. М. Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-82-66, e-mail [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID 0000-0002-5706-4211

<sup>4</sup> Кафедра матеріалознавства ім. Ю. М. Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-82-66, e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>5</sup> Кафедра матеріалознавства ім. Ю. М. Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-82-66, e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

**Анотація.** *Мета дослідження* – удосконалення методики визначення граничного ступеня технологічної деформованості металів під час прокатки клиноподібних зразків, а також з'ясування закономірностей впливу комплексної обробки розплаву на граничний ступінь деформованості сплаву АК7ч за холодної прокатки клиноподібних зразків. *Методика.* Об'єкт дослідження – ливарний алюмінієвий сплав АК7ч вихідного складу та такий, що містить комплекс Sr – Sc; в литому стані та після водневої обробки розплаву. Досліджували закономірності впливу комплексної обробки розплаву на структуру та граничну деформованість сплаву АК7ч. Запропоновано удосконалену методику визначення граничного ступеня деформації металів під час прокатки клиноподібних зразків. Її застосовували під час прокатки зі швидкістю 0,3 м/с на лабораторному стані дуо 180. Були встановлені сталеві загартовані валки із шорсткістю  $R \sim 1$  мкм і незмащеною поверхнею. Розміри вихідних зразків склали  $h_{01} = 3$  мм,  $h_{02} = 11$  мм,  $b_0 = 10$  мм,  $l_0 = 46$  мм. Мікроструктуру вивчали за стандартними методиками на обладнанні, що пройшло держперевірку. *Наукова новизна.* Отримала розвиток методика визначення граничного ступеня технологічної деформованості металів під час прокатки клиноподібних зразків. Розроблена методика – розрахункова та не потребує нанесення рисок на бічні поверхні дослідних зразків. Уперше визначено параметри комплексної обробки розплаву сплаву АК7ч (мікролегування комплексом Sr – Sc + воднева обробка розплаву), а також особливості структури та фазового складу ливарного алюмінієвого сплаву, які забезпечують його прокатку зі ступенем сумарної логарифмічної («істинної») деформації до 1,19. *Практична значимість.* Нова методика визначення граничного ступеня деформації металів під час прокатки клиноподібних зразків дозволила підвищити точність і спростити проведення експерименту. Оптимізація складу модифікування і часових параметрів водневої обробки розплаву дозволила отримати прокат із ливарного сплаву АК7ч.

**Ключові слова:** *граничний ступінь технологічної деформації; прокатка, клиноподібні зразки; сплав АК7ч; воднева обробка розплаву*

## ХОЛОДНАЯ ПРОКАТКА ЛИТЕЙНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

ДОЛЖАНСКИЙ А. М.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,

КУЦОВА В. З.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, проф.,

АЮПОВА Т. А.<sup>3\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

СТОРОЖКО К. Д.<sup>4</sup>, студ.,

РЫБКИН О. П.<sup>5</sup>, студ.

<sup>1</sup> Кафедра качества, стандартизации и сертификации, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 746-05-49, e-mail : [tk136@ua.fm](mailto:tk136@ua.fm), ORCID ID: 0000-0002-7552-3012

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения им. Ю. Н. Тарана-Жовніра, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-89-36, e-mail [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-2413-679X

<sup>3\*</sup> Кафедра материаловедения им. Ю. Н. Тарана-Жовніра, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-82-66, e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID 0000-0002-5706-4211

<sup>4</sup> Кафедра материаловедения им. Ю. Н. Тарана-Жовніра, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-89-36, e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>5</sup> Кафедра материаловедения им. Ю. Н. Тарана-Жовніра, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-89-36, e-mail [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

**Аннотация.** *Целью исследования* является совершенствование методики определения предельной степени технологической деформируемости металлов при прокатке клиновидных образцов, а также определение закономерностей влияния комплексной обработки расплава на предельную степень деформируемости сплава АК7ч при холодной прокатке клиновидных образцов. *Методика.* Объектом исследования является литейный алюминиевый сплав АК7ч исходного состава и содержащий комплекс Sr–Sc; в литом состоянии и после водородной обработки расплава. Исследовали закономерности влияния комплексной обработки расплава на структуру и предельную деформируемость сплава АК7ч. Предложена усовершенствованная методика определения предельной степени деформации металлов при прокатке клиновидных образцов. Ее использовали при прокатке со скоростью 0,3 м/с на лабораторном стане дуо 180. Были установлены стальные закаленные валки с шероховатостью  $R \sim 1$  мкм и несмазанной поверхностью. Размеры исходных образцов составили



$h_{01} = 3$  мм,  $h_{02} = 11$  мм,  $b_0 = 10$  мм,  $l_0 = 46$  мм. Микроструктуру изучали по стандартным методикам на оборудовании, прошедшем госповерку. **Научная новизна.** Получила развитие методика определения предельной степени технологической деформируемости металлов при прокатке клиновидных образцов. Разработанная методика является расчетной и не требует нанесения рисок на боковые поверхности опытных образцов. Впервые определены параметры комплексной обработки расплава сплава АК7ч (микролегирование комплексом Sr – Sc + водородная обработка расплава), а также особенности структуры и фазового состава литейного алюминиевого сплава, которые обеспечивают его прокатку со степенью суммарной логарифмической («истинной») деформации до 1,19. **Практическая значимость.** Новая методика определения предельной степени деформации металлов при прокатке клиновидных образцов позволила повысить точность и упростить проведение эксперимента. Оптимизация состава модифицирования и временных параметров водородной обработки расплава позволила получить прокат из литейного сплава АК7ч.

**Ключевые слова:** предельная степень технологической деформируемости; прокатка; клиновидные образцы; сплав АК7ч; водородная обработка расплава

### Introduction

One of the methods for studying the technological properties of metals is the evaluation their ultimate degree of deformability to the normal shaping process damage [1]. When rolling, such a damage may be the destruction of the product due to the exhaustion of its plastic properties, slipping of the roll in the rolls, breakage of the rolls due to their insufficient strength, etc. As a rule, identification of the type of process damage is determined by the research purpose and does not present difficulties. Usually, in such experiments, there is a problem of determining the ultimate degree of metal deformation at which a damage occurs. For this, wedge-shaped samples are often used (Fig. 1), fed to the rolls with a thin end, and the value of the limiting logarithmic “true” deformation is determined by the formula [1]:

$$\epsilon_{\text{пред}} = \ln \frac{F_{0\text{хар}}}{F_{1\text{хар}}}, \quad (1)$$

$F_{0\text{хар}}$  and  $F_{1\text{хар}}$  – the cross-sectional area of the sample in characteristic sections corresponding to each other, before (index “0”) and after (index “1”) rolling (for example, at the place of destruction of the sample or its slipping in the rolls).

The value  $F_{1\text{хар}}$  is determined by the measured values of the height  $h_1$  and width  $b_{\text{хар}}$  of the rolled samples in a characteristic section (Fig. 1). It is more difficult to determine a previously unknown place on the initial sample with a height  $h_{0\text{хар}}$  at a distance  $x_{0\text{хар}}$  from its

front end, which corresponds to the place of the future characteristic section (fracture) on the rolled sample.

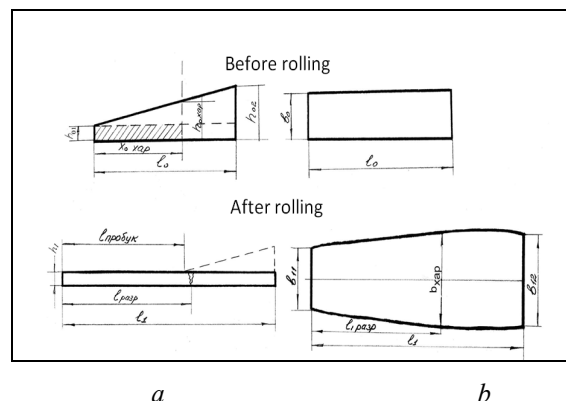


Fig.1. Diagram of the wedge-shaped pattern: a – side view; b – top view;

$l_{\text{разр}}$ ,  $l_{\text{пробук}}$  – distance from the rolled sample front end to the characteristic location of the rolling process failure: destruction or slippage

To solve this problem, a number of longitudinal marks are applied with a certain step on the lateral surface of the initial wedge-shaped sample before rolling [2]. However, the applied (“scratched”) strips can be additional stress concentrators, which contribute to premature destruction of the sample during its plastic deformation, and a similar use of labels with coloring pigments is accompanied by a decrease in the accuracy of determining the characteristic cross section due to a change in their size during metal deformation. Also, such sample preparation significantly complicates the experiment.

### Purpose

Improvement of the methodology for determining the limit degree of technological

deformability of metals during the rolling of wedge-shaped samples, as well as to determine the patterns of the complex melt treatment influence on the AlSi7 alloy deformability limit degree.

### Material

The object of the study is an AlSi7 alloy, modified with complex 0,1 % Sr + 0,5 % Sc in cast and Hydrogen melt treated state (Table 1).

Table 1

The Chemical Composition of the AlSi7 Alloy

Chemical element, % mass.						
Al	Si	Mg	Mn	Fe	Sr	Sc
base	6.8–7.0	0.2–0.4	0.3	0.2–0.4	–	–
	6.8–7.0	0.2–0.4	0.3	0.2–0.4	0.1	0.5

### Methodology and results

During the study, we considered two possible options.

**Option 1.** The sample is rolled without destruction and slipping. Then the maximum degree of achieved deformation  $\varepsilon_{\max}$  is determined by the cross section of its rear end according to the formula (see Fig. 1):

$$\varepsilon_{\max} = \ln \frac{h_{02} \cdot b_0}{h_1 \cdot b_{12}} \quad (2)$$

In this case, the resource of technological deformability of the metal is not exhausted. In fact:

$$\varepsilon_{\text{неод}} > \ln \frac{h_{02} \cdot b_0}{h_1 \cdot b_{12}} \quad (3)$$

**Option 2.** The sample is rolled with a fixed violation of the process of any kind. For example, the place of destruction of the sample after rolling is determined visually (Fig. 2), and the length  $l_{\text{пазп}}$  of the sample part to this place (Fig. 1) can be measured.

In this case, it is necessary to determine the degree of deformation of the sample, taking into account its initial height  $h_{0xap}$  in the cross section, which corresponds to the value  $l_{\text{пазп}}$ . For this case:

– after rolling in a characteristic section (where there is destruction / slipping):

$$F_{1xap} = h_1 \cdot b_{xap} \quad (4)$$

– before rolling in the appropriate section (so far unknown):

$$F_{0xap} = h_{0xap} \cdot b_0 \quad (5)$$

For wedge-shaped samples in general form:

$$h_{0xap} = h_{01} + \frac{h_{02} - h_{01}}{l_0} \cdot x_{0xap} \quad (6)$$

From the conditions of volumes constancy:

$$V_1 = V_0 \quad (7)$$

$V_0, V_1$  – the metal volume before and after the sample rolling to its characteristic section.

If we neglect the curvature of broadening  $b_l$ , which is permissible for  $b_0 \geq h_{02}$ :

$$V_1 \approx \frac{1}{2} (b_{11} + b_{xap}) \cdot h_1 \cdot l_{1xap} \quad (8)$$

This volume corresponds to the original volume:

$$V_0 = h_{01} \cdot b_0 \cdot x_{0xap} + \frac{1}{2} \cdot b_0 \cdot (h_{0xap} - h_{01}) \cdot x_{0xap}$$

and taking into account the formula (6):

$$V_0 = h_{01} \cdot b_0 \cdot x_{0xap} + \frac{1}{2} \cdot b_0 \cdot (h_{01} + \frac{h_{02} - h_{01}}{l_0} \cdot x_{0xap} - h_{01}) \cdot x_{0xap} \quad (9)$$

When substituting expressions (8) and (9) into equality (7) after simple transformations for the root of the quadratic equation that has physical meaning, we have:

$$x_{0xap} = -\frac{h_{01} \cdot l_0}{h_{02} - h_{01}} + \sqrt{\frac{h_{01}^2 \cdot l_0^2}{(h_{02} - h_{01})^2} + \frac{h_1 \cdot (b_{11} + b_{xap}) \cdot l_0 \cdot l_{1xap}}{(h_{02} - h_{01}) \cdot b_0}} \quad (10)$$

Then the algorithm for determining the ultimate degree of metal deformation is as follows:

– samples are measured (Fig. 1) and deformed in one pass with the provoked possibility of disruption of the rolling process. After rolling, the position  $l_{\text{пазп}}$  of the characteristic cross section is visually determined;

- the required dimensions of the sample are measured after rolling, and the value  $x_{0_{xap}}$  is calculated by the formula (10);
- $h_{0_{xap}}$  determined by expression (6);
- $F_{0_{xap}}$  – determined by expression (5);
- $F_{1_{xap}}$  – determined by expression (4);
- ultimate degree of deformation  $\varepsilon_{nped}$  – according to the formula (1).

An improved technique was used when rolling at a speed of 0,3 m/s at the laboratory mill duo 180. Steel hardened rolls with a roughness  $R_a \approx 1.МКМ$  and an ungreased surface were installed. The sizes of the initial samples according to Figure 1 are  $h_{01} = 3$  mm,  $h_{02} = 11$  mm,  $b_0 = 10$  mm,  $l_0 = 46$  mm.

In the first series of experiments, samples of cast alloys AlSi7 and AlSi7(Sr,Sc) [3; 4] in the cast state and after hydrogen treatment carried out in accordance with [5] modes were rolled with a gap between the rolls less than  $h_{01}$  (Fig. 1). Each experiment is duplicated 3 times.

After rolling, the samples were measured with an accuracy of 0,01 mm using a micrometer (thickness, width) and 0,1 mm with a caliper (length).

The appearance of characteristic samples before and after rolling is shown in Figure 2. From these data it is seen that the determination of the size of the samples after rolling does not cause difficulties.

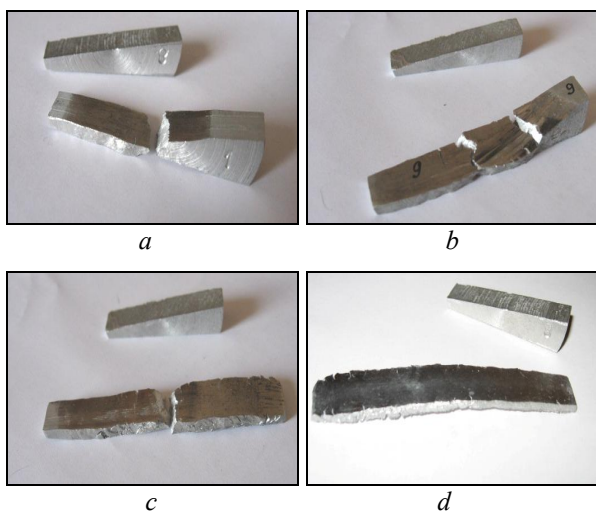


Fig. 2. View of samples of AlSi7 and AlSi7(Sr, Sc) alloys in initial state and after technological deformability tests: a, b – AlSi7; c, d – AlSi7(Sr, Sc); a, c – cast state; b, d – after hydrogen melt treatment

The microstructures of AlSi7 and AlSi7(Sr, Sc) alloys in the cast state and after hydrogen treatment are presented in Figures 3 and 4, and the quantitative dependences of the structure characteristics (D, A – size and the shape parameter of eutectic silicon crystals, respectively, L is the distance between silicon crystals in eutectic) are in Figure 5.

Data of Figures 4–5 indicate the geometric orientation of  $\alpha$ -Al grains in the direction of the principal axis of deformation and partial crushing of eutectic silicon and intermetallic phases.

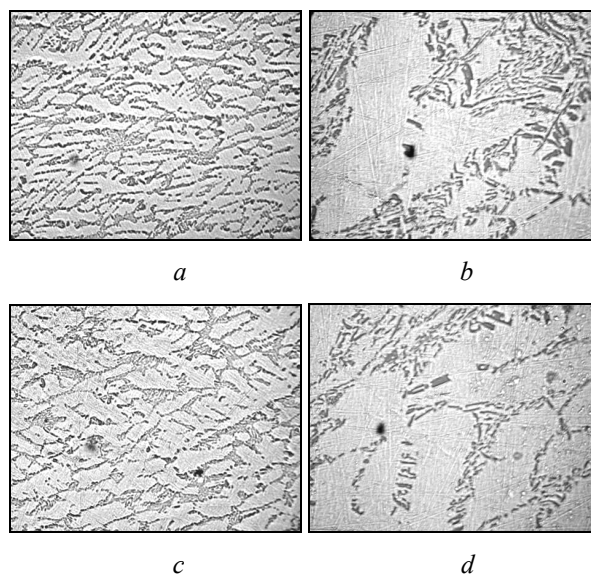


Fig. 3. Structure of the AlSi7 alloy in the cast state (a, b) and after hydrogen treatment (c, d): a, c –  $\times 100$ ; b, d –  $\times 500$

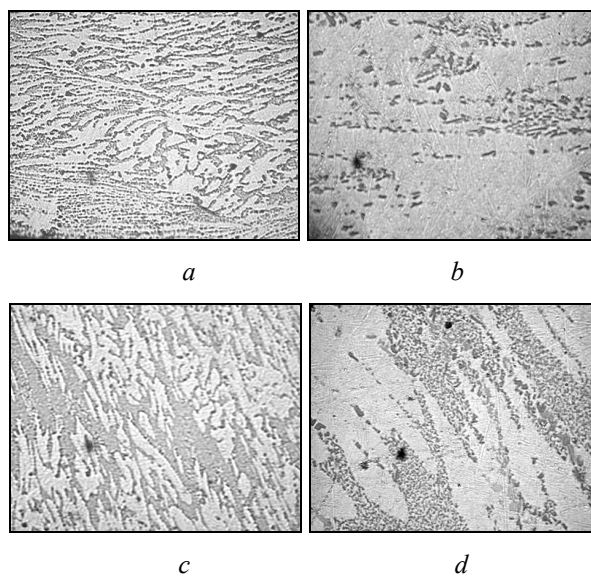


Fig.4. Structure of AlSi7(Sr, Sc) alloy in the cast state (a, b) and after hydrogen treatment (c, d): a, c –  $\times 100$ ; b, d –  $\times 500$

The decrease in the average size of eutectic silicon crystals, the shape parameter of eutectic silicon crystals is associated with the grinding of eutectic silicon, especially in coarse-grained eutectics, and the orientation of the eutectic silicon crystals in the direction of the principal deformation axis.

The results of the deformability limit calculations of the tested samples are presented in Figure 6.

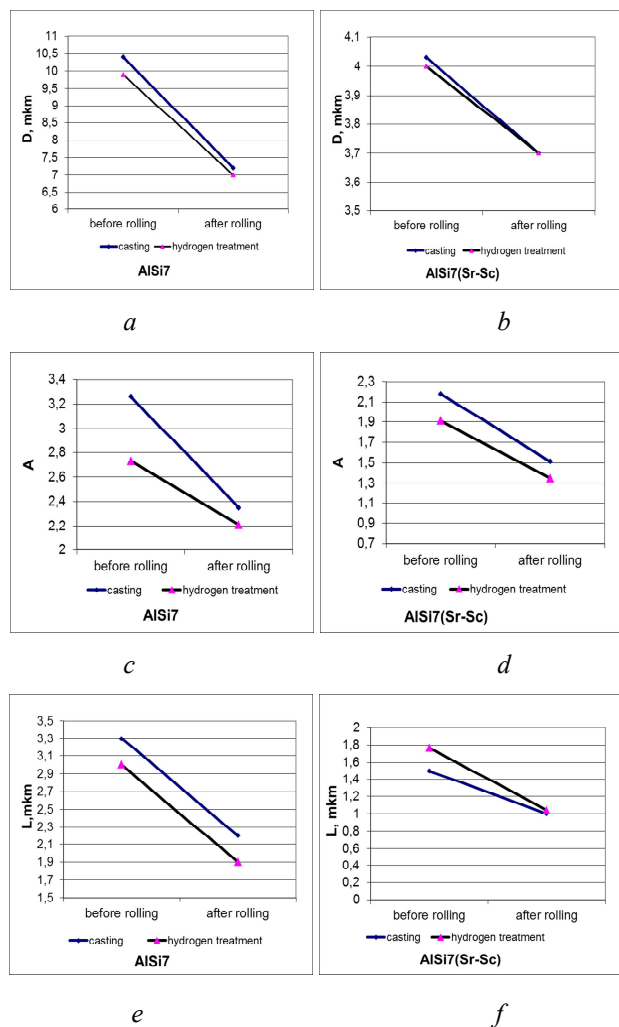


Fig. 5. The AlSi7 and AlSi7(Sr, Sc) alloys structure characteristics dependences in the cast state and after hydrogen treatment: a, b – the size of the eutectic silicon crystals, c, d – the eutectic silicon crystals shape parameter, e, f – the distance between silicon crystals in eutectic a, c, e – AlSi7, b, d, f – AlSi7 (Sr, Sc)

It is shown that the greatest influence on the deformability of the AlSi7 alloy is exerted by the complex physicochemical treatment of the melt – microalloying with strontium and scandium at an optimal concentration of [2–3] – hydrogen treatment (20 minutes). The

deformability of the alloy increases by 60 % compared to the cast alloy of the original composition.

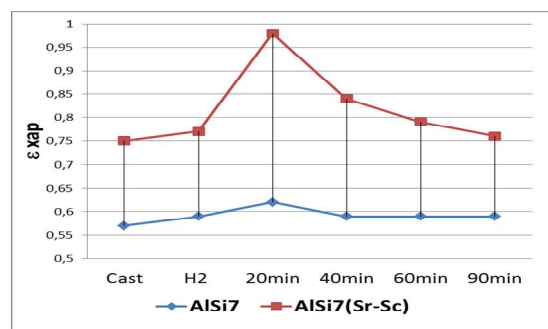


Fig. 6. Dependence of technological deformability of AlSi7 and AlSi7(Sr, Sc) alloys – on the mode of hydrogen melt treatment

### Conclusions

1. The improved method for determining the ultimate degree of metal deformation during rolling of wedge-shaped samples is proposed. It allows increasing accuracy and simplifying the experiment.

2. The method is tested in laboratory conditions for the detection of a rational combination of factors of complex influence in the microalloying strontium-scandium complex and hydrogen melt treatment, which provide a significant increase in the cast aluminum alloy deformability.

3. The obtained dependences of technological deformability on the composition of the AlSi7 alloy and the mode of hydrogen treatment of its melt indicate an increase in the deformability of the alloy by 60 % with the complex physicochemical effect of microalloying with strontium and scandium and hydrogen melt treatment for 20 minutes compared with cast alloy.

4. The structure of AlSi7 and AlSi7 (Sr, Sc) alloy in the cast state and after hydrogen treatment according to optimal modes after rolling with the ultimate degree of deformation was studied. There is a geometric orientation of the grains of  $\alpha$ -Al solid solution in the direction of the principal axis of deformation and partial crushing of eutectic silicon and intermetallic phases.

5. For the first time, the method of rolling obtained the strip 2,4 mm thick from the workpiece of alloy AlSi7 (Sr, Sc) with a

maximum thickness of 11 mm, which allows to expand the use of foundry alloy AK7h for the manufacture of products both by casting and

using pressure treatment methods. The true deformation of the AlSi7(Sr,Sc) alloy after hydrogen treatment (20 min) was 1,19.

### REFERENCES

1. Ilyukovich V.M., Ogurtsov A.P., Nekhaev N.Ye. and Yershov S.V. *Teoreticheskie osnovy` obrabotki metallov davleniem: monografiya* [Theoretical foundations of metal forming : monograph]. Dnipropetrovsk : RVA :Dnipro-VAL”, 2001, vol. 1, 518 p. (in Russian).
2. Grudev A.P. *Trenie i smazka pri obrabotke metallov davleniem* [Friction and lubrication in metal forming]. Moscow : Metallurgiya, 1982, 312 p. (in Russian).
3. Kutsova V.Z. and Ayupova T.A. *Vliyanie mikrolegirovaniya Sr i Sc na strukturu splava AK7ch* [The effect of microalloying Sr and Sc on the structure of AK7ch alloy]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Civil Engineering, Material Science, Machine Engineering]. Vol. 36, p.1, Dnipropetrovsk : PSACEA. 2006, pp. 201–209. (in Russian).
4. Kutsova V.Z., Ayupova T.A. and Ambrazhej M.Yu. *Vliyanie mikrolegirovaniya Sr i Sc na fazovyj sostav i svojstva AK7ch* [The effect of microalloying Sr and Sc on the phase composition and properties of AK7ch]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* Civil Engineering, Material Science, Machine Engineering]. Vol. 41, p. 1, Dnipropetrovsk : PSACEA, 2007, pp. 18–30. (in Russian).
5. Kutsova V.Z. and Ayupova T.A. *Vliyanie vodorodnoj obrabotki rasplava na strukturu i svojstva splava tipa AK7ch* [The effect of hydrogen treatment on the structure and properties of the alloy type AK7ch]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2008, no. 4, pp. 50–61. (in Russian).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Илюкович В. М., Огурцов А. П., Нехаев Н. Е., Ершов С. В. Теоретические основы обработки металлов давлением : монография (в 2 т.). Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2001. Т. 1. 518 с.
2. Грудев А. П. Трение и смазка при обработке металлов давлением. Москва : Metallurgiya, 1982. 312 с.
3. Куцова В. З., Аюпова Т. А. Влияние микролегирования Sr и Sc на структуру сплава АК7ч. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Вып. 36, ч. 1. Днепропетровск : ПГАСА, 2006. С. 201–209.
4. Куцова В. З., Аюпова Т. А., Амбражей М. Ю. Влияние микролегирования Sr и Sc на фазовый состав и свойства АК7ч. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Вып. 41, ч. 1. Днепропетровск : ПГАСА, 2007. С. 18–30.
5. Куцова В. З., Аюпова Т. А. Влияние водородной обработки расплава на структуру и свойства сплава типа АК7ч. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2008. № 4. С. 50–61.

Надійшла до редакції : 12.02.2020 р.

УДК 621.774.3+621.182]:669.018.25](477.62)

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.62.634

## ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ КОТЕЛЬНЫХ КОВАНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 15X1M1Ф ПРОИЗВОДСТВА ЧАО НКМЗ

ОПРЫШКО Л. В.<sup>1\*</sup>,  
ГОЛОВНЯК Т. В.<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Отделение материаловедения, экспертизы и технологий производства труб и изделий из черных и цветных металлов и сплавов, Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности имени Я. Е. Осады» (ГП НИТИ), ул. Писаржевского, 1-а, 49000, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 340-38-52, e-mail: [liudmila.opryshko@gmail.com](mailto:liudmila.opryshko@gmail.com)

<sup>2</sup> Сектор экспертных исследований металлопродукции из черных и цветных металлов и сплавов, Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности имени Я. Е. Осады» (ГП НИТИ), ул. Писаржевского, 1-а, 49000, Днепро, Украина

**Аннотация. Цель работы:** на основе комплексных исследований химического состава, структуры и свойств, в том числе жаропрочности, оценить эксплуатационную надежность металла котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф производства ЧАО НКМЗ (г. Краматорск). **Методики.** Используются современные стандарты, методы и методики металлографических исследований, химического анализа, испытаний кратковременных механических и жаропрочных свойств. **Результаты.** Показано, что отличительной особенностью химического состава металла кованых труб из стали 15X1M1Ф производства ЧАО НКМЗ является неблагоприятное (с точки зрения обеспечения высокой жаропрочности и работоспособности) отношение массовой доли ванадия к массовой доле углерода ( $V/C < 1,6$ ). Структура металла характеризуется неоднородностью в соотношении и распределении структурных составляющих по толщине стенки и длине труб всех исследованных размеров. В металле труб, наряду с удовлетворительной микроструктурой, выявлены браковочные структуры, не обеспечивающие требуемый нормативной документацией уровень длительной прочности. Показана необходимость корректировки на ЧАО НКМЗ химического состава и режимов термической обработки котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф для гарантированного получения удовлетворительной структуры и требуемого уровня служебных свойств в металле труб широкого сортамента. Установлена необходимость разработки современных технических условий на котельные кованые трубы из стали 15X1M1Ф большого сортамента с включением требований по микроструктуре и режимам термической обработки взамен устаревших и не действующих в настоящее время в Украине ТУЗ-923. **Научная новизна.** Впервые выявлены особенности химического состава и структуры металла кованых труб производства ЧАО НКМЗ из стали 15X1M1Ф различного сортамента и их влияние на длительную прочность. **Практическое значение.** Полученные результаты исследований послужат основой для совершенствования технологии производства котельных труб на ЧАО НКМЗ и позволят обеспечить потребность энергетики Украины в трубах высокой эксплуатационной надежности из стали 15X1M1Ф диаметром 620 мм и более.

**Ключевые слова:** котельные кованые трубы; химический состав; микроструктура; кратковременные механические свойства; жаропрочность; предел длительной прочности

## ЕКСПЛУАТАЦІЙНА НАДІЙНІСТЬ КОТЕЛЬНИХ КОВАНИХ ТРУБ ЗІ СТАЛІ 15X1M1Ф ВИРОБНИЦТВА ПрАТ НКМЗ

ОПРИШКО Л. В.<sup>1\*</sup>,  
ГОЛОВНЯК Т. В.<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Відділення матеріалознавства, експертизи та технологій виробництва труб і виробів із чорних і кольорових металів і сплавів, Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади» (ДП НДТІ), вул. Писаржевського, 1-а, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 340-38-52, e-mail: [liudmila.opryshko@gmail.com](mailto:liudmila.opryshko@gmail.com)

<sup>2</sup> Сектор експертних досліджень металопродукції із чорних і кольорових металів і сплавів, Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади» (ДП НДТІ), вул. Писаржевського, 1-а, 49000, Дніпро, Україна

**Анотація. Мета роботи:** на підставі комплексних досліджень структури і властивостей, в тому числі жароміцності, оцінити експлуатаційну надійність металу котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф виробництва ПрАТ НКМЗ (м. Краматорськ). **Результати.** Показано, що відмінна риса хімічного складу металу кованих труб зі сталі 15X1M1Ф виробництва ПрАТ НКМЗ – це несприятливе (з точки зору забезпечення високої жароміцності і працездатності) відношення масової частки ванадію до масової частки вуглецю ( $V/C < 1,6$ ). Структура металу характеризується неоднорідністю у співвідношенні та розподілі структурних складових по товщині і довжині труб усіх досліджених розмірів. У металі труб, поряд із задовільною мікроструктурою, виявлені бракувальні структури, які не забезпечують потрібний нормативною документацією рівень тривалої міцності. Показана необхідність коригування на ПрАТ НКМЗ хімічного складу та режимів термічної обробки котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф для гарантованого отримання задовільної структури і потрібного рівня службових властивостей в металі труб широкого сортаменту. Встановлено необхідність розроблення сучасних технічних умов на котельні ковані труби великого діаметра зі сталі 15X1M1Ф із включенням вимог до мікроструктури та режимів термічної обробки натомість застарілих і не чинних на даний час в Україні ТУЗ-923. **Наукова новизна.** Вперше виявлено особливості хімічного складу та структури металу кованих труб зі сталі 15X1M1Ф виробництва ПрАТ НКМЗ різного сортаменту та їх вплив на тривалу міцність. **Практичне значення.** Отримані результати досліджень послужать основою для вдосконалення технології виробництва котельних труб на ПрАТ НКМЗ та дозволять забезпечити потребу енергетиків України в трубах високої експлуатаційної надійності зі сталі 15X1M1Ф діаметром 620 мм і більше.

**Ключові слова:** котельні ковані труби; хімічний склад; мікроструктура; короточасні механічні властивості; жароміцність; межа тривалої міцності

## OPERATIONAL RELIABILITY OF FORGED BOILER TUBES OF 15Cr1Mo1V STEEL PRODUCED BY NKMZ PJSC

OPRYSHKO L.V.<sup>1\*</sup>  
GOLOVNIAK T.V.<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science, Expertise and Technologies for the Production of Tubes and Products of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys, State Enterprise “Ya.Ye. Osada Scientific Research Tube Institute” (SE NITI), 1-a, Pysarzhevskoho St., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 340-38-52, e-mail: [liudmila.opryshko@gmail.com](mailto:liudmila.opryshko@gmail.com)

<sup>2</sup> Sector of Expert Studies of Metal Products of Ferrous and Non-ferrous Metals and Alloys, Expertise and Technologies for the Production of Tubes and Products of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys, State Enterprise “Ya.Ye. Osada Scientific Research Tube Institute” (SE NITI), 1-a, Pysarzhevskoho St., 49000, Dnipro, Ukraine

**Abstract. Purpose:** To assess operational reliability of metal of forged boiler tubes of 15Cr1MoV steel manufactured by NKMZ PJSC (Kramatorsk) based on comprehensive studies of chemical composition, structure and properties, including high-temperature strength. **Procedures.** Modern methods and procedures of metallographic studies, chemical analysis, tests of short-term mechanical and high-temperature strength properties were used. **Results.** It has been shown that a distinctive feature of metal of forged tubes of 15Cr1MoV steel manufactured by NKMZ PJSC consists in unfavorable (from the point of view of ensuring high-temperature strength and working capacity) ratio of mass fraction of vanadium to mass fraction of carbon ( $V/C < 1.6$ ). Metal structure is characterized by inhomogeneity in a relation to distribution of structural components across the wall thickness and along the length of tubes of all sizes under study. In metal of the tubes studied, along with a satisfactory microstructure, objectionable structures were found, which do not provide the level of long-term strength required by the normative documents. Necessity of adjusting chemical composition and conditions of heat treatment of forged boiler tubes made of 15Cr1MoV steel at NKMZ PJSC to ensure a satisfactory structure and required level of service properties in metal of a wide range of tubes was shown. A need to develop a new specification for forged boiler tubes of 15Cr1MoV steel in a wide product range, including requirements for microstructure and conditions of thermal treatment instead of outdated Technical Specification 923 not applied currently in Ukraine, has been established. **Scientific novelty.** Chemical composition and structure of forged 15Cr1MoV steel tubes produced by NKMZ PJSC in a wide product range and their effect on long-term strength were established for the first time. **Practical value.** The obtained study results will serve as a basis for improving technology of production of boiler tubes at NKMZ PJSC and will make it possible to meet the demand of Ukrainian power engineering industry in 620 mm and more diameter 15Cr1MoV  $\Phi$  steel tubes having high operational reliability.

**Keywords:** forged boiler tubes; chemical composition; microstructure; short-term mechanical properties; high-temperature strength; long-term strength

**Введение.** В котлоагрегатах ТЭС, ТЭЦ и АЭС используют, в основном, котельные горячедеформированные трубы диаметром до 540 мм из углеродистых и легированных марок стали по ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов» [1]. Их изготавливают на трубных заводах Украины и России способами горячей прокатки (на трубопрокатных станах с автоматическим, непрерывным, трехвалковым раскатным и пилигримовым станами) или горячего прессования (на прессовых установках). В энергетическом оборудовании используют также трубы диаметром от 620 до 920 мм из стали 15X1M1Ф, потребность в которых на протяжении нескольких лет была невелика.

Однако в последнее время предприятия энергетики Украины остро нуждаются в таких трубах ввиду необходимости замены исчерпавших свой расчетный и парковый ресурс труб в действующем энергооборудовании. Из-за отсутствия технической возможности котельные трубы диаметрами 620 мм и более не изготавливают на специализированных по производству котельных горячедеформированных труб заводах Украины и России.

Традиционно трубы диаметром 620...920 мм изготавливали методами свободнойковки или прошивки – вытяжки по ТУЗ-923 «Трубы котельные бесшовные механически обработанные из конструкционной марки стали» [2]. Эти технические условия были специально разработаны еще в 1975 г. для предприятия «Баррикады» (г. Волгоград), имевшего оборудование для изготовления таких труб.

В энергомашиностроении предпринимались также попытки использовать литые механически обработанные трубы из стали 15X1M1Ф диаметром 620 мм и более, изготовленные способами центробежного литья или электрошлакового переплава. Однако из-за особенностей структуры и свойств эти трубы не нашли широкого применения в энергетике [3; 4].

Котельные трубы из стали 15X1M1Ф эксплуатируют в котлоагрегатах ТЭС (ТЭЦ) в достаточно жестких условиях (температура пара до 600 °С, давление – 30 МПа и более). Одним из важнейших требований, предъявляемых к материалу таких труб, является жаропрочность [5–7]. Критерий жаропрочности – предел длительной прочности – является основной характеристикой при расчетах на прочность котельного оборудования и нормирован для труб из стали 15X1M1Ф в ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 (при температурах 550 °С, 600 °С за 100 тыс. и 200 тыс. часов) и в ТУЗ-923 (при температуре 560 °С за 10 тыс. и 100 тыс. часов).

Эта служебная характеристика является структурно чувствительной и в значительной степени зависит не только от химического состава, но и от структурного состояния металла труб (строение, распределение и соотношение фаз, состояние границ и др.) [5–8]. Поэтому в действующей нормативной документации на эксплуатируемые в условиях критических и сверхкритических параметров пара котельные трубы из стали 15X1M1Ф – ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 установлены требования по микроструктуре металла таких труб и указан режим их термической обработки. К этим техническим условиям приложены шкалы сдаточных и браковочных структур, разработанные на основе многочисленных исследований качественных показателей металла котельных труб из стали 15X1M1Ф, в том числе характеристик жаропрочности.

ТУЗ-923 устарели и не обеспечивают в полной мере получение труб с требуемым уровнем жаропрочности: требования к микроструктуре металла труб из стали 15X1M1Ф, а также режимы термической обработки в них отсутствуют. Эти технические условия не были переработаны из-за незначительной потребности в котельных трубах диаметром 620 мм и более.

Для получения котельных кованных труб высокой эксплуатационной надежности основные операции технологического цикла



их производства должны сформировать структуру, обеспечивающую не только высокий уровень, но и стабильность служебных свойств в течение расчетного срока их эксплуатации.

Потенциальным изготовителем котельных механически обработанных кованных труб в Украине является ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (ЧАО НКМЗ), который оснащен всем необходимым оборудованием для полного цикла изготовления таких труб (выплавка стали, ковка, термическая обработка и др.) и контроля их качества, а также имеет небольшой опыт в производстве труб по ТУЗ-923.

**Цель работы** – на основе комплексных исследований структуры и свойств, в том числе характеристик жаропрочности, оценить способность действующей на ЧАО НКМЗ технологии гарантированно обеспечивать получение котельных кованных труб из стали 15X1M1Ф высокой эксплуатационной надежности.

**Материалом исследований** послужили изготовленные ЧАО «НКМЗ» методом свободнойковки механически обработанные трубы из стали 15X1M1Ф размерами 620 × 30 мм, 620×40 мм, 920 × 32 мм и 920 × 42 мм, а также трубы размерами 426 × 90 мм и 375 × 75 мм, традиционно изготавливаемые пилигримовой прокаткой. Указанные трубы термически обработаны (нормализация с отпуском) по специально разработанным заводом режимам, отличающимся от указанных для котельных труб из стали 15X1M1Ф в ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207.

В работе проводили испытания труб указанного выше сортамента на растяжение при комнатной и повышенной (400 °С) температурах по (ГОСТ 10006 и ГОСТ 19040 соответственно, а также – на ударный изгиб (на образцах с U-образным надрезом) при 20 °С по ДСТУ EN 10045-1 (ГОСТ 9454). Исследовали микроструктуру металла труб по периметру и толщине стенки труб при 100-, 500- и 1 000-кратных увеличениях. Из-за отсутствия требований по микроструктуре в ТУЗ-923 оценку структуры металла исследованных труб проводили по шкалам сдаточных и браковочных микроструктур Приложения В к ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207.

Испытания на длительную прочность проводили по ГОСТ 10145, в соответствии с требованиями Инструкции ГП НИТИ ТИ № 242-3-18 «Испытания трубной заготовки и труб на длительную прочность для периодического контроля технологических процессов их изготовления. Жаропрочным испытаниям подвергали трубы размером 920×32 мм при указанной в ТУЗ-923 температуре – 560 °С. Путем линейной экстраполяции логарифмической зависимости времени до разрушения от напряжения определяли предел длительной прочности за 100 тыс. часов.

**Результаты исследований.** По массовой доле химических элементов металл исследованных труб соответствует стали марки 15X1M1Ф по ТУЗ-923, за исключением труб размером 920×42 мм, в металле которых содержание углерода (С) превышает нормативные значения, даже с учетом допустимых предельных отклонений: (0,16 + 0,1) % (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав металла котельных кованных труб из стали 15X1M1Ф /  
Chemical composition of metal of forged 15Cr1Mo1V steel boiler tubes**

Размер труб, D×S, мм	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
426×90	0,16	0,31	0,43	1,28	0,95	0,22	0,30	0,18	0,002	0,011
920×32	0,16	0,24	0,47	1,23	0,90	0,22	0,30	0,14	0,004	0,012
920×42	0,18	0,22	0,60	1,35	0,94	0,21	0,36	0,17	0,008	0,017
630×30	0,16	0,29	0,68	1,20	1,01	0,23	0,27	0,17	0,005	0,011
630×40	0,16	0,31	0,55	1,27	0,95	0,28	0,27	0,16	0,003	0,011
325×75	0,12	0,25	0,68	1,25	0,90	0,21	0,16	0,16	0,005	0,012

Окончание таблицы 1										
норма ТУ3-923	0,10... 0,16	0,17... 0,37	0,40... 0,70	1,10... 1,40	0,90... 1,10	0,20... 0,35	не более			
							0,40	0,25	0,025	0,025

В металле труб размерами 620 × 30 мм, 620 × 40 мм, 920 × 32 мм, и 426 × 90 мм содержание углерода находится на верхнем пределе нормы. Отличительная особенность металла труб всех исследованных размеров – содержание карбидообразующих элементов ванадия (V) и молибдена (Mo) на нижнем пределе нормативных значений. Для труб всех исследованных размеров характерно неблагоприятное ( $V/C < 1,6$ ) соотношение концентраций углерода и ванадия для получения в процессе термической обработки мелкодисперсных стабильных карбидов ванадия, что может

негативно сказываться на жаропрочности и долговечности металла труб [8; 9].

Выявленные особенности химического состава металла труб, наряду с действующим на ЧАО НКМЗ режимом термической обработки, оказали влияние на формирование структуры и свойств металла исследованных труб.

Кратковременные механические свойства при комнатной температуре удовлетворяют нормам ТУ3-923 только металла труб размерами 620 × 30 мм, 920 × 32 мм и 375 × 75 мм (табл. 2).

Таблица 2

**Механические свойства при комнатной и повышенной температурах металла котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф / Mechanical properties at room and elevated temperatures of metal of forged 15Cr1Mo1V steel boiler tubes**

Размер труб, D×S, мм	Предел прочности, $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_T$ ( $\sigma_{0,2}$ ), Н/мм <sup>2</sup>	Относит. удлинение, $\delta_5$ , %	Относит. сужение, $\Psi$ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Предел текучести при $t = 400^\circ\text{C}$ $\sigma_T$ ( $\sigma_{0,2}$ ), Н/мм <sup>2</sup>	
426×90	506...523	278...320	24,5...28,0	71,0...73,5	175, 223, 196	(246), (293)	
920×32	526...586	345...439	26,5...24,0	74,0...75,0	128, 223, 157	(295), 305	
920×42	63...718	(407)...519	23,5...20,0	65,5...64,0	121, 95, 105	345, 358	
630×30	623...634	486...489	22,0...21,0	74,0...75,0	215, 221, 198	410, 424	
630×40	653...670	524...515	20,0...19,0	71,0...70,5	173, 182, 181	416, 419	
325×75	566...568	438...442	20,5...20,5	75,0...75,0	>182, 207, 198	294, 305	
норма ТУ3-923	491...657	не менее				39,2	235
		314	18,0	50,0			

Отмечены неудовлетворительные значения предела прочности металла труб размерами 620 × 40 мм, 920 × 42 мм и предела текучести металла труб размером 426 × 90 мм. Значения нормированного указанными техническими условиями предела текучести при температуре 400 °С металла труб всех исследованных размеров соответствуют норме, при этом металл труб размерами 920 × 42 мм, 620 × 30 мм и 620 × 40 мм, с высоким уровнем прочностных свойств при комнатной температуре, отличается высокими значениями предела текучести и при повышенной температуре (в 1,5...1,8 раза выше нормы).

Микроструктура металла по толщине стенки и длине исследованных труб, как правило, неоднородная и отличается составом, дисперсностью и соотношением структурных фаз (рис. 1, 2). При выполнении оценки микроструктуры по шкалам Приложения В к ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 выявлены структуры как удовлетворяющие (1...5 баллов), так и не соответствующие (7, 8 и 10 баллов) требованиям ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 на котельные трубы из стали 15X1M1Ф.

Сдаточные микроструктуры металла труб соответствуют 1 баллу (100 % отпущенного бейнита, преимущественно игольчатого

строения, – трубы размерами 325 × 75, 630 × 30, 630 × 40, 920 × 32 и 920 × 42 мм), а также 2...5 баллам (от 80 до 20 % отпущенного бейнита и феррита – трубы размерами 630 × 40, 426 × 90, 920 × 32 и 920 × 42 мм. Браковочные структуры металла исследованных труб состоят из 100 % отпущенных мартенсита и бейнита или характеризуются наличием локальных зерен с ориентацией по мартенситу (10 баллов – трубы размерами 630 × 30, 630 × 40, 426 × 90, 920 × 32 и 920 × 42 мм).

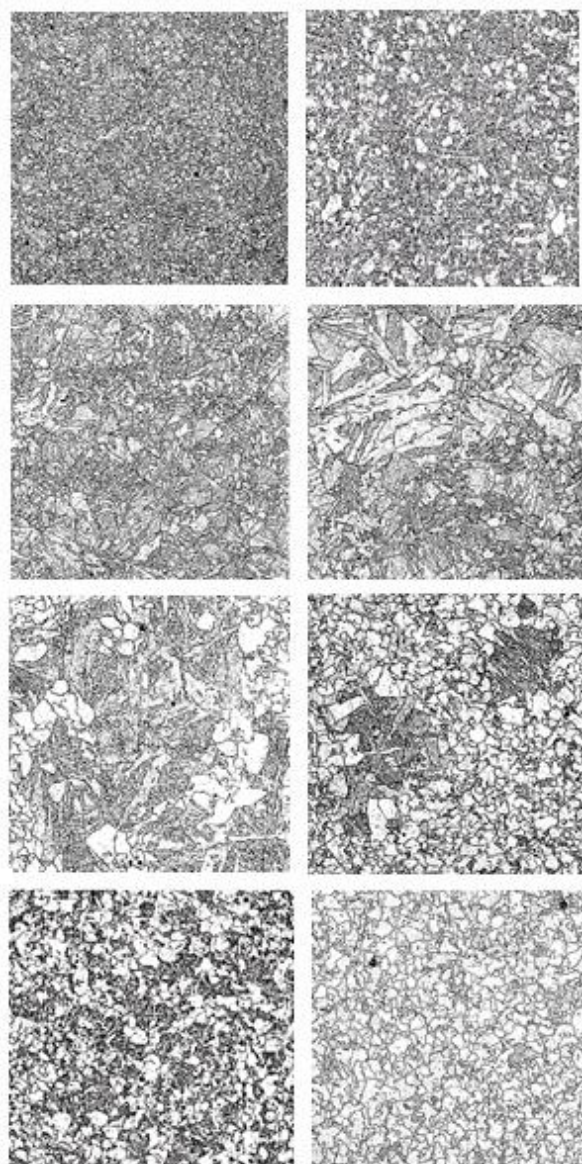


Рис. 1. Характерные микроструктуры металла кованых труб из стали 15Х1М1Ф с различным соотношением и строением структурных составляющих, ×100 (уменьшено в 2 раза) / Fig. 1. Typical microstructures of metal of forged 15Cr1Mo1V steel tubes with various ratios and structures of components, ×100 (reduced by 2 times)

Выявлена также браковочная структура с элементами перекристаллизации по границам и внутри зерен – перегрев при отпуске (7, 8 баллов – трубы размерами 920 × 32, 920 × 42 мм).

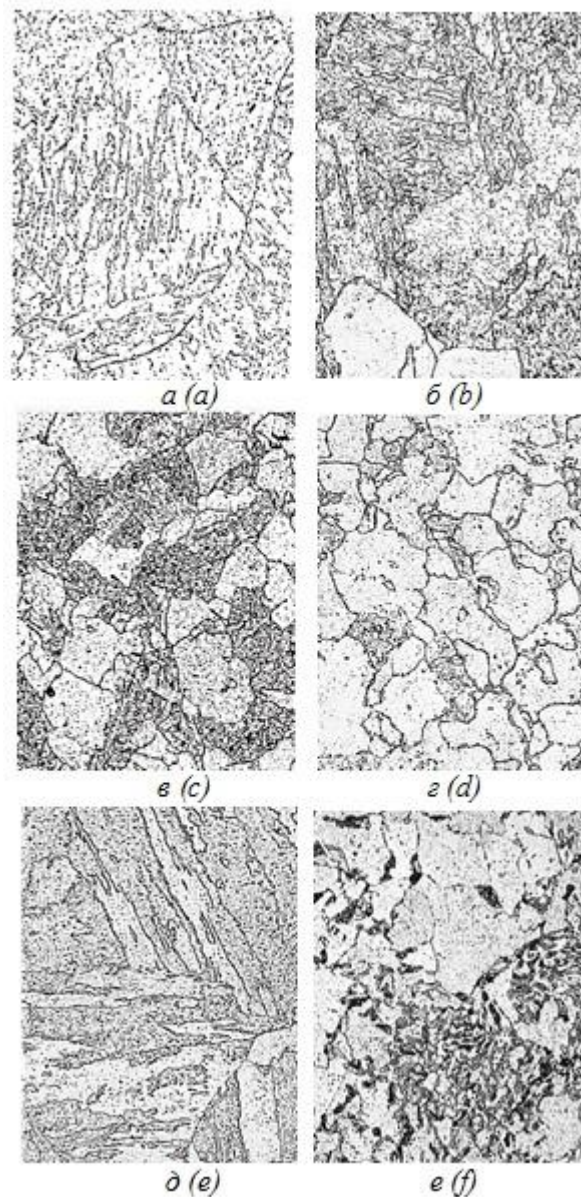


Рис. 2. Удовлетворительные (а, б, в) и браковочные (г, д, е) микроструктуры металла кованых труб из стали 15Cr1Mo1V, ×500 (уменьшено в 2 раза) / Fig. 2. Satisfactory (a, b, c) and objectionable (d, e, f) microstructures of metal of forged 15Х1М1Ф steel tubes, ×500 (reduced by 2 times)

Основной упрочняющей фазой в микроструктуре металла исследованных труб являются в основном карбиды цементитного типа. Мелкодисперсные выделения стабильного карбида ванадия по границам и внутри зерен практически не

просматриваются (за исключением микроструктуры металла отдельных труб размером 630 × 40 мм), что объясняется особенностями химического состава и фактическим режимом термической обработки на ЧАО НКМЗ исследованных труб из стали 15X1M1Ф.

При испытании на длительную прочность образцов трубы размером 920 × 32 мм получены неоднозначные результаты. При одних и тех же уровнях испытательной нагрузки значительно отличаются время до разрушения и значения относительного удлинения разрушенных образцов, что объясняется описанными выше особенностями микроструктуры металла трубы размером 920 × 32 мм.

После проведения металлографического анализа результаты испытаний образцов с неудовлетворительной, согласно требованиям ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207, микроструктурой были исключены из массива данных для определения предела длительной прочности. Значение предела длительной прочности за 100 тыс. часов при

температуре 560 °С металла трубы размером 920 × 32 мм составляет 93 Н/мм<sup>2</sup>, что удовлетворяет требованиям ТУЗ-923-75 (обработке подвергали результаты испытаний образцов со сдаточной, согласно требованиям ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207, микроструктурой).

### Выводы

1. Установлено, что действующая в настоящее время на ЧАО НКМЗ технология не обеспечивает в полной мере получение котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф высокой эксплуатационной надежности с требуемым уровнем служебных свойств.

2. Обоснована необходимость разработки взамен ТУЗ-923 (не действующих в настоящее время в Украине) современных национальных технических условий на котельные кованые трубы большого диаметра из стали 15X1M1Ф с включением требований по микроструктуре, оказывающей существенное влияние на жаропрочность.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. [Действуют с 01.10.2009]. Днепро : ГП НИТИ, 2009. 50 с. (Технические условия).
2. ТУЗ-923. Трубы котельные бесшовные механически обработанные из конструкционной марки стали. [Действуют с 01.01.1976]. Волгоград : завод «Баррикады», 1975. 10 с. (Технические условия).
3. Злепко В. Ф., Перевезенцева Т. В., Новиков С. В. О некоторых особенностях структурного состояния металла центробежнолитых паропроводных труб из стали 15X1M1Ф. *Электрические станции*. 1991. № 3. С. 12–17.
4. Опрышко Л. В., Головняк Т. В., Маленик А. О., Козьминский А. Н. Особенности структуры и свойств металла труб из стали 15X1M1Ф-Ш, изготовленных методом электрошлаковой выплавки. *Горнорудная и металлургическая промышленность*. 2014. № 2. С. 43–47.
5. Антикайн П. А. Металлы и расчеты на прочность котлов и трубопроводов : монография. Москва: Энергоиздат, 1990. 386 с.
6. Крутасова Е. И. Надежность металла энергетического оборудования : монография. Москва: Энергоиздат, 1981. 240 с.
7. Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин И. И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования : монография. Москва : Энергоатомиздат, 1994. 272 с.
8. Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести : монография. Москва : Металлургия, 1988. 224 с.
9. Ланская К. А. Жаропрочные стали : монография. Москва : Металлургия, 1969. 247 с.

### REFERENCES

1. TU 14-3-460/TU U 27.2-05757883-207. *Truby stalevi bezshovni dlia parovyh kotliv i tryboprovodiv* [Seamless steel pipes for steam boilers and pipelines]. Dnipro : SE "SRTI", 2009, 50 p. (in Ukraine). (Technical Conditions).
2. TUZ-923. *Truby stalnye bezshovnye mehanicheski obrabotannye iz konstruykcionnoi marki stali* [Seamless mechanical machined boiler tubes from a structural grade of steel]. Volhohrad : Plant "Barrikady" Publ., 1975, 10 p. (in Russian). (Technical Conditions).

3. Zlepko V.F., Perevezentseva T.V. and Novikov S.V. *O nekotoryh osobennostiah strukturnogo sostoianiia metalla tsentrobezhnolityh paroprovodnyh trub iz stali 15H1MF* [About some features of the structural state of metal of centrifugally cast steam pipes made of steel 15Cr1Mo1V]. *Elektricheskie stantsii* [Power stations]. Moscow, 1991, no. 3, pp. 12–17. (in Russian).

4. Opryshko L.V., Goloviak T.V., Malenik A.O. and Kozminskii A.N. *Osobennosti struktury i svoist metalla trub iz stali 15H1MF-Sh, izgotovlennyh metodom elektroshlakovoi vyplavki* [Features of the structure and properties of metal pipes made of steel 15Cr1Mo1V-SI, produced by electroslag smelting]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost* [Metallurgical and Mining Industry]. Dnipro, 2014, no. 2, pp. 43–47. (in Ukraine).

5. Antikain P.A. *Metally i raschety na prochnost kotlov i truboprovodov* [Metals and calculation for the strength of boilers and piping : monograph]. Moscow : Energoizdat Publ., 1990, 386 p. (in Russian).

6. Krutasova E.I. *Nadozhnost metalla energeticheskogo oborudovania* [Reliability of metal power equipment]. Moscow : Energoizdat, 1981, 240 p. (in Russian).

7. Bugai N.V., Berezina T.G. and Trunin I.I. *Rabotosposobnost i dolgovechnost energeticheskogo oborudovania* [Performance and durability of metal power equipment: monograph]. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1994, 272 p. (in Russian).

8. Kumanin V.I., Kovaliova V.I. and Alekseev S.V. *Dolgovechnost metalla v usloviyah polzuchesti* [Creep durability] : monograph. Moscow : Metallurgy Publ., 1998, 224 p. (in Russian).

9. Lanskaia K.A. *Zharoprochnost stali* [Heat resistance steel: monograph]. Moscow : Metallurgy Publ., 1969, 247 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.02.2020 г.

УДК 691.714

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.70.635

## ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДИСКІВ ПИЛОК ГАРЯЧОГО РІЗАННЯ МЕТАЛУ ШЛЯХОМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

УЗЛОВ О. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,ДРОЖЕВСЬКА Г. В.<sup>2</sup>, асист.,ПУЧИКОВ О. В.<sup>3</sup>, с. н. с.,ШПАК О. А.<sup>4</sup>, н. с.,СЛУПСЬКА Ю. С.<sup>5</sup>, аспір.

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [oleg.uzlov@gmail.com](mailto:oleg.uzlov@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [ann.drozhevskaya@gmail.com](mailto:ann.drozhevskaya@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

<sup>3</sup> Відділ конструкційних сталей, Інститут чорної металургії НАН України, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: [alex.puchikov@gmail.com](mailto:alex.puchikov@gmail.com).

<sup>4</sup> Відділ конструкційних сталей, Інститут чорної металургії НАН України, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: [elenashpak58@gmail.com](mailto:elenashpak58@gmail.com).

<sup>5</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [slupska.yuliia@pgasa.dp.ua](mailto:slupska.yuliia@pgasa.dp.ua)

**Анотація.** *Мета дослідження* – визначити можливість підвищення експлуатаційної стійкості дисків пилок гарячого різання металу шляхом термічної обробки зубів пилок; розробити та впровадити у виробництво режим термічного зміцнення, який забезпечить підвищення експлуатаційної стійкості дисків пил гарячого різання металу. *Методика.* Структурний стан пилок гарячого різання досліджували за допомогою світлових мікроскопів Neophot-32 і Axiovert 200M MAT із програмним забезпеченням AxioVision 4.6.3. Оцінювання твердості зубів дисків пил гарячого різання металу виконували методом Віккерса, мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3. *Результати.* У промислових умовах випробувано 6 режимів термічної обробки зубів пилок гарячого різання металу. Розроблено технологію термічної обробки зубів таких пилок, яка дозволяє підвищити експлуатаційну стійкість дисків. *Наукова новизна.* Встановлено, що обдування зуба на всіх випробуваних режимах зменшує загальну глибину зони термічного впливу, перш за все за рахунок зниження глибини перехідної зони. Показано, що зменшення сили струму на всіх випробуваних режимах знижує глибину зони термічного впливу. Експериментально доведено, що збільшення площі контакту нагрівача і зуба істотно (в 1,5...2 рази) збільшує глибину зони термічного впливу. В основному це відбувається за рахунок збільшення глибини перехідної зони. При цьому дещо знижується твердість загартованої зони. Доведено, що більшість закономірностей, визначених раніше для структури дисків пилок холодного різання, вірні і для структури дисків пилок гарячого різання, незважаючи на істотно різні умови експлуатації. *Практична значимість.* Вдалося збільшити глибину загартованого шару зубів ППР до 80 % від висоти різального елемента. Однак, виходячи з умов технологічності переточки дисків під час експлуатації, глибину загартованої зони обмежили 40...50 % висоти зуба. Якість гарячого різання поліпшилась, кількість дефектів типу «задирика» та «наплив» суттєво зменшилася. Стійкість дисків ППР підвищилась як мінімум на 5 %.

**Ключові слова:** диски пилок гарячого різання металу; ППР; термічна обробка; експлуатаційна стійкість; задирика; наплив; твердість; загартування

## ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИСКОВ ПИЛ ГОРЯЧЕЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА ПУТЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УЗЛОВ О. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,ДРОЖЕВСКАЯ А. В.<sup>2</sup>, асист.,ПУЧИКОВ А. В.<sup>3</sup>, с. н. с.,ШПАК О. А.<sup>4</sup>, н. с.,СЛУПСЬКА Ю. С.<sup>5</sup>, аспір.

<sup>1</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [oleg.uzlov@gmail.com](mailto:oleg.uzlov@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

<sup>2\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [ann.drozhevskaya@gmail.com](mailto:ann.drozhevskaya@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

<sup>3</sup> Отдел конструкционных сталей, Институт черной металлургии НАН Украины, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Днепро, Украина, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: [alex.puchikov@gmail.com](mailto:alex.puchikov@gmail.com),

<sup>4</sup> Отдел конструкционных сталей, Институт черной металлургии НАН Украины, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Днепро, Украина, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: [elenashpak58@gmail.com](mailto:elenashpak58@gmail.com),

<sup>5</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [slupska.yuliia@pgasa.dp.ua](mailto:slupska.yuliia@pgasa.dp.ua)

**Аннотация. Цель исследования** – определить возможность повышения эксплуатационной стойкости дисков пил горячей резки металла путем термической обработки зубьев пил; разработать и внедрить в производство режим термической обработки, обеспечивающий повышение эксплуатационной стойкости дисков пил горячей резки металла. **Методика.** Структурное состояние дисков пил горячей резки исследовали с помощью световых микроскопов Neophot-32 и Axiovert 200M MAT с программным обеспечением AxioVision 4.6.3. Оценка твердости зубьев дисков пил горячей резки металла выполняли по методу Виккерса, микротвердость определяли на приборе ПМТ-3. **Результаты.** В промышленных условиях опробованы 6 режимов термической обработки зубьев пил горячей резки металла. Разработана технология термической обработки зубьев таких пил, позволяющая повысить эксплуатационную стойкость дисков. **Научная новизна.** Установлено, что применение обдува зуба на всех испытанных режимах приводит к уменьшению общей глубины зоны термического влияния, прежде всего за счет снижения глубины переходной зоны. Показано, что уменьшение силы тока на всех испытанных режимах снижает глубину зоны термического влияния. Экспериментально доказано, что увеличение площади контакта нагревателя и зуба существенно (в 1,5...2 раза) увеличивает глубину зоны термического влияния. В основном это происходит за счет увеличения глубины переходной зоны. При этом несколько снижается твердость закаленной зоны. Доказано, что большинство закономерностей, определенных ранее для структуры дисков пил холодной резки, являются верными и для структуры дисков пил горячей резки, несмотря на существенно различные условия эксплуатации. **Практическая значимость.** Удалось увеличить глубину закаленного слоя зубов ППР до 80 % от высоты режущего элемента. Однако, исходя из условий технологичности переточки дисков во время эксплуатации, глубину закаленной зоны ограничили 40...50 % высоты зуба. Качество горячего реза улучшилось, количество дефектов типа «заусенец» и «наплыв» существенно уменьшилось. Стойкость дисков ППР повысилась как минимум на 5 %.

**Ключевые слова:** диски пил горячей резки металла; ППР; термообработка; эксплуатационная стойкость; задир; наплыв; твердость; закалка

## SERVICE DURABILITY IMPROVEMENT OF HOT SAWS BY HEAT TREATMENT

UZLOV O.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

DROZHEVSKA H.V.<sup>3</sup>, *Assist.*,

PUCHYKOV O.V.<sup>3</sup>, *Senior Res.*,

SHPAK O.A.<sup>4</sup>, *Res.*,

SLUPSKA Yu.S.<sup>5</sup>, *Postgrad. Student*

<sup>1\*</sup> Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [oleg.uzlov@gmail.com](mailto:oleg.uzlov@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

<sup>2</sup> Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [ann.drozhevskaya@gmail.com](mailto:ann.drozhevskaya@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

<sup>3</sup> Department of Constructional Steels, Institute of Ferrous Metallurgy of Academy of Sciences of Ukraine, 1-a, Starodubov sq., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 41-22-991, e-mail: [alex.puchikov@gmail.com](mailto:alex.puchikov@gmail.com)

<sup>4</sup> Department of Constructional Steels, Institute of Ferrous Metallurgy of Academy of Sciences of Ukraine, 1-a, Starodubov sq., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 41-22-991, e-mail: [elenashpak58@gmail.com](mailto:elenashpak58@gmail.com)

<sup>5</sup> Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [slupska.yuliia@pgasa.dp.ua](mailto:slupska.yuliia@pgasa.dp.ua)

**Abstract. Purpose of the study.** To determine the improvement potential of service durability of hot saws by heat treatment of saw teeth. To develop the optimal heat treatment modes in order to obtain the higher service durability of hot saws. To implement the optimal heat treatment mode into industrial practice of hot saw treatment. **Methodology.** Investigation of the structure of hot saws has been carried out using light microscopes Neophot 32 and Axiovert 200M MAT with AxioVision 4.6.3 software. The hardness of hot saw teeth has been assessed by Vickers method. Microhardness has been determined by PMT-3 test equipment. **Results.** It has been established that the use of blowing of saw tooth in all tested modes leads to a decrease in the total depth of the heat affected zone, primarily due to a decrease in the depth of the transition zone. It is shown that an amperage decrease in all the tested modes reduces the depth of the heat affected zone. It has been experimentally proved that an increase in the contact area between the heater and the tooth significantly (1.5...2 times) increases the depth of the heat affected zone. This is mainly due to an increase in the depth of the transition zone. In this case, the hardness of the quenched zone is slightly reduced. It is proved that most of the regularities previously defined for the structure of cold saw disks are also true for the structure of hot saw disks, despite significantly different operating conditions. **Practical significance.** It was possible to increase the depth of the hardened layer of hot saw teeth up to 80 % of the height of the cutting element. However, based on the manufacturability of the resizing of the disks during operation, the depth of the hardened zone was limited to 40...50 % of the height of the tooth. The quality of the hot cut has been improved; the number of defects of the "cuts" and "scoring" type has been decreased significantly. The durability of hot saw disks increased by at least 5 %.

**Keywords:** hot saw; heat treatment; service durability; “scoring” defect; “cut” defect; hardness; quenching

### Постановка проблеми

Пили гарячого різання – одні з основних агрегатів у технологічній лінії отримання сортового прокату і від їх ефективної роботи безпосередньо залежить не тільки продуктивність прокатного стану, а і якість готової продукції.

На зуби пили діють різні за напрямком і величиною зовнішні сили. В результаті відбувається знос і деформація зуба. Зношування інструменту спричинює втрату його працездатності, тобто необхідність заміни або правки. Часта зміна різального інструменту тягне за собою втрату продуктивності обробки і знижує надійність роботи обладнання [1].

У процесі експлуатації диска гарячого різання за дії навантажень відбувається відшарування загартованої області зуба і пластична деформація решти різального елемента. Диски виходять із ладу через тріщини в западинах між зубами або в основі зубів. Будь-який вид руйнування вимагає заміни диска. Це викликає зниження продуктивності стану і підвищення витрати дисків. Проблема утворення задирок під час різання матеріалів широко відома і досі залишається

майже невирішеною як в Україні, так і за кордоном.

Тріщини також істотно впливають на стійкість пильних дисків. Тріщини в западинах зубів пили виникають через недоліки технологічного процесу виготовлення пили. Напруження розтягу, що виникають під час роботи пили, стають причиною зростання мікротріщин з утворенням магістральної тріщини. Це являє собою найбільш негативний знос пильного диска. Диск із виявленою тріщиною йде на переплавку [2]. Н. В. Таланов у своїй праці [3] звернув увагу на утворення тріщин як на результат налипання об'єму матеріалу на передню поверхню інструменту.

В умовах переривчастого різання, за високої адгезійної активності пари «опрацьований – інструментальний матеріал» причинами макросколів можуть бути збільшені в результаті налипання металу об'єми контактної (застійної) зони. Напруження розтягу, що виникають під час охолодження на передній поверхні по межі модифікованого контактного шару через різні коефіцієнти термічного розширення оброблюваного та інструментального матеріалів, провокують утворення мікротріщин.



Багато дослідників вивчали причини виникнення тріщин і умови роботи інструменту за впливу ударних навантажень [4]. У працях А. Л. Воронцова і А. Р. Гісметуліна [5; 6] було проведено моделювання процесу врізання інструменту в заготовку за допомогою кінцево-елементної імітаційної моделі. В результаті виявлено вплив переднього кута  $\gamma$  і кута нахилу головної різальної кромки  $\lambda$  на наростання сили різання [7]. Також у праці [8] досліджено напрямки підвищення стійкості матеріалу дисків пил, у тому числі і через відстежування трансформації структури диска під час експлуатації. Г. С. Андреев [9] широко досліджував вплив ударного навантаження на стійкість інструменту. В публікації [10] доведено, що найбільший вплив на стійкість інструменту чинить момент виходу інструменту в результаті відриву застійної зони від поверхні контакту і виникнення напружень розтягу.

Виявлено, що за переривчастого різання значну роль у руйнуванні інструменту відіграє утворення застійної зони на його контактних поверхнях у кінці періоду різання. Результатом циклічної зміни температури і значної різниці між її максимальними (під час роботи) і мінімальними (під час паузи) значеннями стають термічні і фазові напруги в зубах, які, сумуючись з експлуатаційними від діючих навантажень, перевищують межу міцності з утворенням тріщин. Розжарювальна сітка, радіальні тріщини, змінені навантаженнями твердість і структура, отримані за допомогою термообробки, змінюються [11; 12].

Спостерігається інтенсивний знос. Накопичення налиплої стружки в западинах між зубами спричинює утворення тріщин. Налипла стружка виключає зуб із процесу різання і механічне навантаження на наступні зуби зростає. Сильно нагріта в результаті тертя, перекрита стружкою ділянка зумовлює утворення сітки термічних тріщин [13]. Процес стружкоутворення змінюється пластичним

відтисненням зі збільшенням радіуса при вершині. Дослідження процесу на різних подачах з урахуванням радіуса округлення різальної кромки зуба пили дозволяє підтвердити залежність утворення задирок і зношення пил традиційної геометрії. Встановлено, що введення заднього кута зубів дозволяє знизити поверхню контакту з розігрітим металом, зменшити нагрівання вершини зуба пили і підвищити її стійкість за швидкості різання 100...120 м/с [2].

Пильні диски – це основне змінне обладнання, від надійності роботи якого залежить якість одержуваного сортового прокату. Термін служби дисків і якість різання багато в чому визначаються технологією виготовлення і підготовки їх до роботи. Технологія виготовлення дисків пил гарячого різання за останні роки практично не зазнала змін і не відрізняється від тієї, яка застосовувалася 30–40 років тому.

За кордоном проблема стійкості пил вирішується шляхом об'ємної термічної обробки диска, наприклад, продукція фірми Buehler успішно використовується у всьому світі. Але в українських умовах виробництва такі пили неприйнятні з економічної точки зору, через неможливість переточування диска, що, у свою чергу, робить використання об'ємно загартованих дисків пил економічно не обґрунтованим.

Таким чином, із вищенаведеного випливає, що найважливіші показники ефективності процесу різання – це стійкість пильного диска і якість торця металопрокату. Наявність задирок на торцях металопрокату викликає значне збільшення технологічних витрат під час подальшої обробки. З урахуванням проведеного аналізу існуючих результатів досліджень з теми, що розглядається, можна зробити висновок, що на сьогоднішній день в літературі немає прийнятного рішення проблеми ліквідації великих задирок у процесі різання готового гарячого металопрокату і підвищення стійкості зубів дискових пил, з урахуванням економічно доцільного виготовлення дисків пил. Проблема підвищення стійкості пил

холодного різання була розглянута раніше [14].

### Результати досліджень

Порізка прокату в потоці стану 650 здійснюється пилами гарячого різання (ПГР), які виготовляються згідно з кресленням 05574-6 зі сталі 50. Дата розроблення креслення – 1998 рік. Диски пил виготовляються з листового прокату товщиною 11 мм згідно з ГОСТ 19903. Профіль зуба та основні геометричні параметри дисків пил гарячого різання наведені на рисунку 1 та в таблиці 1.

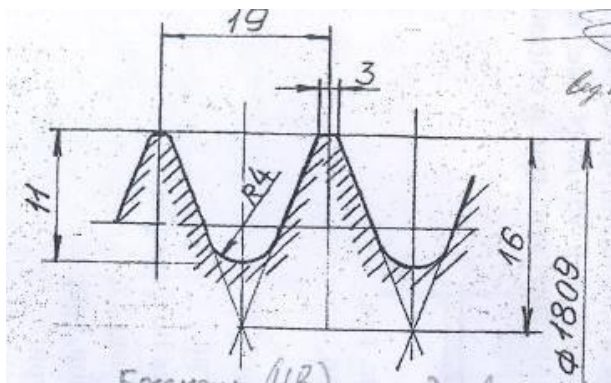


Рис. 1. Профіль зуба ПГР згідно з кресленням 05574-6

Таблиця 1

### Основні параметри дисків ПГР

№ зп	Переточки	Кількість зубів Z	Крок t, мм	Діаметр диска D, мм
1	Новий диск	300	19	1809
2	I переточка	286	19	1724
3	II переточка	272	19	1642

Термічне зміцнення зубів диска здійснюється згідно з ПТИ 232-137-200-2015 на гартувальному станку після заточки зубів. При цьому з двох протилежних сторін диска підводяться графітові електрошестерні. Поворот диска та гартування проводиться автоматично. Сила струму у вторинній обмотці понижувального трансформатора для ПГР №1-6 дорівнює 1 600 А, а для ПГР №7 – 1 500 А. Час контакту зубів з електродами приблизно 5...6 секунд. Твердість загартованої поверхні зубів повинна бути 55–58 HRC. Швидкість охолодження зубів під час гартування в документації не обумовлюється.

Загальний вигляд поверхні зуба пили гарячого різання після гарту за існуючою технологією показано на рисунках 2 та 3.

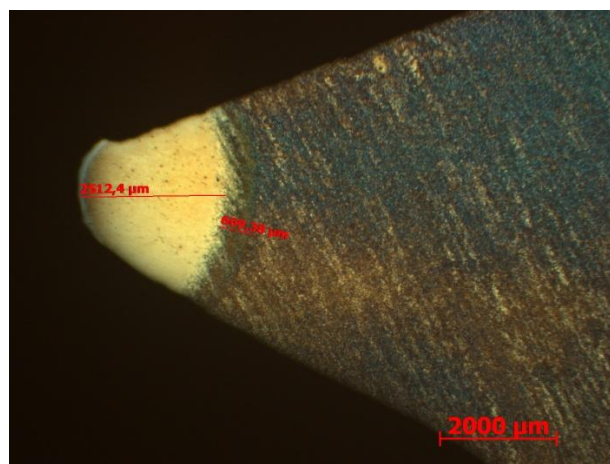


Рис. 2. Загальний вигляд поверхні зуба пили гарячого різання після гарту за існуючою технологією, × 12,5

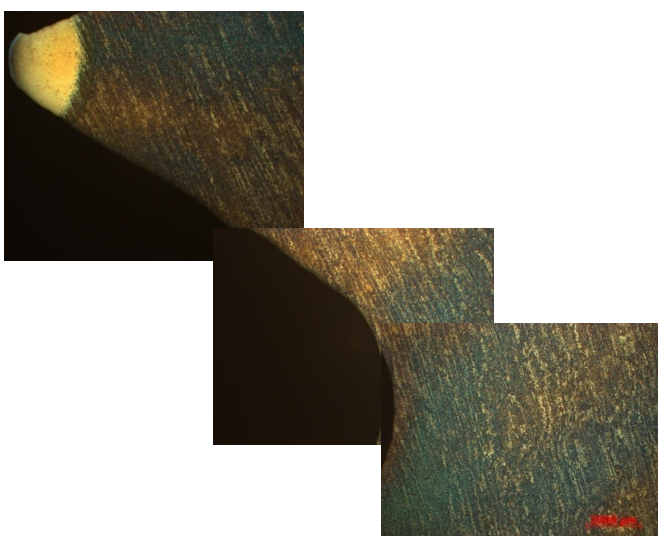


Рис. 3. Загальний вигляд зуба і поверхні диска пили гарячого різання. Колаж

Більш детальний вигляд структури загартованого шару наведено на рисунку 4.

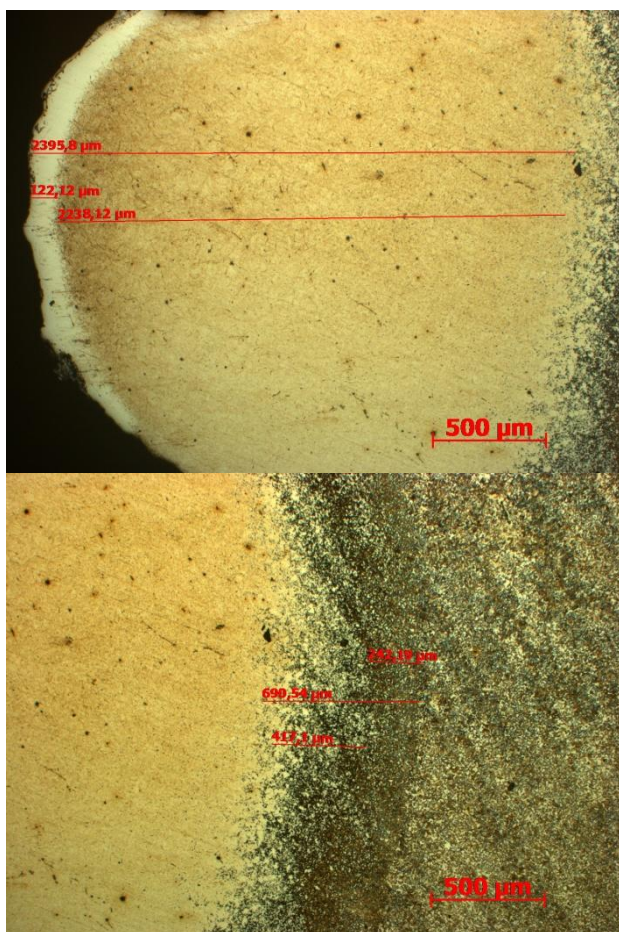
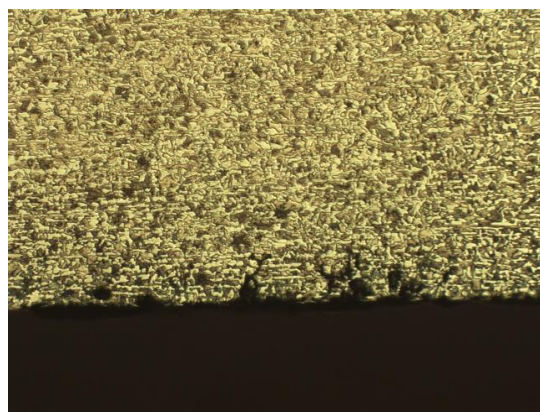


Рис. 4. Детальний вигляд загартованого шару зуба пили гарячого різання

Як видно з рисунка 4, на поверхні спостерігається тонкий так званий «білий шар». Загальна глибина загартованого шару не перевищує 2,5 мм. Існуюча технологія термічного зміцнення зубів пили гарячого різання забезпечувала формування загартованої зони глибиною до 2,5 мм ( $\approx 20\%$  висоти зуба), дуже тонкої, до 1,0 мм, перехідної зони. Далі йшла гарячекатана феритно-перлітна структура. Мікротвердість при цьому змінювалася від 720...830 МПа в загартованій зоні, 400...490 МПа в перехідній і 215...225 МПа в гарячекатаній структурі. Високі значення мікротвердості «білого шару» свідчать, що ці ділянки є швидше за все ділянками мартенситу, що утворилися в процесі експлуатації. Такі ділянки мають високу крихкість, що спричинює утворення мікротріщин в самому «білому шарі» і на межі «білий шар» /

основний метал. Таким чином ділянки «білого шару» легко відшаровуються від основного металу диска. Загалом же структура по перерізу диска являє собою феритно-перлітну суміш без видимих слідів термічного зміцнення

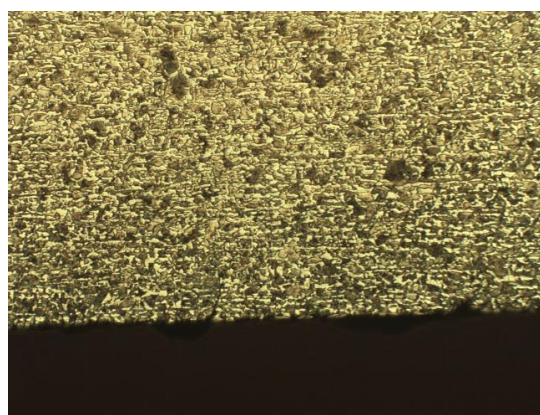
Металографічні дослідження також виявили істотні відмінності в мікроструктурі різних поверхонь зуба (рис. 5).



× 100

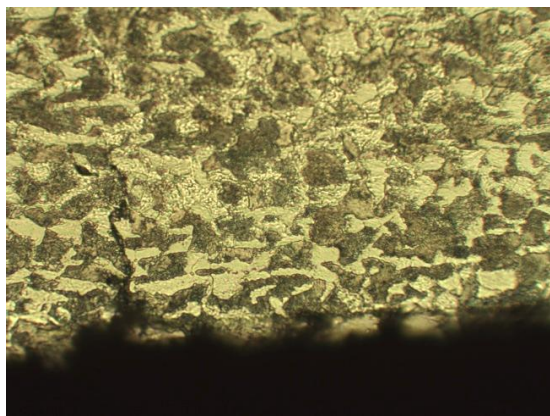


× 400



× 100

а) Перша поверхня (більш деформована, в вищербинах і мікротріщинах)



× 400

б) друга поверхня

Рис. 5. Мікроструктура обох поверхонь диска в районі зуба

Така відмінність може бути пов'язана з різним характером роботи кромки диска під час зустрічі з профілем. Також це може побічно свідчити про биття диска у процесі експлуатації.

Аналіз існуючої на комбінаті технології виробництва і термічної обробки пил показав, що в процесі експлуатації диска пили гарячого різання за дії високих динамічних і теплових навантажень відбувається відшарування або викришування загартованої області зуба і пластична деформація решти різального елемента. Деформація зуба може досягати значних величин і мати симетричний або асиметричний «грибоподібний» вигляд і загин зуба в бік прикладеного навантаження (рис. 6).

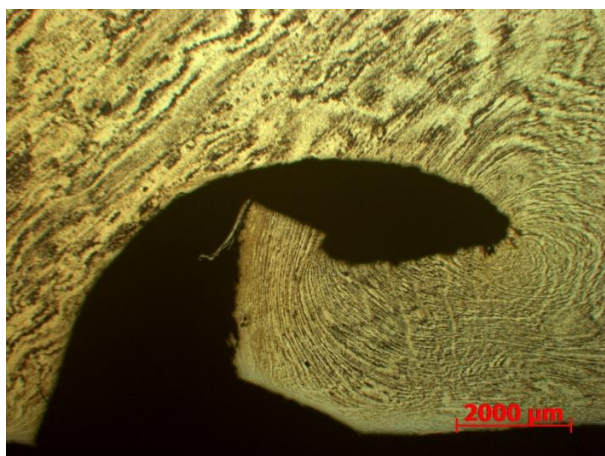


Рис. 6. Зношений і деформований зуб пили гарячого різання, ×12,5

Таким чином, за існуючої технології виготовлення і термообробки дисків пил можливі два варіанти зносу зубів:

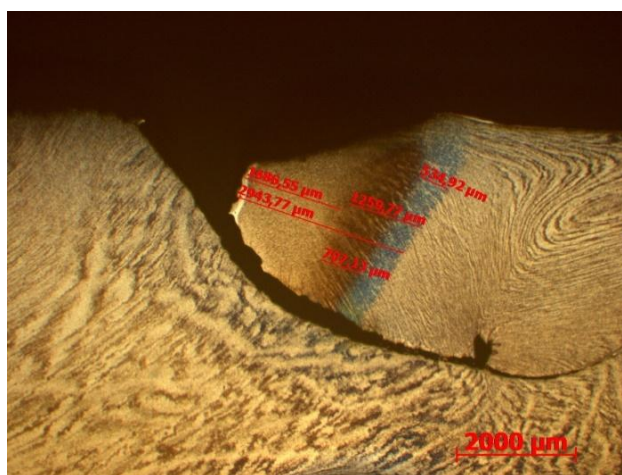
1) викришування загартованої області зуба;

2) загин (деформація) зуба.

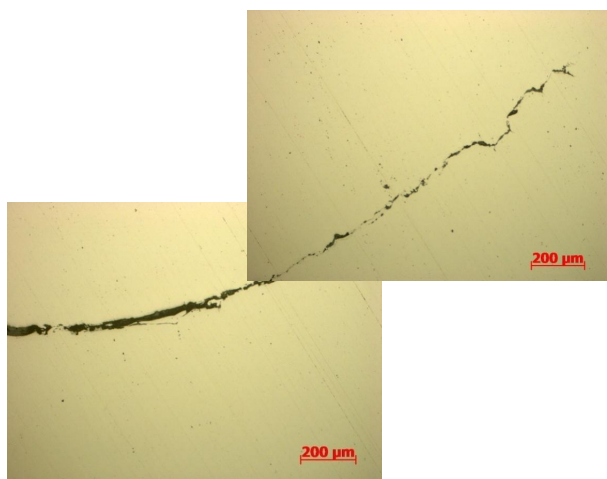
Після викришування загартованої області зуба різання прокату здійснюється відносно м'якою частиною зуба з феритно-перлітною структурою. Це може зумовлювати утворення такого виду дефекту як наплив. Він може утворюватися через недостатню твердість зношених зубів і процес різання набуває фрикційного характеру.

У разі відхилення зубів від первісної форми (загин або деформація) можливе утворення таких дефектів як задирка, особливо якщо згин зуба відбувається нерівномірно щодо поверхонь диска і поєднується із загальним вигином диска пили гарячого різання через недостатню товщину диска (менше нормативної) і за великих подач у процесі різання.

Металографічним контролем зношених зубів дисків пили гарячого різання виявлено тріщини напруги в районі кореня зуба (рис. 7). Такий розвиток тріщин для дисків пили гарячого різання досить характерний.



а) × 12,5



б)  $\times 100$

Рис. 7. Загальний вигляд зношеного зуба (а), з тріщиною напруження в корені зуба (б)

### Коригування існуючої технології термічної обробки пил

Після аналізу існуючої на комбінаті технології виробництва і термічної обробки пил вирішено виконати низку експериментів, які полягали в:

1. оцінюванні впливу обдування зуба під час гартування на структуру і властивості загартованих зубів;

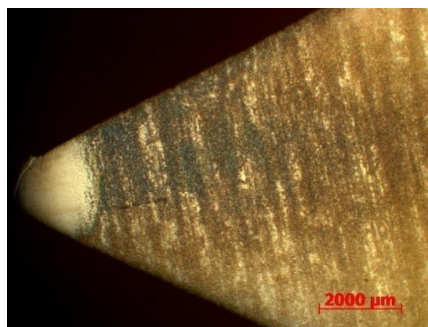
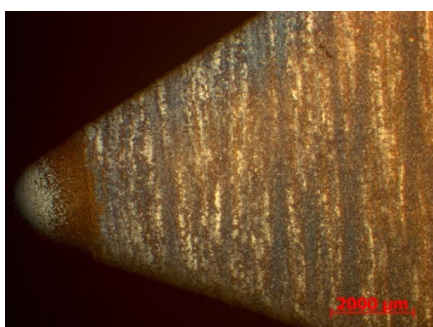
2. оцінюванні впливу зменшення сили струму під час нагрівання зуба від гартування;

3. оцінюванні впливу збільшення площі контакту поверхні зуба з нагрівачем.

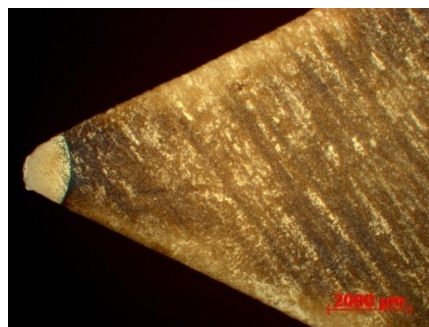
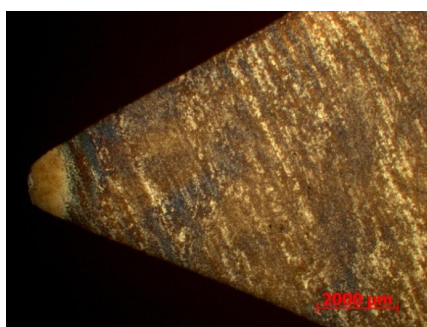
Результати експериментів наведені на рисунку 8.

Без обдування повітрям

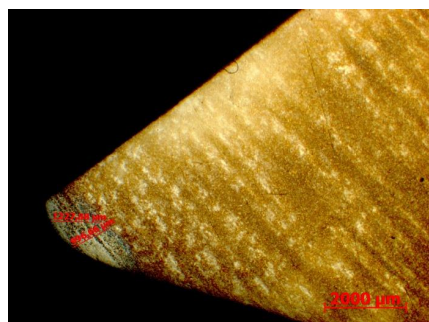
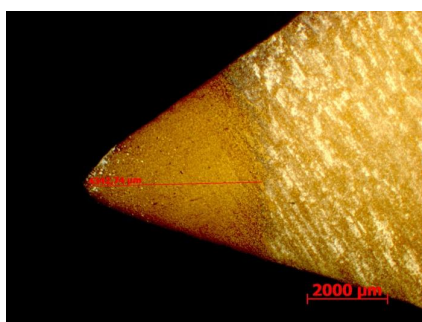
З обдуванням повітрям



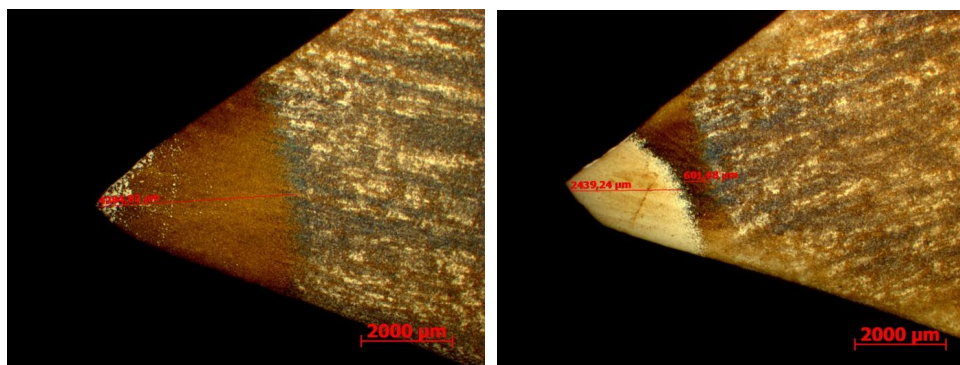
а) За існуючою технологією



б) За існуючою технологією. Сила струму зменшена



в) Глибина канавки 3 мм



г) Глибина канавки 4 мм

Рис. 8. Загальний вигляд зубів після термічної обробки за різними режимами (а – г), ×12,5

Світла область - мартенсит гарту, темна область - перехідна зона. Далі феритно-перлітна структура зуба, що не зазнала

термічної дії. Результати вимірювання глибин зон і твердість структурних складових наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Глибина зон термічного впливу та твердість зубів пили гарячого різ

Без обдування повітрям				З обдуванням повітрям			
Термічна обробка	Глибина загартованої зони, мм/ (твердість, HRC)	Глибина перехідної зони, мм/ (твердість, HRC)	Загальна глибина термічного впливу, мм/ (твердість, HRC)	Термічна обробка	Глибина загартованої зони, мм/ (твердість, HRC)	Глибина перехідної зони, мм/ (твердість, HRC)	Загальна глибина термічного впливу, мм/ (твердість, HRC)
Існуюча технологія (а)	1,4 (60,1...45,3)	1,2 (45,3...27,8)	2,6 (60,1...27,8)	Існуюча технологія (а)	1,9 (60,1...47,7)	0,2 (47,7...38,8)	2,1 (60,1...38,8)
Існуюча технологія зі зменшеною силою струму (б)	1,0 (62,5...54,7)	0,5 (45,3...32,2)	1,5 (62,5...32,2)	Існуюча технологія зі зменшеною силою струму (б)	0,9 (61,8...49,1)	0,2 (49,1...40,8)	1,1 (61,8...40,8)
Глибина канавки 3 мм (в)	0,5 (45,3...34,4)	3,0 (34,4...25,6)	3,5 (45,3...25,6)	Глибина канавки 3 мм (в)	0,5 (60,1...49,1)	0,3 (49,1...35,5)	0,8 (60,1...35,5)
Глибина канавки 4 мм (г)	0,5 (61,8...41,8)	3,8 (41,8...27,8)	4,3 (61,8...27,8)	Глибина канавки 4 мм (г)	2,4 (60,1...59,2)	0,6 (27,1...22,2)	3,0 (60,1...22,2)

Як впливає з аналізу рисунка 8 і даних таблиці 2, охолодження зуба в процесі термічної обробки зумовлює отримання тонкої перехідної зони (0,2...0,6 мм) між загартованою і феритно-перлітною зонами зуба. Це, у свою чергу, може викликати підвищення структурних напружень у перехідній зоні зуба і підвищення ймовірності зламу зуба в цій області в процесі експлуатації. Наявність обдуву у всіх випадках істотно звужує перехідну

зону, тим самим підвищуючи рівень напружень у зубі.

Також з аналізу рисунка 8 і таблиці 2 впливає, що у разі реалізації швидкостей вище критичних у зубі максимально досяжна твердість складає близько 60...62 HRC. Твердість перехідної зони сильно варіюється, але взагалом можна вважати, що в діапазоні 45...25 HRC.

Із метою збільшення глибини загартованого шару була зроблена спроба збільшити площу контакту нагрівача з

поверхню зуба за рахунок використання канавки на нагрівачі глибиною 3 та 4 мм. У результаті за глибини канавки 3 мм отримали суттєве збільшення глибини зони термічного впливу до 3,5 мм (без обдування). З обдуванням на цих зразках глибина становить 0,8 мм (можливо, через особливості проведення експерименту).

Твердість на поверхні зразків без обдування знизилася до 45...35 HRC, що свідчить про швидкості охолодження нижче критичних. У той же час різко збільшилася глибина перехідної зони. Збільшення глибини канавки до 4 мм викликало подальше збільшення загальної глибини зони термічного впливу. В основному це реалізується за рахунок збільшення глибини перехідної зони до 3,8 мм. Застосування обдування зумовило збільшення глибини загартованого шару з 0,5 до 2,4 мм і різке зниження глибини перехідної зони до 0,6 мм. Загалом же зона термічного впливу під час охолодження з обдуванням зменшилася.

### Висновки

1. Застосування обдування зуба на всіх випробуваних режимах викликає зменшення загальної глибини зони термічного впливу, перш за все за рахунок зниження глибини перехідної зони.

2. Зменшення сили струму на всіх випробуваних режимах знижує глибину зони термічного впливу.

3. Збільшення площі контакту нагрівача і зуба істотно (в 1,5...2 рази) збільшує глибину зони термічного впливу. В основному це відбувається за рахунок збільшення глибини перехідної зони. При цьому дещо знижується твердість загартованої зони.

У процесі виконання роботи на існуючому обладнанні ділянки підготовки дисків пил КПЦ випробувано 6 нових режимів термічного зміцнення. При цьому варіювались сила струму на нагрівальних елементах, час нагріву, обдування повітрям різальних елементів, площа контакту нагрівального елемента з поверхньою зуба.

Вдалося збільшити глибину загартованого шару зубів ПГР до 80 % від висоти різального елемента.

Однак, виходячи з умов технологічності переточки дисків під час експлуатації, глибину загартованої зони обмежили 40...50 % висоти зуба. Диски ПГР зі збільшеною глибиною загартованого шару різального елемента масово використовуються у КПЦ в даний час. Якість гарячого різання поліпшилась, кількість дефектів типу «задирок» та «наплив» суттєво зменшилася. Стійкість дисків ПГР підвищилася як мінімум на 5 %.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Насад Т. Г. Высокоскоростная обработка с тепловым воздействием: монография. Саратовский государственный технический университет, 2007. 108 с.
2. Банников А. И. Совершенствование процесса резания горячего металлопроката дисковыми пилами на основе управления теплофизическими явлениями в контактной зоне : дисс. д-ра техн. наук : 05.02.07. Волгоград, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 2018. 306 с.
3. Таланов Н. В. Физические основы процесса резания. *Физические процессы при резании металлов*. 1984. С. 3–37.
4. Банников А. И. Теоретические основы модернизации пил ударного реза горячего проката : монография. Волгоград : ВолГТУ, 2014. 108 с.
5. Воронцов А. Л., Албагачиев А. Ю., Султан-заде Н. М. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол : ТНТ, 2014. 552 с.
6. Гисметулин А. Р., Горбунов И. В., Ефременков И. В. Разработка препроцессора для моделирования операций механообработки в САЕ системе LS-DYNA. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16, № 1 (5). С. 1338–1342.
7. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочность твердых тел. Москва : Металлургия, 1971. С. 141–149.
8. Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. Шляхи відстежування трансформацій мікроструктури матеріалу, які відбуваються внаслідок його знос. *Шостий міжнародний симпозіум українських інженерів-*

механіків у Львові : тези доповідей. За заг. ред. к. т. н., доц. Б. І. Кіндрацького. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2003. С. 145–146.

9. Андреев Г. С. Тепловые явления в режущей части инструмента при прерывистом резании. *Вестник машиностроения*. 1973. № 3. С. 69–73.

10. Плахотник В. А., Конская А. А. Определение температурного поля в поверхностном слое заготовки при термофрикционном резании. *Вестник СХУ им. Даля*. 2013. №. 4 (2). С. 150–152.

11. Дальский А. М. Справочник технолога–машиностроителя : в 2 т; под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. 5-е изд., испр. Мшсква : Машиностроение, 2010. Т. 1. 912 с.

12. Калиновский В. Р. Технология горячей обработки металлов. Минск : ИВЦ Минфина, 2008. 352 с.

13. Банников А. И., Дятлов Н. А., Пермьяков И. Л., Антонов А. С. Металлографическое исследование стружки при ударной резке горячего проката. *СТИН*. 2014. № 4. С. 19–20.

14. Узлов О. В., Дрожжевська Г. В., Пучиков О. В., Гречка І. С. Підвищення ресурсу експлуатації дисків пил холодного різання металу шляхом термічної обробки. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4 (87). С. 10–16. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.241219.10.595

## REFERENCES

1. Nasad T.G. *Vysokoskorostnaya obrabotka s teplovym vozdeystviyem* [High speed heat treatment : monograph]. Saratovskiy State Technical University, 2007. 108 p. (in Russian).

2. Bannikov A.I. *Sovershenstvovaniye protsessa rezaniya goryachego metalloprokata diskovymi pilami na osnove upravleniya teplofizicheskimi yavleniyami v kontaktной zone: dissertatsiya doktora Tekhnicheskikh nauk: 05.02.07* [Improving the process of cutting hot metal by circular saws based on the management of thermophysical phenomena in the contact zone: diss. Dr. Sc. (Tech.) : 05.02.07]. Volhohrad : FGBOU VO “Volhohradskiy State Technival University”, 2018, 306 p. (in Russian).

3. Talanov N.V. *Fizicheskiye osnovy protsessa rezaniya* [The physical basis of the cutting process]. *Fizicheskiye protsessy pri rezanii metallov* [Physical processes in metal cutting]. 1984, pp. 3–37. (in Russian).

4. Bannikov A.I. *Teoreticheskiye osnovy modernizatsii pil udarnogo reza goryachego prokata: monografiya* [Theoretical Foundations for the Modernization of Hot-Impact Saw Cutting Saws : monograph]. Volhohrad : VolhSTU, 2014, 108 p. (in Russian).

5. Vorontsov A.L., Albagachiyev A. Yu. and Sultan–zade N.M. *Teoreticheskiye osnovy obrabotki metallov v mashinostroyenii* [Theoretical foundations of metal processing in mechanical engineering]. Staryy Oskol : TNT, 2014, 552 p. (in Russian).

6. Gismetulin A.R., Gorbunov I.V. and Yefremkov I.V. *Razrabotka preprotssora dlya modelirovaniya operatsiy mekhanoobrabotki v SAYe sisteme LS–DYNA* [Development of a preprocessor for modeling machining operations in the SAELS–DYNA system]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 16, no. 1 (5), pp. 1338–1342.

7. Yekobori T. *Fizika i mekhanika razrusheniya i prochnost' tverdykh tel* [Physics and mechanics of fracture and solid strength]. Moscow : Metallurgiya, 1971, pp. 141–149. (in Russian).

8. V.I. Bol'shakov, V.M. Volchuk and Yu.I. Dubrov. *Shlyakhy vidstezhuvannya transformatsiy mikrostruktury materialu, yaki vidbuwayut'sya vnaslidok yoho znos* [Ways to track the transformation of the microstructure of a material due to its wear]. *Shostyy mizhnarodnyy sympozium ukrayins'kykh inzheneriv-mekhanikiv u L'vovi: tezy dopovidey* [Sixth International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv: Abstracts]. Edited by Cand. Sc. (Tech.), Dr. B.I. Kindrats'kyi. L'viv : KINPATRI LTD, 2003, pp. 145–146. (in Ukrainian).

9. Andreyev G.S. *Teplovyeye yavleniya v rezhushchey chasti instrumenta pri preryvistom rezanii* [Thermal phenomena in the cutting part of the tool during intermittent cutting]. *Vestnik mashinostroyeniya* [Bulletin of mechanical engineering]. 1973, no. 3, pp. 69–73.

10. Plakhotnik V.A. and Konkaya A.A. *Opredeleniye temperaturnogo polya v poverkhnostnom sloye zagotovki pri termofriktsionnom rezanii* [Determination of the temperature field in the surface layer of a workpiece during thermofriction cutting]. *Vestnik SNU imeni Dallya* [Bulletin of SNU named after Dahl]. 2013, no. 4 (2), pp. 150–152.

11. Dal'skiy A.M. *Spravochnik tekhnologa–mashinostroitelya* [Handbook of a mechanical engineer]. In 2 vol. Edited by A.M. Dal'skiy, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov, A.G. Suslov. Moscow : Mashinostroyeniye, 2010, vol. 1, 912 p. (in Russian).

12. Kalinovskiy V.R. *Tekhnologiya goryachey obrabotki metallov* [Hot metal processing technology]. Minsk : IVTs Minfina, 2008, 352 p. (in Russian).

13. Bannikov A.I., Dyatlov N.A., Permyakov I.L., Antonov A.S. *Metallograficheskoye issledovaniye struzhki pri udarnoy rezke goryachego prokata* [Metallographic study of shavings during impact cutting of hot rolled products]. *СТИН* [Steel & Instruments]. 2014, no. 4, pp. 19–20. (in Russian).

14. Uzlov O.V., Drozhevs'ka H.V., Puchikov O.V. and Hrechka I.S. *Pidvyshchennya resursu ekspluatatsiyi dyskiv pyl kholodnoho rizannya metalu shlyakhom termichnoyi obrobky* [Increasing the service life of cold-cut metal saw blades by heat treatment]. *Metaloznastvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. No. 4 (87), 2019, pp. 10–16. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.02.2020 р.



**Металознавство та термічна обробка металів**  
**Науковий та інформаційний журнал**  
**№ 1 (88) 2020 р.**

Відповідальний секретар: к. т. н., доц. *Тимошенко О. А.*

Технічний редактор: *Тимошенко О. А.*

Комп'ютерна верстка: *Тимошенко О. А.*

Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах, несуть автори. Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Адреса редакції:

Україна, 49600, Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а,

кімн. 558 (відповідальний секретар)

+38 (050) 452-43-63

e-mail : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Підп. до друку 03.03.2020 р. Формат 210×297 1/16

Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 5,00. Умовн. фарб.-відб. арк. 5,20. Наклад 50 прим.

Типографія «Atmosfera». Ідентифікатор видавця у системі ISBN: 2267

Адреса: 49000, Дніпро, вул. О. Гончара, 15-Б

тел.: +38 (063) 359-83-09, +38 (067) 892-06-03, +38 (050) 452-10-81

e-mail: [8102@ukr.net](mailto:8102@ukr.net)

---

**Металловедение и термическая обработка металлов**  
**Научный и информационный журнал**

**№ 1 (88) 2020 г.**

Ответственный секретарь: к. т. н., доц. *Тимошенко Е. А.*

Технический редактор: *Тимошенко Е. А.*

Компьютерная верстка: *Тимошенко Е. А.*

Ответственность за достоверность информации, размещаемой в печатных материалах, несут авторы. Редколлегия не всегда разделяет авторскую точку зрения.

Адрес редакции:

Украина, 49600, Днипро, ул. Чернышевского, 24-а,

комн. 558 (ответственный секретарь)

+38 (050) 452-43-63

e-mail : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Подп. в печать 03.03.2020 г. Формат 210×297 1/16

Печать офсетная. Условн.-печ. л.5,00. Условн. крас.-отп. л.5,20. Тираж 50 экз.

Типография «Atmosfera». Ідентифікатор издателя в системе ISBN: 2267

Адрес: 49000, Днипро, ул. О. Гончара, 15-Б

тел.: +38 (063) 359-83-09, +38 (067) 892-06-03, +38(050)452-10-81

e-mail: [8102@ukr.net](mailto:8102@ukr.net)

---

**Metal Science and Heat Treatment of Metals**  
**Scientific and information journal**

**№ 1 (88) 2020**

Executive Secretary: Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. *Tymoshenko O. A.*

Technical Editor: *Tymoshenko O. A.*

Desktop publishing: *Tymoshenko O. A.*

Authors bear the responsibility for the information accuracy contained in the printed materials.

Editors do not always agree with the author's point of view.

**The materials are presented in the author's wording**

Editorial address:

24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine

room 558 (Executive Secretary)

+38 (050) 452-43-63

e-mail : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Send to press on the 03<sup>th</sup> of March, 2020. Format 210×297 1/16

Offset printing. Conventional quire 5,00. Conventional paint marks 5,20. Number of copies 50.

Publisher "Atmosfera". ISBN: 2267

49000, Dnipro, Oles' Honchar Str., 15-B

tel.: +38 (063) 359-83-09, +38 (067) 892-06-03, +38 (050) 452-10-81

e-mail: [8102@ukr.net](mailto:8102@ukr.net)