

## КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ МОРФОЛОГІЇ ВПОРЯДКОВАНОГО РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ СТАЛІ 15X13МФ ПІСЛЯ ІМПУЛЬСНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЛАЗЕРОМ

П. О. МАРУЩАК<sup>1</sup>, І. В. КОНОВАЛЕНКО<sup>1</sup>, В. С. МОЧАРСЬКИЙ<sup>1</sup>,  
А. П. СОРОЧАК<sup>1</sup>, Б. І. РАБИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Ідентифіковано та кількісно проаналізовано цифрові зображення впорядкованого рельєфу на поверхні сталі 15X13МФ, обробленої потужним лазерним імпульсом. Стан поверхні оцінено після опромінення в різних середовищах. Встановлено, що рельєф, сформований на поверхні модифікованого матеріалу, має ознаки хвилястої структури, для якої визначено певні інтегральні параметри зображення.

**Ключові слова:** імпульсне лазерне оброблення, кількісний аналіз морфології поверхні, параметри рельєфу.

Поверхневий шар матеріалу розглядають як особливу деформаційну підсистему з інтенсивними зсувними та ротаційними переміщеннями, які зумовлюють виникнення у цьому шарі нелінійних хвильових процесів з утворенням регулярного або впорядкованого рельєфу [1]. Саме це вважають передумовою модифікування поверхневих шарів матеріалів та нанесення на них захисних покриттів [1, 2].

Деформаційні процеси у системі основа–покрив мають складний та неоднорідний характер. Основні закономірності формування рельєфу за “шахового” розподілу розтягувальних та стискальних напружень на поверхні циклічно деформованого матеріалу проаналізовано в працях [3, 4]. Відомі результати розрахунків нормальних та дотичних напружень вздовж площини поверхневий шар–основа [5], які показали періодичний характер розподілу обох напружень на межі поділу середовищ з різними модулями пружності чи коефіцієнтами термічного розширення. На основі аналізу умов імпульсного лазерного оброблення та відомих методів оцінювання рельєфу поверхневих шарів низки матеріалів запропоновані підходи для кількісного оцінювання параметрів рельєфу з хвилястими структурами на модифікованій поверхні [6]. Технологічна складність, недостатня точність і надійність відомих інструментальних методів визначення стану поверхні обмежують їх практичне використання [7].

Кількісне оцінювання параметрів впорядкованого рельєфу на поверхні дасть змогу не лише передбачати місце і момент виникнення тріщини, але й виявляти фізичні передумови її зародження. На етапі розроблення технології модифікування поверхні матеріалу таке прогнозування суттєво зменшує вартість натурних випроб і скорочує їх тривалість, а під час експлуатації – підвищує надійність конструктивних елементів [8]. Важливо також з'ясувати закономірності впливу інтенсивності лазерного імпульсного оброблення на характеристики сформованого на поверхні сталі впорядкованого рельєфу [9].

Мета роботи – оцінити інтегральні параметри рельєфу поверхні сталі 15X13МФ після її імпульсного оброблення лазером на основі комп'ютерного аналізу цифрових зображень.

**Методика досліджень.** Поверхню плоских зразків (10×5×3 mm) зі сталі 15X13MФ обробляли на повітрі, у воді та чорнилі лазером ГОС-1001 з LiF затвором в імпульсному режимі модульованої добротності з коротким імпульсом випромінювання (зазвичай становить десятки наносекунд). Діапазон зміни густини потоку випромінювання  $5 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ , а діаметр зони оброблення 3 mm. Прозоре конденсоване середовище обмежило розширення плазми і підвищило амплітуду імпульсу тиску  $P = 2 \text{ GPa}$  [10]. Рельєф поверхонь оброблених зразків досліджували і фіксували на інтерференційному профілометрі “Мікрон-альфа”.

Цифрові зображення рельєфу поверхні зразків після лазерного імпульсного оброблення та їх бінаризовані зображення наведені на рис. 1.

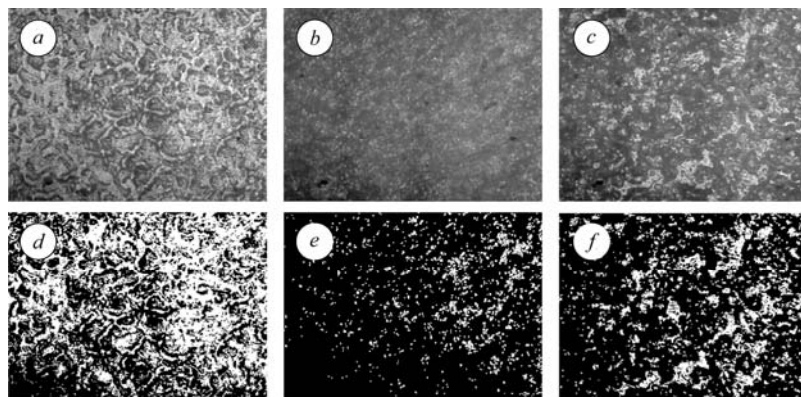


Рис. 1. Вихідні (a–c) та бінаризовані (d–f) зображення впорядкованих структур на поверхні сталі 15X13MФ після лазерного імпульсного оброблення на повітрі (a, d), у воді (b, e) і чорнилі (c, f).

Fig. 1. Original (a–c) and binarized (d–f) images of the ordered structures on the surface of 15X13MФ steel after laser pulse treatment in air (a, d), in water (b, e) and in ink (c, f).

**Фізико-механічні передумови діагностування стану поверхні.** Методика досліджень морфології поверхні матеріалу ґрунтується на підходах фізичної мезомеханіки, де поверхня є складноорганізованою системою складників, виділених на різних масштабних рівнях [1]. Під морфологією рельєфу поверхні розуміли її будову та параметри рельєфу. Стан поверхні аналізували на кількох масштабних рівнях. Зокрема, на мікрорівні рельєф на поверхні матеріалу формується внаслідок зародження, руху, анігіляції дислокацій тощо, на мезорівні – внаслідок кооперативних процесів пластичного деформування та самоорганізації, а на макрорівні – внаслідок локалізації деформації на макроскопічному рівні, сумірному з розмірами самого об’єкта [1, 9]. Інформативні ознаки рельєфу поверхні досліджених зразків узагальнено у табл. 1.

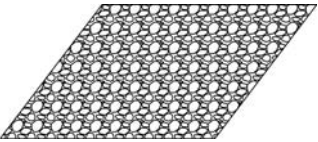
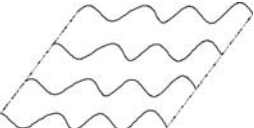

**Алгоритм ідентифікації інформативних ознак рельєфу поверхні.** Запропоновано алгоритм комп’ютерного визначення параметрів рельєфу поверхні. Стан поверхні оцінювали шляхом аналізу її цифрових зображень після лазерного імпульсного оброблення. Алгоритмом розпізнавання інформативних елементів рельєфу на цифровому зображенні поверхні зразка передбачено операції фільтрування, бінаризації та виділення інформативних ознак для визначення параметрів поверхні [11]. Вихідні кольорові зображення (рис. 1a–c) перетворювали у “сірі” з функцією яскравості  $I$  за принципом, прийнятим у стандарті телебачення NTSC [12].

Для кожної точки зображення розраховували абсолютне значення горизонтального та вертикального градієнтів яскравості з використанням оператора Собела:

$$\nabla I_h(i, j) = \left| \frac{\partial I(i, j)}{\partial j} \right|, \quad \nabla I_v(i, j) = \left| \frac{\partial I(i, j)}{\partial i} \right|, \quad (1)$$

де  $i, j$  – відповідно індекси стовпчиків ( $i \in [1 \dots n]$ ) та рядків ( $j \in [1 \dots m]$ ) на зображенні з яскравістю  $I$ .

**Таблиця 1. Схематичне подання рельєфу поверхні досліджених зразків на різних масштабних рівнях та його інформативні ознаки**

Рельєф поверхні		
Схематичне подання	Масштабний рівень	Інформативні ознаки
	Макрорівень	Гradient кольору поверхні
	Мезорівень	Просторова структура рельєфу у вигляді впорядкованої системи виступів та западин
	Мікрорівень	Усереднений параметр елементарної ознаки рельєфу

Для загальної оцінки стану досліджуваної поверхні використали середні значення горизонтального та вертикального gradientів яскравості зображення:

$$G_h = \overline{\nabla I_h} = \frac{1}{mn} \int_0^n \int_0^m \nabla I_h(i, j) didj, \quad G_v = \overline{\nabla I_v} = \frac{1}{mn} \int_0^n \int_0^m \nabla I_v(i, j) didj. \quad (2)$$

Ці gradientи дають змогу оцінити переважний напрям формування хвилястих структур на досліджуваній поверхні та ступінь їх неоднорідності [10]. Нижче середнє значення gradientа свідчить про незначну зміну інтенсивності вздовж обраної лінії на зображенні. Практично це означає, що в певному напрямі структура рельєфу поверхні є одноріднішою [13]. Цей напрям вказує на вісь координат, яка відповідає напрямку найбільшої модифікації поверхні.

Щоб виділити інформативні ознаки, які пов'язані з модифікуванням поверхні, до отриманого зображення у градаціях сірого кольору застосували бінарне перетворення [14]. В результаті цього отримали чорно-біле зображення модифікованої поверхні з функцією інтенсивності  $I_B$ , на якому білі пікселі відповідали фону, а чорні – інформативним елементам впорядкованих структур (рис. 1d-f).

Найуживанішим інформативним параметром, який дає змогу оцінити ступінь модифікації поверхні на основі її зображення, є відносна площа, яка відповідає певним інформативним морфологічним ознакам [15]:

$$S_d = \frac{S}{m \cdot n} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $S$  – кількість пікселів, що відповідають впорядкованим елементам рельєфу поверхні на зображенні  $I_B$ ;  $m$  та  $n$  – відповідно ширина та висота цього зображення.

Розподіл впорядкованих елементів рельєфу вздовж осей зображення описують вертикальна  $H_v$  і горизонтальна  $H_h$  гістограми [11]:

$$H_h = \{H_h(i); i \in [1 \dots n]\}, \quad H_v = \{H_v(j); j \in [1 \dots m]\}, \quad (4)$$

$$\text{де } H_h(i) = \sum_{j=1}^m I(i, j), \quad H_v(j) = \sum_{i=1}^n I(i, j).$$

Кожен елемент гістограм містить кількість пікселів, що відповідають кількості впорядкованих елементів рельєфу у відповідних стовпчиках та рядках аналізу.

ваного зображення. Функції гістограм (4) містять базовий масив інформації про розподіл впорядкованих елементів рельєфу вздовж координатних осей зображення.

Для узагальненої оцінки пошкоджень поверхні використали середні значення гістограм  $\mu_v = S/m$  та  $\mu_h = S/n$  (де  $S$  – загальна кількість пікселів). Проте ці параметри доцільні під час великих об'ємів вимірювань за однакових умов та незмінного прямокутного вікна спостереження. В лабораторних умовах для дослідження різних зразків, особливо за різних умов формування рельєфу на поверхні, середні значення гістограм малоінформативні. Крім того, за використання прямокутного вікна спостереження значення  $\mu_v$  та  $\mu_h$  по-різному масштабовані (відносно розмірів зображення) і тому незручні для порівняння, а за квадратного вікна вони стають однаковими.

За допомогою швидкого перетворення Фур'є функції гістограм (4) подали у вигляді ряду:

$$H_h(i) \approx A_{h0} + \sum_{k=1}^{K_h} A_{hk} \cos(2\pi \frac{k}{n} i - \vartheta_h), \quad H_v(j) \approx A_{v0} + \sum_{k=1}^{K_v} A_{vk} \cos(2\pi \frac{k}{m} j - \vartheta_v), \quad (5)$$

де  $A_h, A_v$  та  $\vartheta_h, \vartheta_v$  – амплітуди та фази гармонік, відповідно;  $k$  – номер гармоніки.

Приймали таку кількість гармонік розкладу  $K_h, K_v$ , щоб точність подання функції гістограми у вигляді суми гармонік була не нижчою за підібране емпірично граничне значення  $\varepsilon$ , яке залежить від виду зображення:

$$\left| H_h(i) - \sum_{k=0}^{K_h} A_{hk} \cos(2\pi \frac{k}{n} i - \vartheta_h) \right| \leq \varepsilon, \quad \left| H_v(j) - \sum_{k=0}^{K_v} A_{vk} \cos(2\pi \frac{k}{m} j - \vartheta_v) \right| \leq \varepsilon. \quad (6)$$

Як інформативні параметри вибрали середні амплітуди гармонік спектра функцій горизонтальної та вертикальної гістограм  $A_{ah}, A_{av}$ :

$$A_{ah} = \frac{1}{K_h} \sum_{k=0}^{K_h} A_{hk}, \quad A_{av} = \frac{1}{K_v} \sum_{k=0}^{K_v} A_{vk}. \quad (7)$$

Середня амплітуда спектра дає можливість кількісно оцінити переважні напрями розташування інформативних елементів рельєфу поверхні. Що вищі її значення, то більша рельєфність модифікованої поверхні у цьому напрямі. Отже, порівнюючи значення  $A_{ah}, A_{av}$ , можна судити про переважний напрям формування елементів рельєфу на модифікованій поверхні.

Пара узагальнених характеристик (середніх градієнтів  $G_h, G_v$  та амплітуд спектра  $A_{ah}, A_{av}$ ) дає можливість отримати інтегральну характеристику аналізованого зображення у двох взаємно перпендикулярних напрямках [15].

**Інтегральні параметри елементів рельєфу на поверхні.** За умов надшвидкої кристалізації металу в його поверхневих шарах можна відзначити два принципово відмінні механізми метастабільного стану матеріалу: зростання вільної енергії матеріалу внаслідок збільшення енергії центрів кристалізації; утворення пересиченого твердого розчину з виникненням напружень та локальних температурно-силових полів. Таким чином, відбувається багаторівнева фрагментація поверхні металу з формуванням рельєфу зі впорядкованою структурою, геометричні ознаки якої визначені умовами лазерного оброблення матеріалу [16, 17].

Правомірність застосування терміну “впорядкований рельєф” доведена результатами досліджень оброблених поверхонь з використанням оптичної і електронної мікроскопії [1, 3]. Закономірності зміни обчислених інтегральних параметрів впорядкованого рельєфу за імпульсного лазерного оброблення в різних середовищах наведені на рис. 2. Рельєф на модифікованій поверхні виникає внаслідок швидкого охолодження металу, що спричиняє значну термодинамічну нестабільність поверхневого шару і забезпечує йому унікальні механічні властивості. Пластичне течіння металу у зоні обмеженої деформації поверхневого шару

має яскраво виражений хвильовий характер. При цьому метал у зоні оброблення ділиться на окремі ділянки, роз'єднані зонами ламінарного плинну різної інтенсивності. Адже відомо, що градієнт напружень зумовлює хвильовий характер поширення пластичної деформації і пов'язаний з цим дискретний характер ділянок релаксації і локалізації напружень, спричиняючи морфологічні зміни в металі [18].

З фізичної точки зору на поверхні металу формується прошарок, який має вищі ніж в його об'ємі модуль пружності та мікротвердість (утворюється своєрідний "покрив"). При цьому рельєф поверхневого шару металу стає хвилястим з утворенням "виступів" та "западин". За результатами обробки зображення можна отримати вертикальну  $H_v$  та горизонтальну  $H_h$  гістограми інтегральних інтенсивностей бінарного зображення з впорядкованим рельєфом поверхні зразків [11].

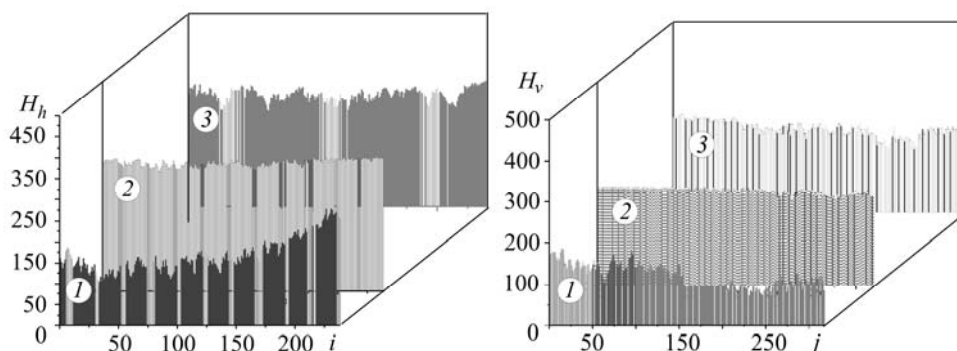


Рис. 2. Горизонтальна  $H_h$  (a) і вертикальна  $H_v$  (b) гістограми інтегральних інтенсивностей бінарних зображень впорядкованого рельєфу поверхонь зразків сталі 15X13MФ після їх лазерного імпульсного оброблення на повітрі (1), у воді (2) і чорнилі (3).

Fig. 2. Horizontal  $H_h$  (a) and vertical  $H_v$  (b) histograms of integrated intensities of the binary images of the ordered surfaces relief for the specimens made of 15X13MФ steel after their laser pulse treatment in air (1), in water (2) and in ink (3).

Отже, вихідним базовим масивом даних служили гістограми розподілу впорядкованих елементів рельєфу (рис. 2). На їх основі оцінили морфологічні параметри впорядкованих структур рельєфу на поверхні зразків, оброблених лазером (табл. 2).

*Оброблення на повітрі.* На поверхні металу сформувався деформаційний рельєф з хвилеподібною структурою розташування виступів та западин (рис. 2a, гістограма 1).

*Оброблення у воді.* Сформувався дещо розорієнтований рельєф (рис. 2a, гістограма 2). Нижчий (порівняно з горизонтальним) вертикальний градієнт рельєфу (рис. 2b) вказує на те, що вздовж вертикальної осі формується однорідніша впорядкована структура рельєфу. Водночас у горизонтальному напрямі градієнт інтегральної інтенсивності бінарних зображень впорядкованого рельєфу поверхонь зразків змінювався істотніше. Нижчим градієнтам відповідають напрями, вздовж яких орієнтований рельєф поверхні. Монотонне зростання параметрів  $G_h$ ,  $G_v$  підтверджує раніше зроблений

**Таблиця 2. Морфологічні параметри впорядкованих структур рельєфу на поверхні зразків сталі 15X13MФ після їх оброблення лазером у різних середовищах**

Середовище оброблення	Параметри впорядкованої структури рельєфу			
	$G_h$	$G_v$	$A_{ah}$	$A_{av}$
повітря	11286,4	8201,8	1,7	1,3
вода	3380,3	2610,3	0,5	0,5
чорнило	6783,0	5275,8	1,1	0,9

висновок [11] про повторюваність та масштабування сформованих деформаційної структур.

*Оброблення у чорнилі.* Дещо іншу морфологію впорядкованого рельєфу (порівняно з отриманою на повітрі) отримали за оброблення в чорнилі (рис. 2а, гістограма 3), що зумовлено тиском плазми. Крім того, вода та чорнило перерозподіляють поглинальну здатність середовища. Форма деталей зі сформованим рельєфом пов'язана не лише з тепловим впливом розплаву у поверхневому шарі зразка, але з виникненням в ньому високого тиску внаслідок значних стискальних напружень [19].

**Двовимірна оцінка морфології рельєфу з впорядкованими структурами.** За імпульсного лазерного впливу на поверхневий шар металу в ньому виникає двофазний стан (рідина на поверхні + тверда основа). Релаксація напружень у металі відбувається шляхом структурування поверхні, розвиток якого припиняється за встановлення динамічної рівноваги між кристалічною та рідкою фазами. При цьому виявили, що зміна середовища оброблення не змінює загальної тенденції утворення рельєфу, проте змінює його параметри: висоту виступів та глибину западин (рис. 3).

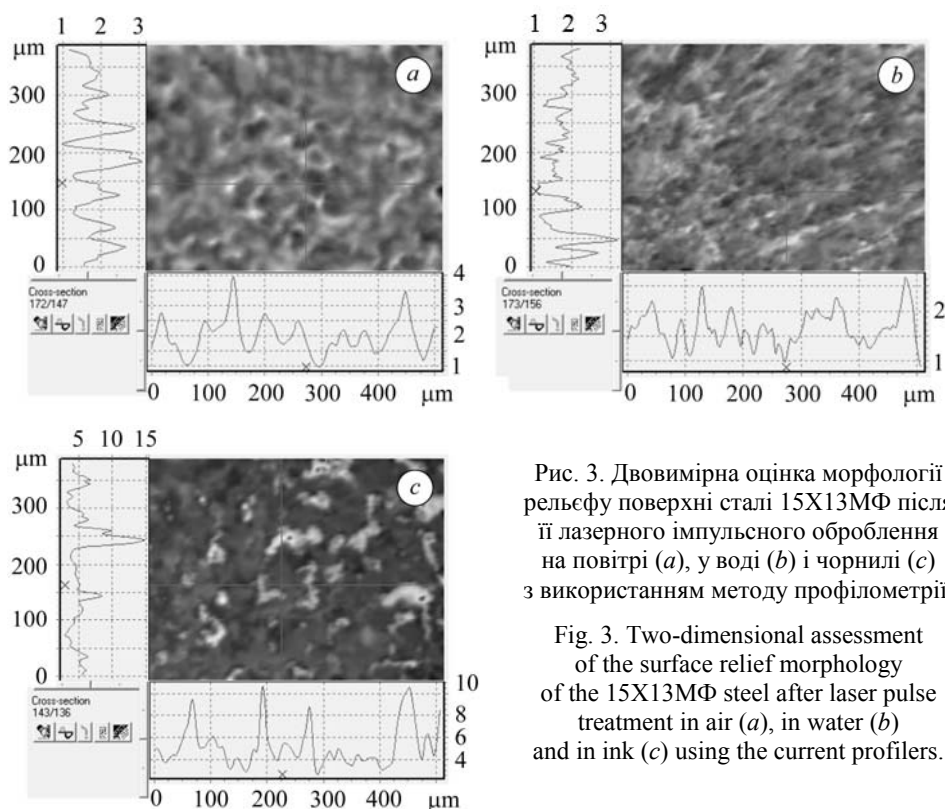


Рис. 3. Двовимірна оцінка морфології рельєфу поверхні сталі 15X13МФ після її лазерного імпульсного оброблення на повітрі (а), у воді (b) і чорнилі (c) з використанням методу профілометрії.

Fig. 3. Two-dimensional assessment of the surface relief morphology of the 15X13MФ steel after laser pulse treatment in air (a), in water (b) and in ink (c) using the current profilers.

Можна припустити, що неоднорідність на межі поділу системи поверхневий шар–тверда основа є однією з причин формування впорядкованих структур на поверхні. Завдяки мікрогетерогенності структури метал має певну неоднорідність фізико-механічних властивостей, що під час лазерного оброблення спричиняє різні за інтенсивністю збурення, які залежать від розподілу напружень та деформацій на локальному рівні. Результуюче поле переміщень фіксується на поверхні металу у вигляді періодичної системи деформаційних хвиль [20].

Розвинуті підходи дають змогу аналізувати кількісні показники морфології поверхневих шарів сталей після лазерного оброблення. Порівняння та можливості розробленого та відомого методів аналізу наведені у табл. 3.

**Таблиця 3. Підходи та можливість їх використання для діагностування параметрів морфології рельєфу обробленої поверхні**

Підходи	Мікро-рівень	Мезо-рівень	Макро-рівень
Оптико-цифровий аналіз	–	+	+
2D профілометрія	+	+	–

Метод оптико-цифрового контролю виявився перспективним для оцінювання морфологічних особливостей обробленої лазером поверхні на мезо- і макрорівнях і може бути основою для експрес-аналізу технічного стану поверхні конструкційних елементів. Проте для достовірнішого оцінювання стану поверхні слід використовувати комплекс методів дефектоскопії [21–23].

### ВИСНОВКИ

Розроблено метод оцінювання морфологічних особливостей поверхні сталі 15X13МФ після оброблення потужними лазерними імпульсами шляхом аналізу її цифрових зображень та розрахунку множини інтегральних параметрів: відносних площ модифікованої поверхні, середніх градієнтів яскравостей зображення та амплітуд спектра функцій гістограм. Необхідною передумовою використання запропонованого методу є достатній градієнт рельєфу модифікованої поверхні металу і візуалізація його ознак методами оптичної мікроскопії.

Методом двовимірної профілометрії встановлено параметри рельєфу обробленої поверхні. Формування на поверхні впорядкованого деформаційного рельєфу пов'язали з термічним чинником від розплавленого поверхневого шару металу.

*РЕЗЮМЕ.* Идентифицированы и проанализированы цифровые изображения упорядоченного рельефа, сформированного на поверхности стали 15X13МФ после обработки мощным лазерным импульсом. Проведена оценка состояния поверхности по результатам рассмотрения различных схем облучения материала. Установлено, что волновым структурам, сформированным на поверхности модифицированного материала, соответствуют определенные значения интегральных параметров изображения.

*SUMMARY.* The identification and quantitative analysis of the ordered relief formed on the 15X13МФ steel surface after the steel treatment by powerful laser pulse according to the digital images was done. It was established that surface conditions were assessed by the analysis of different schemes of material irradiation. It was established that the wave structures formed on the surface of the modified material correspond to the values of the image integral parameters.

1. *Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В.* Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2008. – 286 с.
2. *Structural steels surface modification by mechanical pulse treatment for corrosion protection and wear resistance / H. M. Nykyforchyn, V. I. Kyryliv, Dz. V. Slobodjan, Ju. M. Koval // Surface and Coatings Technology. – 1998. – 100–101 (1–3). – P. 125–127.*
3. *Significant correlation between macroscopic and microscopic parameters for the description of localized plastic flow auto-waves in deforming alloys / S. A. Barannikova, A. V. Ponomareva, L. B. Zuev et al. // Solid State Communications. – 2012. – 9. – P. 784–787.*
4. *Panin V. E.* Wave nature of plastic deformation in solids // *Russian Physics J.* – 1990. – 33, № 2. – P. 99–110.
5. *The chess-board effect in the stress-strain distribution at interfaces of a loaded solid / V. E. Panin, A. V. Panin, D. D. Moiseenko et al. // Doklady Physics. – 2006. – 51, № 8. – P. 408–411.*
6. *Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review / C. S. Montross, T. Wei, L. Ye et al. // Int. J. of Fatigue. – 2002. – 24 (10). – P. 1021–1036.*

7. *Mesomechanics* and hierarchical levels of fatigue crack growth in 25Cr1Mo1V steel / P. V. Yasniy, P. O. Maruschak, S. V. Panin, P. S. Lyubutin // *Int. J. of Terraspace Sci. and Engng.* – 2011. – **3**. – P. 169–175.
8. *Self-organization* of structure of heat resistant steels at dynamic non-equilibrium processes / N. G. Chausov, P. O. Maruschak, O. Pretkovskis et al. // *Abstr. of the 9<sup>th</sup> Int. Conf. “Mechatronic Systems and Materials”* (July 1–3). – Lithuania: Vilnius, 2013. – P. 39.
9. *Physical regularities* in the cracking of nanocoatings and a method for an automated determination of the crack-network parameters / P. Maruschak, V. Gliha, I. Konovalenko et al. // *Materiali in Tehnologije.* – 2012. – **46**. – P. 525–529.
10. *Morphology* of periodical structures on surface of steel 15Kh13MF after the nanosecond laser irradiation accompanied by generation of shock waves / P. O. Maruschak, V. S. Mocharskyi, I. M. Zakiev, Yu. M. Nikiforov // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Oxide Materials for Electronic Engng* (September 3–7). – Lviv, 2012. – P. 192–193.
11. *A novel algorithm* for damage analysis of fatigue sensor by surface deformation relief parameters / I. Konovalenko, P. Maruschak, A. Menou et al. // *Proc. of the Int. Symposium “Operational Research and Applications”* (May 8–10). – Morocco: Marrakech. – 2013. – P. 678–684.
12. *Марущак П. О., Коноваленко И. В.* Измерение деформации материалов путем анализа цифровых изображений поверхности // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2010. – **76**, № 6. – С. 55–61.
13. *Influence* of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating / P. O. Maruschak, S. V. Panin, S. R. Ignatovich et al. // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* – 2012. – **57**. – P. 43–48.
14. *Konovalenko I. V. and Marushchak P. O.* Error analysis of an algorithm for identifying thermal fatigue cracks // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2011. – **47**. – P. 360–367.
15. *Автоматизований аналіз* поверхневих тріщин у конструкційних елементах / П. В. Ясний, П. О. Марущак, І. В. Коноваленко, Р. Т. Біщак // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2008. – **44**, № 6. – С. 83–88.  
(*Yasnii P. V., Marushchak P. O., Konovalenko I. V., and Bishchak R. T.* Computer analysis of surface cracks in structural elements // *Materials Science.* – 2008. – **44**, № 6. – P. 833–839.)
16. *Experimental study* of the surface of steel 15Kh13MF after the nanosecond laser shock processing / P. Maruschak, I. Zakiev, V. Mocharsky, Y. Nikiforov // *Solid State Phenomena.* – 2013. – **200**. – P. 60–65.
17. *Зміцнення* поверхневого шару теплостійких сталей лазерною ударно-хвильовою обробкою / П. О. Марущак, Ю. М. Нікіфоров, Б. П. Ковалюк, В. Б. Гладько // *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля.* – 2008. – № 7 (125). – С. 197–201.
18. *Морфологія* поверхності сталі после ударно-волнової лазерної обробки / П. О. Марущак, В. Б. Гладько, Ю. Н. Никифоров и др. // *Нанорозмірні системи. Будова, властивості, технології: тези конференції НАНСИС-2007* (21–23 листопада). – К.: Ін-т металознавства ім. Г. В. Курдюмова НАН України, 2007. – С. 267.
19. *Lu W.* Research on residual stress drops on material surface by laser shock processing // *Advanced Materials Research.* – 2012. – **460**. – P. 420–423.
20. *Марущак П. О., Сорочак А. П., Мочарський В. С.* Фрактографический анализ поверхности и механизмов разрушения стали 15X13MF после лазерной ударно-волновой обработки // *Вестник машиностроения.* – 2013. – № 4. – С. 50–53.
21. *Коноваленко И. В., Марущак П. О., Окипный И. Б.* Автоматизированный анализ рельефа поверхности разрушения псевдостереоскопическим методом // *Вестник машиностроения.* – 2013. – № 5. – С. 22–24.
22. *Hassani A. and Ghasemzadeh Tehrani H.* Crack detection and classification in asphalt pavement using image processing // *Pavement Cracking: Mechanisms, Modelling, Detection, Testing and Case Histories.* – 2008. – P. 891–896.
23. *Марущак П. О., Коноваленко И. В.* Вимірювання неоднорідних полів переміщень поверхні матеріалу та розкриття вершини тріщини за аналізом цифрових зображень // *Машинознавство.* – 2008. – № 12. – С. 18–21.

*Одержано 20.08.2012*