Вінницький національний технічний університет
Інститут докторантури та аспірантури
Кафедра технологій та автоматизації машинобудування

МЕХАНІКА ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

Вибірковий освітній компонент

Рівень вищої освіти: **третій (освітньо-науковий)**

Спеціальність: **G9 Прикладна механіка; дисципліна відкрита для інших спеціальностей третього рівня**

Освітня програма: **Прикладна механіка (для здобувачів G9)**

Викладач / розробник: **Савуляк В. В., кандидат технічних наук, доцент**

Мова викладання: **українська**

Семестр: **4**

Кредитів ЄКТС: **3**

Загальна кількість годин: **90**

Лекцій: 16 год.

Практичні заняття: **16 год.**

Самостійна робота: **58 год.**

Вид контролю: Диф. залік

Передумови для вивчення дисципліни

Передумови: базові знання з матеріалознавства, опору матеріалів, механіки деформівного твердого тіла, інженерної математики та технологій машинобудування. Вибірковий курс доступний здобувачам інших спеціальностей третього рівня; приклади індивідуальних завдань можна адаптувати до напряму їхніх досліджень.

Мета дисципліни

Сформувати вміння аналізувати пластичне деформування металів, оцінювати запас пластичності та ризик руйнування, обирати технології формоутворення за якістю виробів, витратами матеріалу й енергії.

Компетентності, якими повинен оволодіти здобувач в результаті вивчення дисципліни:

- Здатність аналізувати механізми пластичної течії, граничної деформовності та пошкодження металів.
- Здатність обробляти експериментальні дані, оцінювати їхню невизначеність і визначати межі застосування моделей.

• Здатність обґрунтовувати ресурсозберігаючі технологічні рішення за показниками якості, матеріаломісткості й енергоємності.

За результатами вивчення дисципліни здобувачі вищої освіти набувають результатів навчання:

Знати:

• Фізичні механізми пластичного деформування та зміцнення металів, основні критерії текучості й пластичного руйнування;
• Показники граничної деформовності, використаного ресурсу пластичності та методи їх експериментального визначення;
• Принципи вибору ресурсозберігаючих процесів формоутворення за витратами матеріалу, енергії та якістю виробів.

Вміти:

• Пояснювати фізичні механізми пластичного деформування та зміцнення металів.
• Розраховувати еквівалентні напруження й деформації та використовувати критерії текучості.
• Оцінювати граничну деформовність, накопичення пошкоджень та використаний ресурс пластичності.
• Обробляти результати механічних випробувань і оцінювати розсіювання даних.
• Порівнювати способи формоутворення за витратами матеріалу, енергії та технологічними обмеженнями.
• Обґрунтовувати ресурсозберігаюче рішення за розрахунком або моделюванням.

Тематика

Модуль 1. Механіка пластичного деформування та гранична деформовність

Тема 1 (2 год.). Фізичні основи пластичності металів. Дислокаційний механізм пластичного деформування. Вплив температури, швидкості деформації, розміру зерна та структурного стану. Ізотропія й анізотропія листових металів. Пластичність матеріалу та його здатність до формозмінювання.

Тема 2 (2 год.). Напружено-деформований стан і закони пластичної течії. Тензори напружень і деформацій, головні напруження, інваріанти. Еквівалентне напруження за Мізесом і накопичена еквівалентна пластична деформація. Критерії текучості Мізеса й Треска. Асоційований закон пластичної течії та моделі ізотропного й кінематичного зміцнення.

Тема 3 (2 год.). Гранична деформовність і пошкодження металів. Криві граничного формоутворення листових металів, вплив схеми напруженого стану та шляху навантаження. Локалізація деформації, утворення й розвиток мікропорожнин. Критерії пластичного руйнування, використаний ресурс

пластичності й оцінювання ймовірності руйнування з урахуванням розсіювання властивостей. Приклад пошкодженої зони після вирубування листової заготовки [1].

Тема 4 (2 год.). Експериментальні методи дослідження пластичності. Випробування на розтяг, стиск, зсув і згин. Мініатюрні зразки, оптичні методи вимірювання деформацій, умовні (інженерні) та істинні напруження і деформації за одновісного розтягу. Планування випробувань: фактори, повторення, обсяг вибірки. Визначення граничних станів, повторюваність результатів і невизначеність вимірювань.

Модуль 2. Ресурсозберігаючі технології та інженерне обґрунтування

Тема 5 (2 год.). Ресурсозберігаючі процеси формоутворення. Прокатування, згинання, витягування, витискування та інкрементальне листове формування. Коефіцієнт використання матеріалу, розкрій листа та технологічні втрати. Порівняння штампованих, механічно оброблених, зварних і комбінованих заготовок; вибір способу отримання заготовки з урахуванням топології, матеріалу та серійності [2].

Тема 6 (2 год.). Керування технологічними параметрами та витратами ресурсів. Вплив тертя, змащування, геометрії інструмента, швидкості та температури деформування на зусилля деформування, накопичення пошкоджень і технологічні втрати. Енергоємність операцій, повторне використання матеріалу й продовження строку служби оснастки. Багатокритеріальна оцінка технологій за неповних даних і суперечливих вимог на прикладі алгоритму [2].

Тема 7 (2 год.). Неоднорідні та зварні листові заготовки. Розподіл механічних властивостей у зонах локального термічного або деформаційного впливу. Вплив неоднорідності механічних властивостей на локалізацію деформацій і граничну деформовність [3]. Особливості формоутворення зварних заготовок зі сталі AISI 304 на прикладі фланцевих деталей [4].

Тема 8 (2 год.). Чисельне моделювання та проєктування ресурсоефективних технологій. Постановка задачі моделювання методом скінченних елементів технологічного процесу: визначальна модель матеріалу, дискретизація, контактні й граничні умови. План чисельного експерименту, перевірка моделі за даними випробувань, аналіз чутливості. Приклади моделювання вирубування [1], формоутворення деталей зі зварних заготовок [4] та перевірки вибору технології методом скінченних елементів [2].

Теми семінарських занять - не передбачені

Теми практичних занять

№	Назва практичної роботи	Год.
1	Розрахунок істинних (логарифмічних) і умовних (інженерних) напружень і деформацій; визначення еквівалентної пластичної деформації для заданої схеми деформування	2
2	Застосування критеріїв текучості; побудова кривої зміцнення за експериментальними даними	2
3	Оцінювання використаного ресурсу пластичності за обраною моделлю; аналіз пошкодження заготовки після вирубування за матеріалами [1]	2
4	Планування серії випробувань на розтяг, обробка результатів; оцінювання граничної деформовності й розсіювання	2
5	Вибір способу отримання заготовки з урахуванням технологічних обмежень [2]; розрахунок втрат і коефіцієнта використання матеріалу	2
6	Порівняння варіантів штампування за зусиллям, тертям, енерговитратами та якістю з використанням критеріїв [2]	2
7	Аналіз локальної неоднорідності пластичності за даними [3]; визначення критичних ділянок зварної заготовки [4]	2
8	Постановка задачі моделювання методом скінченних елементів за прикладами [1, 4]; план чисельного експерименту й перевірка вибору технології [2]	2
	Усього	16

Теми лабораторних занять - не передбачені

Окремі семінарські та лабораторні заняття навчальним планом не передбачені; обговорення наукових публікацій і експериментальних даних проводиться в межах практичних занять.

Самостійна робота

№	Вид роботи	Год.
1	Самостійне опрацювання матеріалу тем 1–4: пластична течія, критерії текучості, пошкодження, випробування (4 × 2 год.)	8
2	Самостійне опрацювання матеріалу тем 5–8: технології формоутворення, енергоємність, неоднорідні заготовки, метод скінченних елементів (4 × 2 год.)	8
3	Підготовка, розрахунки та оформлення результатів восьми практичних занять (8 × 2 год.)	16
4	Опрацювання та критичний аналіз двох актуальних наукових публікацій, зокрема із джерел [1]–[4]	6

№	Вид роботи	Год.
5	Виконання індивідуального розрахунково-дослідницького завдання	12
6	Підготовка до модульних контрольних заходів	4
7	Систематизація матеріалу й підготовка до диференційованого заліку	4
	Усього	58

Методи навчання

На лекціях розглядають механізми пластичного деформування, критерії текучості й руйнування та методи ресурсозбереження. Практичні заняття передбачають обчислення напружень і деформацій, аналіз результатів випробувань, порівняння технологічних альтернатив. Самостійна робота охоплює опрацювання наукових джерел, розрахункові матеріали та індивідуальне дослідження.

Індивідуальні завдання

Індивідуальне розрахунково-дослідницьке завдання виконують за темою, узгодженою з викладачем: постановка задачі; аналіз щонайменше п’яти джерел, серед них двох сучасних наукових публікацій; вихідні дані та припущення; розрахунок або обґрунтована модель; порівняння двох технологічних рішень; висновки щодо якості й ресурсних витрат. Результати подають як звіт і коротку презентацію. За можливості використовують дані власного дослідження, за їх відсутності — відкриті або літературні дані з належним посиланням.

Форми та методи контролю

Поточний контроль охоплює перевірку та захист практичних робіт, колоквіуми й інші оцінювані завдання, передбачені силабусом. Підсумковий контроль - диференційований залік. Порядок проведення контрольних заходів, повторного складання й оскарження результатів визначають чинні документи ВНТУ.

Розподіл балів, які отримують здобувачі вищої освіти

Вид роботи	Модуль 1	Модуль 2	Разом
Практичні роботи	20	20	40
Колоквіуми	20	15	35
Модульна контрольна робота	10	0	10
Індивідуальне завдання	0	15	15
Разом за семестр	50	50	100
Диференційований залік	–	–	0

Вид роботи	Модуль 1	Модуль 2	Разом
Усього	–	–	100

Шкала оцінювання

Бали	ECTS	Національна оцінка
90–100	A	відмінно
82–89	B	добре
75–81	C	добре
64–74	D	задовільно
60–63	E	задовільно
35–59	FX	незадовільно, можливе повторне складання
0–34	F	незадовільно, повторне вивчення

Критерії оцінювання знань, умінь та навичок здобувачів вищої освіти

Рівень	Бали	ECTS	Критерії
IV (високий)	90–100	A	Самостійно виконує завдання без суттєвих помилок, перевіряє результати, аргументовано пояснює рішення та його обмеження.
III (достатній)	82–89	B	Виконує всі основні завдання правильно, допускає поодинокі неточності в оформленні або висновках.
III (достатній)	75–81	C	Опановано основні методи; завдання виконані, проте окремі розрахунки або пояснення містять несуттєві помилки.
II (середній)	64–74	D	Виконано базові задачі; висновки неповні, є помилки, що не спотворюють основний результат.
II (середній)	60–63	E	Продемонстровано мінімальне знання методів; завдання виконано частково, з допомогою викладача виправлено основні помилки.
I (низький)	35–59	FX	Виконано лише частину потрібних завдань, є суттєві помилки; необхідне повторне складання.
I (низький)	0–34	F	Основні методи не опановано, більшість завдань відсутня або виконана неправильно; необхідне повторне вивчення.

Рівні якості виконання окремих робіт подано як частку отриманих балів від максимальної оцінки за роботу. Під час оцінювання враховують відповідні змістові критерії; для невеликих робіт можуть нараховуватися дробові бали. Літерну оцінку ECTS визначають лише за підсумковою сумою балів за дисципліну, а не за окремою роботою.

ECTS	Виконання	Розрахункові, експериментальні та проєктні роботи	Колоквіуми й контрольні задачі
A	90–100%	Виконано всі суттєві етапи роботи, результат перевірено; метод і висновки обґрунтовані.	Висока правильність відповідей і рішень; розрахунки, пояснення та захист повні.
B	82–89%	Основний результат правильний; є незначні неточності, що не впливають на висновок.	Переважно правильні відповіді й рішення; поодинокі неточності у поясненні.
C	75–81%	Основні етапи виконано; окремі недоліки в перевірці результату або аргументації.	Відповіді здебільшого правильні, але частина розрахунків або пояснень неповна.
D	64–74%	Отримано частковий результат; є помилки у виконанні або обґрунтуванні.	Виконано основні елементи контрольних завдань, але допущено помилки у застосуванні методів.
E	60–63%	Підтверджено лише мінімальні вміння; розрахунки, схема або висновки неповні.	Відтворено базові поняття і мінімум необхідних дій; обґрунтування недостатнє.
FX	35–59%	Частину роботи виконано, проте залишаються суттєві помилки; результат потребує повторного опрацювання.	Більшість суттєвих відповідей і перевірок неповна або помилкова; потрібне повторне виконання.
F	0–34%	Основні етапи не виконано або результат практично відсутній.	Правильних рішень або підтверджених відповідей майже немає.

Бали за кожним показником нараховують у межах його максимуму; обґрунтованість рішень і перевірка результатів враховуються окремо від формального оформлення роботи.

Вид і конкретна робота	Макс. балів	Критерії нарахування балів
Практична робота 1. Розрахунок технічних та істинних напружень і деформацій, еквівалентної деформації	5	Правильно перераховано технічні та істинні величини – 2 б.; обґрунтовано еквівалентну деформацію й інтерпретацію результатів – 2 б.; оформлення розрахунку – 1 б.
Практична робота 2. Застосування критеріїв текучості й побудова кривої зміцнення	5	Правильно застосовано критерії текучості – 2 б.; побудовано й пояснено криву зміцнення – 2 б.; захист розрахунків – 1 б.

Вид і конкретна робота	**Макс. балів**	**Критерії нарахування балів**
Практична робота 3. Обчислення використаного ресурсу пластичності за різних схем навантаження	5	Коректно визначено накопичену пластичну деформацію й ресурс – 2 б.; зіставлено схеми навантаження і критерії пошкодження – 2 б.; висновки – 1 б.
Практична робота 4. Обробка результатів випробувань на розтяг та оцінювання деформовності	5	Правильно опрацьовано експериментальні дані – 2 б.; визначено деформовність і розсіювання з поясненням невизначеності – 2 б.; оформлення – 1 б.
Практична робота 5. Вибір способу одержання заготовки, розрахунок втрат і коефіцієнта використання матеріалу	5	Обрано технологічно припустимі заготовки – 2 б.; розраховано витрати металу та коефіцієнт використання – 2 б.; обґрунтовано вибір – 1 б.
Практична робота 6. Порівняння способів штампування за силою, тертям, енерговитратами та якістю	5	Правильно визначено умови порівняння операцій – 2 б.; зіставлено силу, тертя, енергоємність і якість – 2 б.; сформульовано висновок – 1 б.
Практична робота 7. Аналіз локальної неоднорідності властивостей зварної листової заготовки	5	Коректно побудовано профіль властивостей неоднорідного матеріалу – 2 б.; визначено критичні ділянки та обмеження оцінки – 2 б.; захист – 1 б.
Практична робота 8. Побудова схеми чисельної моделі й обґрунтування ресурсозберігаючого процесу	5	Обґрунтовано модель, граничні умови та вихідні дані – 2 б.; зіставлено ресурсні й технологічні показники альтернатив – 2 б.; висновки – 1 б.
Колоквіум 1	20	Закони пластичної течії та критерії текучості – 8 б.; розрахунок напружень, деформацій і ресурсу пластичності – 8 б.; пояснення припущень – 4 б.
Колоквіум 2	15	Технології формоутворення та критерії вибору – 5 б.; порівняння технологічних альтернатив – 6 б.; обґрунтовані ресурсні висновки – 4 б.
Модульна контрольна робота	10	Правильність відповідей і міні-задач – до 10; часткові бали за обґрунтоване правильне розв’язання.
Індивідуальне дослідницьке завдання	15	Постановка задачі – 2; аналіз джерел і даних – 3; розрахунок/модель – 4; порівняння рішень – 4; захист – 2.

Академічні права та обов’язки здобувачів вищої освіти

Учасники освітнього процесу дотримуються норм академічної доброчесності, взаємної поваги, недискримінації та професійної етики. У звітах і презентаціях необхідно зазначати джерела даних, літератури, програмних засобів, методик і запозичених зображень. Фальсифікація результатів випробувань або моделювання, плагіат і подання чужої роботи як власної є неприпустимими. Допоміжні цифрові засоби не звільняють здобувача від перевірки розрахунків і персональної відповідальності за висновки.

Здобувачі мають право на консультації, одержання критеріїв оцінювання до виконання завдань, визнання результатів неформальної та/або інформальної освіти у встановленому порядку, а також на аргументоване оскарження результатів контрольних заходів. Положення щодо академічної доброчесності, апеляцій, освітнього омбудсмена, етики та запобігання корупції оприлюднено на офіційному сайті ВНТУ: https://vntu.edu.ua/uk/public-info/zag.html.

Рекомендована література

Основна

1. Савуляк В. В., Молодецька Т. І., Білостечний В. О. Аналіз впливу параметрів процесу вирубування з листа на зону пошкодження заготовок тонкостінних втулок. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2024. № 4. С. 105–113. DOI: https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-4-105-113

2. Савуляк В. В., Білостечний В. О. Формалізований вибір технології отримання заготовок деталей з урахуванням топології, матеріалу та серійності виробництва. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2025. № 4. С. 187–197. DOI: https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-4-187-197

3. Білостечний В. О., Савуляк В. В. Вплив локальної неоднорідності властивостей листових металевих матеріалів на їх пластичність. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2025 : збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції (Вінниця, 3–5 червня 2025 р.). Вінниця : ВНТУ, 2025. С. 349–351. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/download/25338/20926 (дата звернення: 11.11.2026).

4. Білостечний В. О., Савуляк В. В., Ковалевський С. В. Моделювання процесу холодної пластичної деформації фланцевих деталей зі зварних циліндричних заготовок з листової сталі AISI 304 з метою підвищення якості технологічних виробів. Промислова гідравліка і пневматика : матеріали XXV Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 2–3 грудня 2025 р.). Київ : Глобус-Прес, 2025. С. 196–199. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/52052 (дата звернення: 11.11.2026).

5. Firat M. Plasticity modelling for deformation-induced anisotropy in sheet metals: from experiments to finite element implementation. International Journal of Material Forming. 2026. Vol. 19. Article 64. DOI: https://doi.org/10.1007/s12289-026-02031-9

6. Folle L. F., Lima T. N., Santos M. P. S. et al. A Review on Sheet Metal Forming Behavior in High-Strength Steels and the Use of Numerical Simulations. Metals. 2024. Vol. 14, no. 12. Article 1428. DOI: https://doi.org/10.3390/met14121428

7. Sun X., Shen W., Li Y., Hu X., Li C., Xue F. An uncoupled ductile fracture criterion for a wide range of stress states in sheet metal forming failure prediction. Engineering Fracture Mechanics. 2024. Vol. 310. Article 110464. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110464

8. Komori K. Ductile Fracture Prediction during Metal Forming Using an Ellipsoidal Void Model and Some Other Models. Tetsu-to-Hagané. 2024. Vol. 110, no. 8. P. 569–589. DOI: https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2024-033

9. Qin Z., Gatea S., Ou H. Characterisation and modelling of ductile fracture in incremental sheet forming of an aluminium alloy with consideration of temperature variations. International Journal of Material Forming. 2026. Vol. 19. Article 4. DOI: https://doi.org/10.1007/s12289-025-01970-z

10. Liu Q., Zuo Q., Li L. et al. Energy-Oriented Modeling of Hot Stamping Production Line: Analysis and Perspectives for Reduction. Energies. 2024. Vol. 17, no. 22. Article 5798. DOI: https://doi.org/10.3390/en17225798

11. Schumann P., Martin D., Serra O. M., Raja M. P. R., Groche P. Effect of cavity design on textured tool surfaces in sheet metal forming. Manufacturing Review. 2025. Vol. 12. Article 27. DOI: https://doi.org/10.1051/mfreview/2025024

12. Allwood J. M., Music O. Material efficiency at the component level: how much metal can we do without? Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2024. Vol. 382, no. 2284. Article 20230245. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0245

13. ISO/TS 6892-5:2025. Metallic materials — Tensile testing — Part 5: Specification for testing miniaturised test pieces. Geneva : ISO, 2025. URL: https://www.iso.org/standard/88005.html (дата звернення: 11.11.2026).

14. ISO 12004-2:2021. Metallic materials — Determination of forming-limit curves for sheet and strip — Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory. Geneva : ISO, 2021. URL: https://www.iso.org/standard/78138.html (дата звернення: 11.11.2026).

Додаткова

1. Banabic D. Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. XV, 301 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1.

2. Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. XX, 211 p. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5300-8.X5000-6.

3. Hosford W. F., Caddell R. M. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. 4th ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2011. 344 p. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511976940.

4. Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford : Clarendon Press, 1950. URL: https://academic.oup.com/book/52880 (дата звернення: 12.11.2026).

5. Gurson A. L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. Journal of Engineering Materials and Technology. 1977. Vol. 99, no. 1. P. 2–15. DOI: https://doi.org/10.1115/1.3443401.

6. McClintock F. A. A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes. Journal of Applied Mechanics. 1968. Vol. 35, no. 2. P. 363–371. DOI: https://doi.org/10.1115/1.3601204.

7. Johnson G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21, no. 1. P. 31–48. DOI: https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9.

8. Bao Y., Wierzbicki T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. International Journal of Mechanical Sciences. 2004. Vol. 46, no. 1. P. 81–98. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006.

9. Dunand M., Mohr D. Hybrid experimental–numerical analysis of basic ductile fracture experiments for sheet metals. International Journal of Solids and Structures. 2010. Vol. 47, no. 9. P. 1130–1143. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.12.011.

10. Allwood J. M., Cullen J. M. Sustainable Materials: With Both Eyes Open. Cambridge : UIT Cambridge, 2012. URL: https://www.withbotheyesopen.com/ (дата звернення: 12.11.2026).