

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
Заступник директора інституту з
наукової роботи
академік НАН України


(підпис)

І.В. Кривцун
(ініціали, прізвище)

« 06 » липня 2020 р.

**ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ В НЕРІВНОВАЖНОМУ СТАНІ ТА
МЕТОДИ ЇХ ОТРИМАННЯ**

шифр навчальної дисципліни за ОНП 3/І
(назва кредитного модуля)

**РОБОЧА ПРОГРАМА
кредитного модуля**

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


(підпис)

А.І. Устінюв
(ініціали, прізвище)

« 03 » липня 2020 р.


Робоча програма кредитного модуля

складена відповідно до програми навчальної дисципліни:

«Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання» ОНП, 3/І

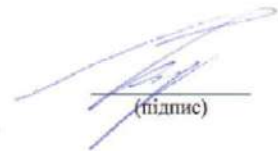
(назва кредитного модуля)

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)



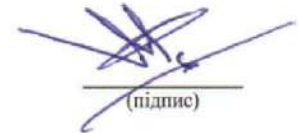
(підпис)

Зав. відділу зварювання легованих 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. Устінів 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» липня 2020 року № 1

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

«06» липня 2020 р.

1. Опис кредитного модуля

Рівень ВО, спеціальність, освітня програма, форма навчання	Загальні показники	Характеристика кредитного модуля
Рівень ВО Третій (доктор філософії)	Назва дисципліни «Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання»	Лекції <u>48</u> год.
Спеціальність 132 – Матеріалознавство (шифр і назва)	Цикл професійної підготовки	Практичні (семінарські) <u>28</u> год.
Освітня програма ОНП 1/П, «Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання» (ОПП, ОНП, назва)	Статус кредитного модуля обов'язковий (обов'язковий, вибірковий)	Лабораторні роботи <u>0</u> год.
		Самостійна робота <u>134</u> год., у тому числі на виконання індивідуального завдання <u>0</u> год.
	Семестр <u>1</u>	Індивідуальне завдання (вид)
Форма навчання денна (денна, заочна)	Кількість кредитів (годин) <u>7/210</u>	Вид та форма семестрового контролю (екзамен / залік; усний / письмовий / тестування тощо) екзамен

Структура сплаву та його механічні властивості визначаються широким колом факторів – хімічним складом, способом плавки, умовами розкислення та модифікування, умовами охолодження та режимами термо-механічної обробки. На характер формування структури зварних з'єднань та їх міцність значний вплив оказує види та умови зварювання, використання відповідного дроту, флюсу або захисного газу, попередній підігрів та режими охолодження. При цьому у нерівноважних умовах зварювання та осадження із парової фази у металі відбувається складний комплекс фізико-хімічних процесів – перекристалізація у твердій фазі, структурні перетворення, формування хімічної та структурної неоднорідності, формування дефектів, пор та несучільностей, що в значній мірі визначає фізико-хімічні, механічні, корозійні та функціональні властивості матеріалу.

Тому метою кредитного модуля «Актуальні фізико-хімічні проблеми отримання матеріалів в нерівноважних умовах» є надання аспірантам знань про основні способи проблеми сучасного матеріалознавства сталей та сплавів; фазові і структурні перетворення в сталях та сплавах; фізичні процеси і явища в матеріалах в процесі їх отримання та при екстремальних зовнішніх впливах; методи отримання та структура нанокристалічних матеріалів. Разом з тим велике значення мають питання отримання та методи дослідження матеріалів отриманих у нерівноважних умовах; механізми їх деформації і руйнування при статичних, циклічних і динамічних навантаженнях; проблеми та методи підвищення конструкційної міцності сталей і сплавів. У модулі розглянуті питання отримання нових функціональних матеріалів, матеріалів з пам'яттю форми, адитивні матеріали та технології їх отримання, технології термічної, термомеханічної та поверхневої обробки матеріалів; сучасні методи дослідження структури і властивостей металевих матеріалів.

Доктор філософії як фахівець повинен мати глибокі теоретичні знання і володіти відповідними навичками використання фундаментальних знань для їх застосування при визначенні структури металів та сплавів, корегування режимів зварювання відповідно до технічних вимог до виробів та одержанні якісних з'єднань з металів та сплавів. Даний курс має велике значення для формування майбутнього доктор філософії, розширює теоретичні та практичні можливості фахівця. Кредитний модуль пов'язаний 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).

2. Мета та завдання кредитного модуля

2.1. Метою навчальної дисципліни є формування у аспірантів здатностей:

- 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);

2.2. 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).

3. Структура кредитного модуля

Назви розділів і тем	Кількість годин				
	Всього	у тому числі			
		Лекції	Практичні (семінарські)	Лабораторні	СРА
1	2	3	4	5	6
Розділ 1. Фізичне матеріалознавство. Загальні положення.					
<i>Тема 1.1. Класифікація сучасних сталей та сплавів. Вплив легуючих елементів на властивості матеріалів</i>	12	2	2	-	8
<i>Тема 1.2. Кристалічна структура металів.</i>	12	2	2	-	8
<i>Тема 1.3. Основи теорії сплавів. Діаграми фазової рівноваги.</i>	12	2	2	-	8

1	2	3	4	5	6
<i>Тема 1.4. Фізичні основи пластичної деформації сталі та сплавів.</i>	12	2	2	-	8
<i>Тема 1.5. Механізми та основні види руйнування</i>	6	2	-	-	4
<i>Тема 1.6. Методи визначення механічних властивостей матеріалів.</i>	10	2	2		6
<i>Тема 1.7. Класифікація методів дослідження матеріалів.</i>	12	2	2		8
Разом за розділом 1	74	14	12	-	48
Розділ 2. Загальні положення теорії термічної обробки та формування структури сталей в нерівноважних умовах.					
<i>Тема 2.1. 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.</i>	8	2	2	-	4
<i>Тема 2.2. Кінетика утворення структур в вуглецевих сталях. Кінетика розпаду аустеніту. Ізотермічні та термокінетичні діаграми розпаду аустеніту.</i>	10	2	2	-	6
<i>Тема 2.3. Особливості формування структур в нерівноважних умовах кристалізації. Формування феритних, перлітних, бейнітних структур та мартенситу.</i>	8	2	2	-	4
<i>Тема 2.4. Формування структури та механічні властивості матеріалу в зоні термічного впливу зварних з'єднань конструкційних сталей.</i>	8	2	-	-	6
<i>Тема 2.5. Чисельні методи прогнозування структурного стану та механічних властивостей матеріалу з'єднань із конструкційних сталей та злитків отриманих електрошлаковим переплавом.</i>	16	6	2		8
Разом за розділом 2	50	14	8	-	28
Розділ 3. Вплив нерівноважних умов отримання матеріалів при кристалізації рідини та конденсації пари на їхню структуру та властивості					
<i>Тема 3.1. Отримання</i>	6	2	2	-	6

1	2	3	4	5	6
<i>конструкційних елементів з використанням адитивної технології</i>					
<i>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.</i>	8	4	2	-	7
<i>Тема 3.3. Структура та властивості матеріалів отриманих в процесі осадження парової фази</i>	8	6	2	-	8
<i>Тема 3.4. Сплави з пам'яттю форми (SMA-матеріали).</i>	10	4	2	-	7
Разом за розділом 3	56	20	8	-	28
Екзамен					30
Всього годин	210	48	28	-	134

4. Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, завдання на СРС з посиланням на літературу)
1	<p>Класифікація матеріалів. Конструкційні матеріали. Класифікація сталей і сплавів. Механізми зміцнення. Вплив легуючих елементів на властивості сталей. Зварюваність сталей. Механізми формування холодних та гарячих тріщин. Завдання на СР аспіранту : - вплив легуючих елементів на властивості сталей; - холодні та гарячі тріщини. Література, основна: [13-20] Література допоміжна: -</p>
2	<p>Кристалічна структура металів. Типи решіток. Розташування атомів. Координаційне число. Індокси Міллера. Дефекти кристалічної решітки. Завдання на СР аспіранту : - типи кристалічних решіток різних металів; - одномірні, двомірні та тримірні дефекти кристалічної структури. Література, основна: [11,14] Література допоміжна: -</p>
3	<p>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. Мікроструктура сталі. Вплив вуглецю. Мікроструктура чавуну. Макроструктура зливків.</p>

	<p>Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>діаграми фазової рівноваги та діаграма залізо-вуглець;</i> - <i>макро- та мікроструктура зливків.</i> <p>Література, основна: [1,2,7,10,11] Література допоміжна: [23-25]</p>
4	<p>Фізичні основи пластичної деформації. Пластичність дислокаційна, двійникуванням, фазовим перетворенням, міжзерним ковзанням. Основні види руйнувань. Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>основні механізми пластичності;</i> - <i>основні види руйнування та типи зламів.</i> <p>Література, основна: [2,11,13] Література допоміжна: [4-7]</p>
5	<p>Загальні положення теорії термічної обробки. Мета термічної обробки. Класифікація видів термічної обробки. Основні фактори впливу при термічній обробці. Види термічної обробки. Утворення аустеніту, кінетика і механізм аустенітизації. Кінетичні криві, ізотермічні і термокінетической діграми утворення аустеніту. Гомогенізація і розмір зерна аустеніту. Ізотермічний розпад аустеніту. Кінетика утворення структур вуглецевих сталей. Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>основні види термічної обробки сталей;</i> - <i>кінетика утворення мікроструктур вуглецевих сталей .</i> <p>Література, основна: [7,9] Література допоміжна: [1-3]</p>
6	<p>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. Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>методи випробування на твердість;</i> - <i>статичні та динамічні випробування.</i> <p>Література, основна: [24] Література допоміжна: [7,8,21,22]</p>
7	<p>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. Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>методи дослідження металів та сплавів;</i> - <i>основні методи визначення хімічного складу.</i> <p>Література, основна: [22-24] Література допоміжна: [13,27,29]</p>
8	<p>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.</p>
9	<p>Формування структур при термічній обробці. Кінетика утворення структур в вуглецевих сталей. Кінетика розпаду аустеніту. Фазові перетворення при нагріві та охолодженні. Особливості формування фериту, перліту, бейніту та мартенситу. Особливості бейнитного та мартенситного</p>

	перетворень. Класифікація бейнітних структур. Різниця між дифузійним та бездифузійним перетворенням. Види мартенситу. Ізотермічні та термокінетичні діаграми розпаду аустеніту. Визначення температур фазових перетворень.
10	<p>Особливості формування структури сталей в нерівноважних умовах</p> <p>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.</p>
11	<p>Формування структури та механічні властивості матеріалу в зоні термічного впливу зварних з'єднань конструкційних сталей.</p> <p>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.</p> <p>Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - особливості теплових процесів при зварюванні, наплавленні; - методи математичного опису структурних фазових перетворень в конструкційних сталях та сплавах під впливом термічного циклу зварювання або наплавлення; - зв'язок між структурним фазовим складом матеріалу зварного шва, наплавлення і ЗТВ та механічними властивостями. <p>Література, основна: [29-33] Література допоміжна: [42-48]</p>
12	<p>Чисельні методи прогнозування структурного стану та механічних властивостей матеріалу з'єднань із конструкційних сталей та злитків отриманих електрошлаковим переплавом.</p> <p>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,</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>Взаємозв'язок між мікроструктурним складом матеріалу злитку та механічними властивостями, проблеми, що виникають при несприятливому</p>

	<p>поєднанні структури металу, його властивостей та залишкових напружень. Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - особливості теплових процесів при електро-шлаковому переплаві; - методи математичного опису структурних фазових перетворень в конструкційних сталях та сплавах під впливом термічного циклу електро-шлакового переплаву; - проблеми, які виникають при несприятливому поєднанні структури металу, механічних властивостей та залишкових напружень. <p>Література, основна: [29-33] Література допоміжна: [42-48]</p>
13	<p>Отримання конструкційних елементів з використанням адитивної технології Методи адитивного виробництва. Класифікація адитивних методів. Методи використання металевих порошків. Методи використання дроту. Переваги і недоліки. Матеріали для адитивних процесів. Устаткування для створення адитивних виробів. Тонкостінні адитивні наплавлення.</p> <p>Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - класифікація методів адитивного виробництва; - переваги та недоліки адитивних методів отримання матеріалів. <p>Література, основна: [27] Література допоміжна: [36-38]</p>
14	<p>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.</p> <p>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.</p> <p>Завдання на СР аспіранту :</p> <ul style="list-style-type: none"> - особливості теплових процесів при пошаровому формуванні з використанням адитивної технології; - методи математичного опису структурних фазових перетворень в титанових сплавах; - прогнозування механічних властивостей титанових сплавів. <p>Література, основна: [29-33] Література допоміжна: [42-48]</p>
15	<p>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.</p>

	Функціональні матеріали і покриття.
16	<p>Сплави з пам'яттю форми. 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. Завдання на СР аспіранту : - зміна кристалічної структури в матеріалах з ефектом пам'яті форми; - основні властивості матеріалів з пам'яттю форми. Література, основна: [25-27] Література допоміжна: [39-41]</p>

5. Практичні заняття¹

Основні завдання циклу практичних занять є закріплення знань, що були одержані на лекційних заняттях.

№ з/п	Назва теми заняття
1	Визначити хімічний склад різних сталей та сплавів згідно їх марки та розрахувати схильність сталей до зварювання та утворення холодних тріщин. (2 години).
2	Визначити тип кристалічної структури та параметри ґратки різних фаз у сталях при дослідженні у ПЕМ. (2 години).
3	Розрахувати частку та склад фаз згідно рівноважної діаграми стану методом відрізків. Провести класифікацію мікроструктури різних сталей та чавунів у вихідному, литому стані та при зварюванні. (2 години).
4	Провести класифікацію зламів різних сталей та сплавів при дослідженні у РЕМ. Визначити частку крихкого та в'язкого руйнування у зламах. (2 години).
5	Експериментально визначити твердість сталей та сплавів за Бринелем, Роквелем, Вікерсом та мікротвердістю. Розрахувати коефіцієнт інтенсивності напружень. Побудувати діаграму напруження-деформація та визначити характерні ділянки. (2 години).
6	Оволодіти основними навиками роботи на растровому, просвітлюючому електронному мікроскопі, дифрактометрі. Визначити хімічний склад фаз методом мікрорентгеноспектрального та рентгеноструктурного аналізу. (2 години).
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).
8	Ознайомитися з устаткуванням для моделювання на зразках обмежених розмірів характерних для металу термічного впливу зварних з'єднань умов нагріву та охолодження. (2 години).
9	Чисельними методами розрахувати та проаналізувати вплив погонної енергії зварювання на швидкість охолодження в інтервалі температур 600 – 500 оС металу ЗТВ, який при зварюванні нагрівався до температури 1200 оС (2 години)..
10	Прогнозування структурного фазового стану та механічних властивостей матеріалу в зоні зварних з'єднань, наплавлень, злитків електро-шлакового переплаву конструкційних сталей (2 години).
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).

¹ За наявності ПЗ

12	Прогнозування структурного фазового стану та механічних властивостей матеріалу, отриманих з використанням адитивної технології пошарового формування. (2 години).
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).
14	Визначити особливості використання сплавів з ефектом пам'яті форми. Побудувати діаграму перетворення уSMA матеріалах. Дослідити мікроструктуру SMA сплавів на різних ділянках перетворення. Визначити температуру мартенситного перетворення для різних SMA сплавів. (2 години).

6. Семінарські заняття²

Семінарські заняття навчальним планом не передбачені.

7. Лабораторні заняття³

Лабораторні заняття навчальним планом не передбачені.

8. Самостійна робота⁴

Робочою навчальною програмою кредитного модулю «Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання» відведено 134 годин на самостійну роботу аспіранта, яка міститься у роботі над конспектом лекцій, монографіями, підручниками, науковими періодичними виданнями, базами наукової електронної інформації при підготовці до лекцій, чотирьох практичних занять, та на підготовку до іспиту.

Розрахунок годин самостійної роботи проводиться за формулою:

$$T_{CP \text{ асп}} = 0,4t_{л} + 0,1t_{п/з} + 0,5t_{екз.}$$

де: L – лекції; $ПЗ$ – практичні заняття; екз - екзамен.

$$T_{CP \text{ Асп.}} = 1,25 \times 10 + 1,25 \times 10 + 25 \times 1 = 50 \text{ годин}$$

9. Контрольні роботи⁵

Підсумковий контроль результатів навчання проводиться у формі екзамену.

10. Рейтингова система оцінювання результатів навчання⁶

з кредитного модуля (дисципліни): «Властивості матеріалів в нерівноважному стані та методи їх отримання», ОНП 3/І

² За наявності СЗ

³ За наявності ЛР, КП

⁴ За умови виділення певної частки навчального матеріалу на самостійне вивчення.

⁵ За наявності

⁶ Вимоги до РСО та методика її складання надані у Положенні про рейтингову систему оцінювання результатів навчання студентів / Уклад.: В. П. Головенкін. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 20 с.

для спеціальності: 132 Матеріалознавство

Розподіл навчального часу за видами занять і завдань з дисципліни згідно з робочим навчальним планом.

Семестр	Навчальний час		Розподіл навчальних годин				Контрольні заходи		
	кредити	академічних годин	Лекції	Практика	Лаб. заняття	СР аспіранта	МКР	РР	Семестрова атестація
2	7	210	48	28	-	134	-	-	Екзамен

Рейтинг студента з дисципліни⁷ складається з балів, що він отримує на:

1. питання, що кожен аспірант отримує у кінці кожного практичного заняття;
2. відповідь при проведенні екзамену.

Система рейтингових (вагових) балів та критерії оцінювання

1. Робота на практичних заняттях

Ваговий бал – 1. Максимальна кількість балів на всіх практичних заняттях дорівнює $2,5 \times 4 = 10$ балів (2,5 балів - відповідь на питання, 0 балів - відсутність відповіді)

2. Штрафні бали

Відсутність на лекції, або на практичному занятті без поважної причини **-1 бал**;

Розрахунок шкали (R) рейтингу:

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:

$$R_c = 10 \text{ балів}$$

На іспиті аспіранти виконують письмову контрольну роботу. Кожне завдання містить три питання. Перелік питань наведено у робочій навчальній програмі. Кожне питання оцінюється у 30 балів.

Система оцінювання питань:

- «відмінно» - повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 28-30 балів;
- «добре» - достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації, або незначні неточності) – 25-28 балів;
- «задовільно» - неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – 18-24 балів;

- «незадовільно» - загалом неправильна відповідь, або її відсутність – 0...18 балів.

Сума стартових балів і балів за іспитову контрольну роботу переводиться до іспитової оцінки згідно з таблицею:

Бали $R_D = R_C + R_E$	Екзаменаційна оцінка
95...100	Відмінно
85...94	Дуже добре
75...84	Добре
65...74	Задовільно
60...64	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
$R_C < 7$	Не допущено

11. Методичні рекомендації

Робоча навчальна програма складена з урахуванням напрямлення підготовки фахівця. Для послідовного та повного вивчення та засвоєння матеріалу вона складається з 3 розділів. Особливу увагу слід приділяти не тільки засвоєнню конкретних теоретичних положень, а й практичному їх використанні. При складанні екзамену аспіранти на основі одержаних ними знань повинні показати знання з теорії процесу утворення зварного з'єднання, розуміння факторів, що впливають на формування зварного з'єднання, знання основних систем установок зварювання металів та сплавів в твердій фазі

12. Рекомендована література

12.1. 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 г. 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: УДМТУ, 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.: Металлургия, 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. : Металлургия, 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 «ПГАСА», 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 закаливающихся 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. Кацивели, 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. Лавриненко // 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 15Х2НМФА. / О.В. Махненко, В.А. Костин, В.В. Жуков, Е.С. Костеневич / Автоматическая сварка. 2019. –№ 9. – С. 14-25.
44. Smoljan B. 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.

Склав:

Пров.наук спів. відділу №22 ІЕЗ ім. Є.О. Патона

д.т.н.

В.А. Костін

зав. від., ІЕЗ ім. Є.О. Патона

д.т.н.,

Позняков В.Д.

зав. від., ІЕЗ ім. Є.О. Патона

д.т.н.,

Махненко О.В.

зав. від.

д.фіз.-мат.н., проф.

Устінов А.І.

Ухвалено на засіданні відділу

Фізико-хімічні методи дослідження матеріалів

(повна назва відділу)

Протокол від «___» _____ 2020 р. № ___

Завідувач відділу ІЕЗ ім. Є.О. Патона

к.т.н.

С.Г. Григоренко

«___» _____ 2020 р.