

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О.ПАТОНА НАЦІОНАЛЬНОЇ  
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ  
Відділ аспірантури при ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Заст. директора  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
академік НАНУ

І.В. Кривцун  
(ініціали, прізвище)

« 06 » липень 2020 р.

**« Твердофазні процеси формування нероз'ємних  
з'єднань матеріалів »**

(назва навчальної дисципліни)

1/П  
(шифр за ОП)

**ПРОГРАМА  
навчальної дисципліни**

рівень вищої освіти – доктор філософії з матеріалознавства  
форма навчання – денна  
спеціальність – 132 – Матеріалознавство  
галузь знань – 13 – механічна інженерія  
освітня програма – Матеріалознавство

Затверджено на засіданні випускового  
відділу за спеціальністю 132  
«Матеріалознавство»

Інститут електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАНУ

Протокол від 03.07.2020 р. № 1


Завідувач випускового відділу

А.І. Устінов  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« 06 » липень 2020 р.

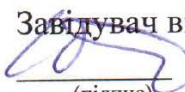
РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

зав. відділом, д.т.н., ст.н.с. Фальченко Ю.В.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

  
(підпис)

Програму затверджено на засіданні  
відділу: «Фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів»  
(повна назва відділу)

Протокол від «03» липеня 2020 року № 1

Завідувач відділу  
  
(підпис) Ю.В. Фальченко  
(ініціали, прізвище)

«06» липеня 2020 р.

## **Вступ**

Програму навчальної дисципліни **«Твердофазні процеси формування нероз'ємних з'єднань матеріалів»**

складено відповідно до освітньо-наукової програми підготовки **Матеріалознавство**

**III** рівня вищої освіти

спеціальності **132 Матеріалознавство**

Навчальна дисципліна належить до циклу **дисциплін професійної та практичної підготовки.**

Статус навчальної дисципліни **вибіркова**

Обсяг навчальної дисципліни **4** кредити ЄКТС

Предмет навчальної дисципліни: основні поняття; класифікації способів зварювання в твердій фазі; основні способи зварювання в твердій фазі, їх визначення, схеми процесів, основні переваги та недоліки; теорії утворення зварного з'єднання; дефекти зварних з'єднань, наслідки утворення; методи визначення оптимальних параметрів дифузійного зварювання; зварювання однорідних та різнорідних металів, структура та властивості з'єднань; обладнання для зварювання, основні його елементи; дифузійне зварювання, ударне зварювання та їх характеристики; основні підходи при зварюванні композиційних матеріалів, інтерметалідних сплавів.

Міждисциплінарні зв'язки:

Навчальна дисципліна пов'язана з дисциплінами:

- «Методи дослідження фазового складу, структури та фізико-механічних властивостей» (4/I),
- «Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання» (3/I),
- «Структура з'єднань матеріалів плавленням» (2/II),
- «Конструкційні сталі та їх здатність до зварювання» (3/II),
- «Конструкційні сплави на основі нікелю, титану та алюмінію і їх здатність до зварювання» (4/II),
- «Основи конструкційної міцності» (5/II),
- «Дослідження процесу руйнування матеріалів методом акустичної емісії» (6/II),
- «Теорія і експериментальні методи дослідження розповсюдження хвиль акустичної емісії в матеріалах» (7/II),
- «Прогнозування руйнування конструкцій методом акустичної емісії»(8/II).

В подальшому набуті знання і вміння будуть використовуватися при розробці нових процесів зварювання та отримання з'єднань з металів в однорідному та різнорідному сполученні, а також дозволять удосконалювати існуючі конструкції за рахунок використання нових прогресивних матеріалів.

### **1. Мета та завдання навчальної дисципліни**

#### **1.1. Метою навчальної дисципліни є формування у аспірантів компетентностей:**

- Здатність проводити критичний аналіз, оцінку і синтез нових та складних ідей (код ЗК 2).

- Здатність переосмислювати наявне та створювати нове цілісне знання та/або професійну практику і розв'язувати значущі соціальні, наукові, культурні, етичні та інші проблеми (код ЗК 3).
- Здатність розроблення та реалізація проектів, включаючи власні дослідження (код ЗК 4).
- Здатність ініціювання дослідницько-інноваційних проектів та автономно працювати під час їх реалізації(код ЗК 5).
- Здатність до самостійного освоєння нових методів дослідження(код ЗК 8).
- Здатність досліджувати проблеми із використанням системного аналізу та інших методів дослідження(код ЗК 9).
- Здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проекти в механічній інженерії та дотичні до неї міждисциплінарні проекти, лідерство під час їх реалізації(код ФК 1).
- Здатність самостійно виконувати наукові дослідження в галузі матеріалознавства на основі сучасних теорій та методів термодинаміки, кінетики процесів в матеріалах, фізики конденсованого стану, та інформаційнокомунікаційних технологій(код ФК 2)
- Здатність проводити теоретичні й експериментальні дослідження, фізико-математичне, фізико-хімічне та комп'ютерне моделювання розроблюваних матеріалів та процесів з метою оптимізації їх властивостей (код ФК 8).
- Здатність використовувати новітні методи досліджень металів і сплавів в науково-дослідницькій діяльності (код ФК 11).

## **1.2. Основні завдання навчальної дисципліни.**

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми аспіранти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання.

### **Знання:**

- методик аналізу та синтезу знань при вирішенні проблем в широкому контексті матеріалознавчих та міждисциплінарних задач, в тому числі, за умов невизначеності чи неповної інформації (код ЗН 1);
- загальних принципів і методів природничих та технічних наук, а також методології наукових досліджень, їх застосування у власних дослідженнях у сфері матеріалознавства (ЗН 3);
- новітніх світових досягнень науки, техніки та технологій в галузі матеріалознавства та суміжних сферах (ЗН 5);
- закономірностей керування складом, структурою та властивостями матеріалів різної природи та функціонального призначення (код ЗН 7);

### **Уміння:**

- Використовувати необхідні для обґрунтування висновків докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних досліджень і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні емпіричні дані(код УМ 2);
- Застосовувати логіку та методологію наукового пізнання(код УМ 3);
- Застосовувати аналіз та синтез знань при вирішенні проблем в широкому контексті матеріалознавчих та міждисциплінарних задач, в тому числі, за умов невизначеності чи неповної інформації(код УМ 4);

- Забезпечувати оригінальні розробки та ідей в контексті наукового дослідження(код УМ 5);
- Орієнтуватися в сучасних тенденціях та потребах суспільства з метою їх використання в професійній галузі; проявити вищу ступінь відповідальності за соціальні, культурні та екологічні наслідки комплексної технічної діяльності в контексті сталого розвитку; виявити готовність до ведення технічної діяльності з дотриманням етичних норм(код УМ 6);
- синтезувати знання та формулювати висновки, обґрунтовувати їх для фахової та нефахової аудиторії (код УМ 8);
- На основі аналізу потреб виробництва формулювати вимоги щодо рівня властивостей нових матеріалів(код УМ 10);
- генерувати нові ідеї для вирішення науково-дослідних проектів та дослідницько-конструкторських робіт (код УМ 12);
- Практично визначати умови необхідні для реалізації процесу з'єднання матеріалів в твердій фазі(код УМ 18).

## 2. Структура навчальної дисципліни

На вивчення навчальної дисципліни відводиться 120 годин / 4 кредити ECTS.

Навчальна дисципліна містить наступні кредитні модулі:

1. Зварювання в твердій фазі. Загальні положення.
2. Зварювання в твердій фазі з низькоінтенсивним впливом.
3. Зварювання в твердій фазі з високоінтенсивним впливом.

Рекомендований розподіл навчального часу

Шифр	Назва навчальної дисципліни	Розподіл за семестрами		Кількість Кредитів ЄКТС	Кількість годин					
		Екзамени	Заліки		Загальний обсяг	Аудиторних у тому числі				Самостійна робота
						Всього	лекцій	практичні	семінарські	
1/II	Фізико-механічні процеси формування нероз'ємних з'єднань матеріалів в твердій фазі	2	-	4	120	40	32	8	-	80

## 3. Зміст навчальної дисципліни

### Розділ 1.Зварювання в твердій фазі. Загальні положення.

#### Тема 1.1. Класифікація способів зварювання тиском

Визначення терміну зварювання тиском. Різновиди класифікації способів зварювання тиском (по способам зварювання, по інтенсивності силового впливу, по

природі деформуючого впливу, по видам технологічних параметрів, по групам матеріалів, що зварюються). Основні способи зварювання тиском (холодне зварювання, вибухом, магнітоімпульсне, ударне, індукційне, ультразвукове, тертям, прокаткою, термокомпресійне, зварювання через прошарки, що вибухають за допомогою електрики дифузійне зварювання). Схеми процесів зварювання. Основні параметри процесів зварювання, можливі технологічні варіанти, переваги та недоліки.

### **Тема 1.2. Теоретичні основи зварювання матеріалів в твердій фазі.**

Визначення термінів: «дифузія», «самодифузія», «гетеро дифузія», «дифузійне зварювання». Особливості процесу дифузійного зварювання. Схема процесу. Основні параметри процесу. Інші параметри процесу і їх вплив на якість зварювання. Технологічні можливості способу дифузійного зварювання. Гіпотези утворення зварного з'єднання при ДЗ. Теорія трьохстадійності утворення зварного з'єднання. Кінетична схема формування фізичного контакту. Схема устрою оксидної плівки на поверхні металу. Механізми видалення оксидної плівки з контактних поверхонь металічних зразків в процесі зварювання. Внесок зсувних деформацій в утворення зварного з'єднання. Схема досліду Хренова та Конюшкова. Кінетична схема процесу дифузійного зварювання (Конюшкова).

### **Тема 1.3. Математичні методи оптимізації параметрів процесу зварювання.**

Критерії вибору режиму зварювання. Математичні методи оптимізації параметрів процесу. Приклади використання розрахункових методів для зварювання в твердій фазі. Математична модель формування з'єднання при ударному зварюванні кругло ланкових ланцюгів. Математичне моделювання напруженого стану в нероз'ємних з'єднаннях з обмеженням пластичної деформації основних матеріалів. Розрахунок силового впливу на приконтатні поверхні зразків при протіканні в стику в багатошарових фольга реакції ВСС.

### **Тема 1.4. Особливості конструкції установок для дифузійного зварювання.**

Класифікація установок по граничному вакууму, по джерелу і способу нагрівання, по системам прикладення тиску. Вимоги до вакуумних систем установок. Матеріали, що застосовуються для виготовлення вузлів вакуумних установок. Основні системи установок: вакуумна, система охолодження, електрична, система нагрівання, система прикладення тиску, контролю параметрів зварювання. Класифікація систем відкачки вакууму. Основні типи установок.

### **Тема 1.5. Технологічні прийоми дифузійного зварювання.**

Класифікація технологічних прийомів по різновидам зварювання. Технологічні можливості способу дифузійного зварювання. Проміжні прошарки. Їх функції та методи отримання. Особливості структури проміжних прошарків. Технологічні схеми ДЗ (зварювання у вільному стані та зварювання з примусовим формуванням зони з'єднання). Схема головних напружень при різних схемах та технологічних прийомах зварювання. Особливості поведінки прошарків суцільного та перфорованого перетинів при зварюванні. Особливості структури багатошарової, пористої та швидкозакристалізованої фольги.

### **Тема 1.6. Дослідження зони з'єднання зразків за допомогою методу мікроіндентування.**

Метод мікроіндентування, його основні положення. Прибор Мікрон-Гамма. Опис. Технічні характеристики. Індентор Берковича. Приклади використання методу мікроіндентування для визначення параметрів зони з'єднання зварних з'єднань, отриманих в твердій фазі.

## **Розділ 2. Зварювання в твердій фазі з низько силовим впливом.**

### **Тема 2.1 Дифузійне зварювання однорідних металів.**

Особливості процесу ДЗ, параметри процесу. Основні типи зварних з'єднань. Класифікація виробів по: матеріалам, геометрії, по формі з'єднання, по тепловій інерції. Зварювання алюмінію, титану, сталі, міді та його сплавів. Способи підготовки поверхні зразків при зварюванні. Структура з'єднань, параметри зварювання.

## **Тема 2.2. Дифузійне зварювання композиційних матеріалів.**

Визначення терміну «композиційний матеріал». Класифікація композиційних матеріалів (КМ) по формі наповнювача. Властивості КМ в порівнянні з базовим матеріалом, сфери використання. Дисперсно-зміцнені КМ, приклади, структура, властивості. Технологічні схеми з'єднання дисперсно-зміцнені КМ способом дифузійного зварювання. Модель Bushby утворення зварного з'єднання з ДУКМ. Різновиди технологічних прийомів зварювання ДУКМ. Використання різних видів прошарків при зварюванні ДУКМ, параметри зварювання, структура та механічні властивості з'єднань. Шаруваті КМ. Класифікація. Структура. Основні методи отримання. Вуглець - вуглецеві КМ. Структура. Приклади отримання зварних з'єднань.

## **Тема 2.3. Дифузійне зварювання інтерметалідних сплавів.**

Визначення терміну «інтерметалід». Властивості інтерметалідних сплавів. Інтерметаліди системи Ti-Al. Структура сплавів. Дифузійне зварювання алюмінідів титану. Параметри процесу, технологічні прийоми зварювання, властивості з'єднань. Вплив температури нагрівання на відновлення оксидної плівки на поверхні зразків. Приклади отримання зварних з'єднань. Вплив технологічних параметрів зварювання на структуру на механічні властивості з'єднань. Наночаруваті прошарки. Їх вплив на формування структури з'єднань. Модель утворення зварного з'єднання.

## **Тема 2.4. Особливості дифузійного зварювання різнорідних металів.**

Модель утворення зварного з'єднання при зростанні в зоні з'єднання інтерметалідного прошарку. Формула для визначення товщини шару інтерметаліду. Вплив товщини інтерметалідного прошарку на механічні властивості з'єднань. Критерії вибору температури при зварюванні різнорідних металів. Технологічні прийоми, що використовуються при зварюванні різнорідних металів. Функції, що виконують прошарки. Структурний стан прошарків. Особливості зварювання способом ДЗ: титану з алюмінієм, хрому з міддю, титану з міддю, заліза з міддю, титану зі сталлю, зварювання вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу з сплавом титану.

## **Тема 2.5. Піноматеріали. Особливості їх структури. Зварювання піно алюмінію.**

Визначення. Класифікація пористих матеріалів. Приклади структури та застосування піно матеріалів з нікелю, міді, ніхрому, алюмінію. Технологія отримання піно алюмінію. Приклади зварювання піно алюмінію.

## **Розділ 3. Зварювання в твердій фазі з високо силовим впливом.**

### **Тема 3.1. Особливості ударного зварювання в вакуумі однорідних металів.**

Ударне зварювання. Приклад зварювання виробів із високоміцних сплавів титану. Критерії вибору температури зварювання. Вплив режиму зварювання на механічні властивості з'єднань. Приклади конструкції оснащення для УЗ зразків. Формування мікроструктури зварних з'єднань. Вплив режиму зварювання на дифузію елементів в стику. Вибір оптимального режиму зварювання.

### **Тема 3.2. Особливості ударного зварювання в вакуумі різнорідних металів.**

Особливості отримання з'єднань алюмінію з міддю, алюмінію з титаном, міді з гафнієм та цирконієм Сфери застосування. Проблеми утворення зварного з'єднання. Параметри зварювання структура та властивості отриманих з'єднань.

### **Тема 3.3. Класифікація дефектів зварних з'єднань.**

Класифікація дефектів. Не провар причині утворення, методи діагностики. Наскрізні тріщини, причині утворення, методи діагностики. Злипання, причині утворення, методи діагностики. Зміщення причині утворення, методи діагностики. Зміна структури металу, причині утворення, методи діагностики. Оплавлення, причині утворення, методи діагностики. Значна деформація виробів, причині утворення, методи діагностики.

#### **4. Рекомендована тематика практичних занять**

Для закріплення знань, що були одержані на лекційних заняттях та для придбання умінь і навичок в аналізі процесів, що протікають в ході зварювання в твердій фазі металів і сплавів при формуванні зварного з'єднання передбачено проведення практичних занять за темами:

*Практичне заняття №1. Дифузійне зварювання в вакуумі однорідних металів*

Ознайомлення з конструкційними особливостями та основними вузлами установки дифузійного зварювання (П-115). Техніка безпеки при роботі на установці. Ознайомлення з експонатами зварних зразків. Демонстрація процесу дифузійного зварювання стикових зразків. Методи підготовки зразків, та проведення робіт по зварюванню. (2 години).

*Практичне заняття № 2. Дифузійне зварювання в вакуумі різнорідних металів*

Використання прошарків при зварюванні різнорідних металів. Методика підготовки прошарків до зварювання. Отримання з'єднань з різнорідних металів (2 години).

*Практичне заняття №3. Ударне зварювання в вакуумі однорідних металів.*

Ознайомлення з конструкційними особливостями та основними вузлами установки ударного зварювання в вакуумі (УЗ84). Техніка безпеки при роботі на установці. Методика підготовки зразків, та проведення робіт по зварюванню. Ознайомлення з експозицією зварних з'єднань (2 години).

*Практичне заняття №4. Ударне зварювання в вакуумі різнорідних металів.*

Особливості процесу отримання УЗВ різнорідних металів. Отримання з'єднань з різнорідних металів. Ознайомлення з експонатами зварних зразків (2 години).

#### **5. Рекомендований перелік комп'ютерних практикумів**

Лабораторні роботи (комп'ютерні практикуми) навчальним планом не передбачені.

#### **6. Рекомендовані індивідуальні завдання**

Самостійна робота аспірантів включає підготовку до лекцій, практичних занять та екзамену.

#### **7. Рекомендована література**

##### **7.1 Базова:**

1. Э.С. Каракозов Соединение металлов в твердой фазе. М. Металлургия, 1976, 262 с.
2. Э.С. Каракозов Соединение металлов давлением. М. Машиностроение, 1986, 275 с.
3. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные виды сварки давлением Учебное пособие. АйПиЭр Медиа, 2009., 631 с.
4. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. М., Металлургия. 1976, 360 с.
5. Н.Ф. Казаков. Диффузионная сварка материалов М. Машиностроение, 1976, 311 с.
6. Конюшков Г.В., Копылов Ю.Н. Диффузионная сварка в электронике / М.: Энергия. - 1974. - 167 с.
7. Шинк Х. Теория инженерного эксперимента. М. Мир., 1972, 381С.
8. Казаков Н.Ф. Жуков В.В. Оборудование для диффузионной сварки. Сборник №7. М., «Полиграфист», 1973, 237 с.



9. Кочергин К.А. Сварка давлением / К.А. Кочергин // Ленинград: Машиностроение. - 1972. - 216 с.
10. Булычев С. И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
11. В.А. Бачин, В.Ф. Квасницкий, Д.И. Котельников. Теория. Технология и оборудование диффузионной сварки. М. Машиностроение, 1991, 351с.
12. Лашко С.В. Пайка металлов. Москва: Машиностроение, 1988. 376 с.
13. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем: Справочник. Москва, Машиностроение, 1991. 272 с.
14. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. Под ред. В.Н. Замкова, К. Наукова думка, 1986, 239 с.
15. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. Киев. Наукова думка, 1990. – 511 с.
16. П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин Соппротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М. Metallurgy.1976, 489 с.
17. Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. (2011) Новые композиционные материалы: учебное пособие. Тамбов. ГОУ ВПО ТГТУ.
18. Ковтунов А.И., Мямин С.В., Семистенова Т.В. (2017) Слоистые композиционные материалы: электронное учебное пособие. Тольятти. ТГУ.
19. Sonia Simoes, Filomena Viana, Manuel F. Viera Joining technology of  $\gamma$ -TiAl alloys/ 2017, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) 154 h/
20. Барабаш О.М., Коваль Ю.Н. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник. Кристаллическая структура металлов и сплавов. Киев, Наукова думка, 1986. - 598 с.
21. К.Е. Чарухина, С.А. Голованенко, В.Е. Мастеров, Н.Ф. Козаков. Биметаллические соединения – М.: Metallurgy, 1970. – 254 с.
22. А.Д. Жуков Высокопористые материалы: структура и тепломассоперенос. МГСУ Техническая литература. 2014.
23. С.В. Белов, П.А. Витязь, В.К. Шелег Пористые проницаемые материалы. Metallurgy, 1987.
24. Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Фальченко импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах. Киев, Наукова думка, 1991, 205 с.
25. Д.В. Миронов, В.Ф. Мазанко, Д.С. Герцрикен. Массоперенос в металлах при действии магнитных полей и импульсных деформаций, 2011. 275 с.

## 7.2 Допоміжна:

1. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. Справочник. М. Машиностроение, 1981.
2. Касаткин Б.С., Кораб Г.Н. Формирование соединений при сварке без расплавления // Автоматическая сварка. - 1967. - №4. - С.33-36.
3. Хренов К.К. Холодная сварка металлов сдвигом/
4. Махненко В.М., Харченко Г.К., Великоиваненко Е.А., Игнатенко А.И., Фальченко Ю.В., Мазанко В.Ф. Ударная сварка в вакууме нахлесточных соединений с использованием формирующих устройств // Автоматическая сварка N1, 1996 г. с.18...20.
5. Фальченко Ю.В., Игнатенко А.И., Харченко Г.К., Чаюн А.Г. Ударная сварка в вакууме высокопрочных сплавов титана. // Автоматическая сварка N5, 1996 г.- с.17...20.
6. Харченко Г.К., Игнатенко А.И. Фальченко Ю.В., Чаюн А.Г. Ударная сварка в вакууме изделий авиационной промышленности // Технологические системы N2, 1999 г. - с. 10...12.

7. В.С. Грошев, А.П. Шишкова, Н.Ф. Казаков, А.И. Антоненко Разработка технологии диффузионной сварки в вакууме пустотелого клапана. // В кн. Диффузионное соединение в вакууме Сборник №6, 1973, Сборник трудов 7 Всесоюзной научно-технической конференции
8. Баглюк Г.А. Сравнение энергосиловых параметров горячей штамповки пористых заготовок при различных схемах деформации // Порошковая металлургия. – 1998. - №9/10. - с. 12 - 15.
9. В.А. Мастеров, П.И. Полухин, Л.П. Скороход Исследование удельных сил давления и трения при пластическом сжатии металла // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1966. - №9. - С. 73 - 78.
10. Р.А. Мусин Я.В. Лямин, И.Н. Бузмаков Интенсификация пластической деформации прокладок при диффузионной сварке // Автоматическая сварка. 1991. №8. - С. 26-29.
11. А.В. Сергеев, В.М. Чудин, Е.С. Сыропаева. Диффузионная сварка алюминиевых сплавов в состоянии сверхпластичности // Автоматическая сварка. - 1991. - №7. - С.40-43.
12. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Прочность наноструктур // Успехи физических наук. – 2009. - том 179. - №4. - С. 337 - 358.
13. *W.C. Oliver, G.M. Pharr* «Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology» // *J. Mater. Res.*, Vol. 19, No. 1, Jan 2004.
14. Игнатович С. Р. и др. Определение микромеханических характеристик поверхности материалов с использованием наноиндентометра «Микрон-гамма» // Вестник Харьковского национального авт.-дор. ун-та. 2008. Т. 42. С. 86-90.
15. С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский, Н. А. Мамека. Связь прочностных характеристик материалов с показателями автоматического индентирования // Материаловедение. — 2007. — № 11. — С. 26–31.
16. . А.Р. Луц, А.А. Суслина Алюминий и его сплавы, Самара, СГТУ, 2013, 81с.
17. Paik J.K., Thayamballi A.K., Kim G.S. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. // *Thin-Walled Structures*. 1999. Vol. 35. P. 205–231.
18. Сливинский В.И., Ткаченко Г.В., Сливинский М.В. Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах. // Вестник Сибирского аэрокосмического университета. 2005. №4. С. 169–173.
19. ГОСТ 859-78 Медь и ее сплавы.
20. Nailiang Yu, Cheng Lu, A. Kiet Tieu, Huijun Li, et al. (2016) Annealing effect on microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminate sheets. // *Materials Science & Engineering A*. 13. 195–204.
21. Gajanan P. Chaudhari, Viola Acoff (2009) Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites. // *Composites Science and Technology*. 10. 1667–1675.
22. Lazurenko D.V., Bataev I.A., Mali V.I., Bataev A.A., et al. (2016) Explosively welded multilayer Ti-Al composites: Structure and transformation during heat treatment. // *Materials & Design*. 102. 122–130.
23. Bushby R.S. Joining of particulate silicon carbide reinforced 2124 aluminium alloy by diffusion bonding / R.S. Bushby, V.D.Scott // *Materials Science and technology*. – 1995. - vol.11. - No.8. – p. 753 - 758.
24. Niu J.T. Study on diffusion welding of aluminium matrix composite / J.T. Niu, L.M. Liu, J.P. Zhai, J.Yu, X.M. Zhang // *Acta Metallurgica sinica*.– 2000.–Vol.13. - №1. – P.12 - 17.
25. Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинец, В.Е. Федорчук Влияние температуры нагрева в вакууме на восстановление оксидной пленки на поверхности интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl // Автоматическая сварка. – 2017. – №4. – С. 43 – 47.
26. А.И. Устинов, Ю.В. Фальченко, А.Я. Ищенко, Т.В. Мельниченко, А.Н. Муравейник Получение неразъемных соединений сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl с использованием

- нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме // Автоматическая сварка. - 2009. - №1. - С. 17 – 21.
27. А.И. Устинов, Ю.В. Фальченко, Т.В. Мельниченко, Г.К. Харченко, Л.В. Петрушинец, Е.А. Шишкин. Многослойные фольги Ti/Al: Способы получения, свойства и применение при сварке давлением // Современная электрометаллургия – 2012. - №1. – С.30-37.
  28. Г.К. Харченко Вопросы диффузионной сварки разнородных металлов. // Автоматическая сварка №4, 1969, С. 29-32.
  29. Ковалев В.В., Михеев Р.С., Коберник Н.В. Особенности получения стале-алюминиевых соединений методами сварки плавлением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4. С. 93–112.
  30. Е.В. Половецкий, Л.М. Капитанчук, О.А. Новомлинец, Влияние толщины промежуточной прослойки на структуру и свойства сварных соединений сплава алюминия АМг6 со сплавом титана ВТ6 способом диффузионной сварки в вакууме // Вісник Чернігівського державного технологічного університету, 2013, №1, С.131-138.
  31. Новомлинець О.А., Фальченко Ю.В., Харченко Г.К., Хоменко М.М. Особливості формування з'єднань під час зварювання хрому з міддю. // Вісник ЧДТУ, 2002 р., N15, С. 101...107.
  32. Николаенко Ю.Е., Харченко Г.К. Фальченко Ю.В. Сварка в твердой фазе титана с медью в технологии изготовления тепловых труб. // Технологические системы N2, 2003 г., С.24...28.
  33. Фальченко Ю.В., Григоренко С.Г, Федорчук В.Є., Руденко М.М. Виготовлення перехідників нержавіюча сталь-алюміній зварюванням тиском у вакуумі. // Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. - 2011. - № 53. – С. 86 – 89.
  34. Харченко Г.К. Дифузійне зварювання у вакуумі інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl із сплавом титану ВТ8 / Г.К. Харченко, Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинец // Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. - 2012. - №1(55). - С. 131 – 135.
  35. V. C. Srivastava, K. L. Sahoo. Processing, Stabilization and application of metallic foams. Art of science. Materials science Poland, Vol. 25, No. 3, 2007. P. 733-753.
  36. Хохлов М. А, Ищенко Д.А. Технологические свойства сверхлегких пористых металлов (обзор). // Автоматическая сварка. – 2015. – №3-4. – С. 60-65.
  37. Хохлов М.А. Особливості формування біметалевих з'єднань з пористих сплавів алюмінію та магнієвих сплавів. // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, 2018 р.
  38. Пеноматериалы. Виды, свойства, применение, Пермь, ЭКАД,
  39. Фальченко Ю.В., Игнатенко А.И., Харченко Г.К., Чаюн А.Г. Ударная сварка в вакууме высокопрочных сплавов титана. // Автоматическая сварка N5, 1996 г.- с.17...20.
  40. Харченко Г.К., Игнатенко А.И. Фальченко Ю.В., Чаюн А.Г. Ударная сварка в вакууме изделий авиационной промышленности. // Технологические системы N2, 1999 г. - с. 10...12.
  41. Ю.В. Фальченко Особенности ударной сварки в вакууме алюминия с медью. Спеціальна металургія: Вчора. Сьогодні, Завтра. // Збірник праць. Київ, КПІ, 2007, С.78-82.
  42. Г.К. Харченко, О.О. Новомлинець, Ю.В. Фальченко, В.В. Арсенюк Зварювання тиском алюмінію з міддю. // Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. Чернігів. 2005, №22, С.81-90.
  43. Николаенко Ю.Е. Харченко Г.К. Фальченко Ю.В., Новомлинець О.А, В.В. Арсенюк, Сварка давлением с нагревом в вакууме титана с медью в технологии изготовления тепловых труб. // Технологические системы N2 (22), 2004 г., С.56...59.

44. Е.В. Половецкий, Ю.В. Фальченко, О.С. Кушнарєва, Т.О. Алексеєнко. Особенности формирования структуры соединений Ti–Al при диффузионной сварке в вакууме через промежуточные алюминиевые прослойки // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування. – 2008. – №4(421). – С. 73-80.
45. Е.В. Половецкий, Л.М. Капитанчук, О.А. Новомлинец Влияние толщины промежуточной прослойки на структуру и свойства сварных соединений сплава алюминия АМг6 со сплавом титана ВТ6 способом диффузионной сварки в вакууме // Вісник ЧДТУ. – 2013. – №1(63). – С.120-127.
46. Барабанова О.А., Полунин В.А., Салмин П.А. Диффузионная сварка: возможные дефекты сварных соединений, причины их возникновения и методы контроля. Сварочное производство, 2017, №10, С.34-43.

## **8. Підсумковий контроль результатів навчання**

Підсумковий контроль результатів навчання проводиться у формі екзамену.

## **9. Засоби діагностики успішності навчання**

Семестрова атестація проводиться у виді екзамену. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100 - бальна рейтингова система і університетська шкала оцінювання.

Навчальна програма складена на основі ОНП підготовки докторів філософії спеціальності 132 – «Матеріалознавство»

**Програму розробив:**

**Зав. відділу ІЕЗ ім. Є.О. Патона  
д.т.н.**

**Ю.В. Фальченко**