

УДК 539.12.04, 621.378.325

**Ю. Нікіфоров, канд. техн. наук; Б. Ковалюк, канд. фіз.-мат. наук;
О. Сіткар, канд. техн. наук; В. Мочарський; А. Сорочак**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІН РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ДІЇ ЛАЗЕРА В РЕЖИМІ МОДУЛЬОВАНОЇ ДОБРОТНОСТІ

Резюме. Досліджено закономірності зміни рельєфу та поверхні матеріалів (мідь, сталь) при дії лазера в режимі модульованої добротності. Пояснено відмінність між характером розтікання матеріалу при опроміненні однопічковими і двопічковими імпульсами на повітрі та в ПКС. Встановлено особливості лазерної абляції в різних режимах та умовах опромінення. Показано, що довжина хвилі застигаючого матеріалу залежить як від тиску, так і від фізичних характеристик матеріалу.

Ключові слова: наносекундний лазер, періодичні стуруктури, рельєф.

Yu. Nikiforov, B. Kovalyuk, O. Sitkar, V. Mocharskyi, A. Sorochak

REGULARITIES OF THE MATERIALS SURFACE RELIEF CHANGES DURING Q-SWITCHED LASER TREATMENT

Summary. The work is devoted to the problems of laser ablation. It is of interest for technology and surface cleaning in particular. Laser ablation has a great importance for laser shock treatment as a factor of surface relief influence.

Investigation of laser ablation is carried out by different experimental methods (electronic microscopy, mass-spectrometry, pendulum method, etc).

Laser ablation is a complex of physical and chemical processes, which provide substances removal from the surface or volume of solid.

Samples have been treated by Q-switched laser GOS-1001 with LiF modulator. The characteristic features of surface morphology were investigated by the electronic microscope REM106-I.

The difference between the nature of material spreading during irradiation in the air and in the transparent condensed medium was investigated.

Regularities of copper and steel surface morphology changes after the Q-switched laser action have been investigated. Investigation of the irradiated materials relief testified that the irradiation in the air and in the transparent condensed medium causes wavy surface morphology. The peculiarities of laser ablation after irradiation in the transparent condensed medium and in the air are found, which is important in the practical application of laser shock treatment.

Removal of irradiated material in the transparent condensed medium is found to be caused by the simultaneous action of two factors: the plasma pressure and ablation (thermal mechanism). It is shown that the wavelength of frozen material depends on the pressure that is a function of the flux density of laser radiation and the physical characteristics of the material.

Key word: nanosecond laser, periodical structures, relief

Вступ. Розвиток нових напрямків застосування лазерів і лазерної технології тісно пов'язаний із вивченням процесів абляції при дії потужних лазерних імпульсів та її впливом на поверхню матеріалів. Цим терміном відзначають сукупність складних фізико-хімічних процесів, результатом яких є видалення речовини з поверхні чи з об'єму твердого тіла [1], починаючи від емісії електронів. При цьому вивчається як стимульоване видалення речовини, включаючи видалення летких продуктів хімічного травлення, так і особливості поглинання потужного лазерного випромінювання,

гідродинаміка неоднорідно нагрітих шарів, їх вплив на зміни поверхні в результаті дії імпульсів різних тривалостей: нано-, піко- та фемтосекундних [2, 3]. Лазерна абляція при опроміненні у вакуумі цікава, в першу чергу, для фізики і технології напилення та очистки поверхні [4, 11]. Її вивчення проводять як шляхом комп'ютерного моделювання, так і різними експериментальними методами, серед яких найбільш використовуваними є метод електронної мікроскопії, мас-спектрометрія, класичний метод маятника та прецизійного зважування в різних варіантах [1 – 5].

Для лазерної ударно-хвильової технології аналіз явища абляції має важливе значення з точки зору аналізу якості обробки поверхні, її пошкоджень, зміни маси зразка, його механічних та електрофізичних властивостей [6 – 9].

Як показали раніше проведені експерименти [10], при лазерній ударно хвильовій дії в результаті абляції вириваються частинки, розміри яких залежать від енергії, пічковості імпульса та середовища, співвідношення кількості пічків та енергії, що припадає на один пічок. Для встановлення закономірностей змін рельєфу поверхні опроміненних матеріалів представляє інтерес провести електронну мікроскопію поверхні після дії потужних лазерних імпульсів різної пічковості, що супроводжується генерацією лазерних ударних хвиль малої амплітуди, на матеріали із помітно відмінними теплофізичними та акустичними властивостями та провести її аналіз із порівнянням результатів з абляції даних матеріалів на основі інших методів.

Метою роботи є дослідження картини рельєфу поверхні зразків сталі та міді, отриманих за допомогою електронного мікроскопа РЕМ-106 до та після дії неодимового лазера з модульованою добротністю енергією до 20 Дж/см².

Методика експерименту. Опромінення проводилось на установці ГОС-1001 з LiF затвором. Схему опромінення зразків у прозорому конденсованому середовищі в режимі генерації лазерних ударних хвиль представлено на рис. 1. Прозоре конденсоване середовище 1 обмежує розширення плазми 2, завдяки чому підвищується тиск ударної хвилі 4.

Окремі відмінності в експериментальних схемах, застосованих при вивченні абляції, пов'язані зі специфікою розміщення зразків відносно лазерного джерела, фокусуєчої системи та системи індикації параметрів лазерного імпульсу, а також виду прозорого конденсованого середовища.

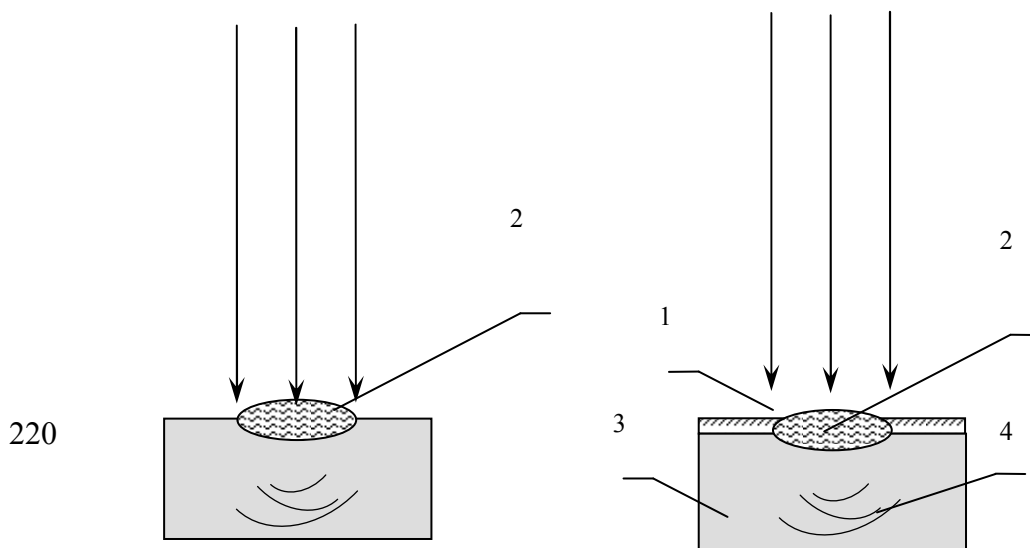


Рисунок 1. Схема опромінення зразків у прозорому конденсованому середовищі в режимі генерації ударних хвиль:
1 – ПКС; 2 – плазма; 3 – зразок; 4 – ударна хвиля

Figure 1. Laser shock wave treatment scheme in the transparent condensed medium:
1 – transparent condensed medium, 2 – plasma, 3 – sample, 4 – shock wave

Дослідження закономірностей абляції проводилось на основі зважування та дослідження морфології поверхні за допомогою електронного мікроскопа. Крім того, винесення маси та оцінювання імпульсу віддачі здійснювались методом маятника при опроміненні лазером у режимі модульованої добротності на повітрі та в ПКС, із наступним зважуванням зразків на аналітичних вагах після серії експериментів.

Результати та аналіз експерименту. На рис. 2 представлено зображення поверхні зразків міді та сталі, отримані за допомогою електронного мікроскопа РЕМ-106. Зразки опромінювались на повітрі або в епоксидній смолі. Як бачимо з рисунка, рельєфом поверхні міді є періодичні структури у вигляді витягнутих крапель. Розміри таких структур лежать у межах 20 – 60 мкм. По краю опроміненого матеріалу видно застигли хвилі неправильної форми. Помітне різке згасання на краю світлової плями. На поверхні сталі, опроміненої у ПКС, спостерігається велика кількість дрібних пор. По краях розміри пор менші, ніж у центрі, а їх концентрація значно більша. Із експериментальних результатів опромінення матеріалів лазером у режимі модульованої добротності випливає, що матеріали із різними теплофізичними властивостями при опроміненні в різних середовищах дають суттєві відмінності в рельєфі поверхні. Важливий вплив на рельєф поверхні сталі при опроміненні в прозорому конденсованому середовищі (ПКС) чинить пічковість лазерного імпульсу.

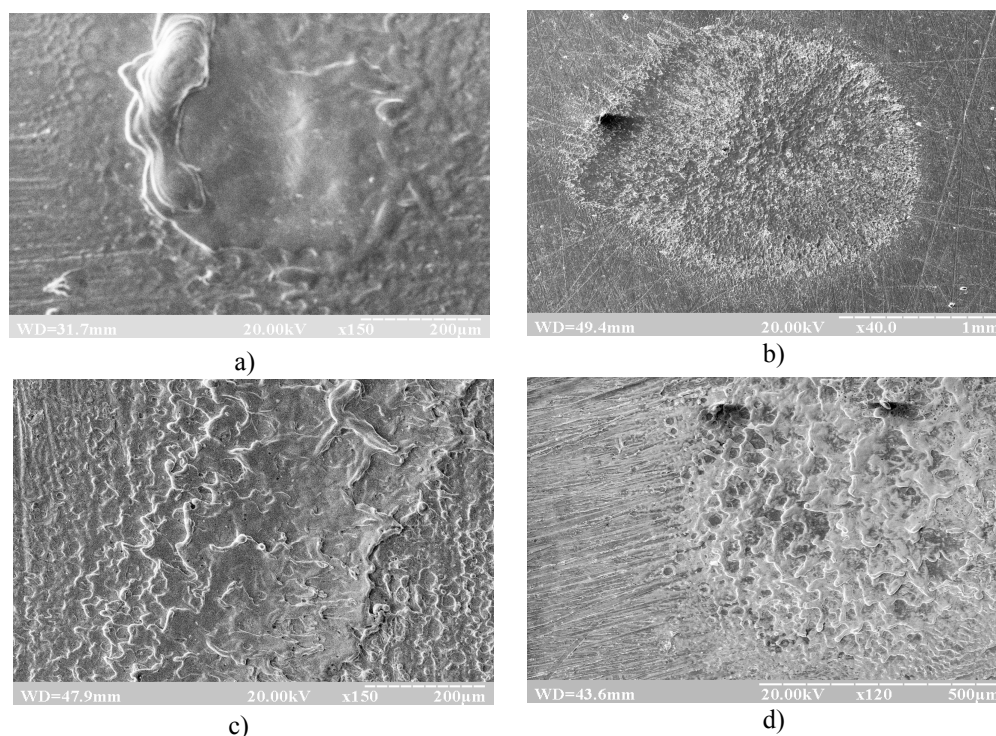


Рисунок 2. Поверхні опромінених матеріалів:
 а) опромінена на повітрі сталь 15Х13МФ ($E=8 \text{ Дж/см}^2$);
 б) опромінена в епоксидній смолі сталь 15Х13МФ ($E=20 \text{ Дж/см}^2$);
 в) опромінена на повітрі мідь ($E=7,25 \text{ Дж/см}^2$);
 г) опромінена в епоксидній смолі мідь ($E=20 \text{ Дж/см}^2$)

Figure 2. Irradiated materials surfaces:
 a) the 15Kh13MF steel surface irradiated in the air ($E=8 \text{ J/cm}^2$);
 b) the 15Kh13MF steel surface irradiated in the epoxy resin ($E=20 \text{ J/cm}^2$);
 c) the copper surface irradiated in the air ($E=7,25 \text{ J/cm}^2$);
 d) the copper surface irradiated in the epoxy resin ($E=20 \text{ J/cm}^2$)

Встановлено, що розподіл застиглої речовини на краю та в центрі матеріалів після опромінення кардинально відмінний. Залежно від відстані до центру плями опромінення та густини потоку випромінювання візуальна картина може бути піноподібною, хвилеподібною або мати вигляд візерунка. Періодичність повторень хвиль (далі «період повторюваності»), утворених після застигання матеріалу внаслідок дії тиску плазми та імпульсу віддачі при однакових умовах опромінення, відрізняється для сталі та міді. При опроміненні на повітрі однопічковим лазерним імпульсом хвилеподібний рельєф повторюється з кроком $35 - 15 \text{ мкм}$ у міді та $75 - 65 \text{ мкм}$ у сталі. При опроміненні в ПКС крок становить $25 - 20 \text{ мкм}$ у міді та лежить у межах $92 - 58 \text{ мкм}$ для сталі. Крок зменшується в міру віддалення від центру плями опромінення.

Результати з визначення періоду повторюваності поверхневих структур для сталі та міді при різних значеннях енергії лазера та пічковості імпульсів представлено у табл. 1.

Таблиця 1.

Період повторення рельєфу опромінених матеріалів

№ з/п	Матеріал	Середовище опромінення	Енергія Дж	Пічки	Період повторення
1	Сталь	Повітря	8,5	1	75-65 мкм
2	Сталь		12,5	1	85-60 мкм
3	Сталь		16,25	2	113-92 мкм
4	Сталь		25	2	78-57 мкм
5	Сталь	ПКС	15,75	2	65-53 мкм
6	Сталь		22,5	2	58 мкм
7	Сталь		21,25	1	102-83 мкм
8	Сталь		10	1	92-23 мкм
9	Мідь	Повітря	9,25	1	33-15 мкм
10	Мідь		20	1	42-23 мкм
11	Мідь		18	2	94-68 мкм
12	Мідь		22,75	2	60-35 мкм
13	Мідь	ПКС	22,75	2	7-35 мкм
14	Мідь		16,75	2	19-36 мкм
15	Мідь		7,25	1	20-25 мкм
16	Мідь		21,5	1	21-16 мкм

Відмінності між характером розтікання на однаковій відстані від центра лазерної плями оцінювалися також довжиною застигаючих хвиль матеріалу (періодичністю повторень), при опроміненні однопічковим імпульсом у ПКС та на повітрі. Для міді вони є незначними, а для сталі ця різниця становить 1,7–2 рази. Для міді (при двопічковому імпульсі) відбувається збільшення довжини застигаючих хвиль матеріалу зі збільшенням енергії. Це означає, що другий пічок впливає на картину розтікання, накладаючись на процес, викликаний дією першого пічка. Рельєф поверхні нагадує результат накладання сферичних хвиль, викликаних осіданням крапель (зародків міді) в розплав та його застигання.

Із порівняння результатів опромінення міді в різних умовах бачимо, що величина тиску, який при опромінюванні в ПКС при однаковій енергії імпульсу є більшим, ніж при опромінюванні на повітрі, відіграє основну роль у створенні рельєфу поверхні. Це відображається на періодичності повторення хвиль рельєфу, які мають в 1,5–2 рази більшу відстань між максимумами сплесків застиглого металу і відповідає формулі, що зв'язує тиск, масову швидкість U і швидкість звуку:

$$U = \frac{p}{\rho c}, \quad (1)$$

де p – тиск, що залежить від густини потоку випромінювання;

ρ – питома густина матеріалу;

c – швидкість звуку в матеріалі.

Якщо порівнювати результати опромінювання на повітрі і в ПКС зразків сталі, то їх у першому наближенні можна оцінити на основі формули (1). Однак цього недостатньо для порівняння і пояснення різниці результатів опромінювання сталі й міді в числах при різній пічковості й однакових значеннях енергії імпульсу лазера.

Відношення довжин хвиль рельєфу для сталі й міді не відповідає даній формулі, як і різниця відстаней між різними максимумами застиглого рельєфу.

Для пояснення різного характеру розтікання необхідно врахувати як масову швидкість частинок у сталі та міді при дії тиску, що визначається формулою (1), так і відмінності у в'язкості даних матеріалів за різних температур.

Проаналізуємо хвилеподібний характер спостережуваного експериментально рельєфу на поверхні застиглої розплаву на основі представлень про поверхневі хвилі [12]. Хвилі на поверхні рідини формуються як результат дії сил тяжіння та поверхневого натягу. Однак із результатів експериментів випливає, що гравітаційна складова, яка має значну довжину хвилі, не проявляється в спостережуваній картині рельєфу.

Для спрощення аналізу в першому наближенні можна припустити, що зовнішній вплив (імпульс тиску) викликає гармонічну хвилю на розплавленій поверхні, і поверхня однорідної рідини є „гофрованою” в горизонтальному напрямку, а коливання згасають у глибину по експоненті. Тоді із розв'язку рівнянь гідродинаміки для рідини, що не стискується, отримуємо дисперсійне рівняння, в якому кутова частота ω пов'язана з хвильовим вектором \vec{k} співвідношенням

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho} k^3}, \quad (2)$$

де ρ – густина розплаву;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу шару рідкого металу, розплавленого лазерним імпульсом. Із даної формули визначається групова швидкість (швидкість руху енергії) як похідна кутової частоти по хвильовому вектору.

$$g = \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{1/2} \frac{9}{4} k^{1/2} = \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{1/2} \frac{9}{4} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Звідси можна знайти довжину хвилі застигаючого металу.

Із фізичних міркувань та співставлення формул швидкості як функції тиску та швидкості звуку із даною формулою випливає, що довжина хвилі змінюється залежно від матеріалу, його густини, величини коефіцієнта поверхневого натягу розплаву, швидкості звуку в ньому, густини потоку лазерного випромінювання, умов опромінення.

λ – довжина хвилі застиглого рельєфу поверхні матеріалу із певним поправочним коефіцієнтом, що залежить від теплофізичних властивостей матеріалу, при опромінюванні в ПКС прямо пропорційна коефіцієнту поверхневого натягу, густині та квадрату швидкості й обернено пропорційна густині енергії падаючого випромінювання.

$$\lambda = \frac{2\pi}{g^2} \frac{\sigma}{\rho}. \quad (4)$$

Оцінювання відношення довжин хвиль рельєфу застиглої поверхні зразків сталі до рельєфу застиглої поверхні зразків міді, виконана на основі отриманої формули, задовільно узгоджується із експериментальними даними. При однаковому значенні густини потоку лазерного імпульсу й опроміненні в прозорому конденсованому середовищі (епоксидна смола) дане відношення дорівнювало приблизно 4,5. Водночас згідно з експериментами воно коливається в межах 4 – 5.

Картини зміни поверхні матеріалу при опроміненні в ПКС та на повітрі, отримані з результатів електронно-мікроскопічних досліджень, корелюють із результатами, отриманими при дослідженні абляції методом винесення маси речовини та із методом маятника, а також дослідженням оптичного відбивання опромінених матеріалів. Під час абляції вириваються частинки великих і малих розмірів із центра плями, де температура є максимальною.

За наявності ПКС, на відміну від робіт [1, 4], де опромінення проводилось у вакуумі та на повітрі, відліт частинок стримується плазмою триваліший час. Як наслідок, збільшується відсоток їх повернення на поверхню і досягає 23 – 24%. Це підтверджується даними зі зважування зразків до і після опромінювання та експериментами з визначення імпульсу віддачі.

Висновки. Методами електронної мікроскопії досліджено закономірності змін рельєфу та поверхні непрозорих матеріалів при дії лазера в режимі модульованої добротності в різних середовищах. Встановлено, що при опроміненні й на повітрі, й у ПКС хвилеподібна картина спостерігається на усіх досліджуваних зразках. Проте вони відрізняються рельєфом поверхні, в тому числі й напливами. Встановлено особливості лазерної абляції при одно- та двопічковому режимах та в різних умовах опромінення матеріалу (повітря або ПКС), що є важливим при практичному застосуванні лазерної ударно-хвильової обробки. Винесення речовини при опроміненні в ПКС пояснюється одночасною дією двох факторів: тиску плазми та абляцією (тепловий механізм). Показано, що довжина хвилі застиглого матеріалу залежить як від тиску, що є функцією густини потоку лазерного випромінювання, так і від фізичних характеристик матеріалу.

Conclusions. Regularities of surface morphology changes after the Q-switched laser action have been investigated. The irradiation in the air and in the transparent condensed medium is found to be caused by the wavy surface morphology. The peculiarities of laser ablation after irradiation in the transparent condensed medium and in the air is established, which is important in the practical application of laser shock treatment. Removal of irradiated material in the transparent condensed medium are caused by the simultaneous action of two factors: the plasma pressure and ablation (thermal mechanism). It is shown that the wavelength of frozen material depends on the pressure that is a function of the flux density of laser radiation and the physical characteristics of the material.

Список використаної літератури

1. Laser Ablation: Principles and Applications (Springer Series in Mater. Sci., Vol.28, Ed. J C Miller).Berlin: Springer-Verlag, 1994.

2. Destruction of a Solid Film under the Action of Ultrashort Laser Pulse. Anisimov, S.I.; Zhakhovskii, V.V.; Inogamov, N. A.; Nishihara, K.; Oparin, A.M.; Petrov, Yu.V. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, vol. 77, issue 11, pp. 606-610.
3. S.I. Anisimov, N.A. Inogamov, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovskii, K. Nishihara, M.B. Agranat, S.I. Ashitkov, A.V. Ovchinnikov, D.S. Sitnikov, „Interaction of short laser pulses with metals at moderate intensities, 9th annual Conference on Laser Ablation COLA 2007, September 24-28, 2007, Tenerife, Spain, Technical Program, Report MO-09, p. 20.
4. Анисимов, С.И. Избранные задачи теории лазерной абляции. Успехи физических наук [Текст] / С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук – 2002. – Т.172, № 3. – С. 301 – 333
5. Investigation of ultrashort pulse laser ablation of solid targets by measuring the ablation-generated momentum using a torsion pendulum Nan Zhang,¹ Wentao Wang,² Xiaonong Zhu,¹ Jiansheng Liu,² Kuanhong Xu,¹ Peng Huang,¹ Jiefeng Zhao,¹ Ruxin Li,² and Mingwei Wang¹, Vol. 19, No. 9 / OPTICS EXPRESS, 2011 + 9,11-17.
6. Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии. Сборник *научных* трудов под редакцией А.А. Углова. – М: Наука, 1989. – 270 с.
7. Peyre, P., Fabbro R, Merrien P., Lieurade H.P. Laser shock processing of aluminium alloys: application to high cycle fatigue behaviour. Materials Science and Engineering, A210, 120-13. 1996.
8. Peyre, P., Fabbro R. Electromagnetic gauge study of laser-induced shock waves in aluminium alloys. Journal de Physique III France, 5, 1953-64. 1995.
9. Hoffman, C.G. Laser-target interactions. Journal of Applied Physics, 45, 2125-8. 1974.
10. Лазерна абляція матеріалів при опроміненні на повітрі в прозорому конденсованому середовищі: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції "Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии. БФФХ-2010" / М-во осв. і науки України, СТНУ. – Севастополь: СНТУ. – 2010. – Т. 1. – С. 83 – 86.
11. Park, H.M., Kim D., Grigoropoulos C. Pressure generation and measurement in the rapid vaporization of water on a pulsed-laser-heated surface // J. Applied Physics, 1996. – v.80, №7. – p. 4072 – 4081.
12. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны [Текст] / Дж. Уизем – М.: Наука, 1977. – 624 с.

Отримано 16.10.2012