

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАНЬОВСЬКА ОКСАНА АНДРІЙВНА

УДК 628.979; 539.12.04

**ВЗАЄМОДІЯ ПОТУЖНОГО КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
З МАТЕРІАЛАМИ,
ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ У СВІТЛОТЕХНІЦІ**

05.09.07 – світлотехніка та джерела світла

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Тернопіль – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент
Нікіфоров Юрій Миколайович
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,
професор кафедри фізики

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор
Головко Леонід Федорович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри лазерної техніки та фізико-
технічних технологій

кандидат фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Котлярчук Богдан Константинович
Інститут прикладних проблем механіки і
математики НАНУ Львів,
старший науковий співробітник відділу
математичного моделювання явищ самоорганізації

Захист відбудеться «__» _____ 2012 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради _____ при Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою : 46000, м. Тернопіль, вул. Руська, 56

Автореферат розіслано «__» _____ 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Тарасенко М.Г.

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Актуальність теми. Обробка матеріалів концентрованими потоками енергії, в тому числі лазерним оптичним випромінюванням, відноситься до інноваційних методів модифікації властивостей та рельєфу матеріалів. Одним із сучасних методів обробки матеріалів світловими концентрованими потоками є лазерна ударно-хвильова обробка. Особливістю лазерної ударно-хвильової обробки служить процес взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною, в результаті якого виникають ударні хвилі. Для підсилення ефекту ударно-хвильової дії процес опромінення здійснюють в прозорому конденсованому середовищі.

Лазерна ударно-хвильова обробка в прозорому конденсованому середовищі призводить до зміни напружень в матеріалі та їх перерозподілу, що в свою чергу викликає підвищення границь циклічної втоми матеріалу, збільшення мікротвердості, а також покращення трибологічних властивостей поверхні матеріалів, таких як алюміній, титан, деякі сталі.

Питання взаємодії потужного лазерного випромінювання з матеріалами в таких умовах вивчено недостатньо як теоретично (відсутні математичні моделі розрахунку температурних полів в матеріалах, опромінених в режимі модульованої добротності в прозорому конденсованому середовищі), так і експериментально.

Актуальною задачею є вивчення особливостей лазерної ударно-хвильової взаємодії з матеріалами, що застосовуються у світлотехніці, як основи одного із альтернативних методів покращення поверхневих та об'ємних властивостей речовин.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до планів наукової діяльності кафедри фізики Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Дослідження впливу лазерних ударних хвиль на фізичні властивості матеріалів з метою керування дефектною підсистемою цих матеріалів», а також відповідно до науково-дослідної роботи «Розроблення методу підвищення ударної в'язкості теплостійких сталей опроміненням наносекундними лазерними імпульсами» (№ 0109U007705).

Мета роботи. Встановлення основних закономірностей впливу лазерних імпульсів субмікросекундного та наносекундного діапазону в режимі генерації ударних хвиль на матеріали світлотехніки при наявності прозорого конденсованого середовища з метою їх цілеспрямованої модифікації.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої задачі використовувались наступні методи: електронної мікроскопії та оптичної мікроскопії, метод зважування, спектрометричний та термометричний

методи, методи розрахунку температурного поля та тиску з використанням прикладного програмного забезпечення та математичних пакетів.

Об'єктом досліджень є взаємодія потужного когерентного випромінювання з речовиною, що супроводжується генерацією ударних хвиль.

Предметом дослідження є особливості дії потужного когерентного випромінювання з матеріалами в прозорому конденсованому середовищі, керування параметрами лазерних ударних хвиль та дослідження характеристик опромінюваних матеріалів.

Наукова новизна одержаних результатів.

– Виявлено особливості розподілу температури при опроміненні в прозорому конденсованому середовищі лазером в режимі модульованої добротності, що дозволило пояснити механізм абляції матеріалів.

– Показано, що керування властивостями приповерхневих шарів світлотехнічних матеріалів при лазерній ударно-хвильовій обробці є більш ефективним при опроміненні в прозорому конденсованому середовищі, що підвищило енергетичну ефективність лазерної опромінювальної установки.

– Розроблено методику впровадження (імплантації) вуглецевих нанотрубок в твердотільну матрицю, що розширило можливості використання світлотехнічного комплексу на базі лазера, що працює в режимі модульованої добротності.

– Встановлено вплив одночасної дії теплового фактору та імпульсу тиску плазми на абляцію речовини та оптичні властивості матеріалів при опроміненні в прозорому конденсованому середовищі, що розширило можливість керування впливом потужного когерентного випромінювання на їх приповерхневі шари.

Практичне значення одержаних результатів.

– Показано можливість модифікації приповерхневих шарів матеріалів, що застосовуються у світлотехніці, опроміненням лазером в режимі генерації ударних хвиль.

– Показано можливості використання лазерної ударно-хвильової обробки як ефективного засобу підвищення міцності матеріалів та їх корозійної стійкості.

– Показано використання лазерної ударно-хвильової обробки як одного із методів впровадження (імплантації) нанотрубок в твердотільну матрицю.

Особистий внесок дисертанта. Дисертантом була проведена робота, пов'язана з пошуком та узагальненням наукових публікацій по темі дисертації. Автором вдосконалено окремі вузли комбінованої установки для генерації лазерних ударних хвиль [18] та проведено експерименти по дослідженню умов генерації імпульсів різної пічковості, а також по опромінюванню досліджуваних зразків при різних умовах [2, 11, 15, 17]. Дисертантом виконано комп'ютерне моделювання та експерименти по

вивченню абляції світлотехнічних матеріалів при опроміненні в ПКС та на повітрі [7, 9, 10, 12], експерименти по впровадженню нанотрубок в твердотільну матрицю та вивченню термо-ерс їх структур [3, 5, 13, 14, 16]. В співпраці з авторами відповідних друкованих праць дисертант приймала участь в розробці експрес–методики для діагностики пошкоджень при дії лазерних ударних хвиль та інтерпретації отриманих результатів експериментів і виявлених закономірностей [4, 8]. В роботах, що увійшли в дисертацію, авторові належить ініціатива у постановці задач, безпосередня участь в їх виконанні, отриманні та аналізі результатів.

Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах. Результати досліджень, представлених у дисертації, доповідались на III міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми й перспективи» (Тернопіль. 20-22 травня 2008 р.), на V Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии БФФХ-2009» (Севастополь 2009 р.), на Всеукраїнській науковій конференції ТНТУ імені Івана Пулюя (Тернопіль 2009 р.), на міжнародній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (Тернопіль 2009 р.), на міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (Тернопіль 2010 р.), на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання теоретичної і прикладної біофізики, фізики і хімії. БФФХ-2010» (Севастополь 2010 р.), на міжнародній конференції «E-MRS 2010 Fall Meeting» (Warsaw, Poland, 2010), на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики» (Харків 2011р.), на XV науковій конференції ТНТУ імені Івана Пулюя (Тернопіль 2011 р.), на науково-технічній конференції "Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування" (Тернопіль. 11-12 травня 2011 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 4 статтях в ліцензованих ВАК України журналах та в 14 тезах конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 156 сторінок, у тому числі 138 основного тексту, 33 рисунки та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, предмет та об'єкт дослідження, викладено задачі та методи дослідження, відображено

наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, реалізація і апробація отриманих результатів, структура дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз взаємодії когерентного лазерного випромінювання з матеріалами. Подано аналіз процесів, що протікають в матеріалах при опроміненні їх лазерними імпульсами різної тривалості та потужності. Зміна енергії та тривалості імпульсу призводить до зміни механізму взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами і в режимі модульованої добротності може супроводжуватись виникненням лазерних ударних хвиль. Проаналізовані механізм та критерій виникнення ударної хвилі, параметри лазерної ударно-хвильової обробки. Подано огляд сучасного стану взаємодії лазерного випромінювання при різних тривалостях дії, умовах опромінення, а також особливості лазерної абляції при дії імпульсів тривалістю 10^{-8} - 10^{-15} с. Проведено аналіз фізичних та математичних моделей, які показали особливості взаємодії потужного когерентного випромінювання з матеріалами, які необхідно враховувати при опроміненні в прозорому конденсованому середовищі (ПКС). Показано, що питання взаємодії потужних лазерних імпульсів з речовиною при опроміненні в ПКС є недостатньо вивченим, що зумовлює необхідність проведення відповідних теоретичних і експериментальних досліджень. В першу чергу, це стосується режимів, які супроводжуються виникненням лазерних ударних хвиль.

В цьому ж розділі подано обґрунтування актуальності поставленої задачі та визначено завдання, які необхідно виконати для досягнення мети дисертаційної роботи.

У **другому розділі** подано блок-схему світлотехнічного комплексу на базі лазера ГОС-1001 (рис. 1), наведено основні параметри лазерної установки, приведено оптичну схему опромінення зразків та схему реєстрації параметрів лазерного імпульсу. Для синхронізації моменту запуску вимірювальної апаратури і генерації імпульсу було сконструйовано пристрій синхронізації. Це дало можливість виключити вплив спалаху ламп та інших фізичних процесів, що відбуваються в лазерній установці під час генерації імпульсу на момент запуску апаратури та провести дослідження впливу стану LiF затвора та його орієнтації в резонаторі на енергетичні характеристики лазерного випромінювання. Описана методика опромінення матеріалів у ПКС з контролем амплітуди імпульсу тиску та методика дослідження розподілу енергії по перерізу світлової плями випромінювача при різних режимах, а також приставка для дослідження температурного поля матеріалу, опроміненого лазерним імпульсом. Наведено сучасні методи дослідження абляції, що використовуються в роботі, зокрема метод електронної мікроскопії. Для реєстрації імпульсу тиску лазерної ударної хвилі (ЛУХ) використано датчик тиску. Діапазон амплітуди імпульсів тиску в експериментах знаходився в межах 0,5-5,6 ГПа.

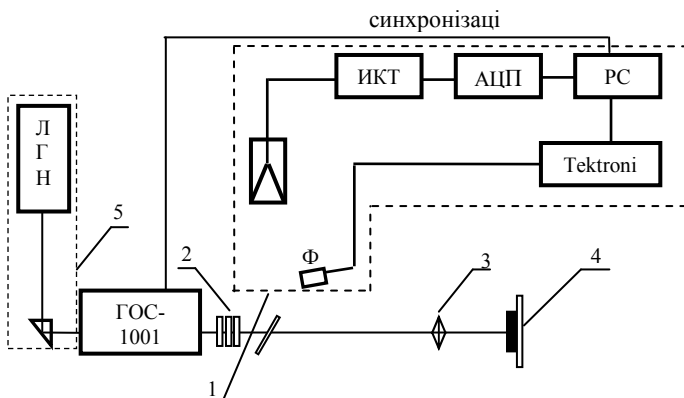


Рис. 1. Блок-схема світлотехнічного комплексу на базі лазера ГОС-1001.

Для підсилення тиску при опроміненні в якості ПКС перевага надавалась епоксидній смолі та воді.

У **третьому розділі** розглядається моделювання тиску лазерної ударної хвилі та моделювання температурного розподілу в матеріалі при опроміненні їх лазерним імпульсом в прозорому конденсованому середовищі.

При цьому тиск, що створюється плазмою при опроміненні в ПКС визначається формулою :

$$p = \sqrt{q \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{\rho_1 D_1 \cdot \rho_2 D_2}{\rho_1 D_1 + \rho_2 D_2}} \quad (1)$$

де q — густина потоку енергії;

ρ_1, ρ_2 — густини не збуджених середовищ 1 і 2 (середовище 1-ПКС, а середовище 2- зразок) ;

D_1, D_2 — швидкості розповсюдження переднього фронту хвилі тиску;

γ — показник адиабати утворених парів.

З точки зору інженерного підходу до аналізу можливостей лазерної ударно-хвильової обробки важливою є інша залежність (2), яка була отримана із формули (1). Вона є функцією технологічних параметрів процесу (необхідної кількості імпульсів, площі оброблюваної поверхні, товщини та типу ПКС, фокусної відстані робочого об'єктиву) і представлена нижче:

$$p = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{E}{\pi \tau_i} \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{\rho_1 D_1 \cdot \rho_2 D_2}{\rho_1 D_1 + \rho_2 D_2} \left[\frac{\Delta F}{2F} + H \left(\frac{1}{2F} - \frac{1}{\sqrt{n^2 (4F^2 + d^2) - d^2}} \right) \right]^{-1}} \quad (2)$$

де E — енергія лазерного імпульсу;

τ_i — тривалість лазерного імпульсу;

F — фокусна відстань лінзи;

ΔF – розфокусування (відстань від фокуса лінзи до поверхні матеріалу);

d – діаметр лазерного пучка;

n – показник заломлення прозорого конденсованого середовища;

H – товщина шару прозорого конденсованого середовища.

На основі даної формули обчислено тиск ударної хвилі при опроміненні лазерним імпульсом в режимі модульованої добротності. На рис. 2 показано графік залежності тиску ударної хвилі від розфокусування оптичної системи

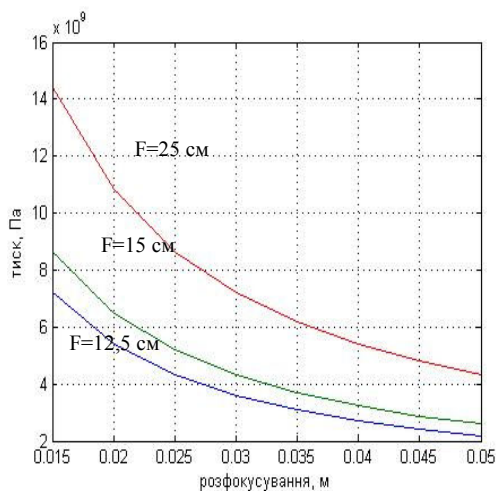


Рис. 2. Тиск УХ в сталі 15Х13МФ при опроміненні в ПКС

для зразка із сталі 15Х13МФ, опроміненого лазерним імпульсом в режимі модульованої добротності в прозорому конденсованому середовищі (епоксидна смола), для лінз з різними фокусними відстанями.

Для лінзи з фокусною відстанню 12,5 см при розфокуванні системи на 2,5 см тиск зменшується в 2 рази. При зміні товщини шару ПКС від 200 до 600 мкм тиск практично не змінюється, а невеликі зменшення площі плями при збільшенні товщини ПКС, що має збільшувати тиск, компенсується поглинанням в ПКС. Це дає можливість

керувати величиною тиску ЛУХ та враховує особливості параметрів оптичної системи технологічних установок, призначених для лазерної ударно-хвильової обробки.

На основі фізичної моделі, що відтворює теплові процеси, які супроводжують лазерну ударно-хвильову дію на матеріали в прозорому конденсованому середовищі, нами розроблено програму для розрахунку температурного поля в зразку, покритті та ПКС при опроміненні лазерним пучком для різних енергій та тривалостей, виду та товщини ПКС. Це дозволяє здійснювати математичне моделювання для різних технологічних умов взаємодії лазерного імпульсного випромінювання з матеріалами.

Аналіз фізичних процесів при опроміненні лазером в режимі генерації ударної хвилі та попередні оцінки показали, що розрахунок температурного

поля необхідно проводити в декілька етапів, які включають графічний, аналітичний та числовий методи. При цьому на кожному етапі слід враховувати форму джерела, розподіл енергії між ПКС та оброблюваним зразком, тривалість дії джерела теплової енергії. В залежності від етапу джерелом енергії є лазерний імпульс (трикутної, трапецієвидної або прямокутної форми), плазма, утворена внаслідок дії лазерного випромінювання, товщина якої залежить від кількості пічків, що складають лазерний імпульс.

Для режиму модульованої добротності в початковий момент дії часову структуру імпульсу прийнято описувати лінійною залежністю від часу (для $t < 10^{-9}$ с). При цьому до уваги приймається, що у першому наближенні густина потоку енергії в імпульсі модульованої добротності наростає і спадає лінійно. Аналітичний розв'язок нами розглядався для двох інтервалів часу $\left(0; \tau_i/2\right)$ та $\left(\tau_i/2; \tau_i\right)$, хоча метод дозволяє обрахувати температурне поле зразка, опроміненого лазерним імпульсом довільної форми.

Було прийнято умову $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ (r_0 — радіус плями на поверхні зразка, a — температуропровідність зразка, τ — тривалість імпульсу), що дозволило вважати задачу одномірною.

Коефіцієнт відбивання усереднювався та вважався постійним, а товщина шару, в якому відбувається процес первинного поглинання δ , приймалася рівною $1/\mu$, де μ — коефіцієнт поглинання.

Розподіл температури в зразку при дії на нього лазерного імпульсу, що відповідає режиму модульованої добротності, виражається формулою:

$$T(z,t) = \frac{q\sqrt{a}}{\lambda\tau} \left[(4t)^{3/2} i^3 \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} - 2(4(t-\tau))^{3/2} i^3 \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right], \quad (3)$$

$$\text{де } i \operatorname{erfc}(x) = \int_x^\infty \operatorname{erfc}(x) dx = (1/\pi^{1/2}) e^{-x^2} - x \operatorname{erfc}(x);$$

λ — теплопровідність;

q — густина енергії;

a — коефіцієнт температуропровідності матеріалу;

z — координата;

τ — тривалість лазерного імпульсу.

Обчислення температурного поля, коли енергія спадає, проводилось на основі теорії про фіктивні джерела, які можуть мати різну форму. Під фіктивним джерелом розуміють джерело тепла з від'ємною інтенсивністю, рівній інтенсивності джерела, що включено в відповідний момент часу.

Графічний метод аналізу показав, що момент вибору включення фіктивного джерела при моделюванні залежить від форми лазерного

імпульсу та її наближення до реального відображення структури джерела енергії.

Аналітичний розв'язок нами розглядався для двох інтервалів часу, хоча метод дозволяє обрахувати температурне поле зразка, опроміненого лазерним імпульсом довільної форми.

Проведені розрахунки показали, що в нашому випадку, внаслідок високих густин потоку лазерної енергії (до ГВт/см²), поверхневий шар досягає стану плазми за короткий час ($\tau_0 < 3$ нс) практично для всіх досліджуваних оптично непрозорих матеріалів.

При опроміненні матеріалу в прозорому конденсованому середовищі обчислення температурного поля дещо ускладнюється. Після закінчення дії лазерного імпульсу джерелом енергії стає плазма, утворена лазерним імпульсом і затримана ПКС. Інтенсивність такого джерела повинна падати протягом часу за законом $\sim \arccos(t/\tau_0)^{1/2}$, де $t = \frac{2l}{c}$ (l – товщина ПКС, c –

швидкість розповсюдження звуку в даному ПКС). Аналіз показав, що при наших умовах експерименту ($t \gg \tau_0$) форму джерела можна приймати прямокутною. Аналітичний розв'язок для такого типу джерела має вигляд:

$$T(z, t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \quad (4)$$

Після закінчення дії імпульсу енергія за рахунок теплопередачі продовжує розповсюджуватися в глибину зразка.

Для визначення температурного розподілу в матеріалі після закінчення дії імпульсу використано формулу:

$$T = \frac{T_0 x^2}{(t + \frac{x^2}{2a})2a} \exp\left(-\frac{z^2}{4a(t + \frac{x^2}{2a})}\right), \quad (5)$$

де T_0 — температура кипіння матеріалу;

x — товщина шару, що досягла температури кипіння;

z — координата.

На основі моделювання температурного поля було оцінено товщину винесеного шару під час абляції при опроміненні матеріалу на повітрі і в ПКС. Проведені оцінки відповідно до теплової моделі опромінення показують, що значну роль у винесенні маси відіграє затримка моменту початку процесу виносу при наявності ПКС, яка збільшує товщину винесеного шару вдвічі, порівняно з опроміненням на повітрі. Результати експериментів узгоджуються з відомими літературними даними при опроміненні у вакуумі та у газовому середовищі.

Проведені у рамках моделі розрахунки відповідають отриманим експериментальним результатам, коли вважати, що потік лазерної енергії поглинутої шаром плазми зменшується експоненціально з глибиною,

досягаючи на поверхні матеріалу значення $Q = Q_0 e^{-\kappa(z)z}$, де $\kappa(z)$ — коефіцієнт поглинання екрануючого шару, що включає плазму і пари. Коефіцієнт $\kappa(z)$ має значно відрізнитись від оптичного коефіцієнта поглинання. Згідно експериментальних даних по винесенню речовини для міді він становить 21 м^{-1} , а для сталі 28 м^{-1} .

Встановлено, що на значення коефіцієнта $\kappa(z)$ впливає особливий характер перерозподілу енергії між плазмою і поверхнею матеріалу під час дії лазерного імпульсу, а також інтерференційні процеси під час опромінення, які викликають перерозподіл температури поверхні.

При лазерній ударно-хвильовій дії в матеріалі відбувається одночасне проходження ударної і теплової хвиль. При „зустрічі” цих двох хвиль в матеріалі виникають точкові дефекти та дислокації. Аналіз результатів комп’ютерного моделювання показав, що „зустріч” теплової хвилі (амплітудне значення температури до 100°C) та ударної хвилі, що мають різну швидкість розповсюдження, відбувається в приповерхневому шарі товщиною 20 мкм при товщині зразка із сталі 4 мм . Це означає, що при опроміненні в ПКС такого зразка на глибинах більших 20 мкм пояснити зміни властивостей можна тільки врахувавши вплив ударно-хвильового фактора лазерної дії. Експерименти, проведені в роботах по дослідженню зміни механічних властивостей при опроміненні в прозорому конденсованому середовищі, підтвердили правильність наших розрахунків. Так, при дослідженні корозійної стійкості зразків із сталі $15\text{X}13\text{МФ}$ товщиною 4 мм в рідкому кислотному середовищі спостерігається підвищення корозійної стійкості на глибині більше 50 мкм . Швидкість корозії залежала від глибини і в області $5\text{--}20 \text{ мкм}$ вона спадала. Ця область відповідає „точці зустрічі” теплової і ударної хвилі.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням особливостей взаємодії потужного лазерного випромінювання, що супроводжується виникненням ударних хвиль малої амплітуди, із матеріалами світлотехніки. Експериментально виявлено наявність дефектної області LiF кристалу, який використовується в якості модулятора добротності лазерного комплексу на базі ГОС-1001 та досліджено її вплив на стабільність роботи установки. Проаналізовано зміни морфології поверхні та коефіцієнта відбивання оптично непрозорих матеріалів при опроміненні їх в різних режимах, запропоновано використання світлотехнічного комплексу для діагностики пошкоджень в матеріалі та імплантації нанотрубок в твердотільну матрицю.

Встановлено, що одним із факторів, який впливає на генерацію моноімпульсів, є спосіб розміщення модулятора в резонаторі лазерної установки відносно дзеркал та активного елемента. Багаторічні використання показують, що із появою дефектів в LiF затворах збільшується порогова енергія накачки ламп для генерації моноімпульсу. Однак, при цьому затвор

можна застосовувати в установці для проведення лазерної ударно-хвильової обробки, змінюючи умови випромінювання.

Проведено експериментальні дослідження оптичних спектрів пропускання та спектрального розподілу оптичної густини LiF кристалічного затвору як і бездефектної так і дефектної областей та вплив стану затвору на енергетичні параметри лазерного випромінювання. На рис. 3 представлено

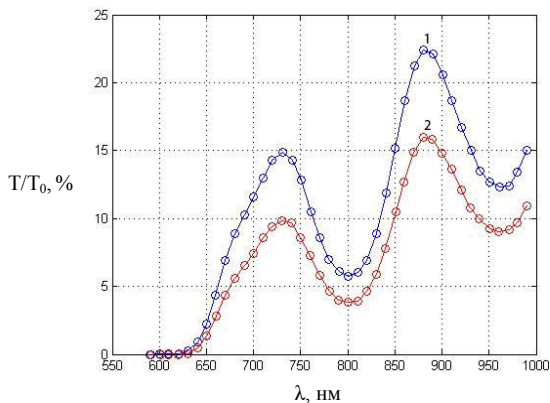


Рис. 3. Спектр пропускання LiF кристалу:
1 – бездефектна область
2 – дефектна область

спектри пропускання LiF кристалу з дефектною областю, що має форму конуса. Визначені загальні розміри дефектної області шляхом дослідження інтегрального пропускання та досліджено роль розміщення дефектів в резонаторі на енергетичні параметри лазерного імпульсу та його пічковість. Генерація лазера залежить від глибини розташування вершини конуса дефектів.

Експериментально встановлено, що можливі такі положення затвору із дефектами, при яких

затвор повністю не спрацює, і спостерігається режим вільної генерації. Це відбувається внаслідок часових змін співвідношення порогової населеності інверсних рівнів та населеності, досягнутої накачкою ламп в експерименті.

При зміні положення затвора відносно дзеркал змінюються енергетичні умови генерації лазерних імпульсів та порогова напруга накачки, енергія лазерного імпульсу та кількість пічків (кількість моноімпульсів, що генерується за один імпульс накачки). При цьому енергія імпульсу в положенні дефектної області затвора ближче до дзеркала, ніж до активного елемента, зменшується в 1,5-2 рази при максимальній енергії накачки 15 кДж. Результати досліджень дозволяють обрати найбільш ефективне розміщення LiF затвора з дефектами при розв'язуванні конкретних задач лазерної ударно-хвильової обробки.

Експериментальне дослідження абляції речовини при опроміненні матеріалів, що застосовуються у світлотехніці, проводилось шляхом визначення винесеної маси та імпульсу віддачі методом маятника. Експерименти показали, що при опроміненні на повітрі винесена маса на одиницю енергії для різних матеріалів відрізняється до 10-12 разів.

Винесення маси нелінійно залежить від густини потоку енергії. Експериментально виявлено, що при опроміненні в ПКС кількість маси винесеної речовини з сталі, міді та алюмінію під час абляції в меншій мірі залежить від теплофізичних характеристик матеріалу, ніж при опроміненні на повітрі.

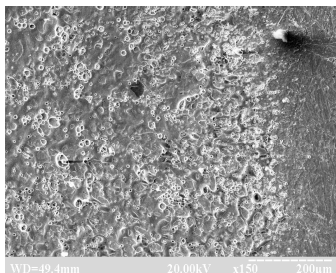
В першу чергу при аналізі результатів абляції матеріалів, опромінених лазером в режимі модульованої добротності, слід звертати увагу на оптичні характеристики матеріалу та лазерного випромінювання. Встановлено, що поріг абляції для фторопласта при опроміненні неодимовим лазером в режимі модульованої добротності значно вищий, ніж у металах, і становить величину $q > 1,5 \times 10^9$ Вт/см², що необхідно враховувати при його технологічних застосуваннях. В даній роботі це стосується вибору підкладки при лазерній імплантації нанотрубок.

Опромінення матеріалів лазером в режимі генерації ударних хвиль, перш за все, приводить до зміни поверхні зразка. Внаслідок перерозподілу енергії в залежності від середовища, в якому здійснюється опромінення, на поверхні зразка в зоні дії імпульсу змінюється рельєф та структура. Важливий вплив на рельєф поверхні сталі при опроміненні в ПКС чинить пічковість лазерного імпульсу. На рис. 4 представлено фотографії опроміненої поверхні сталі в прозорому конденсованому середовищі (епоксидна смола) двошпівковим лазерним імпульсом енергією 20 Дж/см² (а) та одношпівковим лазерним імпульсом енергією 10 Дж/см² (б).

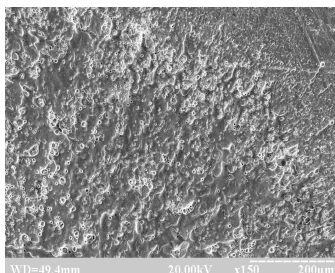
На рис. 5 показано фотографію поверхні міді, опроміненої в ПКС (епоксидна смола) одношпівковим лазерним імпульсом енергією 8,6 Дж/см². На рис. 6 представлено фотографію рельєфу поверхні міді, опроміненої лазерним імпульсом енергією 8,1 Дж/см² на повітрі.

Як видно з фотографій опромінених поверхонь (рис. 4, 5, 6), на поверхні як сталі, так і міді утворюються періодичні структури, а розподіл розплавленої речовини на поверхні опроміненого в ПКС матеріалу, суттєво відрізняється від розподілу при опроміненні на повітрі.

Із наведених експериментальних результатів опромінення матеріалів лазером в режимі модульованої добротності випливає, що матеріали із різними теплофізичними властивостями при опроміненні в різних середовищах дають суттєві відмінності в рельєфі поверхні при однаковому розподілі густини потоку енергії оптичного випромінювача неодимового лазера ГОС 1001.



а)



б)

Рис.4. Поверхня сталі 15X13МФ, опроміненої в ПКС:
а) двопічковий режим 20 Дж/см^2 (збільшення в 150 разів)
б) однопічковий режим 10 Дж/см^2 (збільшення в 150 разів)

Вимірювання мікротвердості показали, що при опроміненні матеріалів в ПКС сильно змінюється структура приповерхневого шару матеріалу.

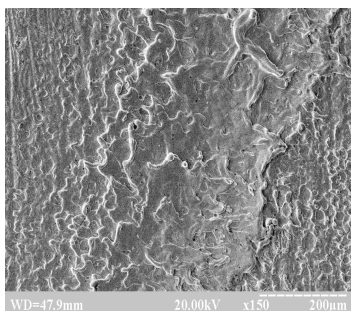


Рис.5. Поверхня титану,
опроміненої в ПКС
 $E=8,6 \text{ Дж/см}^2$
(збільшення в 150 разів)

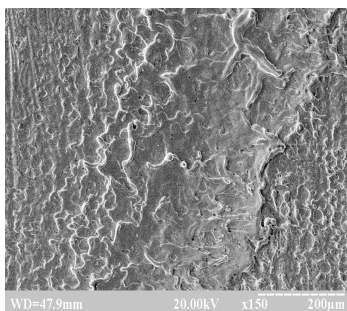


Рис.6. Поверхня титану,
опроміненої в ПКС
 $E=8,1 \text{ Дж/см}^2$
(збільшення в 150 разів)

Встановлено, що розподіл застиглої речовини на краю та в центрі матеріалів після опромінення кардинально відмінний. В залежності від відстані до центру плями опромінення та густини потоку випромінювання, візуальна картина може бути піноподібною, хвиляподібною або мати вигляд візерунку. Періодичність повторень хвиль, утворених після застигання матеріалу внаслідок дії тиску плазми та імпульсу віддачі при однакових умовах опромінення, відрізняється для сталі та титану. Так, при опроміненні на повітрі однопічковим лазерним імпульсом хвиляподібний рельєф повторюється з кроком 35-15 мкм в титану та 75-65 мкм в сталі. При опроміненні в ПКС крок становить 25-20 мкм в титану та лежить в межах 92-58

мкм для сталі. Крок зменшується в міру віддалення від центру плями опромінення.

Зміна морфології поверхні свідчить про зміну ролі механізмів абляції при переході в іншу область густин потоків опромінення. На поверхні виникають капілярні хвилі, які викликані різними нестійкостями опромінюваної поверхні при її нагріванні, плавленні, випаровуванні, що залежать від густини потоку енергії лазера та середовища в якому здійснюється опромінювання. Із співставлення результатів по зважуванню опромінюваних зразків та електронної мікроскопії їх поверхні впливає, що приповерхневий шар речовини не тільки виноситься внаслідок абляції, але і розтікається по поверхні. Розтікання відбувається по-різному в залежності від середовища, в якому проводиться опромінювання. Кількість винесеної маси при абляції в досліджуваному нами інтервалі густини потоку і опроміненні на повітрі зменшується при збільшенні густини потоку.

При опроміненні на повітрі збільшення густини потоку в даному інтервалі енергій приводить до збільшення частини енергії, що йде на нагрівання плазми та збільшує швидкість її розльоту, а маса випаровуваної речовини зменшується. В однопічковому та двопічковому режимах величина енергії за один імпульс накачки відрізняються дуже сильно. Відповідно відрізняється і випаровувана маса.

При опроміненні в ПКС на абляцію значно впливає тиск плазми на поверхню. Дія плазми приводить до двох конкуруючих факторів: винесення речовини та її розтікання по поверхні зразка, що опромінюється. Цим пояснюються відмінності при абляції як для різних матеріалів, так і для різних густин потоків енергії та пічковості. Крім того, на морфологію поверхні та винесення маси впливають також неоднорідне нагрівання внаслідок неоднорідності розподілу енергії по плямі, тиск віддачі при просторово неоднорідному випаровуванні з поверхні та залежність термокапілярних сил від температури. Дослідження мікротвердості показали, що ударно-хвильовий режим лазерного впливу сильно змінює структуру приповерхневого шару зразків сталі та алюмінію. Для сталі мікротвердість після опромінення в ПКС зросла в 2 рази, а для алюмінію – в 1,5 рази. Мікротвердість мідних зразків не змінюється, водночас корозійна стійкість сталей, алюмінієвих та мідних зразків підвищується. Це проявляється в значному сповільненні окислення зразків опромінених в ПКС.

Для дослідження коефіцієнта дифузного відбивання, що є важливим для практичних задач світлотехніки, було виготовлено та опромінено спеціальні зразки зі сталі, алюмінію, алюмінію із імплантованими нанотрубками та міді. Дані експериментів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

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

Оскільки при ЛУХ 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 даних матеріалів, в місцях їх кріплення доцільно обробляти потужними лазерними імпульсами.

В даному розділі також розглянуто можливості використання світлотехнічного комплексу на базі лазера ГОС-1001 для імплантації нанотрубок в твердотільну матрицю. На основі електронної мікроскопії поверхні до та після опромінення встановлено впровадження нанотрубок в алюмінієву матрицю. За допомогою комп'ютерного моделювання температурного поля при опроміненні лазерними імпульсами в ПКС, що описано в розділі 3, дано пояснення, що розігрівання поверхні підкладки при впровадженні нанотрубок відіграє первинну роль. При цьому враховано відмінності теплофізичних властивостей алюмінієвої підкладки та вуглецевих нанотрубок, насипний характер нанотрубок та неоднорідність їх розподілу по товщині, а на процес імплантації впливає тиск плазми, затриманої ПКС.

Наведено аналіз результатів по енерговиділенню в матеріалах, що застосовуються у світлотехніці, при їх опроміненні лазером в режимі генерації ударних хвиль малої амплітуди. На основі термометричного методу вимірювалась величина енергії, що включає як енергію, яка виділяється від теплового фактору лазерної дії, так і енергію, яка вивільняється внаслідок процесів, пов'язаних з проходженням по зразку лазерної ударної хвилі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання вивчено актуальну задачу взаємодії потужного когерентного випромінювання з матеріалами, що застосовуються в світлотехніці.

1. Розроблено науково-практичний підхід до аналізу досліджень лазерної ударно-хвильової обробки в прозорому конденсованому середовищі. Запропоновано аналітичний вираз для розрахунку тиску ударної хвилі. Показано способи керування величиною тиску ударної хвилі шляхом зміни параметрів оптичної системи лазерної установки, товщини та виду прозорого конденсованого середовища.

2. Проведено розрахунок температурних полів в матеріалі при дії лазера в режимі модульованої добротності. Вирішено задачу математичного моделювання розподілу температури в матеріалах при опроміненні лазером модульованої добротності в прозорому конденсованому середовищі.

3. За результатами комп'ютерного моделювання встановлено особливості керування властивостями приповерхневих шарів матеріалів при наявності теплового та ударно-хвильового факторів лазерної дії.

4. На основі досліджень спектрів пропускання LiF затвору встановлено його вплив на енергетичні параметри лазерного випромінювання. Виявлено можливість вибору найбільш ефективного розміщення затвору при розв'язанні конкретних задач лазерної ударно-хвильової обробки.

5. З'ясовані особливості механізмів абляції при опроміненні в різних середовищах матеріалів, що застосовуються в світлотехніці, які впливають на рельєф та структуру приповерхневих шарів.

6. На основі теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень розроблено методику впровадження (імплантації) нанотрубок в твердотільну матрицю, що дозволило розширити можливості використання світлотехнічного комплексу на базі лазера, що працює в режимі модульованої добротності.

7. Наведено експериментальні результати по дослідженню енерговиділення в матеріалах, пов'язаних з проходженням по них лазерних ударних хвиль, та подано їх аналіз на основі запропонованої математичної моделі розрахунку температурних полів.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Ю. Нікіфоров. Лазерна ударно-хвильова обробка матеріалів: фізичні аспекти та вимоги до відповідних світлотехнічних установок / Ю. Нікіфоров, Б. Ковалюк, О. Ржешевська, О. Маньовська // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – № 4. – С. 201–205.

2. Ю. Нікіфоров. Дослідження енергетичних характеристик світлотехнічної лазерної установки з LiF затвором / Ю. Нікіфоров, Б. Ковалюк, О. Маньовська, В. Мочарський // Світлотехніка та електроенергетика. – 2011. – №2 (26). – С. 24–27.

3. Ю. Нікіфоров. Впровадження нанотрубок в твердотільну матрицю за допомогою потужного лазера із модульованою добротністю / Ю. Нікіфоров, Б. Ковалюк, В. Гладь, О. Маньовська // Прогресивні технології та прилади: збірник статей. – Луцьк: ЛНТУ, 2011. – Випуск 1. – С. 136–146.

4. Ю. Нікіфоров. Експрес-метод оцінювання енергетичних процесів у матеріалах при дії потужного лазера / Ю. Нікіфоров, Б. Ковалюк, О. Маньовська // Вісник ТНТУ, 2010. – Т. 15, № 4. – С. 160–167.

5. Yuriy Nikiforov. Modeling of implantation of carbon nanotubes into solid substrate / Yuriy Nikiforov, Mihajlo Nischenko, Bogdan Kovalyuk, Oksana Manyovska. — Book of abstracts of European Materials Research Society „E-MRS 2010 Fall Meeting”. – Warsaw (Poland) September, 2010.

6. Фізичні аспекти лазерної ударно-хвильової обробки матеріалів та вимоги до відповідних світлотехнічних установок : матеріали III міжнародної науково-технічної конференції ["Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми й перспективи"] (Тернопіль, 2008 р.) / Міністерство освіти і науки України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. – Тернопіль : ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 2008. – С. 62–63.

7. Моделювання температурного поля в матеріалах при опроміненні лазером в режимі генерації ударних хвиль: материалы V Международной научно-технической конференции ["Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии. БФФХ-2009"] (Севастополь, 2009 р.) / Міністерство освіти і науки України, Севастопольський національний технічний університет. — Севастополь : Севастопольський національний технічний університет, 2009. – С. 45–46.

8. Розробка експрес-методики для діагностики пошкоджень при дії лазерних ударних хвиль : праці конференції ["Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування"] (Тернопіль, вересень 2009 р.) / Міністерство освіти і науки України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. – Тернопіль : ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 2009 – С. 207–212.

9. Комп'ютерне моделювання точки зустрічі ударної та теплової хвиль в матеріалі при обробці лазером в режимі модульованої добротності : матеріали міжнародної науково-технічної конференції ["Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій"] (Тернопіль, 2010 р.) / Міністерство освіти і науки України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. – Тернопіль : ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 2010. – С.29.

10. Лазерна абляція матеріалів при опроміненні на повітрі в прозорому конденсованому середовищі : материалы VI Международной научно-технической конференции ["Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии. БФФХ-2010"] / Міністерство освіти

і науки України, Севастопольський національний технічний університет. — Севастополь : Севастопольський національний технічний університет, 2010. — Т. 1. — С. 83–86.

11. Дослідження енергетичних характеристик світлотехнічної лазерної установки з Li-F затвором : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції ["Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики"] (Харків, 13-14 квітня 2011 р.) / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Харківська національна академія міського господарства . — Х. : Харківська національна академія міського господарства, 2011 — С. 155

12. Особливості розрахунку температурних полів матеріалів під дією потужних світлових імпульсів, що проходять через прозоре конденсоване середовище : матеріали Всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. (Тернопіль, 2009 р.) / Міністерство освіти і науки України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. — Тернопіль : ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 2009. — С. 250

13. Термо-ЕРС. структури алюміній-нанотрубки, отриманого після опромінення наносекундним лазерним імпульсом : матеріали першої науково-технічної конференції ["Інформаційні моделі, системи та технології"] (Тернопіль, 20 травня 2011 р.). Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. — Тернопіль : ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 2011. — С. 62.

14. Визначення термо-ЕРС в алюмінієвій матриці з введеними нанотрубками : збірник тез доповідей чотирнадцятої наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя / Міністерство освіти і науки України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. — Тернопіль : ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 2010. — С. 62.

15. Ефективність використання LiF затвору з дефектами у світлотехнічній установці для лазерної ударно-хвильової обробки : матеріали першої науково-технічної конференції ["Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики"] (Тернопіль, 19 травня 2011 р.) / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. — Тернопіль : ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 2011. — С. 25–26.

16. Експериментальне дослідження термо-ЕРС алюмінієвої матриці з введеними нанотрубками : матеріали наукового семінару, присвяченого 20-річчю Українського фізичного товариства. / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. — Тернопіль: ТНТУ, 2011. — С. 31–32.

17. Дослідження спектрів дефектної та бездефектної області LiF затвора лазерної установки ГОС 1001 : матеріали XV наукової конференції ТНТУ імені Івана Пулюя / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. — Тернопіль: ТНТУ, 2011 — С. 177.

18. Запуск реєструючої системи для задач взаємодії лазерного випромінювання з речовиною : матеріали науково-технічної конференції

["Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування"] (Тернопіль, 11-12 травня 2011 р.) / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, ТНТУ ім. Ів. Пулюя. — Тернопіль: ТНТУ, 2011 – С. 87–88.

АНОТАЦІЯ

Маньовська О.А. Взаємодія потужного когерентного випромінювання з матеріалами, що застосовуються у світлотехніці. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 — світлотехніка та джерела світла. – ТНТУ імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2012.

Дисертація присвячена встановленню основних закономірностей дії потужних лазерних імпульсів в режимі генерації ударних хвиль на матеріали при наявності прозорого конденсованого середовища. Отримано аналітичний вираз для розрахунку тиску ударної хвилі. Запропоновано способи керування величиною тиску ударної хвилі шляхом зміни параметрів оптичної системи лазерної установки, товщини та виду прозорого конденсованого середовища. Вдосконалено математичну модель розрахунку температурних полів в матеріалах, опромінених наносекундним лазерним імпульсом в прозорому конденсованому середовищі. На її основі встановлено особливості механізму абляції при опроміненні в прозорому конденсованому середовищі, їх вплив на рельєф та структуру приповерхневих шарів матеріалів. Досліджено спектр пропускання LiF затвору з дефектами та вплив його стану на енергетичні параметри лазерного випромінювання, що дає можливість вибору найбільш ефективного розміщення затвору при розв'язанні конкретних задач лазерної ударно-хвильової обробки. Розроблено методику впровадження нанотрубок в твердотільну матрицю та проведено аналіз експериментальних результатів по дослідженню енерговиділення в матеріалах, пов'язаних з проходженням по них лазерних ударних хвиль.

Ключові слова: потужне когерентне випромінювання, прозоре конденсоване середовище, лазерна ударна хвиля, взаємодія випромінювання з матеріалами.

АННОТАЦИЯ

Маневська О.А. Взаимодействие мощного когерентного излучения с материалами, которые применяются в светотехнике. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 — светотехника и источники света. - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2012.

Диссертация посвящена установлению основных закономерностей воздействия мощных лазерных импульсов в режиме генерации ударных волн на материалы при наличии прозрачной конденсированной среды. Получено аналитическое выражение для расчета давления ударной волны. Предложены способы управления величиной давления ударной волны путем изменения параметров оптической системы лазерной установки, толщины и вида прозрачной конденсированной среды. Усовершенствована математическая модель расчета температурных полей в материалах, облученных наносекундными лазерными импульсами в прозрачной конденсированной среде. На ее основе установлены особенности механизма абляции при облучении в прозрачной конденсированной среде, их влияние на рельеф и структуру приповерхностных слоев. Показано, что управление свойствами приповерхностных слоев светотехнических материалов при лазерной ударно-волновой обработке более эффективно при облучении в прозрачной конденсированной среде с учетом температурных условий. Исследованы спектр пропускания LiF затвора с дефектами и влияние его состояния на энергетические параметры лазерного излучения, что дает возможность выбора наиболее эффективного размещения затвора при решении конкретных задач лазерной ударно-волновой обработки. Разработана методика внедрения нанотрубок в твердотельную матрицу и проведен анализ экспериментальных результатов по исследованию энерговыделения в материалах, связанного с прохождением по ним лазерных ударных волн.

Ключевые слова: мощное когерентное излучение, прозрачная конденсированная среда, лазерная ударная волна, взаимодействие излучения с материалами.

ABSTRACT

Manovska O. Interaction of powerful coherent radiation with materials that are used in lighting engineering. — Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.09.07 – Light engineering and light sources. - Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2012.

In the thesis the impact of high-power laser pulses in the shock waves generation mode on materials in the presence of transparent condensed medium is studied. A theoretical model of pressure and temperature field within material under laser treatment in transparent condensed medium is proposed. The analytical formula for shock wave pressure is based on geometrical refraction of light by optical system and transparent condensed medium. The results of modelling allow choosing the optimal conditions of laser treatment by Q-switched laser GOS-1001 with LiF modulator. The transmission spectrum of LiF modulator with defects is studied. A method for the implantation of nanotubes into a solid matrix has been

proposed and the experimental results on release of energy associated with shock wave propagation are analyzed.

Keywords: power coherent radiation, transparent condensed medium, laser shock wave, radiation interaction with materials.

Підписано до друку _____.2012 р.
Формат паперу 60х90/16. Папір друк. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 0,9.
Наклад 120 прим. Зам. № 99/69

Віддруковано у видавничому центрі “Вектор”
46018, м. Тернопіль, вул. Кривоноса, 2б,
Тел. (0352) 40-08-12, (0352) 40-00-63

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ТР №33 від 06 грудня 2007р.
СПД Созанський А. М.