

Юрій Нікіфоров, Михайло Нищенко, Богдан Ковалюк

**ВПЛИВ УМОВ ОПРОМІНЕННЯ ЛАЗЕРОМ В РЕЖИМІ
МОДУЛЬОВАНОЇ ДОБРОТНОСТІ НА МОРФОЛОГІЮ ПОВЕРХНІ:
АНАЛІЗ ТА ДЕЯКІ ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

В статті розглянуто вплив опромінення лазером на морфологію поверхні при генерації лазерних ударних хвиль. Проаналізовано фактори, які визначають точку зустрічі ударної та теплової хвиль, наведено результати досліджень морфології поверхні, мікротвердості та коефіцієнта відбивання матеріалів, які використовуються в світлотехніці.

Ключові слова: лазерні ударні хвилі, морфологія поверхні.

По мірі розширення можливостей лазерної техніки зростає інтерес до вивчення впливу лазерних ударних хвиль (ЛУХ) як помітної складової комплексної лазерної дії зі специфічними властивостями. На даний момент, на відміну від перших років створення потужних лазерів, дія ЛУХ вивчається не як руйнуючий фактор, а як один із методів модифікації матеріалів на промисловому рівні. При модифікації приповерхневих шарів матеріалу використовують ЛУХ малої амплітуди, що генеруються лазерами з потужністю $2 \cdot 10^{11}$ Вт/м² – $4 \cdot 10^{13}$ Вт/м². При відносно невеликих густинах енергії від 0,2 Дж/см² до 0,3 Дж/см² досягається тиск ударної хвилі, необхідний для змін властивостей матеріалів, коли опромінення здійснюється через прозоре конденсоване середовище (ПКС) лазером в режимі модульованої добротності. Експерименти по опромінюванню сталей при генерації ЛУХ показали збільшення корозійної стійкості різних типів сталей для різних типів агресивних середовищ [1, 2], а також зростання енергії руйнування зразків теплостійкої сталі [3, 4]. Останнє пояснюється перерозподілом напружень,

викликаних дією ЛУХ. Виявлено, що він залежить як від умов опромінення так і від їх початкового розподілу.

Для розширення області застосування лазерної ударно-хвильової технології з точки зору якості обробки поверхні важливе значення має аналіз її пошкоджень, пов'язаних з абляцією, зокрема: зміни маси зразка, його механічних та електрофізичних властивостей.

Маловивченим на даний момент лишається питання впливу складу енергетичного імпульсу (пічковість) на процес абляції і зміни рельєфу поверхні при лазерному опроміненні в ПКС в умовах виникнення ударних хвиль (УХ).

Для встановлення закономірностей змін рельєфу поверхні твердих тіл після дії потужних лазерних імпульсів різної пічковості, що супроводжується генерацією лазерних ударних хвиль малої амплітуди, представляє інтерес провести електронну мікроскопію поверхні матеріалів із помітно відмінними теплофізичними та акустичними властивостями та проаналізувати разом із результатами по абляції даних матеріалів на основі інших методів.

В даній роботі наведено результати досліджень поверхні матеріалів, що мають відмінні теплофізичні та оптичні характеристики до та після дії неодимового лазера з модульованою добротністю з густиною енергії до $2 \cdot 10^5$ Дж/м².

Опромінення проводилось на установці ГОС-1001 з LiF затвором за типовою схемою опромінення. Особливістю даних експериментів є опромінення на повітрі та в ПКС при одному та двох пічках в імпульсі. Прозоре конденсоване середовище обмежує розширення плазми, завдяки чому підвищується тиск ударної хвилі.

Про закономірності абляції судили на основі аналізу морфології поверхні за допомогою електронного мікроскопа і зважування зразків до та після опромінення. Окремі відмінності в експериментальних схемах, застосованих при вивченні абляції, були пов'язані зі специфікою розміщення зразків відносно лазерного джерела, фокусуючої системи та

системи індикації параметрів лазерного імпульсу, а також виду прозорого конденсованого середовища.

Опромінення матеріалів лазером в режимі генерації ударних хвиль, як і в інших режимах, перш за все, приводить до зміни поверхні зразка. Внаслідок перерозподілу енергії між ПКС та зразком в залежності від середовища, в якому здійснюється опромінення, на поверхні зразка в зоні дії імпульсу по-різному змінюється рельєф та структура. Важливий вплив на рельєф поверхні сталі при опроміненні в ПКС чинить пічковість лазерного імпульсу. Для повноти аналізу експериментів по впливу лазерних ударних хвиль зображення поверхні зразків, отримані за допомогою електронного мікроскопа РЕМ-106, вивчались при різних збільшеннях. Зразки опромінювались на повітрі або в епоксидній смолі. При малих збільшеннях видно, що рельєф поверхні міді має вигляд періодичних структур у вигляді витягнутих крапель. Розміри таких структур лежать в межах 20 – 60 мкм. Край зони опромінення матеріалів має вигляд застиглих хвиль неправильної форми із помітним їх різким затухання на краю зони. При цьому на поверхні сталі, опроміненої в ПКС, спостерігається велика кількість дрібних пор. По краях розміри пор менші, ніж у центрі, а їх концентрація значно більша.

Слід відмітити, що утворення різноманітних хвилеподібних структур на поверхні, пов'язаних із капілярними хвилями, спостерігається і при опромінюванні поверхні металів потужними іонними пучками тривалістю в десятки наносекунд, для яких, як відомо, характерним є наявність ударно-хвильового фактору впливу на матеріал.

Так, в роботі [5] повідомляється про утворення хвилеподібної поверхні з довжиною хвилі 40 ± 5 мкм для магнію і 6 мкм для алюмінію (тобто практично близького порядку із тими, що спостерігається при дії на метали лазерного імпульсу густиною потоку $10^8 - 10^9$ Вт/см². Характерно, що автори, аналізуючи свої результати, звертаються до робіт по морфології поверхні матеріалів після лазерного впливу. Таким чином, можна стверджувати, що при будь-яких типах концентрованих потоків енергії при досягненні густини потоку, достатньої для виникнення

ударних хвиль, утворюються зміни рельєфа, що пов'язані із капілярними силами.

Зміна морфології поверхні свідчить про зміну ролі механізмів абляції при переході в іншу область густин потоків лазерного випромінювання. Пояснити особливості морфології поверхні можна виникненням капілярних хвиль, що викликані різними нестійкостями опромінюваної поверхні при її нагріванні, плавленні, випаровуванні. Вони залежать від густини потоку енергії лазера та середовища, в якому здійснюється опромінювання, і характеру розподілу густини потоку енергії в зоні лазерного впливу [6-9]. По мірі наростання із часом густини потоку енергії лазерного імпульсу і відповідно енергії, поглинутої поверхнею зразка, механізми утворення періодичних структур при опромінюванні в ПКС змінюються. Як «затравочний» фактор, що впливає на зміни рельєфу поверхні, можуть розглядатись термокапілярні сили. Вони в основному впливають при відносно низьких інтенсивностях і величинах поглинутої енергії. При збільшенні інтенсивності починає помітніше впливати тиск віддачі. Це забезпечує додаткову розкачку капілярних хвиль і появу нових частот в спектрі коливань розплавленого шару поверхні. При досягненні максимального значення густини енергії на рух поверхневого розплавленого шару суттєво впливає імпульс віддачі, викликаний відльотом парів та крапель суміші метал-ПКС.

Приповерхневий шар речовини не тільки виноситься внаслідок абляції, але і розтікається по поверхні. Розтікання відбувається по-різному в залежності від умов опромінювання. Кількість винесеної маси при абляції в досліджуваному нами інтервалі густин потоку, коли мова іде про опромінення на повітрі, зменшується при збільшенні густини потоку.

Збільшення густини потоку лазерної енергії веде до того, що зростає частина енергії, яка йде на нагрівання плазми. При цьому, як відомо, зростає швидкість розльоту, але зменшується маса випаровуваної речовини [10, 11]. Саме це і спостерігається в наших експериментах при опроміненні на повітрі. В однопічковому та двопічковому режимах

потужність за імпульс відрізняється дуже сильно при тій самій загальній енергії імпульсу лазера. Відповідно, відрізняється і випарувана маса.

Коли мова йде про опромінення в ПКС, то на абляцію значно сильніше впливає тиск плазми на поверхню. Він продовжує діяти після закінчення імпульсу до моменту відльоту ПКС. Це викликає рух рідкого шару мішені (опромінюваного матеріалу) по поверхні зразка у вигляді хвиль. Зростання густини потоку збільшує тиск на поверхню, а значить і кількість речовини (маси), яка розтікається у вигляді термокапілярних хвиль по поверхні зразка. При опроміненні в ПКС, внаслідок затримки відльоту плазми, збільшується товщина розплавленого шару. Однак, як показали експерименти, це не викликало збільшення винесеної маси при абляції. Дія плазми призводить до двох конкуруючих факторів: винесення речовини та її розтікання по поверхні зразка, що опромінюється. Можна вважати, що саме в експериментах по зважуванню спостерігаються відмінності при абляції як для різних матеріалів, так і для різних густин потоків енергії та пічковості. Крім того, на морфологію структури та винесення маси впливають не тільки неоднорідне нагрівання зразка внаслідок неоднорідності розподілу енергії по плямі, але і неоднорідність тиску віддачі при просторово неоднорідному випаровуванні з поверхні та залежність термокапілярних сил від температури [9], що супроводжує такий розподіл енергії.

Очевидно, на морфологію поверхні, в залежності від розмірів та геометрії зразка може впливати також хвиля розвантаження, відбита від тильної поверхні зразка, яка зустрічається із тепловою хвилею, що розповсюджується вглиб матеріалу із значно меншою швидкістю.

Визначення «точки зустрічі» ударної та теплової хвиль в матеріалі при обробці лазером в режимі модульованої добротності

При лазерній ударно-хвильовій обробці в матеріалі одночасно існують акустична (ударна) і теплова хвилі. При «зустрічі» цих двох хвиль в матеріалі можна чекати появи точкових дефектів та дислокацій [12, 6, 8].

Внаслідок різної швидкості розповсюдження теплової хвилі її зустріч з відбитою від тильної поверхні зразка ударною відбувається в приповерхневому шарі матеріалу.

При наявності прозорого конденсованого середовища проходження теплової хвилі пов'язане з екрануванням відлітаючою плазмою поверхні зразка та перерозподілом енергії за рахунок затримки відлітання плазми. Час дії теплової хвилі за рахунок ПКС залежить від товщини шару та роду матеріалу ПКС, а ударної хвилі – від товщини та роду матеріалу зразка. В більшості випадків за однаковий проміжок часу відстань, пройдена тепловою хвилею, набагато менша від пройденої ударною хвилею. Тому точка «зустрічі» теплової і ударної хвилі визначається координатою «зустрічі» хвилі температурного розподілу в матеріалі після опромінення в обраний нами момент часу та фронту ударної хвилі після її відбивання від тильної поверхні зразка.

Нехай теплова хвиля рухається по зразку із швидкістю

$$g = \sqrt{\frac{a}{\tau}} \quad (1)$$

де a – температуропровідність матеріалу, τ – тривалість імпульсу, а ударна хвиля з швидкістю c , тоді за час на протязі якого температурна хвиля розповсюдиться на глибину x (відповідний температурний розподіл буде $T(x)$), ударна хвиля пройде до тильної поверхні зразка, відіб'ється, і її фронт буде в даній точці. Маючи діаграму стану матеріалу та залежність $T(x)$, можна оцінювати особливості речовини в момент підходу відбитої ударної хвилі до точки з координатою x . Тобто точка зустрічі — це характерна точка, зафіксована на залежності $T(x,t)$. Характерними точками можуть бути точки, в яких відбуваються фазові перетворення 1-го чи 2-го роду, точки, що відповідають стадіям відпалу або рекристалізації тощо.

За допомогою комп'ютерного моделювання встановлено, що при опроміненні зразка з сталі товщиною 4 мм лазерним імпульсом тривалістю 50 нс в ПКС температура матеріалу більше 100°C досягається на глибинах порядку 15 мкм. За час досягнення такої температури на вказаній глибині в матеріалі поширюється ударна хвиля, після відбивання

від тильної поверхні зразка вертається до цієї глибини, викликаючи комплексний термомеханічний ефект у вигляді дифузійно-деформаційних та рекомбінаційно-деформаційних нестійкостей.

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання показав, що зустріч теплової хвилі (амплітудне значення температури до 100°C) та ударної хвилі відбувається в приповерхневому шарі товщиною 20 мкм. На більших глибинах амплітудне значення температури менше 50 °C.

Це означає, що при опроміненні в ПКС зразка сталі на глибинах, більших від 20 мкм, пояснити зміни властивостей можна тільки впливом ударно-хвильового фактора лазерної дії. Експерименти, проведені в роботах [13, 9] підтвердили правильність наших розрахунків. Так, при дослідженні корозійної стійкості сталі 15X13МФ в рідкому кислотному середовищі підвищення корозійної стійкості спостерігалось на глибині більше 50 мкм. Швидкість корозії залежала від глибини і поділялась на 3 характерних ділянки: підйом, спад, підйом. В області 5 – 20 мкм вона спадала [13]. Ця область відповідає точці зустрічі теплової і ударної хвиль. Про спільну дію теплової і ударної хвиль свідчать і результати роботи [14], де вивчався розподіл дефектів в армко-залізі по глибині методом електрон-позитронної анігіляції. Зразки опромінювались лазером ГОС-1001 з LiF затвором в режимі модульованої добротності. За межами зони чисто термічного впливу визначався розподіл дефектів методом електрон-позитронної анігіляції. Він виявився нелінійним по глибині для всіх зразків і залежав від товщини зразків. Останнє відповідає залежності точки зустрічі теплової і ударної хвиль (глибини) і часу проходження ударної хвилі в матеріалі.

Результати експериментів підтверджують також наявність додаткового впливу неоднорідності розподілу енергії лазерного імпульсу в режимі модульованої добротності на рельєф поверхні зразків у випадку роботи із Li-F модулятором добротності, що має дефекти.

Проведені експерименти свідчать, що опромінення лазером з модульованою добротністю забезпечує додаткові можливості для

створення періодичних структур на поверхні матеріалів. При цьому можна змінювати форму періодичних структур, змінюючи вид ПКС.

Розглянемо можливості застосування результатів лазерної ударно-хвильової обробки досліджуваних матеріалів, наприклад, у світлотехнічній промисловості, де такі матеріали як мідь, сталь, алюміній широко використовуються для виготовлення складових частин різноманітних виробів.

Дослідження мікротвердості показали, що ударно-хвильовий режим лазерного впливу сильно змінює структуру приповерхневого шару зразків теплостійкої сталі та чистого алюмінію, не змінюючи її у міді. Типові результати змін мікротвердості для густини потоку випромінювання $Q = 24 \text{ Дж/см}^2$ [15] представлені в таблиці. Вимірювання мікротвердості здійснювались мікротвердоміром ПМТ-3.

Для сталі мікротвердість після опромінення в ПКС зросла в 2 рази, а для алюмінію – в 1,5 рази. Мікротвердість мідних зразків (електротехнічна мідь) практично не змінюється в межах похибки експерименту, хоча в деяких випадках спостерігалось зменшення мікротвердості міді після опромінення в ПКС (епоксидна смола).

Таблиця 1.

Мікротвердість опромінених матеріалів

Матеріал	Мікротвердість (МПа)		
	До опромінення	Після опромінення	
		ПКС	Повітря
Мідь	1350	1330	1320
Сталь	2200	4300	4500
Алюміній	460	720	705

Водночас корозійна стійкість досліджених мідних, сталей і алюмінієвих зразків підвищується, що спостерігається і для інших матеріалів. Так, про підвищення корозійної стійкості сталей, титана, алюмінієвих сплавів та інших матеріалів після дії на них лазерних ударних хвиль повідомлялось також в роботах [16, 17].

Крім спеціальних експериментів, проведених в кислотних або лужних середовищах, це проявилось і в значному сповільненні окислення поверхні зразків, опромінених в ПКС, які зберігаються на повітрі за кімнатної температури.

У згаданих вище експериментах по лазерній ударно-хвильовій обробці сталі Х18Н10Т-ВД опромінені зразки, наприклад, залишаються без видимих корозійних змін поверхні на протязі декількох років, в той час, як контрольні (неопромінені зразки) – помітно окислюються.

Аналіз морфології поверхні свідчить, що рельєф поверхні опроміненого матеріалу піддається також структурним змінам. Це означає, що коефіцієнт дифузного відбивання матеріалів при лазерній ударно-хвильовій обробці може змінюватись з двох причин: внаслідок зміни геометрії поверхні та зміни її структури. Саме тому аналіз відмінностей у видаленні речовини є важливим при дослідженнях коефіцієнта відбивання, як однієї з оптичних характеристик поверхні матеріалів, опромінених в різних режимах. Для даного дослідження було виготовлено і опромінено спеціальні зразки. Зміни коефіцієнта відбивання опроміненої частини зразка порівнювались з коефіцієнтом відбивання неопроміненої частини.

Таблиця 2.

Оптичні властивості опромінених матеріалів

Матеріал	Режим опромінення	Середовище опромінення	Коефіцієнт відбивання
Мідь	Неопромінений		0,68
	Модульована добротність	повітря	0,59
		ПКС	0,61
	Вільна генерація	повітря	0,68
Сталь	Неопромінений		0,65
	Модульована добротність	ПКС	0,60
		повітря	0,58
Алюміній	Неопромінений		0,61
Алюміній толуол з нанотрубками	Модульована добротність	ПКС	0,53

Як видно із результатів, представлених в табл. 2, при опроміненні міді та сталі коефіцієнт зменшується, при чому якщо опромінювати у ПКС, то коефіцієнт відбивання більший, ніж при опроміненні на повітрі.

Зокрема, при опроміненні міді в ПКС коефіцієнт відбивання зменшується на 15% в порівнянні із його величиною для неопроміненого матеріалу, в той час, як при опроміненні на повітрі ця зміна становить 13%.

При опроміненні сталі в ПКС коефіцієнт відбивання зменшується на 7% від його величини для неопроміненого матеріалу, а при опроміненні на повітрі – на 11%.

Слід відмітити, що для алюмінію, опроміненого в режимі модульованої добротності в толуолі з розчиненими нанотрубками, коефіцієнт відбивання різко зменшується при наявності впроваджених нанотрубок. Як видно з табл. 2, коефіцієнт відбивання зменшується на 0,08, що на 13% менше ніж коефіцієнт відбивання неопроміненого алюмінію.

Відмітимо важливий на нашу думку факт. Оскільки при лазерній ударно-хвильовій обробці в ПКС у досліджуваних оптично непрозорих матеріалах збільшується мікротвердість та корозійна стійкість, а коефіцієнт відбивання зменшується лише на 7 – 11 %, то великогабаритні вироби, виготовлені з такого типу сталі та міді, в місцях їх кріплення доцільно обробляти потужними лазерними імпульсами в режимі генерації ударних хвиль.

Література

1. Нищенко М.М., Ковалюк Б.П., Никифоров Ю.Н. Влияние ударных волн, генерируемых при воздействии наносекундных лазерных импульсов на фазовые превращения в стали X18H10T // Металлофиз. новейшие технол. –2004. – Т.26, № 9. – С. 1227-1240.
2. Peyre P., Carboni C., Forget P. et al. Enhacing corrosion resistance of stainless steel 304, using laser surface treatment // J. KEM. – vol. 384. – p. 157-183, 2007.

3. Ковалюк Б.П., Никифоров Ю.Н., Гладько В.Б., Марущак П.О. Изменение ударной вязкости разрушения сталей после обработки мощными импульсами лазера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: III Международная научно-техническая конференция (Минск, 15-17 октября 2008 г.): сб. материалов в 4 книгах. Книга 2. Высокоэнергетические технологии получения и упрочнения материалов и деталей машин. – Минск: ФТИ НАН Белоруси. – 2008. – С. 280-285.

4. Ясній П.В., Марущак П.О. Ролики МБЛЗ: деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – С. 231.

5. Ковивчак В.С., Панова Т.В., Михайлов К.А. Изв.вузов 1/2, с.344-347, 2011.

6. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // Успехи физ. Наук. – 1996. – Т. 166, № 1. – С. 3.

7. Ахманов С.А. Гусев В.А. Лазерное возбуждение сверхкоротких акустических импульсов: новые возможности в спектроскопии твердого тела, диагностике быстропротекающих процессов и нелинейной акустике // Успехи физических наук – 1992. – Т.162, № 3. – С. 3-87.

8. Емельянов В.И., Каримов К.М. Дефектно-деформационная модель образования поверхностных шероховатостей при лазерном облучении полупроводников и металлов // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31, вып.6. – С. 84-88.

9. Никифоров Ю.Н., Ковалюк Б.П., Гладько В.Б., Марущак П.О., Мочарский В.С. Влияние наносекундного лазерного облучения, сопровождающегося генерацией ударных волн на сталь 15Х13МФ. – Материалы 7-й международной конференции „Взаимодействие излучений с твердым телом”. – Минск, Беларусь, 2007. – С.211-213.

10. Рэди Дж. Промышленное применение лазеров / Рэди Дж. — М.: Мир, 1981.— 638 с.

11. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1971. – 272 с.

12. Иванов Л.И. Эффект изменения электропроводности полупроводниковых кристаллов при прохождении ударной волны от импульса излучения ОКГ / Иванов Л.И., Никифоров Ю.Н., Янушкевич В.А. // ЖЭТФ. – 1974. – Т.67, № 7. – С. 147-149.

13. Янушкевич В.А. Эффект повышения коррозионной стойкости стали 15Х13МФ при облучении лазером в режиме генерации ударных волн / В.А. Янушкевич, Ю.Н. Никифоров, М.М. Нищенко, Б.П. Ковалюк, В.Б. Гладьо, В.С. Мочарский // Перспективные материалы. – 2012. – №6. – С. 60-65.

14. Ковалюк Б.П., Лихторович С.П., Никифоров Ю.Н., Нищенко М.М. Распределение дефектов в армко-Fe по глубине при воздействии ударных волн, вызванных лазерным облучением / Б.П.Ковалюк, С.П.Лихторович, Ю.Н.Никифоров, М.М.Нищенко // Металлофизика. — 1992. — Т.14, №12. — С.43-49.

15. Маньовська О. Рельєф поверхні зразків, опромінених лазером в прозорому конденсованому середовищі / О. Маньовська, В. Мочарський, Ю. Нікіфоров // Матеріали II науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 25 квітня 2012). – Тернопіль, ТНТУ, 2012 – С. 61.

16. Trdan U., Ocana J.I., Grum J. Surface evaluation of laser shock processed aluminium alloy after pitting corrosion attack with 3d metrology method // The 10th Intern. Conf. of the Slovenian Soc. for Non-Destructive Testing, Sept. 1-3, 2009, P.251-257

17. Yanushkevich V.A. Effect of improvement of corrosion resistance of 15Kh13MF steel irradiated by laser in shock wave generation mode // V.A. Yanushkevich, Yu.N. Nikiforov, M.M. Nishchenko, B.P. Kovalyuk, V.B. Glad'o, V.S. Mocharskii // Inorganic Materials: Applied Research – Vol. 4, Issue 2. – 2013. – P.160-164.

Yuriy Nikiforov, Mykhaylo Nishchenko, Bohdan Kovalyuk
INFLUENCE OF LASER IRRADIATION IN THE MODULATED
QUALITY FACTOR REGIME ON THE SURFACE MORFOLOGY:
ANALYSIS AND SOME PRACTICAL RECOMMENDATIONS

In the paper the influence of laser irradiation on the surface morphology at shock wave generation is discussed. Factors determining a point of shock and heat waves collision are analysed, results of surface morphology, microhardness and reflection coefficient studies for materials used in light engineering are presented.

Keywords: *laser shock waves, surface morfology.*