

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кафедра фізики кристалів

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан фізичного факультету
Руслан ВОВК



2025 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Спецкурс «СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ ТА
СПЛАВІВ. ФІЗИКА НАДПЛАСТИЧНОСТІ»
(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)
галузь знань _____ 10 – Природничі науки
(код, назва галузі)
спеціальність _____ 104 – фізика та астрономія
(шифр, назва спеціальності)
освітня програма _____ «фізика»
(шифр, назва програми)
спеціалізація _____ (назва спеціалізації)
вид дисципліни _____ за вибором
(обов'язкова / за вибором)
факультет _____ фізичний

2025/2026 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

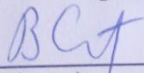
29 серпня 2025 року, протокол № 10

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ: Коршак В.Ф., канд. фіз.- мат. наук, доцент кафедри фізики кристалів

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики кристалів

Протокол №9 від 22 серпня 2025 року

В.о. завідувача кафедри:



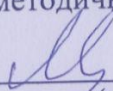
(підпис)

Владислав СЕМІНЬКО
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол №5 від 28 серпня 2025 року

Голова методичної комісії



(підпис)

Микола МАКАРОВСЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “ **Механічні властивості металів і сплавів** ” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки ____перший (бакалавр)____ спеціальності (напряму) _____ Е5 – фізика та астрономія _____

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є сформувані у студентів уявлення про сутність і закономірності фізичних процесів, які обумовлюють механічні властивості металів і сплавів, сучасні теоретичні уявлення про механізми цих процесів, методи проведення механічних випробувань.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є придбання знань про механізми фізичних процесів, які обумовлюють механічні властивості металів та сплавів за різних умов навантаження в широкому інтервалі температур, механічні характеристики, які отримують за різних методів випробування.

1.3. Кількість кредитів – 5

1.4. Загальна кількість годин – 150

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
За вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
3-й	-й
Семестр	
6-й	-й
Лекції	
32 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
16 год.	год.
Лабораторні заняття	
	год.
Самостійна робота, у тому числі	
102 год.	год.
У т. ч. індивідуальні завдання (курсів роботи)	
15 год.	год.

1.6. Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких результатів навчання:

знати:

особливості кристалічної будови металів та сплавів, що визначають їхні механічні властивості, механізми деформації за різних умов навантаження, елементи теорії дислокацій і теорії руйнування, механізми зміцнення матеріалів, експериментальні методи проведення механічних досліджень;

вміти:

використовувати знання про кристалічну будову, залежність механізмів деформації та механізмів деформаційного зміцнення від умов випробування для аналізу механічних характеристик і прогнозування механічних властивостей металів і сплавів.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Загальні уявлення про механічні властивості і кристалічну будову металів та сплавів

1. Фізична сутність механічних властивостей. Напруження і деформації. Статичні, динамічні, циклічні випробування
2. Схеми механічного навантаження. Одноосні розтяг та стиснення. Випробування при $\dot{\epsilon} = \text{const}$ та $\sigma = \text{const}$. Згин. Кручення
3. Деформаційні криві за умов активного навантаження. Криві повзучості. Деформаційне та швидкісне зміцнення. Випробування на релаксацію напружень
4. Типові просторові ґратки металів: об'ємноцентрована, гранецентрована, гексагональна щільно пакована. Індокси площин і напрямів у кристалічних ґратках
5. Дефекти кристалічної будови – носії пластичної деформації. Точкові дефекти. Термодинаміка точкових дефектів. Комплекси точкових дефектів. Міграція точкових дефектів
6. Теоретична і реальна міцність металів. Модель Я. І. Френкеля
7. Дислокації. Контур і вектор Бюргерса. Рух дислокацій і пластична деформація. Енергія дислокацій
8. Дво- і тривимірні дефекти. Дефекти пакування. Межі зерен і блоків. Міжфазні поверхні

Розділ 2. Механічні властивості металів та сплавів за різних умов випробування

9. Пружна деформація. Границя пружності. Закон Гука. Модулі пружності. Коефіцієнт Пуассона. Непружність металів. Дефект модуля пружності
10. Механізми пластичної деформації. Стадійність пластичної деформації. Пластична деформація ковзанням. Критичне приведенне напруження зсуву. Закон Шміда. Системи ковзання
11. Пластична деформація моно- і полікристалів. Зуб і площадка текучості. Деформація двійникуванням
12. Вплив різних факторів (температури, швидкості деформації, концентрації твердого розчину, частинок другої фази, розміру зерна) на розвиток пластичної деформації. Закон Холла-Петча
13. Механізми деформаційного зміцнення. Гальмування дислокацій. Сила Пайєрлса-Набарро. Гальмування дислокацій домішковими атомами, дисперсними частинками та при взаємодії з іншими дислокаціями. Взаємодія дислокацій з границями зерен
14. Повзучість металів. Низькотемпературна (логарифмічна) повзучість. Високотемпературна повзучість (повзучість Андраде). Залежність швидкості стаціонарної повзучості від температури та напруження
15. Повзучість Набарро-Херрінга і повзучість Кобла. Жароміцність. Тривала міцність
16. Руйнування. Крихке руйнування. Механізми виникнення тріщин у металі. Тріщиностійкість. Механізм в'язкого руйнування
17. Твердість. Твердість по Бринеллю, по Віккерсу, по Роквеллу. Мікротвердість. Мікро- і наноіндентування як методи визначення механічних властивостей
18. Втомленість. Причини виникнення мікропластичних деформацій і механізм руйнування при втомленості. Фактори, що впливають на опір втомленості металу

Розділ 3. Надпластичність

19. Стійкість пластичної течії. Феноменологія пластичності. Основні ознаки надпластичної деформації. Релаксація напружень у надпластичних матеріалах. Внутрішнє тертя у надпластичних матеріалах

20. Механізми надпластичної деформації. Зерномежеве проковзування, направлений дифузійний масоперенос та дислокаційна повзучість в умовах надпластичності. Експериментальні методи дослідження механізмів деформації в умовах надпластичності
21. Пластичність, зумовлена фазовим перетворенням в умовах деформації. Короткі відомості про термодинаміку і кінетику фазових перетворень. Кінетика Аврамі. Природа пластичності за поліморфних перетворень. Пластичність за рекристалізації

2. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
		л	п	л.	ін.	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Загальні уявлення про механічні властивості і кристалічну будову металів та сплавів						
1. Фізична сутність механічних властивостей. Напруження і деформації. Статичні, динамічні, циклічні випробування	7	1				6
2. Схеми механічного навантаження. Одноосні розтяг та стиснення. Випробування при $\dot{\epsilon} = \text{const}$ та $\sigma = \text{const}$. Згин. Кручення	7	1				6
3. Деформаційні криві за умов активного навантаження. Криві повзучості. Деформаційне та швидкісне зміцнення. Випробування на релаксацію напружень	7	1				6
4. Типові просторові ґратки металів: об'ємноцентрована, гранецентрована, гексагональна щільно пакована. Індеси площин і напрямів у кристалічних ґратках	7	1	1			5
5. Дефекти кристалічної будови – носії пластичної деформації Точкові дефекти. Термодинаміка точкових дефектів. Комплекси точкових дефектів. Міграція точкових дефектів	7	1	1			5
6. Теоретична і реальна міцність металів. Модель Я. І. Френкеля.	7	1				6
7. Дислокації. Контур і вектор Бюргерса. Рух дислокацій і пластична деформація. Енергія дислокацій	7	1	1			5
8. Дво- і тривимірні дефекти. Дефекти пакування. Межі зерен і блоків. Міжфазні поверхні	7	1	1			5
Разом за розділом 1	56	8	4			44
Розділ 2. Механічні властивості металів та сплавів за різних умов випробування						
9. Пружна деформація. Границя пружності. Закон Гука. Модулі пружності. Коефіцієнт Пуассона. Непружність металів. Дефект модуля пружності	7	1				6
10. Механізми пластичної деформації. Стадійність пластичної деформації. Пластична деформація ковзанням. Системи ковзання. Критичне приведенне напруження зсуву. Закон Шміда	7	2	1			4
11. Пластична деформація моно- і полікристалів. Зуб і площадка текучості. Деформація двійникуванням	7	1	1			5

12. Вплив різних факторів (температури, швидкості деформації, концентрації твердого розчину, частинок другої фази, розміру зерна) на розвиток пластичної деформації. Закон Холла-Петча	8	2	2			4
13. Механізми деформаційного зміцнення. Гальмування дислокацій. Сила Пайерлса-Набарро. Гальмування дислокацій домішковими атомами, дисперсними частинками та при взаємодії з іншими дислокаціями. Взаємодія дислокацій з границями зерен	7	2	2			3
14. Повзучість металів. Низькотемпературна (логарифмічна) повзучість. Високотемпературна повзучість (повзучість Андраде). Залежність швидкості стаціонарної повзучості від температури та напруження	7	1				6
15. Повзучість Набарро-Херрінга і повзучість Кобла. Жароміцність. Тривала міцність	7	1				6
16. Руйнування. Крихке руйнування. Механізми виникнення тріщин у метали. Тріщиностійкість. Механізм в'язкого руйнування	7	2				5
17. Твердість. Твердість по Бринеллю, по Віккерсу, по Роквеллу. Мікротвердість. Мікро- і наноіндентування як методи визначення механічних властивостей	7	1				6
18. Втомленість. Причини виникнення мікропластичних деформацій і механізм руйнування при втомленості. Фактори, що впливають на опір втомленості металу	7	1				6
Разом за розділом 2	71	14	6			51
Розділ 3. Надпластичність						
19. Стійкість пластичної течії. Феноменологія пластичності. Основні ознаки надпластичної деформації. Релаксація напружень у надпластичних матеріалах. Внутрішнє тертя у надпластичних матеріалах	7	2	2			3
20. Механізми надпластичної деформації. Зерномежеве проковзування, направлений дифузійний масоперенос та дислокаційна повзучість в умовах надпластичності. Експериментальні методи дослідження механізмів деформації в умовах надпластичності	8	4	2			2
21. Пластичність, зумовлена фазовим перетворенням в умовах деформації. Короткі відомості про термодинаміку і кінетику фазових перетворень. Кінетика Аврамі. Експериментальне підтвердження пластичності перетворення. Природа пластичності за поліморфних перетворень. Пластичність за рекристалізації	8	4	2			2
Разом за розділом 3	23	10	6			7
Усього годин	150	32	16			102

3. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Структура сплавів. Тверді розчини та проміжні фази у сплавах	2
2	Розпад пересичених твердих розчинів	2
3	Механізми пластичної деформації металів	2

4	Залишкові напруження і їх вплив на механічні властивості металів та сплавів	2
5	Процеси, що протікають при нагріві пластично деформованих металічних матеріалів	2
6	Особливості процесів масопереносу в умовах надпластичності	2
7	Пластичність, зумовлена фазовим перетворенням в умовах деформації	2
8	Фазова нерівноважність евтектичних сплавів. Надпластичність евтектик	2
	Усього	16

5. Завдання для самостійної роботи

№	З використанням літературних джерел із списку рекомендованої літератури проробка питань, поставлених викладачем на лекції з теми:	Кількість годин
1	Фізична сутність механічних властивостей. Напруження і деформації. Статичні, динамічні, циклічні випробування	6
2	Схеми механічного навантаження. Одноосні розтяг та стиснення. Випробування при $\dot{\epsilon} = \text{const}$ та $\sigma = \text{const}$. Згин. Кручення	6
3	Деформаційні криві за умов активного навантаження. Криві повзучості. Деформаційне та швидкісне зміцнення. Випробування на релаксацію напружень	6
4	Типові просторові ґратки металів: об'ємноцентрована, гранецентрована, гексагональна щільно пакована. Індеси площин і напрямів у кристалічних ґратках	5
5	Дефекти кристалічної будови – носії пластичної деформації Точкові дефекти. Термодинаміка точкових дефектів. Комплекси точкових дефектів. Міграція точкових дефектів	5
6	Теоретична і реальна міцність металів. Модель Я. І. Френкеля.	6
7	Дислокації. Контур і вектор Бюргерса. Рух дислокацій і пластична деформація. Енергія дислокацій	5
8	Дво- і тривимірні дефекти. Дефекти пакування. Межі зерен і блоків. Міжфазні поверхні	5
9	Пружна деформація. Границя пружності. Закон Гука. Модулі пружності. Коефіцієнт Пуассона. Непружність металів. Дефект модуля пружності	6
10	Механізми пластичної деформації. Стадійність пластичної деформації. Пластична деформація ковзанням. Системи ковзання. Критичне приведені напруження зсуву. Закон Шміда	4
11	Пластична деформація моно- і полікристалів. Зуб і площадка текучості. Деформація двійникуванням	5
12	Вплив різних факторів (температури, швидкості деформації, концентрації твердого розчину, частинок другої фази, розміру зерна) на розвиток пластичної деформації. Закон Холла-Петча	4
13	Механізми деформаційного зміцнення. Гальмування дислокацій. Сила Пайєрлса-Набарро. Гальмування дислокацій домішковими атомами, дисперсними частинками та при взаємодії з іншими дислокаціями. Взаємодія дислокацій з границями зерен	3

14	Повзучість металів. __Низькотемпературна (логарифмічна) повзучість. Високотемпературна повзучість (повзучість Андраде). Залежність швидкості стаціонарної повзучості від температури та напруження	6
15	Повзучість Набарро-Херрінга і повзучість Кобла. Жароміцність. Тривала міцність	6
16	Руйнування. Крихке руйнування. Механізми виникнення тріщин у металі. Тріщиностійкість. Механізм в'язкого руйнування	5
17	Твердість. Твердість по Бринеллю, по Віккерсу, по Роквеллу. Мікротвердість. Мікро- і наноіндентування як методи визначення механічних властивостей	6
18	Втомленість. Причини виникнення мікропластичних деформацій і механізм руйнування при втомленості. Фактори, що впливають на опір втомленості металу	6
19	Стійкість пластичної течії. Феноменологія пластичності. Основні ознаки надпластичної деформації. Релаксація напружень у надпластичних матеріалах. Внутрішнє тертя у надпластичних матеріалах	3
20	Механізми надпластичної деформації. Зерномежеве проковзування, направлений дифузійний масоперенос та дислокаційна повзучість в умовах надпластичності. Експериментальні методи дослідження механізмів деформації в умовах надпластичності	2
21	Пластичність, зумовлена фазовим перетворенням в умовах деформації. Короткі відомості про термодинаміку і кінетику фазових перетворень. Кінетика Аврамі. Експериментальне підтвердження пластичності перетворення. Природа пластичності за поліморфних перетворень. Пластичність за рекристалізації	2
	Разом	102

6. Індивідуальні завдання (курсів роботи)

Тема курсової роботи

Механізми масопереносу в умовах надпластичності.

7. Методи контролю

Екзамен.

Питання до контролю:

1. Фізична сутність механічних властивостей. Напруження і деформації
2. Схеми механічного навантаження
3. Деформаційні криві за умов активного навантаження. Криві повзучості. Випробування на релаксацію напружень.
4. Типові просторові ґратки металів. Індокси площин і напрямів у кристалічних ґратках
5. Точкові дефекти в кристалах
6. Теоретична і реальна міцність металів. Модель Я. І. Френкеля
7. Дислокації. Контур і вектор Бюргерса
8. Рух дислокацій і пластична деформація. Енергія дислокацій
9. Межі зерен і блоків. Міжфазні поверхні
10. Пружна деформація. Границя пружності. Закон Гука

11. Модулі пружності. Коефіцієнт Пуассона. Непружність металів
12. Пластична деформація ковзанням. Системи ковзання
13. Критичне приведення напруження зсуву. Закон Шміда
14. Пластична деформація моно- і полікристалів. Зуб і площадка текучості
15. Вплив різних фізичних факторів на розвиток пластичної деформації. Закон Холла-Петча
16. Гальмування дислокацій. Сила Пайєрлса-Набарро
17. Гальмування дислокацій домішковими атомами, дисперсними частинками та при взаємодії з іншими дислокаціями
18. Взаємодія дислокацій з границями зерен
19. Низькотемпературна (логарифмічна) повзучість
20. Високотемпературна повзучість (повзучість Андраде)
21. Залежність швидкості стаціонарної повзучості від температури та напруження
22. Повзучість Набарро-Херрінга і повзучість Кобла
23. Жароміцність. Тривала міцність
24. Крихке руйнування. Механізми виникнення тріщин у металі. Тріщиностійкість.
25. Механізм в'язкого руйнування
26. Твердість. Мікротвердість
27. Причини виникнення мікропластичних деформацій і механізм руйнування при втомленості
28. Фактори, що впливають на опір втомленості металу
29. Стійкість пластичної течії. Феноменологія пластичності
30. Основні ознаки надпластичної деформації
31. Релаксація напружень у надпластичних матеріалах
32. Внутрішнє тертя у надпластичних матеріалах
33. Механізми надпластичної деформації
34. Експериментальні методи дослідження механізмів деформації в умовах надпластичності
35. Пластичність, зумовлена фазовим перетворенням в умовах деформації
36. Короткі відомості про термодинаміку і кінетику фазових перетворень. Кінетика Аврамі
37. Експериментальне підтвердження пластичності перетворення
38. Природа пластичності за поліморфних перетворень. Пластичність за рекристалізації

Екзаменаційний білет № 1

1. Фізична сутність механічних властивостей. Напруження і деформації. Схеми механічного навантаження. Одноосні розтяг та стиснення. Випробування при $\dot{\epsilon} = \text{const}$ та $\sigma = \text{const}$. Згин. Кручення. Статичні, динамічні, циклічні випробування
2. Пластична деформація моно- і полікристалів. Зуб і площадка текучості. Деформація двійникуванням

Екзаменаційний білет № 2

1. Типові просторові ґратки металів: об'ємноцентрована, гранецентрована, гексагональна щільно пакована. Індeksi площин і напрямів у кристалічних ґратках
2. Повзучість Набарро-Херрінга і повзучість Кобла. Жароміцність. Тривала міцність

Екзаменаційний білет № 3

1. Точкові дефекти в кристалах. Термодинаміка точкових дефектів. Комплекси точкових дефектів. Міграція точкових дефектів
2. Механізми надпластичної деформації. Зерномежеве проковзування, направлений дифузійний масоперенос та дислокаційна повзучість в умовах надпластичності. Експериментальні методи дослідження механізмів деформації в умовах надпластичності

Екзаменаційний білет № 4

1. Дислокації. Контур і вектор Бюргерса. Рух дислокацій і пластична деформація. Енергія дислокацій

2. Стійкість пластичної течії. Феноменологія пластичності. Основні ознаки надпластичної деформації

Екзаменаційний білет № 5

1. Пружна деформація. Границя пружності. Закон Гука. Модулі пружності. Коефіцієнт Пуассона. Непружність металів. Дефект модуля пружності
2. Деформаційні криві за умов активного навантаження. Криві повзучості. Деформаційне та швидкісне зміцнення. Випробування на релаксацію напружень

Екзаменаційний білет № 6

1. Механізми пластичної деформації. Стадійність пластичної деформації. Пластична деформація ковзанням. Критичне приведені напруження зсуву. Закон Шміда. Системи ковзання
2. Твердість. Твердість по Бринеллю, по Віккерсу, по Роквеллу. Мікротвердість

Екзаменаційний білет № 7

1. Руйнування. Крихке руйнування. Механізми виникнення тріщин у металі. Тріщиностійкість. Механізм в'язкого руйнування
2. Пластичність, зумовлена фазовим перетворенням в умовах деформації. Короткі відомості про термодинаміку і кінетику фазових перетворень. Кінетика Аврамі. Природа пластичності за поліморфних перетворень. Пластичність за рекристалізації

Екзаменаційний білет № 8

1. Механізми деформаційного зміцнення. Гальмування дислокацій. Сила Пайєрлса-Набарро. Гальмування дислокацій домішковими атомами, дисперсними частинками та при взаємодії з іншими дислокаціями. Взаємодія дислокацій з границями зерен
2. Дво- і тривимірні дефекти. Дефекти пакування. Межі зерен і блоків. Міжфазні поверхні

Екзаменаційний білет № 9

1. Повзучість металів. Низькотемпературна (логарифмічна) повзучість. Високотемпературна повзучість (повзучість Андраде). Залежність швидкості стаціонарної повзучості від температури та напруження
2. Втомленість. Причини виникнення мікропластичних деформацій і механізм руйнування при втомленості. Фактори, що впливають на опір втомленості металу

Екзаменаційний білет № 10

1. Вплив різних фізичних факторів (температури, швидкості деформації, концентрації твердого розчину, частинок другої фази, розміру зерна) на розвиток пластичної деформації. Закон Холла-Петча
2. Теоретична і реальна міцність металів. Модель Я. І. Френкеля.

8. Схема нарахування балів

Підсумковий семестровий контроль

Поточний контроль, контрольні роботи, індивідуальне завдання	Екзамен	
--	---------	--

Поточне тестування за темами	Поточне тестування за темами	Поточне тестування за темами	Контроль-ні роботи	Індивідуальне завдання	Разом		Сума
T1-T8	T9-T18	T19-T21					
5	5	5	16	9	40	60	100

T1, T2 ... – теми розділів

Критерії оцінювання

Поточне тестування з кожної групи тем складається з одного тестового завдання, вичерпна відповідь на яке оцінюється у 5 балів.

Індивідуальне завдання – курсова робота. Підготовка курсової роботи – 9 балів.

Успішне виконання контрольної роботи оцінюється в 8 балів.

Екзаменаційний білет містить два пункти. Вичерпна відповідь на кожен пункт оцінюється в 30 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90 –100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Рекомендована література

Основна література

1. Барчій І. Є, Переш Є.Ю., Різак В. М., Худолій В. О. Гетерогенні рівноваги. – Ужгород: Закарпаття, 2003. – 212 с.
2. Болеста І. Фізика твердого тіла. – Вид-во відділу ЛНУ імені Івана Франка, 2003. – 479 с.
3. Мудрий С. І., Штаблавий І. І. Фізичне матеріалознавство. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2012. – 418 с.
4. Зиман З. З., Сіренко А. Ф. Основи фізичного матеріалознавства: Навчальний посібник. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2005. – 288 с.

5. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.
6. Kaibyshev O. A. Superplasticity of alloys, intermetallics and ceramics. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1992. – 317 p.
7. Mukherjee A. K. Superplasticity in metals, ceramics and intermetallics. In: Materials Science and Technology. – New York: Wiley, 2006. – P. 408–456.
<https://doi.org/10.1002/9783527603978.mst0056>.
8. Padmanabhan K. A., S. Balasivanandha Prabu, Mulyukov R. R. [et al.] Superplasticity c Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2018. – 526 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31957-0>.
9. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. Металознавство. – ІОЦ «Політехніка», 2001. – 375 с.
10. Гарнець В. М. Матеріалознавство. – Кондор, 2009. – 348 с.
11. Долгов О. М., Колосов Д. Л. Механічні властивості і конструкційна міцність матеріалів: Навчальний посібник. – Дніпро, «Дніпровська політехніка», 2022. – 70 с.

Додаткова література

1. Дутка О. І. Матеріалознавство. – Кондор, 2009. – 156 с.
2. Гуль Ю. П., Чмельова В. С. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів. – Дніпро, НМетАУ, 2017. – 34 с.
3. Valiev R. Z. Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation – Prog. Mater. Sci., 2000, vol. 45. – P. 103–189. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9).
4. Kawasaki M., Langdon T. G. Review: achieving superplastic properties in ultrafine-grained materials at high temperatures. – J. Mater. Sci., 2016, vol. 51. – P. 19–32. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9176-9>.
5. Ashby M. F., Verrall R. A. Diffusion-accommodated flow and superplasticity. –Acta Metall., 1973, vol. 21, Iss. 2. – P. 149–163.
6. Nieh T. G. Wadsworth J., Sherby O. D. Superplasticity in metals and ceramics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 275 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525230>.