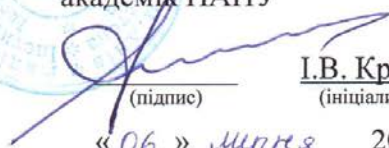


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О.ПАТОНА НАЦІОНАЛЬНОЇ  
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ  
Відділ аспірантури при ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України



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

  
(підпис) І.В. Кривцун  
(ініціали, прізвище)  
«06» липня 2020 р.

**«Властивості матеріалів в нерівноважному стані та  
методи їх отримання»**

(назва навчальної дисципліни)

3/1  
(шифр за ОП)

**ПРОГРАМА**

**навчальної дисципліни**

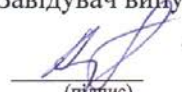
рівень вищої освіти – доктор філософії з матеріалознавства  
форма навчання – денна  
спеціальність – 132 – Матеріалознавство  
галузь знань – 13 – механічна інженерія  
освітня програма – Матеріалознавство

Затверджено на засіданні випускового  
відділу за спеціальністю 132  
«Матеріалознавство»

Інститут електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАНУ

Протокол від 03.072020 р. № 1

Завідувач випускового відділу

  
(підпис) А.І. Устїнов  
(ініціали, прізвище)  
«06» липня 2020 р.

Розробники програми навчальної дисципліни

«Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання»  
(назва кредитного модуля)

Провідний науковий співробітник відділу «Фізико-хімічні методи дослідження матеріалів» Інституту електрозварювання ім Є.О. Патона НАНУ д.т.н., ст.н.с. Костін Валерій Анатолійович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

  
(підпис)

Зав. відділу зварювання легированих сталей Інституту електрозварювання ім Є.О. Патона НАНУ, член-кор. НАНУ, д.т.н., ст.н.с. Позняков Валерій Дмитрович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

  
(підпис)

зав. відділу математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецеелектрометалургії Інституту електрозварювання ім Є.О. Патона НАНУ, д.т.н., ст.н.с. Махненко Олег Володимирович.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)


  
(підпис)

зав. відділу парофазних технологій неорганічних матеріалів Інституту електрозварювання ім Є.О. Патона НАНУ, д.фіз.-мат.н., проф. Устінов Анатолій Іванович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

  
(підпис)

Програму затверджено на засіданні  
відділу: «Фізико-хімічні методи дослідження матеріалів»  
(повна назва відділу)

Протокол від «03» липеня 2020 року № 1

Завідувач відділу  
 С.Г. Григоренко  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«06» липеня 2020 р.

## Вступ

Програму навчальної дисципліни **«Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання»** 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 **обов'язкова**

Обсяг навчальної дисципліни **7** кредити ЄКТС

Предмет навчальної дисципліни: основні поняття; класифікація сучасних сталей та сплавів. Вплив легуючих елементів на властивості матеріалів; кристалічна структура металів; основи теорії сплавів; діаграми фазової рівноваги; механізми та основні види руйнування; загальні положення теорії термічної обробки; основні види термічної обробки; кінетика розпаду аустеніту; ізотермічні та термокінетичні діаграми розпаду аустеніту; методи дослідження металевих матеріалів; методи отримання матеріалів у нерівноважних умовах; методи адитивного виробництва; класифікація адитивних методів; матеріали для адитивних процесів; сплави з пам'яттю форми (SMA-матеріали); поняття псевдоупругості та ефекту пам'яті форми; роль мартенситних перетворень.

Міждисциплінарні зв'язки:

Навчальна дисципліна пов'язана з дисциплінами:

- «Методи дослідження фазового складу, структури та фізико-механічних властивостей матеріалів» (4/I),
- «Твердофазні процеси формування нероз'ємних з'єднань матеріалів» (1/II),
- «Структура з'єднань матеріалів отриманих 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 працювати в міжнародному контексті (код ЗК 10).
- Здатність самостійно виконувати наукові дослідження в галузі матеріалознавства на основі сучасних теорій та методів термодинаміки, кінетики процесів в

матеріалах, фізики конденсованого стану, та інформаційно-комунікаційних технологій (код ФК 2);

- Здатність оцінювати властивості матеріалів на основі існуючих та спеціально розроблених моделей та методів досліджень (код ФК-5);
- Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері механічної інженерії, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень(код ФК-6);
- Здатність визначати і оцінювати актуальність наукового напрямку та практичне значення досліджень (код ФК 7);
- 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);

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

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

#### **знання:**

- Методологію пошуку, оброблення, аналізу та синтезу інформації в спеціальному та міждисциплінарному контексті(код ЗН 2);
- Сучасних методів теоретичного та експериментального дослідження структури та властивостей матеріалів(код ЗН 6);
- Фундаментальних принципів фізичного, математичного, фізико-хімічного та імітаційного моделювання(код ЗН 8);
- Сучасного стану матеріалознавства та критеріїв підбору матеріалу, включаючи нові класи наноматеріалів, кластерних матеріалів, композиційних, багатошарових та інших(код ЗН 9)
- Основних положень сучасного матеріалознавства, вплив нерівноважних умов отримання матеріалів на їх структуру та властивості, технологічні процеси, що забезпечують необхідні умови отримання матеріалів з комплексом властивостей, необхідних для їх практичного використання (код ЗН 10);
- Технологічних процесів отримання матеріалів у вигляді покриттів шляхом осадження з парової фази, наплавленням, газоплазмовим нанесенням і поверхневою обробкою виробів (код ЗН 11);
- Сучасних уявлень про наноструктуровані матеріали, їх характеристики та методи отримання (код ЗН 12).
- придатності до зварювання низьковуглецевих конструкційних сталей підвищеної та високої міцності, особливості процесу зварювання в реальних умовах монтажу, для отримання нероз'ємних з'єднань з наперед заданими властивостями (код ЗН 16);

#### **уміння:**

- планувати теоретичне та експериментальне дослідження, оцінювати, адаптувати та узагальнювати його результати (код УМ 9 );
- оцінювати вплив нерівноважних умов отримання матеріалів на характеристики їх роботоздатності, та застосовувати сучасні методи їх підвищення (код УМ 14);
- практично застосувати отримані теоретичні знання при виборі матеріалів залежно від реальних умов експлуатації та функціонального призначення (код УМ 15);
- Придатності до зварювання низьковуглецевих конструкційних сталей підвищеної та високої міцності, особливості процесу зварювання в реальних умовах монтажу, придатності до зварювання легованих і високолегованих жаростійких та жароміцних сталей, особливості зварювання високовуглецевих сталей, зварювальних матеріалів для отримання нероз'ємних з'єднань з наперед заданими властивостями (код УМ 16);

- практично використовувати сучасні апаратні засоби для визначення структурних характеристик матеріалів їх механічних та фізичних властивостей, робити прогноз на основі визначеного комплексу їх властивостей щодо ресурсу експлуатаційних можливостей використання матеріалів (код УМ 17);
- практично визначати умови необхідні для формування з'єднання з необхідним комплексом властивостей (код УМ 18).

## 2. Структура навчальної дисципліни

На вивчення навчальної дисципліни відводиться 180 годин / 6 кредити ECTS.

Навчальна дисципліна містить наступні кредитні модулі:

1. Фізичне матеріалознавство Загальні положення.
2. Загальні положення теорії термічної обробки.
3. Методи отримання матеріалів у нерівноважних умовах.

### 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
З/І	Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання	1	-	7	210	76	48	28	-	134

## 3. Зміст навчальної дисципліни

### Розділ 1. Фізичне матеріалознавство. Загальні положення.

#### Тема 1.1. Класифікація сучасних сталей та сплавів. Вплив легуючих елементів на властивості матеріалів

Класифікація матеріалів. Конструкційні матеріали. Класифікація сталей і сплавів. Механізми зміцнення. Вплив легуючих елементів на властивості сталей. Зварюваність сталей. Холодні тріщини.

#### Тема 1.2. Кристалічна структура металів.

Кристалічна структура металів. Типи решіток. Розташування атомів. Координаційне число. Індеси Міллера. Дефекти кристалічної решітки.

#### Тема 1.3. Основи теорії сплавів. Діаграми фазової рівноваги.

Основи теорії сплавів. Правило фаз Гіббса. Діаграми фазової рівноваги. Діаграми стану 1-3 го роду. Правило відрізків. Види діаграми стану. Діаграма Fe-C. Ізотермічні і термодинамічні діаграми перетворення. Мікроструктура сталі. Вплив вуглецю. Мікроструктура чавуну. Макроструктура зливків.

#### Тема 1.4. Фізичні основи пластичної деформації сталі та сплавів.

Фізичні основи пластичної деформації. Пластичність дислокаційна, двійникуванням, фазовим перетворенням, міжзеренним ковзанням.

#### **Тема 1.5. Механізми та основні види руйнування**

Класифікація механізмів руйнування. В'язке руйнування. Крихке руйнування. Руйнування сколом. Складні види руйнування. Об'єднання різних механізмів руйнування. Руйнування втомою. Статичні та динамічні види руйнування. Механізми зародження тріщин.

#### **Тема 1.6. Методи визначення механічних властивостей матеріалів.**

Випробування на твердість. За Бринелем, Роквелем, Вікерсом, мікротвердість. Випробування на статичну міцність. Криві напруга-деформація. Тріщиностійкість. Коефіцієнт інтенсивності напружень. Динамічні випробування на ударну в'язкість. Втома.

#### **Тема 1.7. Класифікація методів дослідження матеріалів.**

Методи отримання зображення. Світлова мікроскопія. Електронна мікроскопія. Атомно-силова мікроскопія. Методи визначення елементного складу. Методи визначення кристалічної структури. Методи визначення фазового складу.

## **Розділ 2. Загальні положення теорії термічної обробки та формування структури сталей в нерівноважних умовах .**

### **Тема 2.1. Термічна обробка сталей та сплавів.**

Мета термічної обробки. Класифікація видів термічної обробки. Основні види термічної обробки. Утворення аустеніту, кінетика і механізм аустенітизації. Гомогенізація і розмір зерна аустеніту. Ізотермічний розпад аустеніту.

### **Тема 2.2. Формування структур при термічній обробці.**

Кінетика утворення структур в вуглецевих сталях. Кінетика розпаду аустеніту. Фазові перетворення при нагріві та охолодженні. Особливості формування фериту, перліту, бейніту та мартенситу. Особливості бейнітного та мартенситного перетворень. Класифікація бейнітних структур. Різниця між дифузійним та бездифузійним перетворенням. Види мартенситу. Ізотермічні та термокінетичні діаграми розпаду аустеніту. Визначення температур фазових перетворень.

### **Тема 2.3. Особливості формування структури сталей в нерівноважних умовах**

Особливості формування структур в нерівноважних умовах кристалізації. Вплив режимів та параметрів зварювання на формування структур. Формування структур в металі шва та металі ЗТВ. Вплив розміру первинного аустенітного зерна на формування мікроструктур. Вплив неметалевих включень на формування структур. Особливості формування фериту по границях первинних аустенітних зерен. Голчастий ферит та ферит Відманштетту. Формування МАК-фази (мартенсито-аустеніто-карбідних комплексів) в металі шва. Структури зони крупного та дрібного зерна в металі ЗТВ.

### **Тема 2.4. Формування структури та механічні властивості матеріалу в зоні термічного впливу зварних з'єднань конструкційних сталей.**

Формування структури в металі зони термічного впливу високоміцних конструкційних сталей з межею плинності від 350 до 800 МПа при їх безперервному нагріві та охолодженні по термічним циклам зварювання. Вплив термічних циклів зварювання на механічні властивості металу зони термічного впливу високоміцних конструкційних сталей з межею плинності від 350 до 800 МПа. Зміна структури та механічних властивостей металу зони термічного впливу зварних з'єднань конструкційних сталей з межею плинності 350 – 490 МПа внаслідок дії циклічного навантаження.

### **Тема 2.5. Чисельні методи прогнозування структурного стану та механічних властивостей матеріалу з'єднань із конструкційних сталей та злитків отриманих**

### **електрошлаковим переплавом.**

Основи теплових процесів при зварюванні, наплавленні. Головні положення та закони, що лежать в основі теорії мікроструктурних фазових перетворень в конструкційних сталях та сплавах під впливом термічного циклу зварювання або наплавлення, методи, що існують для опису цих фізико-хімічних процесів, які результати можуть бути отримані за допомогою цих методів,

Взаємозв'язок між мікроструктурним складом матеріалу зварного шва, наплавлення і ЗТВ та механічними властивостями, проблеми, що виникають при несприятливому поєднанні структури металу, його властивостей, залишкових напружень та експлуатаційних навантажень.

Основи теплових процесів при електро-шлаковому переплаві. Мікроструктурні фазові перетворення в злитках конструкційних сталей та сплавів під впливом термічного циклу електро-шлакового переплаву, методи, що існують для опису цих фізико-хімічних процесів, які результати можуть бути отримані за допомогою цих методів.

Взаємозв'язок між мікроструктурним складом матеріалу злитку та механічними властивостями, проблеми, що виникають при несприятливому поєднанні структури металу, його властивостей та залишкових напружень.

## **Розділ 3. Вплив нерівноважних умов отримання матеріалів при кристалізації рідини та конденсації пари на їхню структуру та властивості**

### **Тема 3.1. Отримання конструкційних елементів з використанням адитивної технології**

Адитивні технології. Методи адитивного виробництва. Класифікація адитивних методів. Матеріали для адитивних процесів. Устаткування для створення адитивних виробів.

### **Тема 3.2. Прогнозування макроструктури та механічних властивостей конструкційних елементів титанового сплаву, отриманих з використанням адитивної технології пошарового формування, вплив механічних властивостей на працездатність та ресурс конструкційних елементів.**

Основи теплових процесів в конструкційних елементах з титанових сплавів при пошаровому формуванні з використанням адитивної технології. Мікроструктурні фазові перетворення в титанових сплавах під впливом термічного циклу пошарового наплавлення, методи, що існують для опису цих фізико-хімічних процесів, які результати можуть бути отримані за допомогою цих методів.

Взаємозв'язок між мікроструктурним складом матеріалу конструкційного елемента з титанового сплаву та механічними властивостями, проблеми, що виникають при несприятливому поєднанні структури металу, його властивостей та залишкових напружень після пошарового формування з використанням адитивної технології.

### **Тема 3.3. Структура та властивості матеріалів отриманих в процесі осадження парової фази**

Основи термічного випаровування речовин у вакуумі. Закон Ленгмюра. Закон Рауля. Діаграма направленості парового потоку у вакуумі. Механізми конденсації парової фази. Вплив умов осадження парової фази на структуру вакуумних конденсатів. Структурні зони Мовчана-Демчишина. Отримання наноструктурованих матеріалів в процесі електронно-променевого осадження речовин. Квазікристалічні матеріали отримані в процесі осадження парової фази. Функціональні матеріали і покриття.

### **Тема 3.4. Сплави з пам'яттю форми (SMA-матеріали).**

Псевдоупругість і ефект пам'яті форми. Роль мартенситних перетворень. Гістерезис перетворення. Особливості зміни кристалічної структури при ефекті пам'яті форми і псевдоупругості. Властивості SMA-матеріалів.

#### **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.* Визначити хімічний склад різних сталей та сплавів згідно їх марки та розрахувати здатність сталей до зварювання та схильність до утворення холодних тріщин (2 години).

*Практичне заняття № 2.* Визначити тип кристалічної структури та параметри ґратки різних фаз у сталях при дослідженні у ПЕМ. (2 години).

*Практичне заняття № 3.* Розрахувати частку та склад фаз згідно рівноважної діаграми стану. Провести класифікацію мікроструктури різних сталей та чавунів у вихідному, литому стані та при зварюванні. (2 години).

*Практичне заняття № 4.* Провести класифікацію зламів різних сталей та сплавів при дослідженні у РЕМ. Визначити частку крихкого та в'язкого руйнування у зламах. (2 години).

*Практичне заняття № 5* Експериментально визначити твердість сталей та сплавів за Бринелем, Роквелем, Вікерсом та мікротвердістю. Розрахувати коефіцієнт інтенсивності напружень. Побудувати діаграму напруга-деформація та визначити характерні ділянки. (2 години)..

*Практичне заняття № 6.* Оволодіти основними навичками роботи на растровому, просвітлюючому електронному мікроскопі, дифрактометрі. Визначити хімічний склад фаз методом мікро рентгеноспектрального та рентгеноструктурного аналізу. (2 години).

*Практичне заняття № 7.* Провести класифікацію діаграм перетворення аустеніту. Визначити ділянки утворення фериту, перліту, бейніту та мартенситу. Розрахувати розмір та бал зерна у сталях та сплавах різних металів. (2 години).

*Практичне заняття № 8.* Ознайомитися з устаткуванням для моделювання на зразках обмежених розмірів характерних для металу термічного впливу зварних з'єднань умов нагріву та охолодження. (2 години).

*Практичне заняття №9.* Чисельними методами розрахувати та проаналізувати вплив погонної енергії зварювання на швидкість охолодження в інтервалі температур 600 – 500 °С металу ЗТВ, який при зварюванні нагрівався до температури 1200 °С. (2 години).

*Практичне заняття №10.* Прогнозування структурного фазового стану та механічних властивостей матеріалу в зоні зварних з'єднань, наплавлень, злитків електрошлакового переплаву конструкційних сталей (2 години).

*Практичне заняття №11* Ознайомитися з основними методами адитивного виробництва. Ознайомитися з устаткуванням для використання металевих порошків та зварювальних дротів для адитивного наплавлення. Вибрати основні матеріали для адитивного процесу(2 години).

*Практичне заняття №12.* Прогнозування структурного фазового стану та механічних властивостей матеріалу, отриманих з використанням адитивної технології пошарового формування. (2 години).

*Практичне заняття №13.* Ознайомлення з конструкційними особливостями та основними вузлами установки для електронно-променевого осадження речовин у вакуумі.



Техніка безпеки при роботі на установці. Ознайомлення з дослідними зразками матеріалів отриманих шляхом вакуумного осадження речовин. Демонстрація процесу електронно-променевого осадження речовин у вакуумі. (2 години).

*Практичне заняття № 14.* Визначити особливості використання сплавів з ефектом пам'яті форми. Побудувати діаграму перетворення SMA матеріалів. Дослідити мікроструктуру SMA сплавів на різних ділянках перетворення. Визначити температуру мартенситного перетворення для різних SMA сплавів. (2 години).

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

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

## **6. Рекомендовані індивідуальні завдання**

Самостійна робота студентів включає підготовку до лекцій, практичних занять.

## **7. Рекомендована література**

### **7.1 Базова:**

1. Гудремон Э.А. Специальные стали. Том 1. –2-е изд. - М.: Металлургия, 1966. - 734 с.
2. М.И.Гольдштейн Пути повышения прочности и хладостойкости конструкционных сталей / М.И.Гольдштейн // МиТОМ .- 1987 .- №11 .- С.6-11.
3. Матросов Ю.И., Литвиненко Д. А., Голованенко С. А. Сталь для магистральных трубопроводов. М., 1989. - 289с.
4. Григоренко Г.М., Костин В.А. Свариваемость сталей и критерии ее оценки. Сварочное производство, 2012, 10(935), с.3-10.
5. Справочник сварщика. Справ. изд./Под ред. В. В. Степанова М: Машиностроение, 1975, 520 с.
6. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов.
7. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. М.:Машгиз,1960, 495 с.
8. Позняков В.Д., С.Б. Касаткин, В.А. Довженко Структура и хладостойкость сварных соединений стали 09Г2С после ремонтной сварки // Автоматическая сварка. – 2006. – № 9. – С. 46-52.
9. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов.М.:Металлургия,1978,389 с.
10. Энтин Р. И. Превращения аустенита в стали, М., 1960, 466 с.
11. Гуляев А.П. Металловедение. - М.: Металлургия, 1986. - 542 с.
12. Квасницкий В.В. Теория сварочных процессов. Исследования физико-химических и металлургических процессов и способности металлов к сварке. Учебное пособие. – Николаев:УДМУ, 202. – 184 с.
13. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
14. Лившиц Л.С, Хакимов А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. М.: Машиностроение. 167 с.
15. Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф. Низколегированные стали высокой прочности, для сварных конструкций. Киев: Техшка, 1970. 188 с.
16. Гривняк И. Свариваемость сталей: пер. со слов. Л.С.Гончаренко; под ред. Э.Л.Макарова.- М.:Машиностроение, 1984. – 216 с.

17. Ю.Я.Мешков Физические основы разрушения стальных конструкций.- Киев: Наук. думка, 1981.- 240 с.
18. Грабин В.Ф.,Денисенко А.В. Металловедение сварки низко- и бредне-легированных сталей .- К.: Наукова думка, 1978.- 254с.
19. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.:металлургия, 1979, 208 с.
20. Бабаскин Ю.З., Щипицын С.Я., Кирчу И.Ф. Конструкционные и специальные стали с нитридной фазой. – К.: Наукова думка, 2006. – 380с.
21. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Специальные стали. Учебник для вузов. Г. М.: Metallurgy, 1985. 408 с.
22. Лившиц Л. С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей). — М.: Машиностроение, 1979.— 253 с.
23. Богомолова Н.А. Практическая металлография: Учебник для техн. училищ. - 2-е изд., испр. - М.: Высш. школа, 1982. - 272 с., ил. - (Профтехобразование. Металлография, металловедение).
24. Приборы и методы физического металловедения. Ч.1-2. Под. ред. Вейнберг Ф. М.: Мир, 1973. - 432 с.
25. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука[и др.]; под ред. Х. Фунакубо. –М. : Metallurgy, 1990. –224 с.
26. Курдюмов, Г. В.О природе бездиффузных мартенситных превращений / Г. В. Курдюмов// ДАН СССР. –1948. –Т. 60. –№9. –С. 1543-1546.
27. Курдюмов, Г. В.О термоупругом равновесии при мартенситных превращениях / Г. В. Курдюмов, Л. Г. Хандрос// ДАН СССР. –1948. –Т. 60. –№2. –С. 211-220.
28. Г.М.Григоренко, В.А.Шаповалов, В.В.Жуков, Аддитивное производство металлических изделий (Обзор) // Автоматическая сварка, №5-6, 2016, с. 148-153.
29. Влияние циклического нагружения на микроструктуру и хладостойкость металла ЗТВ стали 10Г2ФБ / В.Д. Позняков, Л.И. Маркашова, А.А. Максименко и др. // Автоматическая сварка. - 2014. - №5. – С. 3-11.
30. Особенности формирования структуры сварных соединений микролегированной конструкционной стали S460M / Г. М. Григоренко, В. Д. Позняков, Т.А. Зубер, В.А. Костин // Автоматическая сварка. - 2017. - №9. – С. 9-16.
31. В.Д. Позняков. Свариваемость высокопрочных легированных сталей с пределом текучести 590...785 МПа // Автоматическая сварка. - 2018. - №3. – С. 7-12.
32. В.Д. Позняков. Конструкційні сталі класу міцності С350...С490 та їх здатність до зварювання // Строительство, материаловедение, машиностроение Сб. научн. Трудов. Вып. 89, - Дн-вск, ГВУЗ «ЛГАСА», 2016.- С. 144-150.
33. Гуляев А.П. — Металловедение, М. «Металлургия», 1986. - 282 с.
34. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. - Москва: Наука, 1977. - 236 с.
35. О.Г.Касаткин, П.Зайффарт Расчетные модели для оценки механических свойств металла ЗТВ при сварке низколегированных сталей. Сб. тр. междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». – Киев, 2002. – С. 103–106.
36. Christian J.W. The Theory of Transformations in Metals and Alloys. Parts I. Oxford, Pergamon, 2002. - 1200 pp.
37. В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др. Теория сварочных процессов. Учебник для вузов – М.: Высшая школа. – 1988, 559 с.

## 7.2. Допоміжна

1. Позняков В.Д. Механические свойства металла швов и сопротивляемость образованию холодных трещин тавровых соединений стали 13ХГМРБ / В.Д. Позняков // Автоматическая сварка. – 2008. – № 2. – С. 20-25.
2. Позняков В.Д. Повышение сопротивляемости замедленному разрушению сварных соединений литых закаливаемых сталей / В.Д. Позняков // Автоматическая сварка. – 2008. – № 5. – С. 11-17.
3. Позняков В.Д. Структура и хладостойкость сварных соединений стали 09Г2С после ремонтной сварки / В.Д. Позняков, С.Б. Касаткин, В.А. Довженко // Автоматическая сварка. – 2006. – № 9. – С. 46-52.
4. Лобанов Л.М. К вопросу образования продольных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей / Л.М. Лобанов, Л.И. Миходуй, В.Д. Позняков // Автоматическая сварка. – 2003. – № 4. – С. 14-18.
5. Лобанов Л.М. Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа / Л.М. Лобанов, В.Д. Позняков, О.В. Махненко // Автоматическая сварка. – 2013. – № 7. – С. 8-13.
6. Лобанов Л. Продовження ресурсу конструкцій з високоміцних сталей на основі ремонтно-зварювальних технологій / Л. Лобанов, В. Позняков // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: Збірник наукових праць 4-ї Міжнародної конференції (23-27 червня 2009р., Львів) / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2009. – с. 829-838.
7. Макара А.М. Влияние временных сварочных напряжений на сопротивляемость соединений образованию холодных трещин / А.М. Макара, В.Г. Гордонный, И.В. Новиков // Автоматическая сварка. – 1968. – № 7. – С.1-5.
8. Маркашова Л.И. Структурные условия оптимизации свойств прочности, пластичности, трещиностойкости сварных соединений / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, Е.Н. Бердникова // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докладов пятой международной конференции (пос. Качивели, Крым, 25-28 мая 2010 г.) / Под ред. проф. В.И. Махненко – К.: Международная ассоциация «Сварка», 2010. – С.105-110.
9. Маркашова Л.И. Структурные факторы и оптимизация свойств прочности, пластичности, трещиностойкости сварных соединений высокопрочных сталей / Л.И. Маркашова, Е.Н. Бердникова, Т.А. Алексеенко // Материалы 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». (16-20 мая 2011г., Харьков, Украина). – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2011. – С.247.
10. Махненко В.И. Влияние микроструктурных изменений на перераспределение водорода при сварке плавлением сталей / В.И. Махненко, Т.В. Королева, И.Д. Лавринец // Автоматическая сварка – 2002. – № 2. – С. 7-13.
11. Махненко В.И. Исследование влияния фазовых превращений на остаточные деформации при сварке кольцевых стыков труб / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, О.В. Махненко и др. // Автоматическая сварка – 2000. – №5. – С. 3-8.
12. Махненко В.И. Компьютерное моделирование сварочных процессов / В.И. Махненко // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – К.: Наукова думка, 1998. – С.108-124.
13. Метод препарирования для электронно-микроскопических исследований / Ю.Ф. Даровский, Л.И. Маркашова, Н.П. Абрамов [и др.] // Автоматическая сварка. – 1985. – №12. – С. 60.
14. Механические свойства металлов и сплавов: Справочник / Л.В. Тихонов, В.А. Каноненко, Г.И. Прокопенко, В.А. Рафаловский – К.: Наукова думка, 1986. – 568 с.

15. Мешков Ю.Я. Структура металла и хрупкость стальных изделий / Ю.Я. Мешков, Г.А. Пахаренко. – К.: Наукова думка, 1985. – 266 с.
16. Мешков Ю.Я. Физические основы прочности стальных конструкций / Ю.Я. Мешков – К.: Наукова думка, 1981. – 238 с.
17. Металлография железа. Т.1. Основы металлографии. – Москва: Металлургия, 1972. – 246 с.
18. Мовчан М.В. Исследования механизма модифицирования первичной структуры литых сплавов дисперсными неметаллическими частицами / М.В. Мовчан, В.А. Ефимов // Известия АН СССР. Металлы. – 1984. – №4. – С.109-116.
19. Скульский В.Ю. Структура металла в зоне сплавления и ЗТВ сварных соединений высокохромистых теплоустойчивых сталей / В.Ю. Скульский // Автоматическая сварка. – 2005. – № 5. – С. 15-23.
20. Скульский В.Ю. Термокинетические особенности образования холодных трещин в сварных соединениях закаливающихся теплоустойчивых сталей / В.Ю. Скульский // Автоматическая сварка. – 2009. – № 3. – С. 14-18.
21. Грабин В.Ф., Головкин В.В., Соломийчук Т.Г., Гончаренко Е.И., Костин В.А. Анализ структурного состава металла швов, выполненных сварочными проволоками ферритно-перлитного класса. // Автоматическая сварка, 2003, №8, с.18-23.
22. Лобанов Л.М. Влияние пластической деформации на структуру, механические свойства и коэрцитивную силу металла кислородных баллонов / Л.М. Лобанов, М.Д. Рабкина, В.А. Костин, В.А. Нехотящий // Технология диагностики и неразрушающий контроль. – 2011. - №4. - С.14-23.
23. Костин В.А. Влияние нановключений на формирование структуры металла швов феррито-бейнитных сталей (обзор) / В.А.Костин, В.В. Головкин, Г.М. Григоренко // Збірник НУК ім. Адмірала Макарова. – 2011. - №4 (433), електронне видання.
24. Костин В.А. Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства микролегированных конструкционных сталей / В.А. Костин, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, Т.Г. Соломийчук, Т.А. Зубер, А.А. Максименко // Автоматическая сварка. – 2012. - №12. - С.10-16.
25. Костин В.А. Микроструктурные исследования сварных швов высокопрочной конструкционной стали WELDOX 1300 с пределом прочности 1700 МПа / В.А. Костин, Г.М. Григоренко, Т.Г. Соломийчук, В.В. Жуков, Т.А. Зубер // Автоматическая сварка. -2013. - №3. - С.7-14.
26. Костин В.А. Математическое описание углеродного эквивалента как критерия оценки свариваемости сталей / В.А. Костин // Автоматическая сварка. – 2012. - №8. - С.12-17.
27. Григоренко Г.М. Современные возможности моделирования превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей / Г.М.Григоренко, В.А. Костин, В.Ю. Орловский // Автомат. сварка. – 2008. - №3. - С.31-34.
28. Костин В.А. Методы оценки упрочнения металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей / В.А. Костин, В.В. Головкин, Г.М. Григоренко // Автоматическая сварка. – 2011. - №10. - С.12-17.
29. Костин В.А. Физическое моделирование структурных превращений в металле ЗТВ трубных сталей // В.А. Костин, Т.А. Филиппчук / Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. Вып.58. – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА». – 2011. – С.389- 394.
30. Костин В.А. Особенности формирования структуры при сварке высокопрочных сталей с карбонитридным упрочнением / В.А. Костин, Г.М. Григоренко, В.В. Жуков // Вісник НУК. – 2013. - №1.- с.34-41.
31. G.M. Grigorenko Predicting the temperatures of phase transformations in high strength low alloy steels / G.M. Grigorenko, V.A. Kostin // Advances in electrometallurgy. – 2013. -№1.- Vol. 11. – С.46-54.

32. Kostin V.A., Grigorenko G.M. Using nanoparticles for modification structure of weld metal hsla steels // 4-th international conference “Nanotechnologies”, 2016, October 24 – 27, Tbilisi, Georgia (Nano – 2016).
33. V.A.Kostin, G.M.Grigorenko, V.V.Golovko, V.V.Zhukov Influence nanoparticles on the structure and properties of welded metals of HSLA steels // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2016.-№ 6.- PP.64-69.
34. G. Grigorenko, V.Kostin, V. Zhukov, T.Zuber Peculiarities of Structural Transformations in HAZ Metal of Rail Steel M76 Joint Produced by Flash-Butt Welding // Journal of Physical Science and Application 6 (5) (2016) 54-65.
35. Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, Т.А. Зубер, В.А.Костин Особенности формирования структуры сварных соединений микролегированной конструкционной стали S460M // Автоматическая сварка, № 10, 2017, с. 9-16.
36. Костин В.А., Григоренко Г.М. Особенности формирования структуры 3D изделия из стали S460M в аддитивной металлургической технологии // Современная электрометаллургия, №3 (128), 2017, с.33-42.
37. С. В. Ахонин, Э. Л. Вржижевский, В. Ю. Белоус, И. К. Петриченко 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей. // Автоматическая сварка, №5-6, 2016, с. 141-144.
38. В. Н. Коржик, В. Ю. Хаскин, А. А. Гринюк и др. Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий (Обзор)// Автоматическая сварка, №5-6, 2016, с. 127-134.
39. Shape Memory AlloyShape Training Tutorial. (PDF). Retrieved on 2011-12-04: <http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf>
40. Otsuka K., Wayman C.M., *Mechanism of shape memory effect and superelasticity. Shape memory materials* (Cambridge: University Press:1998).
41. Коваль Ю.Н., Лободюк В.А. *Деформационные и релаксационные явления при превращениях мартенситного типа*. Киев: “Наукова думка”:2010.
42. А.М. Покровский, А.В. Рыжиков Численное моделирование температурно-структурного состояния биметаллического прокатного валка в процессе его наплавки. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, №2 [659] 2015. – С.22-28.
43. Махненко О.В. Влияние сварочного цикла охлаждения на структурно-фазовый состав стали 15X2НМФА. / О.В. Махненко, В.А. Костин, В.В. Жуков, Е.С. Костеневич / Автоматическая сварка. 2019. –№ 9. – С. 14-25.
44. Smoljan V. Computer simulation of microstructure transformation in heat treatment processes // J. AMME. – 2007. – 24, No. 1. – P. 275–282.
45. Koistinen D.P., Marburger R.E. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels // Acta Metallurgies. – 1959. – V.7. – pp. 59—60.
46. Avrami M. Kinetics of Phase Change. Journal of Chemical Physics 7 (12): 1103–1112 (1939), 8 (2): 212–224 (1940), 9 (2): 177–184 (1941).
47. Yukio Ueda, Hidekazu Murakawa, Yu Luo A Computational Model of Phase Transformation for Welding Processes // Transactions of JWRI. – 1995. – 24(1). –pp. 95-100.
48. Гачкевич О.Р., Козакевич Т.В. Вибрані проблеми моделювання та оптимізації фазового складу та зумовлених ним напружень у маловуглецевих низьколегованих сталевих тілах за технологічного нагріву // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. - 2018, вип. 27, С.28-40.

## **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 розробили:**

д.т.н., ст.н.с.

В.А. Костін

зав. від., д.т.н., ст.н.с.

В.Д. Позняков

зав. від., д.т.н., ст.н.с.

О.В. Махненко

зав. від., д.фіз.-мат.н., проф.

А.І. Устінов