

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра Лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Фізика взаємодії
концентрованих потоків енергії з речовиною - 2

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів
до вивчення кредитного модуля
для студентів спеціалізації
«Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки»
спеціальності 131 Прикладна механіка

*Рекомендовано вченою радою Механіко-машинобудівного інституту НТУУ
«КПІ ім. І.Сікорського»*

Київ
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»
2017

Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною - 2:
Методичні вказівки до самостійної роботи студентів до вивчення кредитного модуля для студентів спеціалізації «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки» спеціальності 131 Прикладна механіка / Уклад. В.В. Романенко, О.С. Козирєв, – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 13 с.

*Гриф надано вченою радою
ВПІ НТУУ «КПІ»
(протокол №__ від _____ р.)*

*Ухвалено на засіданні кафедри графіки ВПІ НТУУ «КПІ»
(протокол №__ від _____ р.)*

Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною-2

Методичні вказівки
до самостійної роботи студентів до вивчення кредитного модуля
спеціалізації
«Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки»
спеціальності 131 Прикладна механіка

Укладачі	Романенко В.В., к.т.н., доц. Козирєв О.С., ст. викл.
Відповідальний редактор	Котляров В.П., д.т.н., проф.
Рецензент	Малафєєв Ю.М. , к.т.н., доц.

Зміст

1. Мета та завдання кредитного модуля.....	2
2. Структура кредитного модуля.....	3
3. Організація навчального процесу.....	3
4. Лекційні заняття.....	6
5. Практичні заняття.....	9
6. Лабораторні заняття.....	10
7. Оцінювання результатів навчання.....	11
8. Контакти із викладачем.....	13
9. Література.....	13

1. Мета та завдання кредитного модуля

Метою кредитного модуля є формування у студентів здатностей:

- Здатність аналізувати процеси лазерного випаровування
- Здатність використовувати фізичні моделі лазерного руйнування;
- Здатність аналізувати процеси лазерного різання безперервним та імпульсно-періодичним випромінюванням;
- Здатність розраховувати параметри газолазерного різання;
- Здатність аналізувати вплив енергетичних, оптичних та газодинамічних параметрів на процеси лазерного різання;

Основні завдання кредитного модуля.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати такі результати навчання:

знання :

- Знання особливостей руйнування під дією лазерного випромінювання.
- Знання фізичних моделей лазерного руйнування;
- Знання особливостей ГЛР з використанням різних технологічних газів;
- Знання особливостей імпульсно-періодичного лазерного різання;
- Знання фізичних моделей лазерного різання для різних режимів роботи лазера;
- Знання енергетичних, оптичних та газодинамічних параметрів лазерного різання

уміння:

- Уміння розрахувати температуру металу при дії на нього лазерного джерела теплоти в заданій точці та в заданий момент часу, залежно від типу теплової задачі;
- Уміння оцінити критичну для фазових переходів густину потужності;
- Уміння розрахувати параметри руйнування під дією лазерного випромінювання;
- Уміння розрахувати параметри лазерної різки металів безперервним та імпульсно-періодичним випромінюванням;
- Уміння розрахувати оптимальні енергетичні, оптичні та газодинамічні параметри лазерного різання;

досвід:

- Досвід у практичному використанні фізичних моделей лазерного імпульсного руйнування;
- Досвід у керуванні режимами газолазерного та імпульсно-періодичного різання;

2. Структура кредитного модуля

Всього		Розподіл навчального часу за видами занять				Семестрова атестація
Кредитів	Годин	Лекційні заняття	Практичні заняття	Лабораторні заняття	СРС	
4,5	135	18	36	18	63	Екзамен

3. Організація навчального процесу**Календарно-тематичний план засвоєння навчальної дисципліни**

Тиждень	Зміст навчальної роботи
1	<p>Лекція 1 Руйнування матеріалів під дією лазерного випромінювання. Етапи взаємодії випромінювання з речовиною. Кінетика процесу руйнування. Квазістаціонарне руйнування.</p> <p>Практичне заняття 1 Плавлення металів під дією лазерного випромінювання</p> <p>Лабораторне заняття 1 Руйнування матеріалів під дією лазерного імпульсного випромінювання</p>
3	<p>Лекція 2 Припущення, на яких базується тепловий механізм руйнування. Теплова задача в рухомих координатах. Перехідний режим. Оптимальний режим випаровування.</p> <p>Практичне заняття 2 Тепловий механізм руйнування</p> <p>Лабораторне заняття 2 Взаємодія імпульсного лазерного випромінювання з металевими сплавами. Вимірювання температуропровідності матеріалу.</p>

Тиждень	Зміст навчальної роботи
5	<p>Лекція 3 Схема світлового конусу. Рівняння енергетичного балансу. Залежність питомого виносу маси від густини енергії.</p> <p>Практичне заняття 3 Феноменологічна модель процесу руйнування</p>
7	<p>Лекція 4 Можливі процеси при лазерному розділенні матеріалів. Фізичний та хімічний механізми різки. Схеми подавання технологічного газу. Функції кисню. Некерована різка. Грат. Стаціонарне та нестаціонарне руйнування. Кінетика формування різку за високих та низьких швидкостей.</p> <p>Практичне заняття 4 Лазерне різання металів безперервним випромінюванням</p> <p>Лабораторне заняття 3 Газолазерна різка матеріалів потужним безперервним лазерним випромінюванням</p>
9	<p>Лекція 5 Рівняння енергетичного балансу та реакції окислення. Розрахунок геометричних параметрів різку. Дві схеми формування різку. Геометричні параметри різку. Граничні режими різання імпульсно-періодичним випромінюванням. Функція кисню при різанні імпульсно-періодичним випромінюванням.</p> <p>Практичне заняття 5 Лазерне різання металів імпульсно-періодичним випромінюванням</p> <p>Лабораторне заняття 4 Різка матеріалів імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням</p>
11	<p>Лекція 6 Групи металів за топографією бічної поверхні різку. Механізм формування першої зони. Механізм формування другої зони. Механізм формування третьої зони. Якість різки низько вуглецевих сталей. Якість різки нержавіючих сталей. Якість різки титану. Якість різки кольорових металів та сплавів.</p>

Тиждень	Зміст навчальної роботи
13	Лекція 7 Комплексні енергетичні параметри. Баланс енергії. Глибина якісного різку та повна глибина прорізання. Вплив густини потужності і шляхи керування ним. Розмір ЗТВ. Практичне заняття 6 Вплив енергетичних параметрів на розмірні характеристики різку
15	Лекція 8 Вплив ΔF . Існуючі схеми стабілізації ΔF . Вплив поляризації на кут нахилу стінок різку.
17	Лекція 9 Залежність глибини різку від надлишкового тиску технологічного газу. Вплив надлишкового тиску на якість різки різних металів. Практичне заняття 7 Вплив газодинамічних параметрів на розмірні характеристики різку

На початку семестру студенти мають за своїм логіном і паролем увійти до електронного кампусу та отримати Методичні вказівки та Конспект лекцій.

Рекомендується щотижня засвоювати навчальний матеріал однієї лекції відповідно до календарно-тематичного плану.

Модульні контрольні роботи проводяться з метою поточного контролю успішності засвоєння навчального матеріалу. Кредитний модуль передбачає виконання двох контрольних робіт. Контрольні роботи проводяться у формі письмових відповідей на завдання.

Модульна контрольна робота №1 проводиться за матеріалами розділів 6-7 (див. п. 3. Структура кредитного модуля). Питання, що виносяться на контрольну:

- 1.Випаровування під дією лазерного випромінювання.
- 2.Особливості руйнування під дією лазерного імпульсу.
- 3.Кінетика процесу руйнування.
- 4.Тепловий механізм руйнування.
- 5.Квазістаціонарне руйнування.
- 6.Феноменологічна модель руйнування.
- 7.Етапи взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.

Модульна контрольна робота №2 проводиться за матеріалами розділів 8-9 (див. п. 3. Структура кредитного модуля). Питання, що виносяться на контрольну:

1. Загальні характеристики процесів лазерної різки матеріалів.
2. ГЛР з використанням кисню.
3. Закономірності лазерної різки безперервним випромінюванням.
4. Закономірності лазерної різки імпульсно-періодичним випромінюванням.
5. Загальні характеристики ГЛР різних металів.
6. ГЛР вуглецевих сталей.
7. ГЛР нержавіючих сталей.
8. ГЛР титану
9. ГЛР алюмінію.
10. Параметри обробки, що впливають на розмірні характеристики різки.
11. Вплив газодинамічних параметрів.
12. Вплив енергетичних параметрів.
13. Вплив оптичних параметрів.

4. Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<p>Руйнування матеріалів під дією лазерного випромінювання. Етапи взаємодії випромінювання з речовиною. Кінетика процесу руйнування. Квазістаціонарне руйнування.</p> <p>Література: основна - [3] с. 71-85, [4] с. 129-138; додаткова –[2] с. 236-245.</p> <p>Завдання на СРС: на які фізичні процеси витрачається перехідний час? Як змінюються з часом питомі частки рідкої та парової фаз під час руйнування? Чому висока пікова інтенсивність випромінювання не є оптимальною для процесів руйнування? Який механізм іонізації металевого пару має місце при лазерному руйнуванні? Як плазма може впливати на лазерне випромінювання? Які параметри руйнування стабілізуються в режимі квазістаціонарного руйнування?</p>

2	<p>Припущення, на яких базується тепловий механізм руйнування. Теплова задача в рухомих координатах. Перехідний режим. Оптимальний режим випаровування.</p> <p>Література: основна - [3] с. 85-111, [2] с. 129-146</p> <p>Завдання на СРС: Від чого залежить швидкість стаціонарного руйнування? Відмінності теплових задач в рухомих і нерухомих координатах. Складові, що впливають на швидкість стаціонарного руйнування при різних значеннях густини потужності. Як змінюється швидкість стаціонарного руйнування на протязі перехідного періоду. Які критерії „оптимального” руйнування існують? Що можна віднести до недоліків теплової моделі руйнування?</p>
3	<p>Схема світлового конусу. Рівняння енергетичного балансу. Залежність питомого виносу маси від густини енергії.</p> <p>Література: основна -[2] с. 147-154</p> <p>Завдання на СРС: За рахунок яких процесів відбувається руйнування по глибині? За рахунок яких процесів відбувається руйнування по діаметру? Що означають складові балансу енергії? Чому залежність питомого виносу маси від густини енергії не є монотонною?</p>
4	<p>Можливі процеси при лазерному розділенні матеріалів. Фізичний та хімічний механізми різки. Схеми подачі технологічного газу. Функції кисню. Некерована різка. Грат. Стаціонарне та нестаціонарне руйнування. Кінетика формування різку за високих та низьких швидкостей.</p> <p>Література: основна -[5] с. 5-19</p> <p>Завдання на СРС: Відмінність термосколування та скрайбування. За рахунок яких фізичних процесів відбувається руйнування при лазерній різці безперервним випромінюванням? Імпульсно-періодичним випромінюванням?</p>
5	<p>Рівняння енергетичного балансу та реакції окислення. Розрахунок геометричних параметрів різку. Дві схеми формування різку. Геометричні параметри різку. Граничні режими різання імпульсно-періодичним випромінюванням. Функція кисню при різанні імпульсно-періодичним випромінюванням.</p> <p>Література: основна - [5] с. 19-24</p> <p>Завдання на СРС: Чим визначається швидкість стаціонарного руйнування? Чим відрізняється різка на високих та низьких швидкостях? В чому полягає межа між високими та низькими швидкостями? Чим визначаються кути нахилу кордонів періодичного та безперервного руйнування? В чому полягає некерований режим різки?</p>

6	<p>Групи металів за топографією бічної поверхні різку. Механізм формування першої зони. Механізм формування другої зони. Механізм формування третьої зони. Якість різки низько вуглецевих сталей. Якість різки нержавіючих сталей. Якість різки титану. Якість різки кольорових металів та сплавів.</p> <p>Література: основна - [5] с. 30-32, 40-45 [1] с. 171-179</p> <p>Завдання на СРС: Чим визначається кількість зон на бічній поверхні різку? Для яких металів характерна наявність автогенного режиму? За яких умов? Які технологічні гази для яких груп матеріалів використовуються? Чому?</p>
7	<p>Комплексні енергетичні параметри. Баланс енергії. Глибина якісного різку та повна глибина прорізання. Вплив густини потужності і шляхи керування ним. Розмір ЗТВ.</p> <p>Література: основна - [5] с. 33-40</p> <p>Завдання на СРС: З чого складається баланс енергії при газо лазерній різці? Які ККД при цьому застосовуються? Чим обмежені використання комплексних параметрів $\frac{P}{V_p}$ та $\frac{P}{h}$? Поясніть існуючі залежності $h(V_p)$ та $h_k(V_p)$. Які способи підвищення густини потужності існують і які з них є доцільними з точки зору використання у ГЛР? Чому?</p>
8	<p>Вплив ΔF. Існуючі схеми стабілізації ΔF. Вплив поляризації на кут нахилу стінок різку.</p> <p>Література: основна - [5] с. 45-61</p> <p>Завдання на СРС: Як ΔF впливає на якість різання різних металів? Порівняйте переваги та недоліки контактних та безконтактних способів стабілізації ΔF. Яким чином можна використовувати вплив поляризації на кут нахилу стінок різку?</p>
9	<p>Залежність глибини різку від надлишкового тиску технологічного газу. Вплив надлишкового тиску на якість різки різних металів.</p> <p>Література: основна - [5] с. 61-75</p> <p>Завдання на СРС: Чому залежність глибини прорізання від надлишкового тиску технологічного газу не є монотонною? Чому в подальшому ця глибина зменшується? В чому полягає сенс терміну „мінімальний тиск”? Який тиск є достатнім? Які технологічні обмеження зверху та знизу існують для тиску технологічного газу при обробці різних металів?</p>

5. Практичні заняття

Основні завдання циклу практичних занять: засвоєння конкретних питань, отримання навичок та умінь у фізичних та інженерних розрахунках.

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Плавлення металів під дією лазерного випромінювання Знайти максимальну глибину зварювання сталі ($T_m=1535$; $T_b=2900$) джерелом теплоти радіусом 3 мм.
2	Тепловий механізм руйнування Знайти час затримки квазістаціонарного руйнування в рамках теплової моделі руйнування, якщо на мідну мішень ($\rho=8,96$; $L_b=4813$; $a=1,12$) діє лазерний імпульс: $E=4$ Дж, $\tau=1$ мсек, $\Theta=2$ мрад. Лінза з $F=50$ мм. Коефіцієнт поглинання $A=0.39$. Температуру поверхні руйнування прийняти рівній температурі випаровування ($T_0=2580$)
3	Феноменологічна модель процесу руйнування Знайти діаметр отвору, якщо на сталю мішень ($\rho=7,87$; $L_m=275$; $L_b=7140$) діє лазерний імпульс: $E=6$ Дж, $\tau=1$ мсек, $\Theta=2$ мрад. Лінза з $F=150$ мм. Коефіцієнт поглинання $A=0.5$. Діаметр випромінювання на лінзі – 12 мм.
4	Лазерне різання металів безперервним випромінюванням Сталь ($\lambda=0,51$; $a=0,15$; $T_m=1535$) ріжуть безперервним лазерним випромінюванням з густиною потужності $W_p=5 \cdot 10^5$ Вт/см ² із швидкістю 1 м/хв. Знайти шорсткість бокової поверхні різа. Температуру поверхні прийняти $T_0=1,2 \cdot T_m=1842$. Початкову температуру не враховувати.
5	Лазерне різання металів імпульсно-періодичним випромінюванням Сталь ($\lambda=0,51$; $a=0,15$; $c=0,43$; $\rho=7,87$; $T_m=1535$; $L_b=8100$ Дж/г) ріжуть імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням з параметрами: $\bar{p}=100$ Вт, $f=1$ кГц. $F=100$ мм, $D=10$ мм. Знайти: ширину та глибину різі, максимальну швидкість обробки.
6	Вплив енергетичних параметрів на розмірні характеристики різі Потужність безперервного випромінювання при газолазерній різці сталі ($\lambda=0,51$; $a=0,15$; $c=0,43$; $\rho=7,87$; $T_m=1535$; $L_m=275$) є 1000 Вт. Ширина різі складає 150 мкм. Швидкість різання – 1,2 м/хв. Знайти сумарну потужність випромінювання та реакції окислення. Сумарний ККД прийняти = 0.5.
7	Вплив газодинамічних параметрів на розмірні характеристики різі Потужність безперервного випромінювання при газолазерній різці сталі ($\lambda=0,51$; $a=0,15$; $c=0,43$; $\rho=7,87$; $T_m=1535$; $L_m=275$) є 1000 Вт. Ширина різі складає 150 мкм. Швидкість різання – 1,2 м/хв. Знайти тиск кисню, за якого глибина різі перестане зростати.

6. Лабораторні заняття

Основні завдання циклу лабораторних занять: засвоєння конкретних питань, отримання специфічного досвіду.

№ з/п	Назва лабораторної роботи	Кількість ауд. годин
1	Руйнування матеріалів під дією лазерного імпульсного випромінювання Ціль роботи: Вивчити фізичні особливості процесів, що відбуваються при руйнуванні матеріалів лазерними імпульсами; ознайомитися з існуючим фізичними моделями лазерного імпульсного руйнування; встановити експериментальні залежності зміни ерозії матеріалу від деяких параметрів обробки та порівняти їх з розрахунками.	4
2	Взаємодія імпульсного лазерного випромінювання з металевими сплавами. Вимірювання температуропроводності матеріалу. Ціль роботи: Ознайомитися з постановкою та рішенням задач теплопровідності на ЕОМ для плаского зразка та імпульсного лазерного випромінювання; отримати практичні навички у роботі з імпульсною лазерною установкою та радіоелектронною апаратурою, що реєструє; виміряти температуропровідність різних металевих сплавів при кімнатній температурі за допомогою лазерного імпульсного випромінювання.	4
3	Газолазерна різка матеріалів потужним безперервним лазерним випромінюванням Ціль роботи: Ознайомитися з принциповими особливостями ГЛР матеріалів; отримати практичні навички керування режимами різання; отримати експериментальні залежності зміни ширини різку та ЗТВ на краях різку від технологічних факторів.	4
4	Різка матеріалів імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням Ціль роботи: Ознайомитися з особливостям формування різів при обробці імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням; отримати практичні навички керування режимами різання імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням; встановити залежності зміни ширини різку на верхній та нижній кромках деталі від основних технологічних факторів процесу.	6

7. Оцінювання результатів навчання

Рейтинг студента складається з балів, що він отримує за:

1. Виконання 7 практичних робіт.
2. Виконання 4 лабораторних робіт.
3. Виконання двох МКР.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання:

1. Практичні роботи

Максимальна кількість балів за всі роботи – 14.

- вірна відповідь/вирішення задачі – 2 бали
- невірна відповідь/відсутність на занятті – 0-1 балів

2. Лабораторні роботи

Максимальна кількість балів за всі роботи – 16.

- повне виконання лабораторної роботи – 3-4 бали
- неповне виконання лабораторної роботи /відсутність на занятті – 0-2 бали

3. МКР

Максимальна кількість балів за дві МКР – $2 \cdot 20 = 40$.

- повна відповідь, вільне володіння матеріалом – 15-20 балів
- задовільна відповідь – 10-14 балів
- неповна відповідь – 5-9 балів
- незадовільна відповідь – 0-4 бали

Штрафні та заохочувальні бали:

- не допуск до виконання лабораторної роботи через незадовільний вхідний контроль: -0.5 бала
- відсутність на ЛР або ПР без поважних причин: -1 бал
- правильна відповідь на вхідному контролі: +1 бал

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:

$$R_C = 14 + 16 + 40 = 70 \text{ балів}$$

Екзаменаційна складова дорівнює 30% від R : $R_E = 30$ балів

Рейтингова шкала з дисципліни складає:

$$R = R_C + R_E = 70 + 30 = 100 \text{ балів}$$

Необхідною умовою допуску до екзамену є зарахування всіх лабораторних та практичних робіт, виконання МКР та стартовий рейтинг не нижче 30 балів.

Система оцінок має вигляд:

$R_D = R_C + R_E$	Оцінка <i>ECTS</i>	Традиційна оцінка
95-100	<i>A</i>	відмінно
85-94	<i>B</i>	добре
75-84	<i>C</i>	
65-74	<i>D</i>	задовільно
60-64	<i>E</i>	
$R_D < 60$	<i>Fx</i>	незадовільно
$R_C < 30$ або не виконані інші умови допуску до заліку	<i>F</i>	не допущений

8. Контакти із викладачем

Спілкування з викладачем проводиться через електронний кампус або електронною поштою:

Романенко Віктор Васильович: romvvv@gmail.com

Козирев Олексій Сергійович: akozyrev@ukr.net

9. Література

Базова

1. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. – М.: Мир, 1974
2. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная обработка материалов. – М.: машиностроение, 1975
3. Анисимов С.И. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970
4. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985
5. Коваленко В.С., Романенко В.В., Олещук Л.М. Малоотходные процессы резки лучом лазера. — Київ: Техніка, 1987. — 110 с.

Допоміжна

1. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Мир, 1984
2. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989
3. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. – Рига, Звайгзне, 1967