

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250918.28.395

## МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТВЕРДОСТІ ЛИСТОПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

ВОЛЧУК В. М.<sup>1\*</sup>, д. т. н., доц.,  
ДУБРОВ Ю. І.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.

<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: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<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) 47-39-56, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Анотація. Постановка задачі.** У зв'язку з технологією виробництва та експлуатацією проводити оцінку механічних властивостей масивних чавунних відливок не завжди можливо за допомогою натурних іспитів. Тому прогноз властивостей, зокрема листопркатних чавунних валків, здійснюють за допомогою моделювання шляхом аналізу впливу параметрів технології. До параметрів технології, що впливають на формування структури чавунних валків, слід віднести хімічний склад, швидкість охолодження, тощо. Оскільки структура матеріалів значним чином впливає на їх властивості, але при цьому не завжди можна провести кількісну параметризацію її елементів за допомогою класичних методів, в роботі пропонується оцінювати якість валків на основі мультифрактального аналізу структури. **Матеріали і методики досліджень.** В якості матеріалу для дослідження обрано листопркатні валки ЛПХ17НМдц-63, структура та властивості яких оцінювалися з використанням теорії мультифракталів, твердоміру Шора, металографічного аналізу, математичного моделювання. Відзначається, що збільшення вмісту хрому до 17 % в білій зоні впливає на утворення стійких карбідів та призводить до підвищення показників твердості з 47 до 76 одиниць Шора у порівнянні з сірою зоною. **Результати та їх обговорення.** Досліджувався вплив елементів структури білої зони бочки валка (від 0 до 50 мм від поверхні). Встановлені співвідношення між найбільш чутливими показниками із спектру розмірностей елементів структури білої зони:  $D_0$  та  $D_{+100}$  розмірностями аустеніту;  $D_0$  та  $D_{-100}$  розмірностями карбідів хрому і показниками твердості валків. Отримані моделі прогнозу твердості робочої зони бочок валків ЛПХ17НМдц-63 від розмірностей аустеніту (коефіцієнти кореляції  $R^2 = 0,71$  і  $R^2 = 0,85$ ) та карбідів хрому ( $R^2 = 0,95$  і  $R^2 = 0,89$ ). **Висновки.** Результати дослідження свідчать про доцільність застосування мультифрактальної моделі структури до прогнозу показників твердості робочої зони бочок валків ЛПХ17НМдц-63.

*Ключові слова:* мультифрактал; структура; спектр розмірностей; чавунні валки; твердість

## МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТВЕРДОСТІ ЛИСТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

ВОЛЧУК В. Н.<sup>1\*</sup>, д. т. н., доц.,  
ДУБРОВ Ю. И.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1\*</sup> 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

<sup>2</sup> 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: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Аннотация. Постановка задачи.** В связи с технологией производства и эксплуатацией проводить оценку механических свойств массивных чугунных отливок не всегда возможно с помощью натуральных испытаний. Поэтому прогноз свойств, в частности листопркатных чугунных валков, осуществляют с помощью моделирования путем анализа влияния параметров технологии. К параметрам технологии, влияющим на формирование структуры чугунных валков, следует отнести химический состав, скорость охлаждения, и тому подобное. Поскольку структура материалов значительным образом влияет на их свойства, но при этом не всегда можно провести количественную параметризацию ее элементов с помощью классических методов, в работе предлагается оценивать качество валков на основе мультифрактального анализа структуры. **Материалы и методики исследований.** В качестве материала для исследования выбраны листопркатные валки ЛПХ17НМдц-63, структура и свойства которых оценивались с использованием теории мультифрактала, твердомера Шора, металлографического анализа, математического моделирования. Отмечается, что увеличение содержания хрома до 17 % в белой зоне влияет на образование устойчивых карбидов и приводит к повышению показателей твердости с 47 до 76 единиц Шора.

Шора по сравнению с серой зоной. **Результаты и их обсуждение.** Исследовалось влияние элементов структуры белой зоны бочки вала (от 0 до 50 мм от поверхности). Установлены соотношения между наиболее чувствительными показателями из спектра размерностей элементов структуры белой зоны:  $D_0$  и  $D_{+100}$  размерностями аустенита;  $D_0$  и  $D_{-100}$  размерностями карбидов хрома и показателями твердости валков. Получены модели прогноза твердости рабочей зоны бочек валков ЛПХ17НМдц-63 от размерностей аустенита (коэффициенты корреляции  $R^2 = 0,71$  и  $R^2 = 0,85$ ) и карбидов хрома ( $R^2 = 0,95$  и  $R^2 = 0,89$ ). **Выводы.** Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности применения мультифрактальной модели структуры к прогнозу показателей твердости рабочей зоны бочек валков ЛПХ17НМдц-63.

*Ключевые слова:* мультифрактал; структура; спектр размерностей; чугунные валки; твердость

## MULTIFRACTAL HARDNESS ANALYSIS OF ROLLER ROLLS

VOLCHUK V.M.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
DUBROV Yu.I.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Abstract. Formulation of the problem.** In connection with the technology of production and operation to evaluate the mechanical properties of massive cast iron castings is not always possible with the use of field examinations. Therefore, the forecast of properties, in particular, rolling mill casting rolls, is carried out by means of simulation by analyzing the influence of the parameters of the technology. The parameters of the technology that influence the formation of the structure of cast-iron rolls include the chemical composition, the cooling rate, and the like. Since the structure of materials greatly affects their properties, but it is not always possible to quantitatively parameterize its elements using classical methods, in the work it is proposed to evaluate the quality of rolls on the basis of a multifractal analysis of the structure. **Materials and methods of research.** As a material for research, roller-bearings ЛПХ17НМдц-63, whose structure and properties were evaluated using the theory of multifractals, Shore hardness meter, metallographic analysis, mathematical modeling, were selected. It is noted that increasing the chromium content to 17 % in the white zone affects the formation of stable carbides and leads to an increase in hardness from 47 to 76 units of Shore compared with the gray zone. **Results and discussion.** The influence of the elements of the white zone structure of the roll barrel (from 0 to 50 mm from the surface). The relations between the most sensitive indicators in the spectrum of dimensions of the elements of the structure of the white zone are established:  $D_0$  and  $D_{+100}$  by the dimensions of austenite;  $D_0$  and  $D_{-100}$  dimensions of chromium carbides and roller hardness indexes. The models for predicting the hardness of the working area of the rolls of ЛПХ17НМдц-63 rolls from the dimensions of austenite (correlation coefficients  $R^2 = 0,71$  and  $R^2 = 0,85$ ) and chromium carbides ( $R^2 = 0,95$  and  $R^2 = 0,89$ ). **Conclusions.** The results of the study indicate the expediency of applying a multifractal model of structure to the prediction of hardness parameters of the working area of roll barrels ЛПХ17НМдц-63.

*Keywords:* multifractal; structure; dimensional spectrum; cast iron rolls; hardness

### Постановка задачі

Аналіз літературних джерел та штатної технології виробництва масивних металевих відливок, до яких відносяться листопрокатні чавунні чавунні валки, свідчить про те, що вона являється складною у зв'язку з її багатопараметричністю та багатокритеріальністю [1–4]. Тому для ідентифікації подібних технологій застосовують системний підхід [5; 6], що об'єднує різні методики – натурні іспити, неруйнівні методи контролю, експертні оцінки, математичне моделювання та інші підходи [7–10].

Застосування математичних методів моделювання дозволяє отримувати оперативні оцінки по критеріям якості прокатних валків, або коригувати їх технологічні режими виробництва, минаючи значні матеріально-часові витрати [11; 12]. Та здебільшого їх застосовують для пошуку зв'язків між складом, структурою та властивостями валків [13–15]. Це, здебільшого, пов'язане з тим, що основними

характеристиками, які впливають на якість литих валків, є: хімічний склад, структура. На формування структури впливають технологічні параметри, включаючи, в першу чергу, умови охолодження та термічну обробку [1; 3].

Незважаючи на значну кількість існуючих моделей прогнозу характеристик якості листопрокатних чавунних валків, слід зазначити, що більшість з них мають певні розбіжності, які можуть не задовольняти вимогам замовника. Відхилення показників прогнозу від даних експерименту можна пояснити з позицій багатофункціональності технології виробництва валків, коли навіть незначні відхилення, наприклад, по хімічному складу валків, можуть призвести до значного відхилення їх механічних властивостей [1; 3; 5].

В роботі запропоновано використати для оцінки структури та критеріїв якості листопрокатних валків використати фрактальний підхід, що базується на проміжній асимптотіці [16–20]. Для оцінки структурних елементів маловуглецевих сталей

застосовують мультифрактальний підхід [21; 22]. В [23; 24] відмічається про успішне використання мультифрактального аналізу щодо прогнозу механічних властивостей сортопрокатних валків.

### Матеріали і методики досліджень

Листопркатні (Л) чавунні валки з пластинчатою формою графіту (П) виконання ЛПХ17НМдц-63

мають поверхню робочого шару леговану хромом (Х) до 17 %, нікелем (Н) та молібденом (М). Це двошарові валки (д), виготовлені методом центробіжного лиття (ц) [1; 3].

Хімічний склад робочого шару (білої зони) та сірої зони листопркатного валку ЛПХ17НМдц-63 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад валка, % від маси / The chemical composition of the roll, % of the mass

Бочка валку	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Mg
Біла зона (0 до 55)	2,75	1,08	0,94	0,039	0,033	16,5	1,32	1,24	0,058	0,049	–
Сіра зона (> 55 мм)	3,35	1,92	0,50	0,056	0,012	0,40	0,44	0,036	0,053	0,014	0,043

Валок не піддавався термічній обробці. Розміри бочки валку виконання ЛПХ17НМдц-63 наступні: діаметр 550 мм, довжина 1 500 мм.

Твердість бочки валку визначалася за методом Шора (ГОСТ 23273-78) на Дніпровському заводі

прокатних валків (табл. 2). При визначенні твердості валків контрольні заміри здійснювалися в трьох точках, що рівномірно розташовані по довжині низу бочки валку.

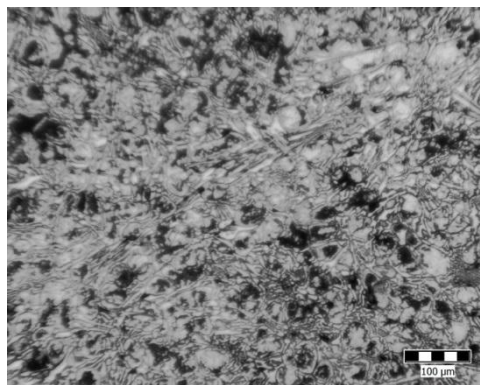
Таблиця 2

Твердість низу бочки валка, HSD (від чистового діаметру) / Hardness of the bottom of the barrel roller, HSD (from the working diameter)

Контрольні точки	Показники твердості
1	76/5-35мм, 74/45мм, 68/50мм, 58/55мм, 49/60мм, 47/65-75мм
2	76/5-35мм, 73/45мм, 69/50мм, 58/55мм, 51/60мм, 48/65-75мм
3	75/5-35мм, 74/45мм, 68/50мм, 57/55мм, 50/60мм, 47/65-75мм

Біла поверхнева зона бочки складається із аустенітної матриці з вclusions хромистих

карбідів на базі  $Cr_7C_3$  (рис. 1 а), а сіра – з перлітної матриці та карбідів (цементиту 25,6 %) (рис. 1 б).



а (a)



б (b)

Рис. 1. Структура низу бочки валка: металева матриця білої зони (а), металева матриця сірої зони (б) / Fig. 1. Structure of the bottom of the barrel of the roll: the metal matrix of the white zone (a), the metal matrix of the gray zone (b)

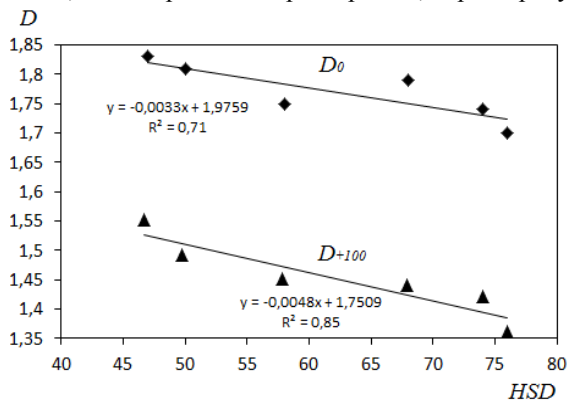
Робочу (білу) зону листопркатних чавунних валків виконання леґують хромом (активним карбідоутворюючим елементом), який у валкових розплавах утворює стійкі карбіди, підвищує твердість і глибину вибіленого шару, але це призводить до збільшення глибини перехідної зони та зниження характеристик міцності, термічної стійкості прокатного валка [1; 3].

### Результати та їх обговорення

Спектр статистичних розмірностей мультифрактальної структури білої та сірої зони бочки валку ЛПХ17НМдц-63 визначався за формулою Реньї [25]:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta}, \quad (2)$$

де  $\delta$  – розмір ячійки квадратної сітки, якою покривають об'єкт для обчислення розмірності;  $p_i$  – ймовірність попадання точки (пікселя для ЕОМ), що знаходиться на досліджуваному об'єкті, в  $i$ -ту ячійку квадратної сітки. Розмірності характеризують:  $D_0$  – однорідний фрактал при  $q = 0$  (фрактальна розмірність);  $D_I$  – інформаційна розмірність при  $q = 1$  (інформаційна ентропія), що характеризує швидкість зростання кількості інформації і показує, як зростає інформація, необхідна для визначення місця розташування точки на об'єкті дослідження, при  $\delta \rightarrow 0$ ;  $D_2$  – кореляційна розмірність, характеризує

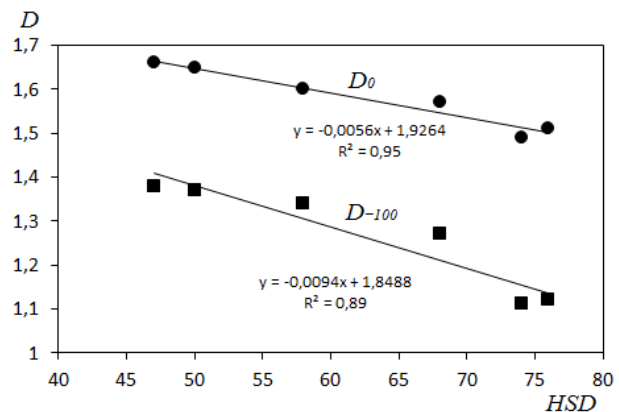


а (а)

ймовірність знаходження в одній і тій же ячійці двох точок на об'єкті;  $D_\infty$  – розмірність, що характеризує найбільш розріджений простір на об'єкті та найбільш концентрований простір –  $D_{-\infty}$ .

Зв'язок між критеріями якості валкового чавуну з перлітною матрицею та розмірностями структурних складових: карбідами і цементитом розкрито в [26; 27], де коефіцієнт кореляції  $R^2$  між цими показниками змінюється від 0,51 до 0,91.

Зафіксовані відносно високі значення коефіцієнтів кореляції між розмірностями аустеніту (рис. 2 а) та карбідів хрому (рис. 2 б) із мультифрактального спектру та показниками твердості.



б (б)

Рис. 2. Вплив розмірностей елементів структури білої зони на показники твердості чавунного валка: аустенітна матриця (а), карбіди хрому (б) / Fig. 2. Influence of the dimensions of the elements of the structure of the white zone on the indicators of hardness of the cast iron roll: austenitic matrix (а), carbide chromium (б)

Отримані результати можна пояснити не тільки позитивним впливом аустенітної матриці та карбідів хрому на твердість чавуну, але і впливом геометричної конфігурації та неоднорідності елементів структури, яка фіксується з використанням мультифрактального підходу.

Доцільність застосування мультифрактальної моделі до прогнозу твердості листопрокатних валків з аустенітною матрицею підтверджується отриманими моделями, оскільки виявлена чутливість показників твердості до розмірностей елементів структури білої зони: аустеніту та карбідів хрому.

## Висновки

Запропоновано для оцінки структури та критеріїв якості листопрокатних чавунних валків застосовувати мультифрактальний підхід. Встановлені співвідношення між розмірностями білої зони структури (розмірностями аустеніту  $D_0$  і  $D_{+100}$  та карбідів хрому  $D_0$  і  $D_{-100}$ ). Отримані моделі прогнозу показників твердості білої зони валків ЛПХ17НМдц-63 ( $R^2 = 0,71 \dots 0,95$ ) в залежності від розмірностей елементів структури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кривошеев А. Е. Литые валки : монография / [А. Е. Кривошеев]. – Москва : Metallurgizdat, 1957. – 360 с.
2. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступу : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
3. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей : монография / [Т. С. Скобло, Н. М. Воронцов, Н. А. Будагьянц и др.]. – Москва : Металлургия, 1994. – 336 с.
4. Большаков В. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 4. – С. 5–11.
5. Большаков Вад. І. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого лиття / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2015. – № 9. – С. 69–73. – Режим доступу : <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>

6. Большаков В. И. Этапы идентификации багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступу : <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/67873>
7. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіди НАН України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
8. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступу : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
9. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 3. – С. 21–25. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
10. Kroviakov S. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete / S. Kroviakov, A. Mishutin, O. Pishev // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7 – № 3.2. – Pp. 245–249.
11. Волчук В. Спосіб прогнозу механічних властивостей чавунних валків / В. Волчук, С. Токосов // Science Rise. – 2018. – Т. 11. – С. 57–61. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.150342>
12. Волчук В. М. Математична модель прогнозу якості металу / В. М. Волчук, М. С. Штанденко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2018. – № 2. – С. 31–35. – Режим доступу : <https://doi.org/10.30838/I.BPSACEA.2312.290818.31.87>
13. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 5. – С. 12–18. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
14. Большаков В. И. Прогнозирование и управление качественными характеристиками прокатных валков / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 9. – С. 9–14. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/42101>
15. Большаков В. И. Пути прогноза механических свойств прокатных валков / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2014. – № 1. – С. 19–40. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/19-40>
16. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph / [B. B. Mandelbrot]. – New-York, San Francisco : Freeman, 1982. – 480 p. – Режим доступу : <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
17. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
18. Большаков В. И. Организация фрактального моделирования / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіди НАН України. – 2018. – № 6. – С. 67–72. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.067>
19. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіди НАН України. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
20. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіди НАН України. – 2017. – № 6. – С. 46–50. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00>
21. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіди НАН України. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступу : <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
22. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347–360.
23. Volchuk V. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // Tehnički glasnik – Technical Journal. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – Pp. 93–97. – Режим доступу : <https://hrcak.srce.hr/202359>
24. Fractals and properties of materials: monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступу : <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
25. Probability Theory : monograph / [A. Rényi]. – Amsterdam : North-Holland, 1970. – 670 p.
26. Волчук В. Н. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 12. – С. 10–14. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
27. 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. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>

## REFERENCES

1. Krivosheev A.E. *Litye valki* [Cast rolls]. Moscow : Metallurgy, 1957, 360 p. (in Russian).
2. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
3. 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).

4. Bolshakov 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]. *Metallovedeniye i termichna obrabotka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
5. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnologiyi vyrobnyctva masyvnoho metallevoho lyt'tya* [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).
6. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnologiy ta shlyakhy yikh realizatsiyi* [Stages multiparameter identification technologies and ways of their implementation]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2013, no. 8, pp. 66–72. (in Ukrainian).
7. 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).
8. 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).
9. Volchuk V.N. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By identifying areas compromise performance materials quality]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. (in Russian).
10. Kroviakov S., Mishutin A. and Pishev O. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, [S. 1.], vol. 7, no. 3.2, pp. 245.
11. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohozu mekhanichnykh vlastyvostry chavunnykh valkov* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. *ScienceRise*, 2018, vol. 11, pp. 57–61. (in Ukrainian).
12. Volchuk V.M. and Shtandenko M.S. *Matematychna model prohozu yakosti metalu* [Mathematical model of the metal quality forecast]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 2, pp. 31–35. (in Ukrainian).
13. 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 Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
14. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Prognozirovaniye i upravleniye kachestvennyimi kharakteristikami prokatnykh valkov* [Prediction and control of quality characteristics rolls]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 9, pp. 9–14. (in Russian).
15. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Puti prognoza mekhanicheskikh svoystv prokatnykh valkov* [Ways to forecast the mechanical properties of the rolls]. *Metallovedeniye i termichna obrabotka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 1, pp. 19–40. (in Russian).
16. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p.
17. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
18. Bol'shakov 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).
19. 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).
20. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fraktal'nyy podkhod pri identifikatsii slozhnykh sistem* [Fractal approach to the identification of complex systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 6, pp. 46–50. (in Russian).
21. 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).
22. Bolshakov V.I. and Volchuk V.N. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya veyvletno-mul'tifraktal'nogo podkhoda dlya otsenki struktury i svoystv malouglerodisty stali* [Material science aspects of the use of wavelet and multifractal approach for assessing the structure and properties of low-carbon steel]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2011, vol. 33, no. 3, pp. 347–360. (in Russian).
23. 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.
24. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
25. Rényi A. *Probability Theory*. Amsterdam : North-Holland, 1970, 670 p.
26. Volchuk V.M. *Opredeleniye chuvstvitelnosti mul'tifraktal'nykh kharakteristik metalla* [Determining the sensitivity of the multifractal characteristics of metals]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 12, pp. 10–14. (in Russian).
27. Volchuk V.N. *K voprosu o primeneni 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]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).

Надійшла до редакції 03.08.2018, прийнята до друку 27.08.2018

УДК 621.785:535.211:669.15-194:669.017  
DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250918.34.396

## ДРОБЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СКОРОСТНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

ГУБЕНКО С. И.<sup>1\*</sup>, д. т. н., проф.,  
НИКУЛЬЧЕНКО И. А.<sup>2</sup>, аспирант

<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: 0000-0001-0002-0003

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, ORCID ID: 0000-0011-0012-0013

**Аннотация. Цель.** Целью данной работы было изучение дробления неметаллических включений в процессе их скоростного плавления и кристаллизации при лазерной обработке. **Методика.** Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному облучению на установках ГОС–30М и КВАНТ–16. **Результаты.** Исследованы особенности контактного плавления неметаллических включений в условиях аномального массопереноса, способствующего дроблению включений в поверхностном слое упрочняемых стальных изделий. Показано, что дробление включений при лазерной обработке является фактором, определяющим уровень упрочнения сталей. **Научная новизна.** Изучение процессов скоростного плавления и затвердевания позволяет утверждать, что лазерное воздействие представляет собой способ изменения структуры и свойств неметаллических включений в поверхностных упрочненных слоях стальных изделий. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит разработать режимы лазерной обработки, позволяющие влиять на размеры, структуру, распределение и содержание включений в упрочненных слоях.

*Ключевые слова:* сталь; неметаллические включения; лазерное воздействие; плавление; дробление

## ДРОБЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В ПРОЦЕСІ ШВИДКІСНОГО ПЛАВЛЕННЯ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ДІЇ

ГУБЕНКО С. І.<sup>1\*</sup>, д. т. н., проф.,  
НИКУЛЬЧЕНКО І. О.<sup>2</sup>, аспірант

<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: 0000-0001-0002-0003

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, ORCID ID: 0000-0011-0012-0013

**Анотація. Мета.** Метою даної роботи було вивчення дроблення неметалевих включень в процесі їх швидкісного плавлення і кристалізації при лазерній обробці. **Методика.** Матеріалами для досліджень служили промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному опроміненню на установках ГОС–30М і КВАНТ–16. **Результати.** Досліджені особливості контактного плавлення неметалевих включень в умовах аномального масопереносу, що сприяє дробленню включень в поверхневому шарі сталевих виробів, що зміцнюють. Показано, що дроблення включень при лазерній обробці є фактором, який визначає рівень зміцнення сталей. **Наукова новизна.** Вивчення процесів швидкісного плавлення і затвердіння дозволяє стверджувати, що лазерний вплив являє собою спосіб зміни структури і властивостей неметалевих включень в поверхневих зміцнених шарах сталевих виробів. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити режими лазерної обробки, що дозволяють впливати на розміри, структуру, розподіл і вміст включень в зміцнених шарах.

*Ключові слова:* сталь; неметалеві включення; лазерна дія; плавлення; дроблення

## SPLITTING UP OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN THE PROCESS OF SPEED MELTING WITH LASER ACTION

GUBENKO S.I.<sup>1\*</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.  
NIKULCHENKO I.O.<sup>2</sup>, Postgrad. Stud.

<sup>1\*</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina Ave., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

<sup>2</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina Ave., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, ORCID ID: 0000-0011-0012-0013

**Abstract. Purpose.** The purpose of this work was to study the fragmentation of non-metallic inclusions in the process of their high-speed melting and crystallization during laser processing. **Methodology.** Materials for research were industrial steels containing various non-metallic inclusions. Samples of various steels with a pre-polished surface were subjected to laser irradiation at the GOS-30M and KVANT-16 installations. **Findings.** The features of contact melting of non-metallic inclusions under conditions of anomalous mass transfer, which promotes the crushing of inclusions in the surface layer of hardened steel products, were investigated. It is shown that crushing of inclusions during laser processing is a factor that determines the level of hardening of steels. **Originality.** The study of the processes of high-speed melting and solidification suggests that laser irradiation is a method of changing the structure and properties of non-metallic inclusions in surface hardened layers of steel products. **Practical value.** The using of the obtained results will allow us to develop laser processing modes that allow us to influence the size, structure, distribution and content of inclusions in the hardened layers.

*Keywords:* steel; non-metallic inclusions; laser action; melting; splitting

## Введение

Лазерное воздействие позволяет существенно влиять на размеры, фазовый состав и структуру, а также распределение неметаллических включений в поверхностном слое стальных изделий, подвергнутых лазерному упрочнению [1–4]. Поскольку лазерное излучение неоднородно по сечению, неоднородно и температурное поле в зоне облучения [5–7], поэтому на одном пятне облучения включения одного типа могут быть в разном состоянии. Как было показано в работах [1; 8], в момент лазерного воздействия тугоплавкие включения  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiN}$  оплавляются или остаются в твердом состоянии. Включения  $\text{FeO}$ ,  $\text{FeO}\text{--}\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}\text{--}\text{TiO}_2$ , имеющие более низкие температуры плавления, могут расплавиться, оплавиться или остаться твердыми. Легкоплавкие включения  $\text{FeO}\text{--}\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}\text{--}\text{SiO}_2$ ,  $2\text{FeOSiO}_2$ ,  $2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ , сульфиды, сульфидные и оксисульфидные эвтектики расплавляются и под действием ударной волны растекаются до поверхности образца. Одной из важных задач, связанных с уменьшением вредного влияния включений на свойства сталей, является уменьшение их размеров, поскольку известно, что это важный показатель, определяющий уровень концентрации деформационных и термических напряжений вблизи указанных частиц [1]. Целью данной работы было изучение дробления неметаллических включений в процессе их скоростного плавления и кристаллизации при лазерной обработке.

## Материалы и методики исследований.

Образцы сталей R7, НБ–57, 08кп, 08Х, 08Т, ЭЗ, 08Ю, ШХ15, 60Г с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному облучению на установках ГОС–30М и КВАНТ–16 при напряжении накачки 2,5 кВ и энергии импульса 10...30 Дж. Скорость нагрева в среднем составляла  $10^5$  °С/с, время воздействия импульса –  $1,0\text{...}6,0 \cdot 10^{-3}$  с, скорость охлаждения – в среднем  $10^6$  °С/с, плотность

мощности излучения –  $4 \cdot 10^4$  кВт/см<sup>2</sup>. Исследовали микроструктуру с помощью микроскопа «Неофот–21».

## Результаты исследований и их обсуждение

Известно, что лазерный нагрев поверхностного слоя изделия вплоть до температуры плавления стали и неметаллических включений происходит с очень высокой скоростью [5; 6]. Процесс плавления зависит от параметров теплового потока, неоднородность которого обусловлена различием теплопроводности и удельной теплоемкости включений и стальной матрицы [1; 2]. Эффективность лазерного плавления неметаллических включений и стальной матрицы зависит от характера распространения фронта плавления в поверхностном слое [5–7]. Неметаллические включения оказывают локальное влияние на характер распространения фронта плавления, способствуя его неоднородности. При этом плавление включений способствует химической и структурной неоднородности расплава, возникшего в момент лазерного воздействия в тонком поверхностном слое облучаемого изделия.

При лазерном воздействии возможно как плавление, так и частичное растворение неметаллических включений, причем тип включения, а также режим лазерной обработки определяют вероятность протекания этих процессов. Процессы растворения, плавления и дробления включений происходят, как правило, при их контакте с расплавленной стальной матрицей, хотя они возможны и в случае твердой матрицы [1; 2].

Частичное растворение включений в момент лазерного воздействия происходит при «разрушении» их поверхностного слоя в результате разупорядочения кристаллической решетки, если включение не плавится (рис. 1 а, б). В процессе растворения включения происходят неупорядоченные переходы атомов, входящих в состав включения через границу с расплавленной (либо твердой) матрицей. Очевидно, благодаря взаимному массопереносу элементов стальной матрицы в поверхностный слой включений происходит искажение решетки включения,



возникают напряжения и повышенная плотность дефектов кристаллического строения. Аномальный скоростной массоперенос через границы включение-матрица сопровождается обменом электронами между включениями и матрицей [9]. Следует отметить, что быстротечность импульсного лазерного воздействия не создает условий для полного растворения исходных включений. Глубина зоны растворения включений зависит от режима лазерной обработки: чем больше энергия импульса  $W$  и время воздействия  $\tau_{\text{имп}}$ , тем она больше. Атомы из растворенного поверхностного слоя включений проникают в окружающий расплав, что вызывает его насыщение и пересыщение элементами включения.

Плавление включений происходит путем неупорядоченных переходов его атомов через

границу с расплавленной матрицей. Механизм сверхскоростного плавления включений, как и их частичного растворения, связан с взаимным (включение  $\leftrightarrow$  матрица) скоростным массопереносом атомов через границы раздела, которые тоже плавятся. При этом аномальный скоростной массоперенос через границы включение-матрица сопровождается обменом электронами между включениями и матрицей [9], а также реализуется в условиях электромагнитного поля, индуцируемого лазерным излучением, под действием которого на компоненты сплавов возникают определенные силы, направление которых зависит от магнитных свойств этих компонентов [1; 2].

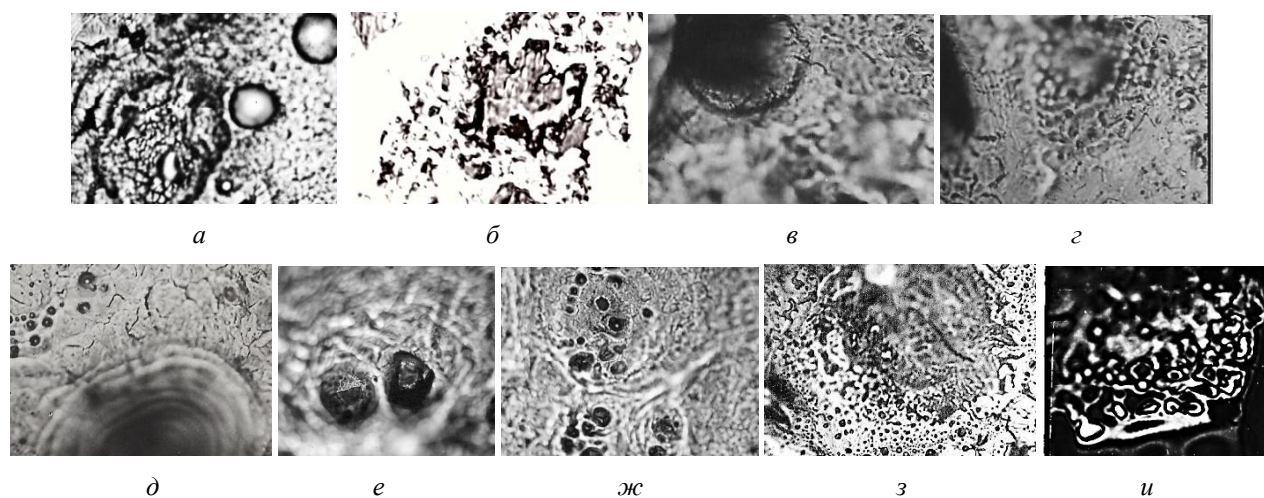


Рис. 1. Растворение, плавление и дробление неметаллических включений при лазерном воздействии;  $\times 500 \times 6$  /  
 Fig. 1. Dissolution, melting and crushing of non-metallic inclusions by laser exposure;  $\times 500 \times 6$

Рассмотрим процесс плавления включений, особенности которого определяют условия их дробления при лазерном воздействии. Скоростное плавление включений связано с рядом процессов, определяющих условия разрушения их кристаллической решетки (рис. 1 в, з). Во-первых, благодаря взаимному массопереносу элементов стальной матрицы в поверхностный слой включений искажается решетка включения, возникают напряжения и повышенная плотность дефектов кристаллического строения, что важно для рассмотрения теории дислокационного плавления применительно к включениям [10]. Согласно этой теории, сильно искаженные области с практически разупорядоченной решеткой могут быть зародышами жидкой фазы, которые целиком переходят в жидкую сталь, растворяясь в ней и насыщая прилегающие к включению участки матрицы элементами включения. При этом в расплаве вокруг исходного «материнского» включения появляется большое количество гетерофазных кластеров, состав и структура которых близки к таковым у включений. Очевидно, реализация такого механизма плавления включений определяется величиной напряжений,

создаваемых в их поверхностном слое. По-видимому, в условиях высокоскоростного лазерного воздействия при возникновении больших напряжений возможно практически безактивационное превращение сильно разупорядоченного поверхностного слоя включения в жидкое состояние благодаря образованию зародышей жидкой фазы, которые превращаются в кластеры, входящие в структуру неравновесного расплава.

Во-вторых, следует рассмотреть роль межфазных границ включение – матрица в процессе плавления включений в условиях ЛТО. Как было показано в работах [1; 2] под действием лазерного излучения исходная структура границ включение-матрица переходит в неравновесное высокоэнергетическое состояние, что вызывает развитие диссипативных процессов, связанных со стремлением системы включение-матрица к состоянию с минимумом свободной энергии. В результате система включение-матрица переходит к состоянию неустойчивого равновесия, которое определяет структуру и свойства лазерно-закаленной межфазной границы. В условиях скоростного импульсного лазерного воздействия

релаксационные процессы на границах включения – матрица практически не имеют времени для развития, поэтому напряжения на этих границах способствуют преимущественному развитию плавления включений вдоль границ включения – матрица и переходу отдельных зерен включения или их комплексов в окружающий расплав, в котором они затем плавятся как самостоятельные микровключения. Эти новообразования образуют кластеры в структуре расплава, которые по составу и структуре близки к включениям.

Как показано в работе [1], на скорость лазерного растворения и плавления должна влиять анизотропия поверхностных свойств включения. Вероятность массопереноса от включения в матрицу через границу их раздела тем больше, чем меньше разрывается межатомных связей, т. е. чем менее плотно упакована атомная плоскость. Включения с ярко выраженной анизотропией поверхностных свойств должны характеризоваться более высокой скоростью растворения. Процесс плавления включения сопровождается скоростным перераспределением сил межатомных связей в пользу атомов разного типа, имеющих благоприятное соотношение электроотрицательностей [11; 12].

В результате плавления стальной матрицы и включений образуется локальная микрометаллургическая ванна, в которой под действием лазерного излучения возникают гидродинамические потоки в условиях вихревого термокапиллярного перемешивания, что вызывает перемещение включений (рис. 1, *д-ж*). При лазерном плавлении включений возникают высокая степень неравновесности жидкой фазы, бифуркационная неустойчивость расплава и переход от ламинарного течения жидкости к турбулентному, что обеспечивает градиент колебательного давления на границе включения-матрица (жидкой, если расплавились и включение, и матрица, либо полужидкой, если матрица осталась твердой), контролирующей конвективные и аномальные потоки массопереноса [1; 12]. Это вносит элементы конвективного массопереноса элементов включения и матрицы в общий процесс аномального скоростного массопереноса [1; 12]. Оба механизма плавления и растворения включений, рассмотренные выше, свидетельствуют об образовании в поверхностном слое изделия, подвергнутом лазерному воздействию, локальных участков микрогетерогенного расплава, в структуре которого присутствуют кластеры или гетерофазные комплексы, сохраняющих сильное химическое взаимодействие атомов, входивших в состав исходных включений. Формируются локальные участки типа металлических эмульсионных расплавов, в которых при резком охлаждении гетерофазные кластеры кристаллизуются в «сателлитные» частицы. Таким образом, эти динамические кластеры являются центрами скоростной кристаллизации включений как

непосредственно в момент плавления исходных включений, так и при последующем охлаждении (рис. 1 з).

Процессы скоростных формирования «сателлитных» частиц и их роста сопровождаются аномальным массопереносом атомов из расплавленной стальной матрицы через границу их раздела к новым частицам. При этом, как и при плавлении включений [1–4], важную роль играет соотношение электроотрицательностей атомов различного типа [2; 11; 12], поскольку большая разница электроотрицательностей компонентов вызывает усиление связей между разнородными атомами и позволяет объяснить преимущественный массоперенос атомов определенных компонентов из жидкой матрицы к растущим «сателлитным» частицам. Кроме того, следует учитывать, что формирование и рост «сателлитных» частиц, как ранее было определено для процесса лазерного плавления включений [1–4], происходит в условиях, когда осуществляется обмен электронами между расплавом и новыми частичками [9], а также действия электромагнитного поля, индуцируемого лазерным излучением. Под влиянием электромагнитного поля на компоненты сплавов возникают определенные силы, направление которых зависит от магнитных свойств этих компонентов, которые способствуют аномальному перераспределению атомов элементов, обладающих разными магнитными свойствами (магнитным моментом) из расплавленной стальной матрицы к растущим «сателлитным» частицам. Таким образом, в процессе роста «сателлитных» частиц электронное взаимодействие между ними и расплавленной матрицей усложняется электромагнитным взаимодействием между атомами этих фаз.

Следует учитывать еще один возможный механизм дробления включений в условиях импульсного лазерного воздействия. Указанная обработка происходит при значительной энергии импульса, высокой удельной мощности излучения, кратковременности воздействия, больших скоростях нагрева и охлаждения, приводящие к протеканию плавления включений с очень высокой скоростью. В имеющейся литературе пока не произведены строгие количественные расчеты теплового, концентрационного и упругого полей, которые позволили бы выяснить, каково распределение температуры, концентрации компонентов, напряжений и деформаций, обусловленные спецификой воздействия луча лазера. В силу неоднородности излучения по сечению температурное поле в зоне облучения неоднородно. Кроме того, следует учитывать влияние включений на распределение температуры, поскольку они имеют большую поглощательную способность, чем матрица стали, а также различную теплопроводность включений и матрицы, что усугубляет температурную микронеоднородность. Как было показано в работах [1; 5; 6] воздействие луча

импульсного лазера подобно взрыву. В ударных волнах развиваются огромные давления, приводящие к возникновению значительных напряжений, которые способствуют реализации аномального массопереноса, который обсуждался выше. Кроме того, при давлении ударного сжатия эти напряжения могут превысить величину временного сопротивления твердого включения, разогретого до высоких температур. В результате происходит разрушение твердых тугоплавких включений по вязкому либо хрупкому механизму в зависимости от природы включения и невозможности скоростной релаксации в нем напряжений в условиях кратковременного импульсного лазерного воздействия. Очевидно, при таком разрушении включений происходит разрыв межатомных связей вдоль плоскостей спайности их кристаллической решетки и осколки разрушенных включений перемещаются в расплавленной стальной матрице как самостоятельные включения и могут плавиться. Включения с ярко выраженной анизотропией поверхностных свойств должны иметь более высокую способность к разрушению.

Что касается легкоплавких включений, переходящих в жидкое состояние при любом режиме лазерного воздействия, то значительные напряжения, развивающиеся в ударных волнах при импульсном лазерном воздействии, способны разрушать их путем разделения на отдельные капли. Разрушение жидких включений происходит путем разрыва межатомных связей. Эти капли становятся кратковременными

элементами структуры расплава и перемещаются в нем под действием гидродинамических потоков в условиях вихревого термокапиллярного перемешивания. Поведение новых капель в металлическом расплаве определяется соотношением их вязкостей, а также поверхностным натяжением и характером смачивания капель бывших включений расплавом. Капли, образовавшиеся при разрушении жидких включений, находятся в условиях, когда осуществляется обмен электронами между ними и расплавом [9], а также действия электромагнитного поля, индуцируемого лазерным излучением, которое оказывает влияние на аномальное перераспределение атомов элементов, обладающих разными магнитными свойствами (магнитным моментом). В процессе скоростного охлаждения после лазерного воздействия эти капли затвердевают как новые неметаллические включения. В результате вместо исходных включений возникают участки с дисперсными частицами (рис. 1 и).

В результате наложения нескольких процессов – плавления (или частичного растворения) исходных включений и образования новых «спутельных» частиц, а также механического дробления твердых либо жидких включений в условиях лазерного воздействия существенно уменьшается средний размер неметаллических включений, а также уровень загрязненности сталей в поверхностном слое изделий (табл. 1). С помощью лазерной обработки удалось уменьшить средние размеры включений и загрязненность ими стали на 30...50 %.

Таблица 1

**Влияние лазерного воздействия на объемную долю включений  $f$  и средний размер включений  $D_v$  в колесной стали (энергия импульса 25 Дж, время воздействия  $3,6 \times 10^{-3}$ , с) /**  
**The influence of laser irradiation on the volume fraction of inclusions  $f$  and the average size of inclusions  $D_v$  in wheel steel (pulse energy 25 J, exposure time  $3,6 \times 10^{-3}$ , sec)**

Включение	$f$ , об % (до ЛТО)	$D_v$ , мкм (до ЛТО)
FeO – MnO	0,17 (0,28)	13,2 (20,0)
MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15 (0,25)	15,5 (25,0)
FeS – MnS	0,20 (0,36)	9,4 (16,2)
MnO·SiO <sub>2</sub>	0,17 (0,29)	23,5 (36,1)

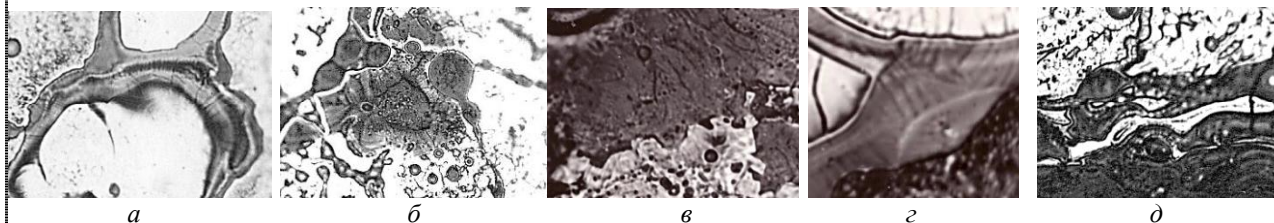


Рис. 2. Зоны скоростной кристаллизации в неметаллических включениях в колесной стали;  $\times 500$  /  
 Fig. 2. Zones of high-speed crystallization in non-metallic inclusions in wheel steel;  $\times 500$

При закалке из жидкого состояния во включениях возникла зона скоростной кристаллизации, для которой характерны зоны ликвации, ультрамелкозернистость, столбчатая форма зерен, зоны

локальных микросдвигов, частички метастабильных фаз (рис. 2).

## Выводы

Изучение процессов скоростного плавления и затвердевания позволяет утверждать, что лазерное воздействие представляет собой способ изменения структуры и свойств неметаллических включений в поверхностных упрочненных слоях стальных изделий. Исследованы особенности контактного

плавления неметаллических включений в условиях аномального массопереноса, способствующего дроблению включений в поверхностном слое упрочняемых стальных изделий. Показано, что дробление включений при лазерной обработке является фактором, определяющим уровень упрочнения сталей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неметаллические включения в стали : монография / [С. И. Губенко, С. П. Ошкадеров]. – Киев : Наукова думка, 2016. – 528 с.
2. Губенко С. И. Плавление и кристаллизация неметаллических включений и стальной матрицы при лазерной обработке / С. И. Губенко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – Вип. 46. – № 3. – С. 73–79.
3. Губенко С. И. Особливості швидкісного плавлення та твердіння неметалевих включень при лазерній обробці сталі / С. И. Губенко, В. М. Беспалько, І. А. Нікульченко // Металознавство та обробка металів. – 2017. – № 2 (87). – С. 54–59.
4. Губенко С. И. Скоростные плавление и кристаллизация неметаллических включений в сталях при лазерном воздействии : сб. праць XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» / Губенко С. И., Нікульченко І. А. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – С. 297–306.
5. Структура и свойства сплавов обработанных излучением лазера : монография / [М. А. Криштал, А. А. Жуков, А. Н. Кокора]. – Москва : Metallurgy, 1973. – 192 с.
6. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов : монография / [П. А. Леонтьев, Н. Т. Чеканов, М. Г. Хан]. – Москва : Metallurgy, 1986. – 142 с.
7. Денисенко О. І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 9. – № 1 (2008). – С. 181–184.
8. Губенко С. И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение – матрица при высокоэнергетических обработках / С. И. Губенко // Металлофизика, новейшие технологии. – 2014. – Т. 36. – № 3. – С. 287–315.
9. Электронная локализация в твердом теле : монография [Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф.]. – Москва : Наука, 1976. – 339 с.
10. Капиллярные явления в процессах роста и плавления кристаллов : монография [Найдич Ю. В., Перевертайло В. М., Григоренко Н. Ф.]. – Киев : Наукова думка, 1983. – 100 с.
11. Равдель А. А. Приложение теории активированного комплекса к реакциям растворения / А. А. Раздель // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1979. – № 4. – С. 47–51.
12. Губенко С. И. Лазерное плавление и кристаллизация неметаллических включений и стальной матрицы / С. И. Губенко // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 38–50.

## REFERENCES

1. Gubenko S.I. and Oshkadepov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova dumka, 2016, 528 p. (in Russian).
2. Gubenko S.I. *Plavlenie i kristallizatsia nemetallicheskih vkluchenij i stalnoy matritsi pri lazernoy obrabotke* [Melting and crystallization of non-metallic inclusions and the steel matrix during laser processing]. *Fiziko-himichna mehanika materialiv* [Physical and chemical mechanics of materials]. 2010, vol. 46, no. 3, pp. 73–79 (in Russian).
3. Gubenko S.I., Bespalko V.N. and Nikulchenko I.A. *Osoblivosti shvidkissnogo plavlennya ta tverdinnya nemetalevih vkluchenij pri lazernij obrobtsi stali* [Features of high-speed melting and hardening of non-metallic inclusions during laser machining of steel]. *Metaloznnavstvo ta obrobka metaliv* [Metal Science and Treatment of Metals]. 2017, vol. 87, no. 2, pp. 54–59 (in Ukrainian).
4. Gubenko S.I. and Nikulchenko I.A. *Skorostnie plavlenie i kristallizatsiya nemetalevih vkluchenij pri lazernom vozdeystvii* [High-speed melting and crystallization of non-metallic inclusions in steels under laser irradiation]. Collect of Works of the XIV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow”, Kyiv, NTUU “KPI”, 2016, pp. 297–306 (in Russian).
5. Kryshhtal M.A., Zhukov A.A. and Kokora A.H. *Struktuta i svojstva cplavov obrabotannih izlucheniem lasera* [Structure and properties of alloys treating with laser beam]. Moscow : Metallurgy Publ., 1973, 192 p. (in Russian).
6. Leontjev P.A., Chekanov N.T. and Han M.G. *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1986, 142 p. (in Russian).
7. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181–184 (in Ukrainian).
8. Gubenko S.I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij i mizhphasnih granits vcluchenie-matritsa pri visokoenergeticheskij obrabotkah* [Possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries under high-energy treatments]. *Metalliphizika, noveishie tehnologii* [Metal Physics, New Technologies]. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 287–315 (in Russian).
9. Samsonov G.V., Priadko I.F. and Priadko L.F. *Elektronnaya lokalizatsiya v tverdom tele* [Electronic localization in solids]. Moscow : Science Publ., 1976, 339 p. (in Russian).

10. Naidich Yu.V., Perevertailo V.M. and Grigorenko N.F. *Kapilyarnie yavleniya v protsesah rosta i plavleniya kristallov* [Capillary phenomena in the growth and melting of crystals]. Kyiv : Naukova dumka, 1983, 100 p. (in Russian).
11. Ravdel A.A. *Prilozhenie teorii aktivirovannogo kompleksa k realizatsii rastvoreniya* [Application of the theory of an activated complex to dissolution reactions]. *Adgeziya rasplavov i pajka materialov* [Adhesion of melts and soldering of materials], 1979, no. 4, pp. 47–51 (in Russian).
12. Gubenko S.I. *Lazernoe plavlenie i kristallizatsiya nemetallicheskih vklucheniy i stalnoy matritsi* [Laser melting and crystallization of non-metallic inclusions and steel matrix]. *Vysoko`energeticheskaya obrabotka materialov* [High-energy processing of materials]. Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2009, pp. 38–50. (in Russian).

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Куцовой В. З. (Украина), д-ром техн. наук, проф. Большаковым В. И. (Украина).*

Поступила в редакцию 05.08.2018.

Принята к печати 29.08.2018.