МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра тракторів та сільськогосподарських машин,
експлуатації і технічного сервісу

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності Н7 «Агроінженерія» денної і заочної форм здобуття вищої освіти

МИКОЛАЇВ
2026

УДК 004.896(075.8)
М30

Друкується за рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від «20» жовтня 2026 р., протокол №2.

Укладач:

Д. Д. Марченко – канд. тех. наук, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Г. О. Іванов – канд. тех. наук, професор кафедри загальнотехнічних дисциплін, Миколаївський національний аграрний університет.

В. В. Аулін – докт. тех. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет.

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП……..... 4

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО САПР ТА ЇХ МІСЦЕ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ. СУЧАСНІ ПРИКЛАДНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ……... 6

2. АВТОМАТИЗОВАНЕ ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ І СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ НА ОСНОВІ ЇХНІХ 3D-МОДЕЛЕЙ……. 17

3. МЕТОДИ ПОБУДОВИ 3D-СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ…….. 24

4. МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ У САПР……..... 32

5. МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ І ВИРОБІВ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ…… 42

6. ПРИКЛАДНІ БІБЛІОТЕКИ САПР……..... 52

7. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ САПР ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ (CAE)……... 61

8. ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У САПР…….. 72

9. ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБУ. СИСТЕМИ PDM, ERP, PLM…….. 81

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ……..... 90

ВСТУП

Автоматизоване проєктування є засобом узгодження технічної ідеї, геометричної моделі, конструкторської документації та розрахунків. Для агроінженера особливе значення має врахування специфічних умов експлуатації машин: контакту робочих органів із ґрунтом і рослинною масою, забруднення, абразивного зношування, ударних навантажень, сезонності використання техніки та вимог ремонтопридатності.

Матеріал курсу формує взаємопов’язану систему знань: від понять автоматизованих систем і історії їх розвитку до побудови параметричних моделей, перевірки технологічності конструкції, керування цифровою документацією та використання інформації протягом усього життєвого циклу техніки.

Під час вивчення дисципліни слід відокремлювати геометричне відображення виробу від інженерної моделі: перше характеризує форму, друге додатково містить припущення, матеріали, навантаження, граничні умови й критерії працездатності. Комп’ютерна модель не усуває відповідальності інженера за правильність постановки задачі та інтерпретації результатів.

Метою викладання дисципліни «Системи автоматизованого проєктування» є формування у здобувачів вищої освіти теоретичних знань і практичних умінь у галузі автоматизованого проєктування технічних і технологічних систем, опанування сучасних методів комп’ютерного моделювання, інженерного аналізу та конструювання деталей, вузлів і механізмів сільськогосподарської техніки, набуття навичок застосування CAD/CAE/CAM-систем для розроблення, удосконалення та оптимізації конструкцій машин і обладнання агропромислового виробництва з мінімальними витратами часу й ресурсів.

Вивчивши матеріал, студент може вважати, що він його засвоїв, якщо розуміє основні принципи побудови та функціонування систем автоматизованого проєктування, сутність процесів інженерного проєктування та конструювання, методи створення двовимірних креслеників і тривимірних параметричних моделей деталей та складальних одиниць, способи виконання інженерних розрахунків і комп’ютерного моделювання, принципи розроблення конструкторської

документації, а також можливості застосування сучасних інформаційних технологій для підвищення точності, якості та ефективності проєктування сільськогосподарських машин і обладнання.

Основною формою вивчення дисципліни є самостійна робота здобувачів вищої освіти з навчальними посібниками, методичними матеріалами та сучасними програмними засобами автоматизованого проєктування. Крім того, відповідно до навчальної програми проводяться лекційні та практичні заняття, під час яких здобувачі опановують теоретичні основи САПР, виконують завдання з комп'ютерного моделювання, розроблення креслеників, створення тривимірних моделей та інженерного аналізу технічних об'єктів. Результати засвоєння навчального матеріалу перевіряються шляхом поточного контролю, захисту практичних робіт, виконання самостійних завдань та складання підсумкового іспиту.

Кредитно-трансферна схема вивчення дисципліни

«Системи автоматизованого проєктування» – курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності Н7 «Агроінженерія» денної та заочної форм здобуття вищої освіти.

№ п/п	Найменування розподілу	К-ть годин/кредитів			
		Лекції	ЛЗ (ПЗ)	СР	Всього
3-й семестр					
1	Модуль 1. Теоретичні основи та розвиток систем автоматизованого проєктування (САПР)	16	16	16	48/1,6
2	Модуль 2. Структура, принципи та сучасні інформаційні технології САПР	14	14	14	42/1,4
Всього за 3-й семестр		30	30	30	90 (3,0)

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО САПР ТА ЇХ МІСЦЕ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ. СУЧАСНІ ПРИКЛАДНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

1.1. Основні поняття та визначення

Проєктування (від лат. projectus – кинутий уперед) – процес створення описів нового або модернізованого технічного об'єкта (виробу, процесу), достатніх для виготовлення чи реалізації цього об'єкта в заданих умовах.

Такі описи, які називають остаточними, становлять комплект конструкторської та технологічної документації у вигляді креслень, пояснювальних записок, специфікацій, програм для технологічних автоматів тощо.

Проєктування – процес створення опису, потрібного для побудови в заданих умовах об'єкта, який ще не існує. Виокремлюють три основні способи здійснення проєктування:

– якщо весь процес проєктування виконує людина, його називають неавтоматизованим;

– проєктування, під час якого відбувається взаємодія людини й ЕОМ, називають автоматизованим. Автоматизоване проєктування, як правило, здійснюється в режимі діалогу людини з ЕОМ із застосуванням спеціальних мов взаємодії;

– проєктування, під час якого всі перетворення описів об'єкта та алгоритму його функціонування виконуються без участі людини, називають автоматичним.

Сукупність проєктних документів відповідно до встановленого переліку, у яких представлено результат проєктування, називають проєктом.

Система автоматизованого проєктування (САПР) – організаційно-технічна система, що складається з комплексу засобів автоматизації проєктування (КЗАП), взаємопов'язаного з необхідними підрозділами проєктної організації (П1, П2, ..., Пn) або колективом фахівців (користувачів системи), і забезпечує автоматизоване проєктування.

1.2. Структура САПР конструкторсько-технологічного призначення

Структура САПР. Як і будь-яка складна система, САПР складається з підсистем. Розрізняють проєктувальні та обслуговувальні підсистеми.

Проєктувальні підсистеми безпосередньо виконують проєктні процедури. Прикладами таких підсистем можуть бути підсистеми геометричного 2D- і 3D-моделювання механічних об'єктів, виготовлення конструкторської документації (КД), схемотехнічного аналізу, трасування з'єднань (на друкованих платах) тощо.

Обслуговувальні підсистеми забезпечують функціонування проєктувальних підсистем; їх сукупність часто називають системним середовищем (або оболонкою) САПР.

Класифікація САПР. Класифікація визначає місце об'єкта в системі, яке вказує на його необхідні властивості або визначається ними. Відповідно вона є засобом зберігання й пошуку інформації, що міститься в самій класифікації. Класифікація створює умови для розроблення технічно обґрунтованих норм забезпечення процесу створення, функціонування та стандартизації у сфері САПР.

Під організаційною системою розуміють сукупність колективу фахівців, комплексу засобів, взаємодій і взаємозв'язків між ними та із зовнішнім середовищем, а також алгоритму процесу проєктування, необхідного для здійснення автоматизованого проєктування.

Класифікація САПР:

1) за видом створюваних проєктних документів:

– текстові: створюють лише текстові документи на паперовій стрічці або аркуші;

– текстові та графічні: створюють текстові й графічні документи на паперовій стрічці або аркуші;

– на електронних носіях: зберігають документи на магнітних, лазерних дисках і флешносіях;

– на фотоносіях: зберігають документи на мікрофільмах, фотошаблонах тощо.

2) за складністю об'єкта:

– однорівнева: побудована на основі комп’ютера середнього або високого класу зі штатним набором периферійних пристроїв, який може доповнюватися засобами обробки графічної інформації;

– дворівнева: побудована на основі комп’ютера середнього або високого класу та одного (або декількох) автоматизованих робочих місць (АРМ), що містять міні-ЕОМ;

– трирівнева: побудована на основі ЕОМ високого класу, АРМ і периферійного обладнання з програмним керуванням;

3) за типом об’єкта проєктування:

– САПР виробів машинобудування;

– САПР виробів приладобудування;

– САПР технологічних процесів (ТП) у машино- і приладобудуванні;

– САПР будівельних об’єктів;

– САПР технологічних процесів у будівництві;

– САПР програмних виробів;

– САПР організаційних систем.

Решта груп (8 і 9) є резервними та призначені для виокремлення й кодування САПР, які не належать до перелічених груп.

Теорія автоматизації проєктування постійно розвивається. З’являються нові технічні й програмні засоби, комплексні САПР, тому наявні схеми класифікації САПР змінюватимуться та вдосконалюватимуться.

1.3. Структура та стадії процесу проєктування

У проєктуванні прийнято виокремлювати стадії науково-дослідних робіт (НДР), дослідно-конструкторських робіт (ДКР), технічного проєкту, робочого проєкту, випробувань дослідного зразка.

На стадії НДР вивчають потреби у створенні нових виробів із заданим цільовим призначенням, досліджують фізичні, інформаційні, конструктивні та технологічні принципи побудови виробів і можливості реалізації цих принципів, прогнозують значення характеристик і параметрів об’єктів, здійснюють широкий патентний

пошук, аналіз літературних джерел і експериментальні роботи з перевірки концептуальних рішень, покладених в основу конструкції, яку створюють.

Результатом НДР є формулювання технічного завдання (ТЗ) на розроблення об’єкта – документа, що містить мету створення й призначення об’єкта, технічні вимоги (ТВ), режими та умови роботи, сфери застосування, узгодження параметрів із типорозмірами, інформацію про експериментальні роботи, порівняльну оцінку технічного рівня тощо.

На підставі ТЗ розробляють технічну пропозицію – сукупність документів, які відображають технічні рішення, прийняті у проєкті, і містять результати функціонально-фізичних та вартісних досліджень, обґрунтування виконуваних функцій, фізичних принципів дії, доцільності використання тих чи інших рішень, порівняльну оцінку цих рішень за технічними, економічними, технологічними, екологічними та іншими показниками.

На стадії ДКР створюють ескізний проєкт виробу – сукупність графічної та текстової документації, на підставі якої можна скласти загальне уявлення про будову, принцип роботи, призначення, основні параметри й габаритні розміри проєктованого виробу, про компонування машини загалом та її основних вузлів.

На стадії технічного проєкту розробляють детальнішу графічну та текстову документацію, яка дає повне й остаточне уявлення про будову, компонування машини та всіх її вузлів. До технічного проєкту включають усі необхідні розрахунки (динамічні, міцнісні тощо).

На стадії робочого проєкту створюють повний комплект конструкторсько-технологічної документації, достатній для виготовлення об’єкта.

На стадії випробувань отримують результати, які дають змогу виявити можливі помилки й недоліки проєкту, після чого вживають заходів для їх усунення.

1.4. Види забезпечення САПР

Структурування САПР за різними аспектами зумовлює виокремлення семи видів забезпечення САПР (рис. 1.1).

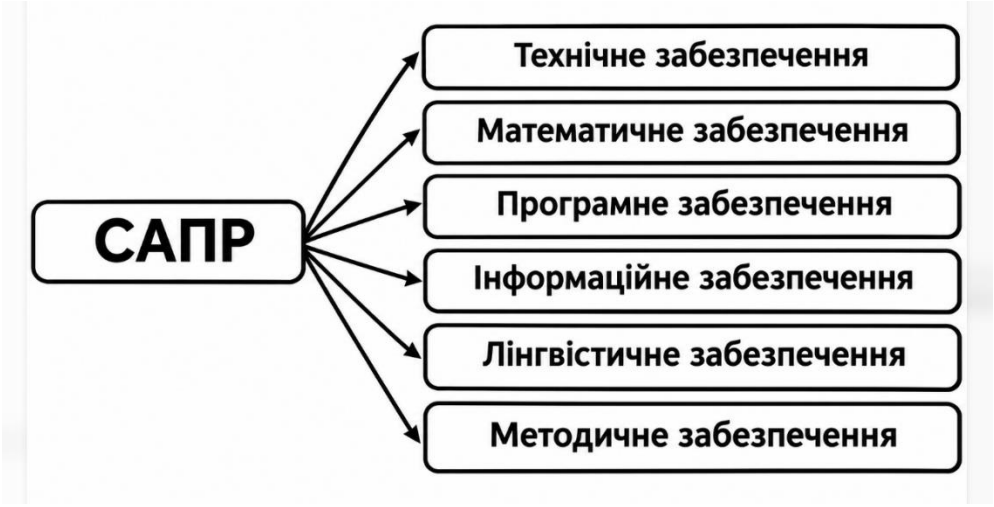


Рис. 1.1. Види забезпечення САПР

Технічне забезпечення – сукупність взаємопов’язаних технічних засобів, призначених для здійснення автоматизованого проєктування.

Математичне забезпечення – сукупність математичних методів, математичних моделей та алгоритмів проєктування, необхідних для здійснення автоматизованого проєктування, поданих у встановленій формі.

Програмне забезпечення (ПЗ) – сукупність комп’ютерних програм, потрібних для здійснення автоматизованого проєктування, поданих у встановленій формі. ПЗ поділяють на загальносистемне та прикладне.

Інформаційне забезпечення – дані у вигляді документів або електронних баз даних (БД), які містять довідкові відомості про матеріали, комплектувальні вироби, типові проєктні рішення, поточний стан розробок, структури й параметри проєктованих об’єктів.

Лінгвістичне забезпечення – сукупність мов проєктування, зокрема термінів і визначень, правил формалізації природної мови, методів стиснення та розгортання текстів, необхідних для автоматизованого проєктування.

Методичне забезпечення – сукупність документів, що встановлюють склад і правила добору та експлуатації засобів забезпечення автоматизованого проєктування.

Організаційне забезпечення – сукупність документів, що визначають склад проєктної організації та її підрозділів, зв’язки між ними, їхні функції, а також форму подання результату проєктування й порядок розгляду проєктних документів,

необхідних для здійснення автоматизованого проєктування. До них належать методичні та керівні матеріали, положення, інструкції, накази й інші документи, що забезпечують взаємодію підрозділів проєктної організації під час створення та експлуатації САПР.

1.5. CAD/CAM/CAE-системи

Системи автоматизації проєктування охоплюють системи інженерної графіки (CAD), інженерних розрахунків (CAE), автоматизації підготовки виробництва та керування ним (CAM).

CAD (Computer-aided design) – системи для розроблення конструкторської документації. Вони дають змогу створювати як плоскі (двовимірні, 2D) креслення, так і об’ємні (тривимірні, 3D) геометричні моделі.

CAM (Computer-aided manufacturing) – системи для розроблення програм керування технологічним процесом (ТП), наприклад обробленням деталей на автоматичних верстатах.

CAD/CAM-системи забезпечують одночасне розв’язання завдань конструкторського й технологічного проєктування. Вони мають комплексні засоби як для розроблення та випуску КД, так і для автоматизованого керування виробництвом.

CAE (Computer-aided engineering) – системи для розв’язання завдань інженерного аналізу, зокрема міцнісних і теплових розрахунків, аналізу процесів лиття тощо.

1.6. Можливості сучасних САПР

Завдяки використанню САПР істотно скорочуються терміни проєктування та зменшується його вартість, адже на підготовчому етапі виробництва можна змоделювати потрібні вироби, виконати перевірні розрахунки та усунути недоліки конструкції.

З’являється можливість аналізувати різні варіанти розв’язання навіть складних проєктних завдань, що мінімізує помилки під час виробництва. Усе це підвищує якість і результативність проєктів. Крім того, завдяки автоматизації проєктування на

початковому етапі практично усувається вплив людського чинника, оскільки програми САПР автоматично вказують на помилки моделювання, а іноді пропонують способи їх виправлення.

Під час автоматизованого проєктування створюється електронний аналог креслення, а замість паперу й креслярських інструментів використовують екран комп'ютера, клавіатуру та маніпулятор (мишу).

Застосування САПР сприяє підвищенню ефективності виробництва завдяки зростанню якості й продуктивності праці проєктувальників, скороченню термінів проєктування, зменшенню матеріальних витрат і чисельності конструкторів.

Переваги використання САПР:

1. Точність і надійність. САПР забезпечує високу точність і надійність у процесі проєктування. На відміну від ручного проєктування, коли помилки можуть виникати через людський чинник, САПР працює з математичною точністю, мінімізуючи ймовірність помилок.

2. Підвищення продуктивності. САПР дає змогу істотно прискорити проєктування. Завдання, що за ручного виконання потребують багато повторень і часу, в САПР можуть виконуватися автоматично, завдяки чому скорочуються витрати праці.

3. Простота внесення змін. У САПР зміни до проєкту можна внести значно швидше й простіше, ніж у разі ручного проєктування. Це забезпечує оперативне пристосування до нових вимог або виправлення помилок без необхідності розпочинати роботу заново.

4. Можливість моделювання та досліджень. САПР дозволяє проводити різноманітне імітаційне моделювання й дослідження, зокрема теплові, гідравлічні або міцнісні розрахунки. Це допомагає інженерам оцінити характеристики й надійність виробу ще на стадії проєктування, знижує ризик помилок і підвищує якість кінцевої продукції.

Недоліки САПР:

1. Інвестиційні витрати. Упровадження та використання САПР потребують значних капіталовкладень. Придбання ліцензій на програмне забезпечення, навчання

персоналу та підтримка системи вимагають фінансових ресурсів, що можуть бути значними для невеликих компаній або фахівців-початківців.

2. Залежність від технічної інфраструктури. Для роботи САПР потрібні сучасне апаратне й програмне забезпечення, потужні комп'ютери та високошвидкісне інтернет-з'єднання. У разі несправностей або збоїв системи можливі простої та затримки виконання проєктів.

3. Обмеження творчого процесу. За ручного проєктування інженер має більше свободи для творчості й індивідуального підходу до розв'язання завдань. У САПР процес проєктування нерідко обмежується параметрами та правилами, заданими програмним забезпеченням, що може знижувати гнучкість і унікальність проєкту.

4. Складність опанування та навчання. Робота із САПР потребує спеціальних знань і навичок. Навчання персоналу може бути тривалим і вимагати значних зусиль. Крім того, внаслідок розвитку технологій і появи нових версій програмного забезпечення необхідно постійно оновлювати знання та періодично проходити навчання.

5. Ризик втрати даних. САПР працює з цифровими даними, які можуть бути втрачені або пошкоджені. Неправильне зберігання чи збої системи здатні спричинити небажані наслідки, зокрема втрату всього проєкту.

Отже, порівняно з ручним проєктуванням САПР має чимало переваг: високу точність, підвищення продуктивності, простоту внесення змін, можливості імітаційного моделювання та досліджень. Водночас існують і недоліки: інвестиційні витрати, залежність від технічної інфраструктури, обмеження творчого процесу, складність навчання та ризик втрати даних.

САПР є невіддільною частиною сучасної інженерної практики й продовжує розвиватися, пропонуючи дедалі більше засобів і функцій для оптимізації та вдосконалення процесу проєктування. Незважаючи на певні недоліки, переваги САПР зазвичай переважають, особливо коли необхідні висока точність, продуктивність і можливість проведення різноманітних досліджень та імітаційного моделювання.

1.7. САПР середнього рівня. САПР верхнього рівня

На сучасному ринку представлено велику кількість САПР для розв'язання різних завдань. Умовно їх поділяють на три групи.

Легкі САПР (нижнього рівня) призначені для 2D-проєктування та креслення, а також створення окремих тривимірних моделей без можливості роботи зі складальними одиницями. Такі системи не мають чіткої спеціалізації: у них можна виконувати будівельні й машинобудівні проєкти, електротехнічні роботи тощо.

САПР середнього рівня – програми для 3D-моделювання виробів, виконання розрахунків, автоматизації проєктування електричних, гідравлічних та інших допоміжних систем. Дані в них можуть зберігатися у звичайній файловій системі або в єдиному середовищі електронного документообігу й керування даними (PDM- та PLM-системах). Часто системи середнього класу містять програми підготовки керувальних програм для верстатів із ЧПК (CAM-системи) та інші засоби технологічного проєктування. Вони оптимальні за співвідношенням вартості та функціональності.

Важкі САПР (верхнього рівня) призначені для роботи зі складними виробами (великими складальними одиницями в авіабудуванні, суднобудуванні тощо). За функціональністю вони виконують ті самі завдання, що й системи середнього рівня, але мають принципово іншу архітектуру й алгоритми роботи.

У таблиці наведено приклади CAD-систем, призначених для машинобудування.

Таблиця 1.1

Класифікація CAD-систем

Рівень САПР	Продукт	Компанія
Верхній	Unigraphics	EDS Unigraphics
Верхній	CATIA	Dassault Systemes
Верхній	Creo Parametric (Pro/Engineer)	PTC Inc. (Parametric Technology Corporation)
Середній	Solid Edge	EDS

Рівень САПР	Продукт	Компанія
Середній	SolidWorks	SolidWorks (Dassault Systemes)
Середній	Cimatron	Cimatron
Середній	AutoCAD	Autodesk Ltd (Англія / США)
Середній	AUTOCAD-3D	Аскон
Середній	T-FlexCAD	Топ Системи
Середній	АРМ WinMachine	НВЦ «Автоматизоване проєктування машин»
Середній	КРЕДО	НДЦ АСК
Середній	АДЕМ	Omega Adem Tehnologiec
Середній	TurboCAD	IMSI
Середній	DataCAD	DataCAD
Нижній	Caddy	Ziegler Informatics
Нижній	bCAD	ПроГруппа
Нижній	Спрут	Sprut Technology
Нижній	Кредо	АСК

1.8. Методика створення 3D-моделей у САПР

Створення окремих тривимірних об’єктів починається з побудови ескізу – плоскої фігури, на основі якої формують об’ємне тіло. Ескіз можна розташувати на одній зі стандартних площин проєкцій, плоскій грані наявного тіла або допоміжній площині, положення якої задає користувач. Зазвичай ескіз складається з одного або кількох контурів.

Після завершення ескізу необхідно визначити спосіб його переміщення в просторі для отримання елемента потрібного типу, тобто обрати вид формоутворювальної операції.

У САПР AUTOCAD-3D можна застосувати такі формоутворювальні команди (рис. 1.2): видавлювання, обертання, побудову за перерізами, кінематичну операцію.

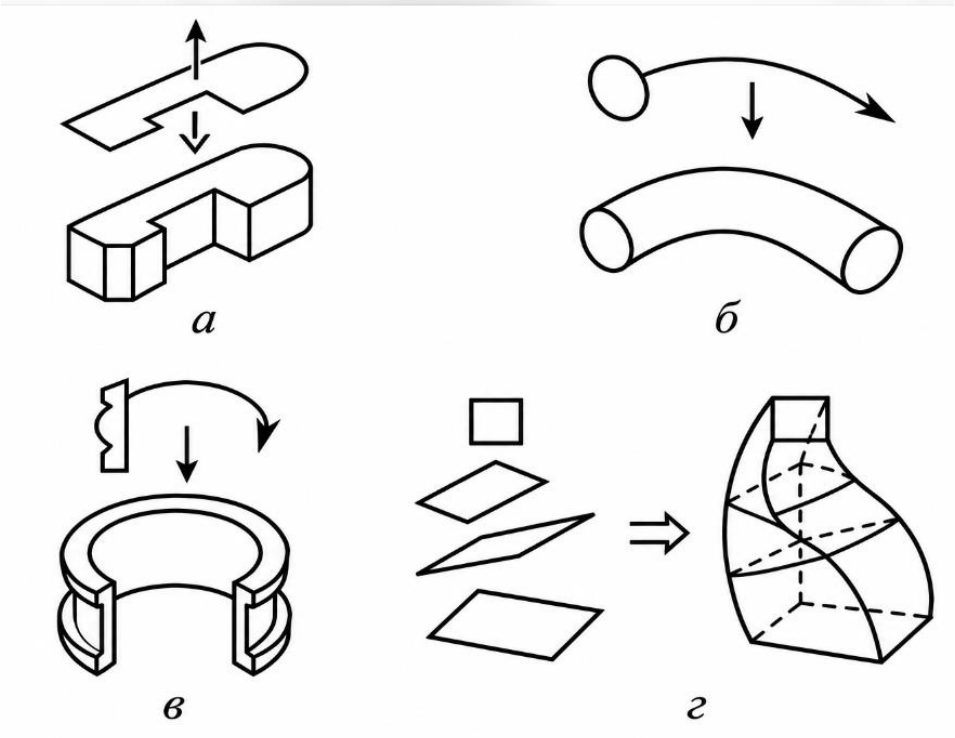


Рис. 1.2. Основні формоутворювальні операції створення тривимірних об’єктів:
а – видавлювання; б – кінематична; в – обертання; г – за перерізами.

Відмінність операцій видалення матеріалу від операцій його додавання полягає в тому, що результатом видалення є не створення нового тіла чи об’єднання тіл, а віднімання або перетин.

Віднімання формоутворювального елемента від тіла – видалення матеріалу, розташованого всередині поверхні елемента.

Перетин формоутворювального елемента й тіла – видалення матеріалу, розташованого за межами поверхні елемента.

1.9. Принцип системного підходу в проєктуванні

Проєктування складних об’єктів ґрунтується на використанні ідей і методів, викладених у низці теорій та підходів. Найзагальнішим із них є системний підхід.

Основний і найзагальніший принцип системного підходу полягає в розгляді частин явища або складної системи з урахуванням їхньої взаємодії.

Системний підхід передбачає такі етапи:

– виявлення структури системи;

– типізацію її зв’язків;

– визначення атрибутів системи;

– аналіз впливу зовнішнього середовища на систему.

Системний підхід є основою узагальнювальної наукової дисципліни, яку називають «Теорія систем» («Системний аналіз»).

Теорія систем – наукова дисципліна, яка конкретизує положення системного підходу для дослідження та проєктування складних економічних, соціальних і технічних систем, насамперед слабоструктурованих.

Характерними прикладами таких систем є виробничі системи. Під час їх проєктування поставлених цілей досягають у багатокроковому процесі прийняття рішень. Методи прийняття рішень вивчає наукова дисципліна «Теорія прийняття рішень».

2. АВТОМАТИЗОВАНЕ ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ І СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ НА ОСНОВІ ЇХНІХ 3D-МОДЕЛЕЙ

2.1. Асоціативний зв’язок між моделями та конструкторською документацією

Асоціативний зв’язок – зв’язок, установлений між моделлю виробу та документацією на нього, який дає змогу за внесення змін до моделі автоматично відображати їх в інших документах, пов’язаних із цією моделлю.

У САПР AUTOCAD-3D реалізовано асоціативний зв’язок між моделями та кресленнями деталей (складальних одиниць), специфікацією й іншою технічною документацією, а також автоматизоване формування асоціативних 2D-зображень (видів, розрізів/перерізів, місцевих видів і розрізів, виносних елементів, розривів тощо) на основі 3D-моделей.

Асоціативне креслення – креслення, створене в CAD-системі, яке містить зображення моделі відповідно до вимог стандартів ЄСКД. Коли форма або розміри

моделі змінюються, зображення на всіх пов’язаних із нею асоціативних видах також змінюються.

2.2. Автоматизоване формування асоціативних 2D-зображень на основі їхніх 3D-моделей

У системі AUTOCAD підтримується створення таких асоціативних зображень відповідно до ДСТУ EN ISO 128-3:2022:

– стандартних видів – спереду, зверху, зліва, справа, знизу, ззаду;

– проєкційного виду;

– виду за стрілкою – додаткового й місцевого, допоміжних видів;

– розрізів – простого, складного, місцевого;

– перерізів – винесеного, у розриві;

– виносного елемента.

Розріз – зображення, отримане за уявного розсічення предмета площиною. На розрізі показують усе, що розміщено в січній площині та видно за нею. Положення січної площини на кресленні позначають розімкнутою лінією із зазначенням напряму погляду.

Фігуру перерізу, що входить до розрізу/перерізу, виділяють штрихуванням, яке умовно характеризує матеріал деталі. Правила виконання розрізів, перерізів та штрихування їхніх поверхонь регламентуються ДСТУ EN ISO 128-3:2022.

Залежно від кількості січних площин розрізи бувають:

– прості – з однією січною площиною;

– складні – з кількома січними площинами. Складні розрізи поділяють на ступінчасті (січні площини паралельні одна одній) і ламані (січні площини перетинаються).

Залежно від положення січної площини розрізи поділяють на:

– горизонтальні – січна площина паралельна горизонтальній площині проєкцій;

– вертикальні (фронтальні й профільні) – січна площина перпендикулярна горизонтальній площині проєкцій і паралельна одній із площин проєкцій (фронтальній або профільній).

Переріз – зображення, отримане внаслідок уявного розсічення предмета площиною. На перерізі показують лише те, що розташовано в січній площині.

За розміщенням на кресленні перерізи бувають винесені й накладені. Винесені перерізи переважно розташовують на вільному полі креслення та обводять основною лінією. Накладені перерізи розміщують безпосередньо на зображенні предмета й обводять тонкими лініями.

Порядок створення асоціативних видів на кресленні:

1. Створити креслення й обрати потрібний формат аркуша.

2. Для вставлення стандартних видів виконати послідовність команд: Вставлення → Вид із моделі → Стандартні види з моделі або натиснути кнопку «Стандартні види» на панелі «Асоціативні види». Під час створення складальних креслень і креслень складних деталей рекомендовано застосовувати команду «Довільний вид».

3. За потреби побудувати додаткові та/або місцеві види, розрізи, місцеві розрізи, перерізи тощо.

4. Відредагувати зображення в асоціативних видах, нанести необхідні розміри, позначення, написи, осі тощо.

6. Розмістити види на аркуші креслення. За необхідності вимкнути проєкційні зв’язки між видами (щоб розташувати вид за стрілкою в довільному місці аркуша).

Стандартні види автоматично розташовуються в проєкційному зв’язку з головним видом. За необхідності зв’язок можна вимкнути, що дозволяє довільно розміщувати види на аркуші креслення.

Алгоритм створення асоціативних розрізів/перерізів на асоціативному кресленні:

1. Натиснути кнопку «Лінія розрізу/перерізу» на панелі «Позначення», щоб побудувати лінію розрізу/перерізу.

2. Перемістити вказівник миші на поточний проєкційний вид, установити його в місці виконання розрізу – на екрані з’явиться попереднє зображення позначення лінії розрізу. Для створення складного розрізу натиснути кнопку команди «Складний розріз» на панелі властивостей. Команда «Розріз/Переріз» запускається автоматично після нанесення на асоціативному виді лінії розрізу/перерізу. Група перемикачів

«Розріз моделі» або «Переріз моделі» на панелі властивостей дозволяє обрати тип зображення. Розріз/переріз розміщують у проєкційному зв’язку з опорним видом, що обмежує його переміщення. Щоб розірвати цей зв’язок, використовують команду «Проєкційний зв’язок».

3. Для редагування лінії розрізу використовують спеціальні параметри панелі властивостей: кнопку «Редагувати точки» для зміни конфігурації лінії та групу перемикачів для визначення розміщення додаткового тексту.

4. Для створення розрізу натиснути кнопку «Створити об’єкт».

5. Оформити отримане креслення.

2.3. Оформлення креслення

Основні вимоги до виконання складальних креслень установлює ДСТУ EN ISO 128-1:2022.

Складальне креслення – документ, який містить зображення складальної одиниці та інші відомості, необхідні для складання (виготовлення) і контролю.

Окрім зображення складальної одиниці складальне креслення має містити:

а) виконавчі розміри, граничні відхилення та інші параметри й вимоги, які необхідно виконати або проконтролювати за цим кресленням;

б) вказівки щодо способу виконання нерознімних з’єднань (зварних, паяних тощо);

в) номери позицій складових частин виробу;

г) габаритні розміри, які визначають граничні зовнішні або внутрішні обриси виробу;

д) установлювальні розміри, відповідно до яких виріб установлюють на місці монтажу;

е) приєднувальні розміри, за якими виріб приєднують до інших виробів, та інші необхідні довідкові розміри.

Усі складові частини на складальному кресленні нумерують відповідно до номерів позицій, зазначених у специфікації.

Номери позицій наносять на поличках ліній-виносок, проведених від зображень видимих складових частин.

Лінію-виноску, що перетинає контур зображення та не відходить від певної лінії, завершують крапкою. Лінію-виноску, проведену від лінії видимого або невидимого контуру, а також від ліній, що позначають поверхні, завершують стрілкою.

Лінії-виноски не повинні перетинатися між собою, бути паралельними лініям штрихування (коли проходять через заштриховане поле) та, по можливості, перетинати розмірні лінії й елементи зображення, до яких не стосується напис на поличці.

Номери позицій проставляють на зображеннях, де відповідні складові частини проєктуються як видимі, зазвичай на основних видах і розрізах, які їх замінюють.

Номери позицій розташовують паралельно основному напису креслення поза контуром зображення та групують у стовпчик або рядок на одній лінії.

Номери позицій на кресленні зазвичай наносять один раз. Допускається повторне зазначення номерів позицій однакових складових частин.

Розмір шрифту номерів позицій має бути на один-два номери більшим за розмір шрифту h, прийнятий для розмірних чисел на цьому кресленні.

Для групи кріпильних деталей, що належать до одного місця кріплення, можна виконувати спільну лінію-виноску з вертикальним розташуванням номерів позицій.

Складальні креслення, як правило, виконують зі спрощеннями відповідно до вимог стандартів ЄСКД.

На складальних кресленнях допускається не показувати:

а) фаски, заокруглення, проточки, заглиблення, виступи та інші дрібні елементи;

б) зазори між стрижнем і отвором;

в) кришки, кожухи, перегородки тощо, якщо необхідно показати приховані ними складові частини виробу. При цьому роблять відповідний напис, наприклад: «Кришку поз. 3 не показано»;

г) написи на табличках, фірмових планках, шкалах та інших подібних деталях, зображуючи лише їхній контур.

Загальні принципи оформлення технічних креслеників визначено ISO 128-1:2020, а вимоги до написів – ДСТУ EN ISO 3098-1:2018.

2.4. Формування специфікації в різних режимах

Специфікація – основний конструкторський документ складальної одиниці, який окремо або разом із занесеними до нього іншими конструкторськими документами повністю й однозначно визначає виріб та його склад.

Специфікацію складають для кожної складальної одиниці на окремих аркушах формату А4. Форму й порядок заповнення специфікації встановлює ДСТУ ISO 7573:2018.

У загальному випадку специфікація складається з розділів, розташованих у такій послідовності:

– документація;

– комплекси;

– складальні одиниці;

– деталі;

– стандартні вироби;

– інші вироби;

– матеріали;

– комплекти.

Назву кожного розділу наводять як заголовок у графі «Найменування» та підкреслюють. Після кожного розділу залишають кілька порожніх рядків для додаткових записів. Допускається резервування номерів позицій.

Записи виробів у розділах «Складальні одиниці» та «Деталі» виконують за алфавітом комбінацій початкових індексів організацій-розробників, а далі – у порядку зростання цифр, які входять до позначення.

У розділі «Стандартні вироби» записують вироби, застосовані за такими категоріями стандартів: державними, республіканськими, галузевими та стандартами підприємства. У межах кожної категорії стандарти групують за функціональним призначенням виробів (кріпильні, електротехнічні тощо); усередині групи – за алфавітом назв; у межах кожної назви – за зростанням позначень стандартів, а всередині кожного позначення – за зростанням основних параметрів або розмірів виробу.

До розділу «Матеріали» вносять усі матеріали, які безпосередньо входять до виробу, що специфікується, у послідовності, визначеній ДСТУ ISO 7573:2018.

У графі «Формат» зазначають формати документів, позначення яких вносять до графи «Позначення».

У графі «Поз.» наводять порядкові номери складових частин виробу, що специфікується, відповідно до послідовності їх запису в специфікації. Документам із розділу «Документація» номери позицій не присвоюють.

У графі «Кіл.» зазначають кількість складових одиниць на один виріб, що специфікується.

У розділі «Документація» цю графу не заповнюють. У розділі «Матеріали» в ній указують загальну кількість матеріалів на один виріб з одиницями вимірювання.

Допускається записувати одиниці вимірювання у графі «Примітка» безпосередньо біля графи «Кіл.».

Дозволяється поєднувати специфікацію зі складальним кресленням за умови розміщення їх на форматі А4. Такому об’єднаному документу присвоюють позначення основного конструкторського документа.

У САПР AUTOCAD-3D можна створювати й редагувати специфікації проєктів. Розширення файлу специфікації (spw) відрізняється від файлів моделей (m3d) або креслень (cdw). Специфікацію можна складати напівавтоматично на основі складальної моделі або вводити всі позиції вручну. Об’єкти додаються до специфікації автоматично ще під час внесення деталей до складальної одиниці. При цьому записуються такі відомості про деталь: назва, позначення, кількість і номер позиції.

Способи створення специфікації:

1. Ручний (із мінімальним використанням сервісних можливостей):

– готові шаблони аркушів специфікації;

– ручне введення даних.

2. Напівавтоматичний:

– готові шаблони аркушів специфікації;

– вибір назв розділів і підрозділів із готових шаблонів;

– автоматичне проставляння номерів позицій елементів складальної одиниці під час додавання їхніх назв до специфікації;

– автоматична нумерація аркушів специфікації;

– вставлення назв і позначень стандартних деталей та матеріалів із конструкторської бібліотеки.

3. Автоматичний:

– усі можливості напівавтоматичного способу;

– пов’язування геометрії з об’єктом специфікації (видалення об’єкта специфікації під час видалення геометрії деталі на складальному кресленні та навпаки);

– зв’язок номерів позицій складального креслення й специфікації.

У напівавтоматичному режимі система проєктування специфікацій установлює зв’язки між специфікацією, аркушем (або аркушами) складального креслення та робочими кресленнями деталей.

Дані, необхідні для заповнення специфікації, формуються безпосередньо на кресленнях складальної одиниці під час роботи над цими документами.

Це позбавляє конструктора потреби одночасно працювати з різними типами документів (кресленням і специфікацією) та дає змогу повністю зосередитися на конструкції виробу. Працюючи над кресленням, конструктор поступово вводить до нього відомості про складальні одиниці, деталі, стандартні вироби й інші об’єкти, пов’язані з відповідним аркушем. Усі введені відомості зберігаються у файлі креслення поряд із геометричними об’єктами, елементами оформлення тощо.

3. МЕТОДИ ПОБУДОВИ 3D-СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ

3.1. Методики створення 3D-складальних одиниць у САПР

Під час проєктування нових виробів із використанням тривимірних САПР конструктор зазвичай застосовує висхідний метод. Його сутність полягає в тому, що спочатку незалежно одна від одної розробляють (моделюють) деталі, а потім формують із них складальну конструкцію, на основі якої надалі створюють специфікацію. Послідовність дій показано на рис. 3.1.

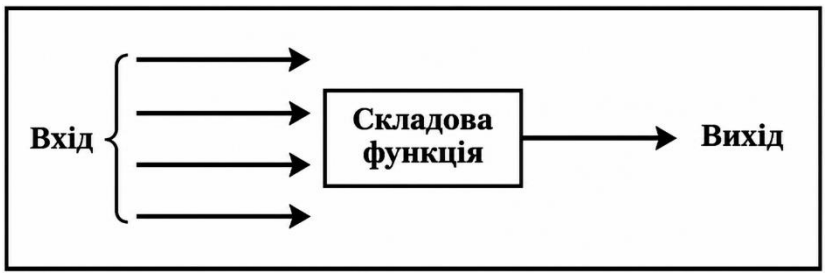


Рис. 3.1. «Висхідний» метод створення складальних одиниць.

Застосування цього способу проєктування виправдане тоді, коли роботу виконують за наявними кресленнями та схемами, що дозволяє, наприклад, виявити неточності в конструкторській документації. Проте якщо параметри моделей залежать один від одного, але взаємозв'язків між ними не задано, внесення змін у конструкцію стає трудомістким: конструктор має змінювати параметри кожної деталі окремо, а потім перевіряти складальну одиницю на перетин компонентів, механізм – на працездатність тощо.

Низхідний метод проєктування (рис. 3.2) передбачає, що розроблення виробу починається зі створення його компонування й визначення структури, на основі яких потім моделюють деталі та вузли, що входять до виробу.

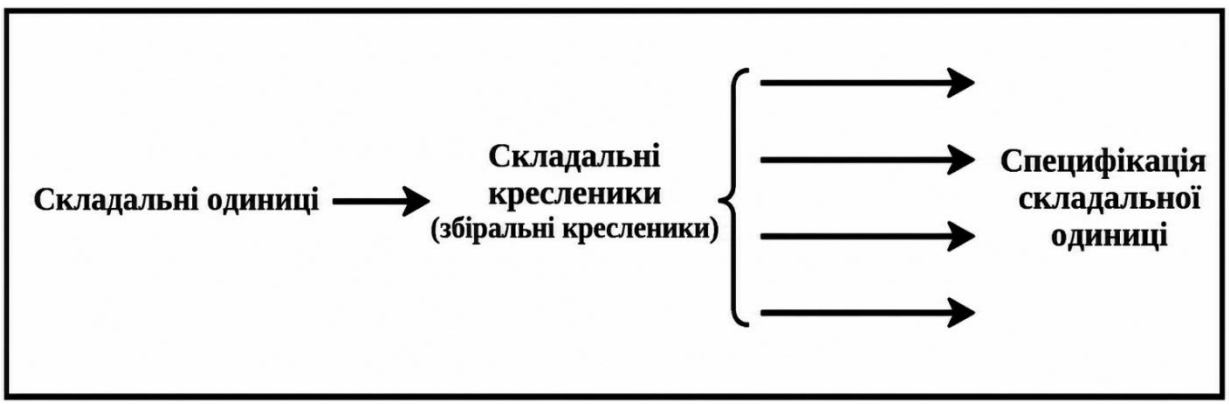


Рис. 3.2. «Низхідний» метод створення складальних одиниць.

Конструктор формує структуру виробу, створюючи нові деталі та вузли безпосередньо у складальній одиниці (а не окремо, як за висхідного проєктування), пов'язуючи нові елементи з геометрією інших компонентів.

Низхідний метод проєктування дає змогу ефективно розподіляти роботу над складальними одиницями між учасниками розроблення, а за використання типових

конструкцій помітно скорочувати терміни створення серії типорозмірів і варіантів виконання виробів.

Щоб створити новий файл тривимірної моделі складальної одиниці, у головному меню потрібно виконати команди «Файл → Створити → Новий документ → Складальна одиниця» або натиснути кнопку «Складальна одиниця» на стандартній панелі. Відкриється вікно нового документа, де розміщено дерево побудови, систему координат і площини проєкцій.

Компонент із файлу додають натисканням кнопки «Додати з файлу» на панелі «Редагування складальної одиниці». Після виклику команди з'являється стандартне діалогове вікно вибору файлів. Потрібно обрати відповідний каталог і вказати назву файлу, що містить компонент. Зображення обраного компонента з'явиться у вікні перегляду діалогу. Якщо файл обрано правильно, слід натиснути «Відкрити».

Далі вказують точку вставлення компонента. Її можна обрати довільно у вікні складальної одиниці, використати прив'язку (наприклад, до початку координат або вершини) чи ввести координати X, Y, Z в полях панелі властивостей.

Компонент буде вставлено в поточний документ; його початок координат збігатиметься з указаною точкою вставлення, а напрями осей системи координат – із напрямами відповідних осей поточної складальної одиниці. У дереві побудови з'явиться піктограма типу компонента (деталі або складальної одиниці).

Якщо вставлений компонент є першим, він автоматично фіксується в положенні вставлення. Зафіксований компонент не можна перемістити в системі координат складальної одиниці.

За необхідності фіксацію компонента можна вимкнути. Для цього його виділяють у дереві побудови та викликають із контекстного меню команду «Властивості компонента». На вкладці «Властивості» панелі властивостей активують перемикач «Не фіксувати компонент». Фіксацію можна вмикати або вимикати за бажанням користувача, однак під час створення складальної одиниці рекомендовано фіксувати один або кілька її компонентів.

3.2. Використання зіткнень і спряжень під час складання. Редагування моделі складальної одиниці

Під час складання дуже важливо задати взаємне положення елементів.

Після вставлення компонента в складальну одиницю можна встановити його приблизне положення та орієнтацію. У системі AUTOCAD-3D передбачено кілька способів переміщення компонентів: обертання навколо центра габаритного паралелепіпеда, навколо осі або точки, а також зсув у будь-якому напрямі.

Команди переміщення компонентів містяться у групі команд «Сервіс». Кнопки їх виклику розташовані на панелі «Редагування складальної одиниці»:

– «Перемістити компонент»;

– «Повернути компонент».

Слід мати на увазі:

– якщо компонент зафіксовано, його неможливо зсунути або повернути в системі координат складальної одиниці;

– переміщенню компонента в одному чи кількох напрямах можуть перешкоджати накладені на нього спряження. Наприклад, співвісні компоненти можуть переміщуватися лише вздовж спільної осі, а також обертатися навколо неї.

Переміщення компонентів складальної одиниці може порушити наявні параметричні зв’язки та обмеження.

Наприклад, допоміжні елементи після зсуву або повороту опорних об’єктів можуть залишатися на попередніх місцях. Тому компоненти, які перемістили, позначаються в дереві побудови червоною позначкою.

Для усунення порушень потрібно перебудувати та/або перемістити об’єкти так, щоб їхня форма, параметри й положення відповідали положенню опорних об’єктів і не суперечили накладеним спряженням.

Перебудувати об’єкти складальної одиниці можна командою «Перебудувати» або натисканням клавіші F5.

Спряження – параметричний зв’язок між компонентами складальної одиниці, що формується через задання взаємного положення їхніх елементів.

У спряженнях можуть брати участь грані, ребра, вершини, графічні об’єкти ескізів і допоміжні елементи різних компонентів.

Команди накладання спряжень розташовано в групі меню «Операції / Спряження компонентів». Кнопки швидкого виклику містяться на панелі «Спряження».

Приклади:

1. Щоб задати паралельність поверхонь деталей, на панелі «Спряження» натисніть кнопку «Паралельність», а потім послідовно виберіть поверхні для спряження.

2. Щоб забезпечити співвісність деталей, натисніть «Співвісність» на панелі «Спряження» та вкажіть циліндричні поверхні.

3. Щоб створити контакт об’єктів за площиною, натисніть «Збіг» на панелі «Спряження» та виберіть відповідні поверхні.

Не слід створювати взаємовиключні спряження, оскільки система повідомить про надмірне визначення складальної одиниці. Крім того, іноді після її перебудови замість позначок з’являються червоні знаки оклику, що вказують на помилку побудови компонента, спряження або іншого елемента.

Наприклад, елемент, вирізаний зі складальної одиниці, було видавлено до грані певної деталі. Після переміщення цієї деталі відповідна грань уже не може обмежувати видавлюваний елемент (його ескіз не повністю проєктується на цю грань або взагалі не може бути спроєктований). Вирізання стає неможливим, і після перебудови моделі операція позначається в дереві побудови як помилкова.

3.3. Створення та редагування моделі деталі у складальній одиниці «за місцем»

Для редагування деталі під час роботи зі складальною одиницею необхідно:

1. Натиснути правою кнопкою миші на деталь і вибрати команду «Редагувати компонент у вікні». Її також можна знайти на панелі інструментів «Правка» або через пошук команд.

2. Відкриється файл, у якому створено деталь.

3. Внести необхідні зміни до деталі та зберегти їх кнопкою на панелі «Системна».

4. Повернувшись до файлу складальної одиниці, погодитися із застосуванням змін, натиснувши кнопку «Перебудувати».

3.4. Застосування бібліотек стандартних 3D-виробів під час створення складальної одиниці

Якщо у складальній одиниці використовуються стандартні вироби (болти, гайки, гвинти тощо), їх не потрібно моделювати як унікальні деталі. До складальної одиниці можна вставляти моделі стандартних виробів із бібліотеки «Стандартні вироби». Щоб її запустити, у меню «Застосунки» потрібно вибрати команду «Стандартні вироби», а потім «Вставити елемент».

Під час додавання стандартного виробу до складальної одиниці в дереві побудови з’являється відповідна піктограма.

3.5. Визначення властивостей моделей деталі та складальної одиниці

Можна змінювати властивості моделі (деталі, складальної одиниці), її виконання, а також властивості побудованого в ній тіла. Для цього викликають команду редагування властивостей і виконують потрібні дії за допомогою елементів панелі параметрів.

Налаштування властивостей об’єктів деталі або складальної одиниці здійснюють у діалоговому вікні «Властивості об’єкта», яке відкривають через «Налаштування → Параметри... → Поточна деталь/складальна одиниця → Властивості об’єктів».

Поле «Найменування» містить назву моделі (складальної одиниці). За замовчуванням усі деталі називаються «Деталь», а складальні одиниці – «Складальна одиниця».

Матеріал моделі й параметри штрихування для відображення на розрізах/перерізах в асоціативних видах креслень показано в секції «Матеріал» панелі параметрів. Позначення матеріалу міститься в полі «Матеріал», а параметри штрихування (стиль, кут і колір) – у полях групи «Графічне відображення матеріалу». За потреби можна вибрати інший матеріал і змінити параметри штрихування.

Щоб змінити позначення, потрібно встановити курсор у полі «Позначення». На екрані з’явиться панель з елементами формування позначення – полями введення його складових частин і кнопкою вставлення коду документа (рис. 3.7). Сформуйте позначення й натисніть клавішу Enter.

3.6. Створення рознесеної складальної одиниці

У технічній документації (наприклад, у настанові з експлуатації) іноді потрібно показати складальну одиницю в «розібраному» вигляді, щоб було видно всі її компоненти. На рис. 3.3 представлено рознесену складальну одиницю вузла «Напрямний блок».

Перед рознесенням компонентів необхідно встановити його параметри: вибрати компоненти, напрям і величину їх переміщення. Для цього викликають команду «Сервіс → Рознести компоненти → Параметри».

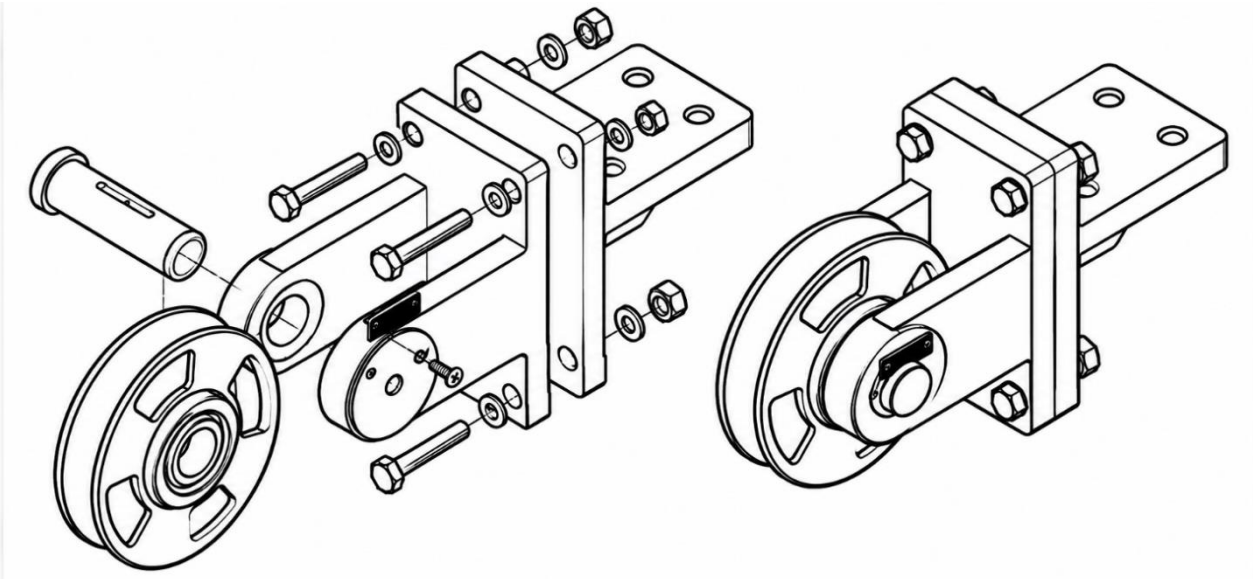


Рис. 3.3. Рознесена складальна одиниця вузла «Напрямний блок».

Після виклику команди на екрані з’являється панель для задання параметрів рознесення компонентів. У вікні «Крок рознесення» на вкладці «Параметри» панелі властивостей відображається перелік кроків рознесення. Якщо параметри рознесення поточної складальної одиниці ще не налаштовували, перелік буде порожнім.

Щоб додати крок рознесення, натисніть кнопку «Додати». Після цього потрібно зазначити компоненти, які беруть участь у цьому кроці, обрати напрям рознесення й задати відстань.

У відповідному полі введіть відстань, на яку компонент має переміститися відносно свого попереднього положення.

Після задання параметрів кроку рознесення натисніть кнопку «Застосувати» на панелі спеціального керування. Вибрані компоненти буде рознесено відповідно до встановлених параметрів.

Щоб змінити напрям переміщення компонента, скористайтеся перемикачем «Напрям» (прямий або зворотний). Після цього знову натисніть «Застосувати». Задайте потрібну кількість кроків рознесення та налаштуйте їхні параметри.

Для завершення налаштування натисніть кнопку «Перервати» на панелі спеціального керування. Після цього складальна одиниця відображатиметься в рознесеному вигляді.

Щоб увімкнути звичайний режим відображення складальної одиниці, натисніть кнопку «Рознести» на панелі «Вид» або викличте команду «Сервіс → Рознести компоненти → Рознести». Вона перемикає режими рознесеного й звичайного відображення. Коли компоненти рознесено, біля назви команди з’являється позначка, а кнопка «Рознести» залишається натиснутою.

Вибір компонентів для рознесення. Натисніть кнопку «Компоненти» на панелі властивостей та оберіть потрібні об’єкти (деталі або підскладальні одиниці) у дереві побудови чи вікні моделі.

Вибрані компоненти підсвічуються у вікні моделі, відповідні піктограми в дереві побудови виділяються кольором, а назви з’являються у списку компонентів. Один компонент може брати участь у кількох кроках рознесення, а один крок може охоплювати кілька компонентів.

Компонент, що входить до підскладальної одиниці (на будь-якому рівні вкладеності), може брати участь у кроці рознесення незалежно від інших її компонентів.

Щоб виключити компонент із кроку рознесення, вкажіть його повторно або виділіть його назву в списку й натисніть «Видалити».

Вибір об’єкта, який задає напрям рознесення. Компоненти можна розносити в напрямі ребра або перпендикулярно до грані. Натисніть кнопку «Об’єкт» на панелі

властивостей і вкажіть у вікні моделі потрібне ребро чи грань. Вибраний елемент підсвітиться, а його назва з’явиться в довідковому полі вкладки «Параметри».

Щоб обрати інший елемент, який визначає напрям рознесення, вкажіть його курсором. Виділення попереднього елемента зникне, а для виконання операції буде вибрано нове ребро чи грань.

4. МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ’ЄКТІВ У САПР

4.1. Призначення параметризації. Непараметричні та параметричні моделі геометричних об’єктів у САПР

Процес проєктування й конструювання зазвичай є ітераційним і передбачає розгляд кількох варіантів, тому спрощення й автоматизація побудови моделі майбутнього виробу належать до найважливіших завдань САПР.

Одним із поширених методів розв’язання цього завдання є параметричне проєктування (параметризація), що ґрунтується на моделюванні деталей і виробів із використанням параметрів елементів моделі та співвідношень між ними. Параметризація дає змогу за короткий час, змінюючи параметри або геометричні співвідношення, розглянути різні конструктивні схеми, обрати оптимальні рішення та уникнути принципових помилок.

Технологія параметричного конструювання дозволяє за потреби легко змінювати форму моделі, швидко й ефективно отримувати альтернативні конструкції або переглядати концепцію виробу загалом. Без засобів параметричного конструювання модель визначається лише своєю геометрією, тому навіть незначні зміни потребують великих витрат праці. Зміни до параметричної моделі вносяться так само просто, як коригування значень розмірів на кресленнях.

Параметризація дозволяє за короткий час шляхом зміни параметрів або геометричних співвідношень отримувати різні конструктивні схеми й уникати принципових помилок.

Перші програми з можливістю параметризації з’явилися 1989 року. Першопрохідцями були Pro/Engineer (тривимірне твердотільне параметричне

моделювання) компанії Parametric Technology Corporation і T-FLEX CAD (двовимірне параметричне моделювання) компанії «Топ Системы».

4.2. Методи параметризації 2D- і 3D-моделей у САПР

Параметричне проєктування істотно відрізняється від звичайного двовимірного креслення або тривимірного моделювання. По суті, створюється математична модель об'єктів із параметрами, зміна яких змінює конфігурацію та розміри деталей, їх взаємне розташування у складальних одиницях тощо.

На практиці застосовують багато різних методів параметризації. Розглянемо найпоширеніші з них.

Таблична параметризація. Її сутність полягає у створенні таблиці (табл. 4.1) параметрів типових деталей (рис. 4.1).

Таблиця 4.1

Параметричні значення гайкового ключа

Позначення	A (дюйми)	B (мм)	B′ (мм)	C (мм)	C′ (мм)	L (мм)	Маса (г)
40.1/4	1/4″	15	10,4	3,6	6	113	18
40.5/16	5/16″	19,5	12,9	4,3	6	130	28
40.11/32	11/32″	21,5	14,2	4,3	6,1	137	34
40.3/8	3/8″	23,6	15,9	4,8	6,6	145	40
40.7/16	7/16″	25,6	17	5,1	7	153	53
40.1/2	1/2″	29,4	19,8	5,6	8	170	70
40.9/16	9/16″	31,5	21,2	6	8,5	178	80
40.5/8	5/8″	35,5	23,8	6,9	9,8	193	104
40.11/16	11/16″	37,5	25	7	10,3	200	120
40.3/4	3/4″	41,8	29,4	7,6	11,3	216	160
40.13/16	13/16″	44	29,4	8	11,6	224	172
40.7/8	7/8″	48	32	8,2	12,3	248	212

Позначення	A (дюйми)	B (мм)	B′ (мм)	C (мм)	C′ (мм)	L (мм)	Маса (г)
40.15/16	15/16″	52	34,7	8,5	12,9	268	270
40.1	1″	54,4	36,3	8,5	13,2	270	297
40.1/16	1 1/16″	59	39	8,8	14	294	355
40.1/8	1 1/8″	61,6	41	9	14,4	305	394
40.1/4	1 1/4″	68,8	45	10,1	15	356	575

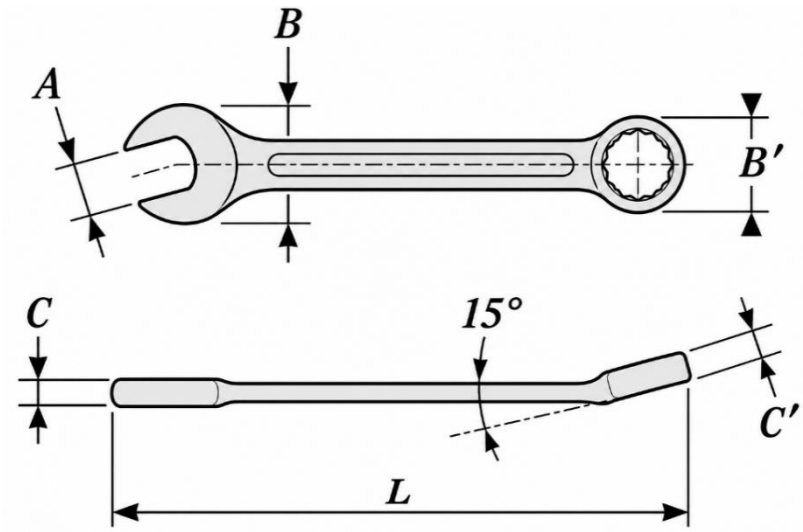


Рис. 4.1. Параметри гайкового ключа.

Новий екземпляр деталі створюють вибором відповідного типорозміру з таблиці. Можливості табличної параметризації досить обмежені, оскільки задання довільних нових значень параметрів і геометричних співвідношень зазвичай неможливе. Проте табличну параметризацію широко застосовують у параметричних САПР, адже вона значно спрощує й прискорює створення бібліотек стандартних і типових деталей та їх використання під час конструкторського проєктування.

Ієрархічна параметризація. Її також називають параметризацією на основі історії побудов. Під час створення моделі вся послідовність операцій відображається в окремому вікні у вигляді «дерева побудови» (рис. 4.2). У ньому в порядку створення перелічено всі допоміжні елементи, ескізи й виконані операції.

Окрім послідовності побудов, система запам’ятовує ієрархію елементів моделі (відношення між ними), наприклад: складальна одиниця → підскладальна одиниця → деталі. Параметризація на основі історії побудов наявна практично в усіх САПР із тривимірним твердотільним параметричним моделюванням. Зазвичай її поєднують із варіаційною та/або геометричною параметризацією.

Варіаційна (розмірна) параметризація. Варіаційна, або розмірна, параметризація ґрунтується на створенні ескізів із накладанням різних параметричних зв’язків та на заданні користувачем обмежень як системи рівнянь, що визначають залежності між параметрами (рис. 4.2).

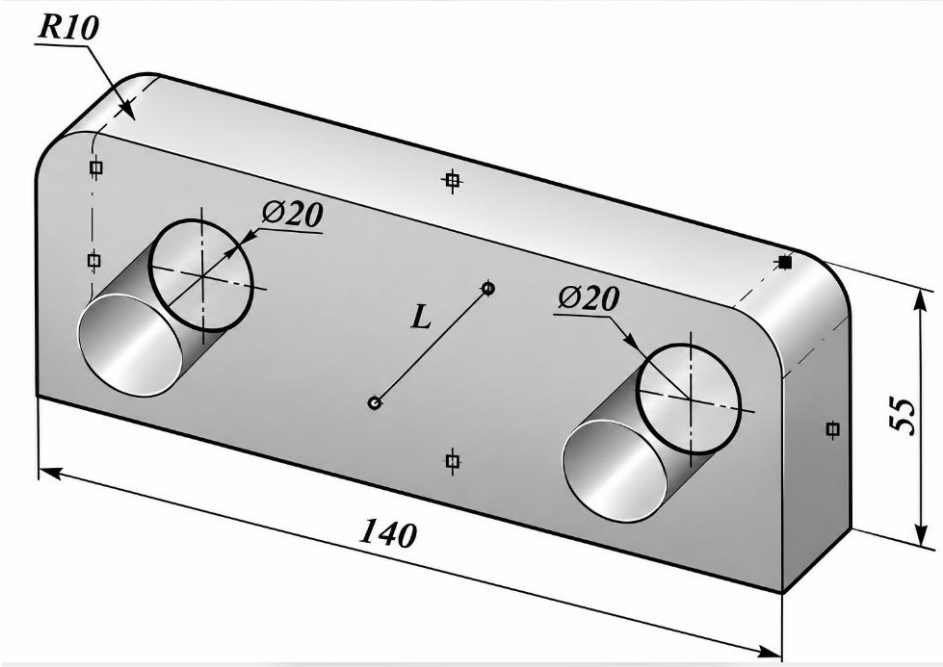


Рис. 4.2. Геометрична модель із варіаційною параметризацією.

Процес створення параметричної моделі з використанням варіаційної параметризації:

1. На першому етапі створюють ескіз (профіль) для тривимірної операції. На ескіз накладають необхідні параметричні зв’язки.

2. Потім на ескіз наносять розміри, уточнюючи окремі розміри профілю. Деякі з них можна визначити як змінні (наприклад, присвоїти назву Length) і задати залежності інших розмірів у вигляді формул (наприклад, Length/2).

3. Далі виконують тривимірну операцію (наприклад, видавлювання), атрибути якої також є параметрами (наприклад, величина видавлювання).

4. За потреби створення складальної одиниці взаємне розташування її компонентів задають через спряження між ними (збіг, паралельність або перпендикулярність граней і ребер, розташування об’єктів на певній відстані або під заданим кутом тощо).

Варіаційна параметризація дає змогу легко змінювати форму ескізу або значення параметрів операцій і таким чином зручно модифікувати тривимірну модель.

Окремим випадком розмірної параметризації є так звана «евристична» параметризація. Спочатку послідовно створюють ескіз і наносять на нього розміри; потім операцією видавлювання отримують геометричну модель (рис. 4.3, а). Далі редагують значення розмірів та виконують операцію «Евристична параметризація», унаслідок якої геометрія профілю змінюється автоматично (рис. 4.3, б).

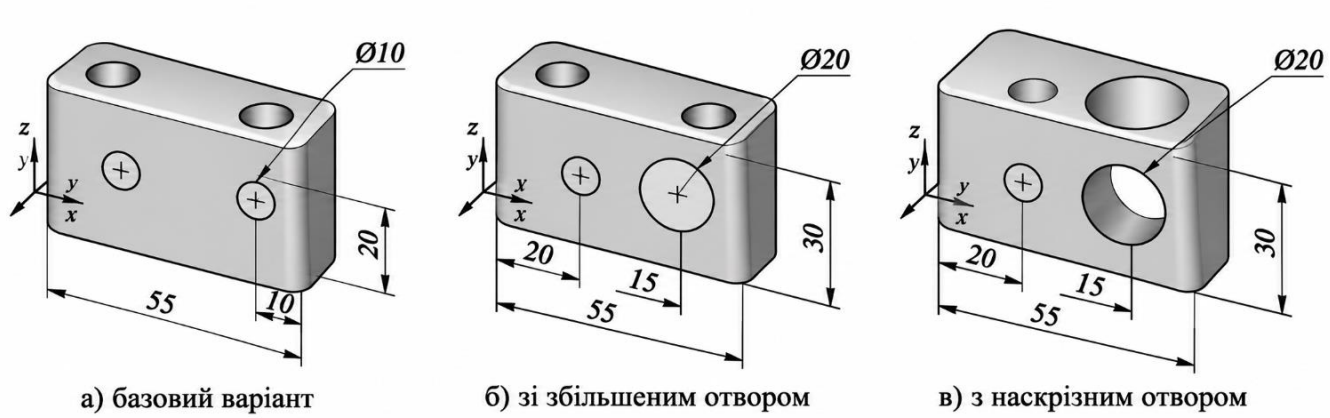


Рис. 4.3. «Евристична» параметризація (а, б, в).

Геометрична параметризація. Так називають параметричне моделювання, за якого геометрія кожного параметричного об’єкта перераховується залежно від положення батьківських об’єктів, його параметрів і змінних.

За геометричної параметризації параметрична модель складається з елементів побудови та елементів зображення. Елементи побудови (конструкторські або допоміжні лінії) задають параметричні зв’язки. До елементів зображення належать лінії зображення (якими обводять конструкторські лінії), а також елементи оформлення (розміри, написи, штрихування тощо). Одні елементи побудови можуть залежати від інших.

Елементи побудови також можуть містити параметри (наприклад, радіус кола або кут нахилу прямої). Коли один з елементів моделі змінюється, усі залежні від нього елементи перебудовуються відповідно до своїх параметрів і способів їх задання.

Процес створення параметричної моделі методом геометричної параметризації:

1. Спочатку конструктор задає геометрію профілю конструкторськими лініями та позначає ключові точки.

2. Далі наносять розміри між конструкторськими лініями. На цьому етапі можна задати взаємозалежність розмірів.

3. Потім конструкторські лінії обводять лініями зображення, отримуючи профіль, на якому можна виконувати різні тривимірні операції.

Наступні етапи загалом подібні до моделювання із застосуванням варіаційної параметризації.

Геометрична параметризація забезпечує гнучкіше редагування моделі. Якщо потрібно внести незаплановану зміну до геометрії, необов'язково видаляти початкові лінії побудови (це може призвести до втрати асоціативних зв'язків між елементами моделі). Можна провести нову лінію побудови й перенести на неї лінію зображення.

4.3. Обмеження в системах параметризації: розмірні, топологічні, функціональні, логічні

Обмеження – будь-яка умова побудови моделі, яка пов'язує положення або форму окремого примітива з іншими примітивами.

Сукупність примітивів об'єкта та обмежень повністю визначає його параметричну модель. Види обмежень показано на рис. 4.4.

Логічні обмеження визначають допустимі умови відношень між окремими геометричними параметрами об'єктів. Вони запобігають отриманню під час модифікації фізично неможливої форми об'єкта.

Функціональні обмеження охоплюють усі можливі вирази, які визначають одні семантично залежні параметри об'єкта через інші, раніше визначені. Такі обмеження є функціонально заданими розмірними позначеннями.

Топологічні обмеження визначають взаємозв'язки графічних примітивів і поряд з іншими обмеженнями впливають на форму об'єкта. До них належать збіг точок різних примітивів, дотик, паралельність, перпендикулярність, співвісність і симетрія.

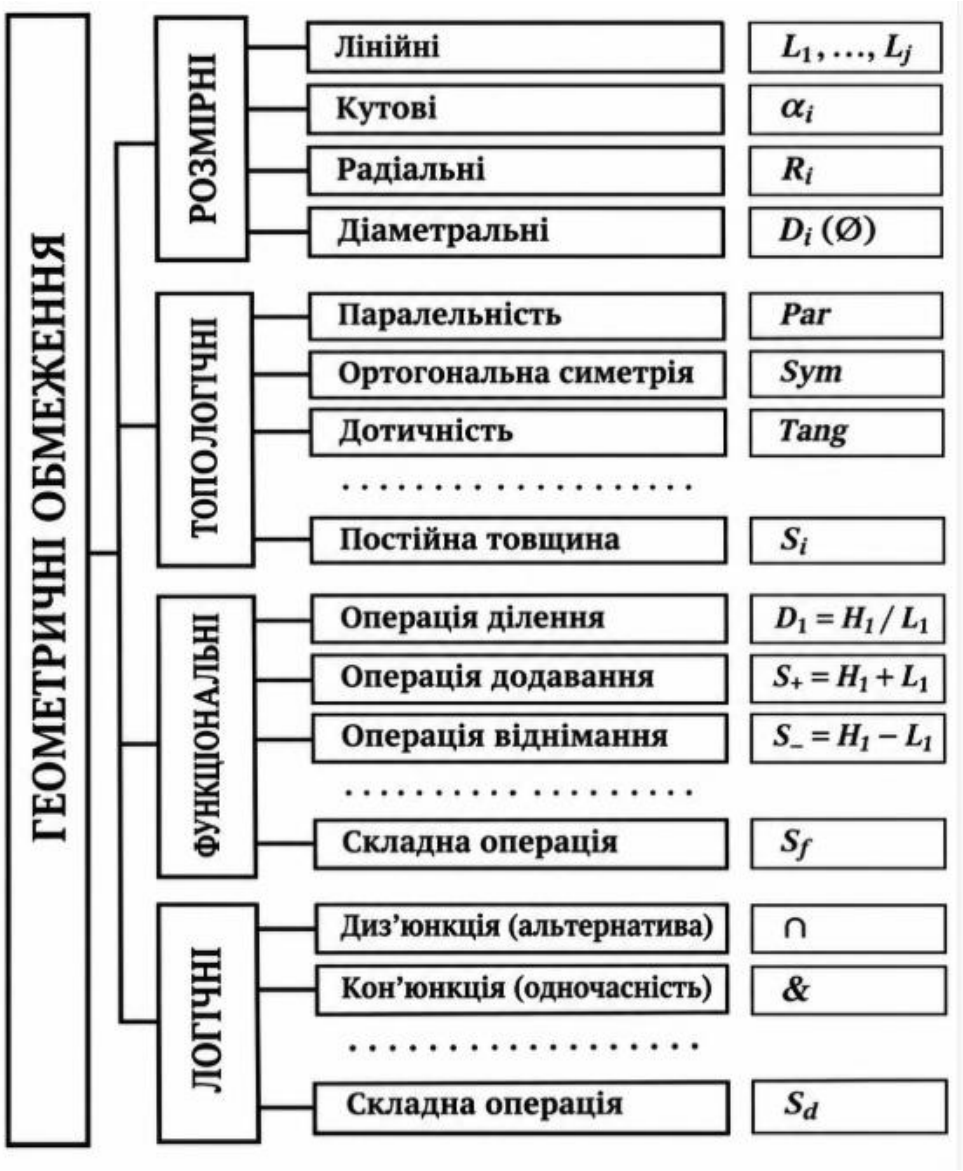


Рис. 4.4. Класифікація обмежень.

До топологічних обмежень також належать вимоги щодо належності примітивів до певного виду, рівності довжин відрізків, радіусів дуг і кіл, сталості товщини деталі тощо.

Уведення топологічних обмежень зменшує кількість розмірних обмежень, необхідних для створення параметричних описів моделей конструкторських об'єктів.

Розмірні обмеження охоплюють сукупність розмірів, числові значення яких задають положення базових точок примітивів графічного об’єкта відносно обраної системи координат або раніше визначених примітивів цього об’єкта. До них належать лінійні, радіальні, діаметральні й кутові розміри.

4.4. Параметризація геометричних об’єктів. Ступені вільності

У САПР AUTOCAD-3D реалізовано варіаційний спосіб параметризації зображень. Це означає, що під час роботи з кресленням, фрагментом або ескізом тривимірного елемента можна накладати на об’єкти зображення різні розмірні (лінійні, кутові, радіальні, діаметральні) та геометричні (паралельність, перпендикулярність, дотик, належність точки кривій, фіксація точки тощо) обмеження.

AUTOCAD-3D надає користувачеві можливість установлювати такі зв’язки й обмеження:

– вертикальність об’єктів*;

– горизонтальність об’єктів*;

– колінеарність відрізків*;

– паралельність об’єктів*;

– перпендикулярність об’єктів*;

– вирівнювання характерних точок об’єктів за вертикаллю*;

– вирівнювання характерних точок об’єктів за горизонталлю*;

– дзеркальна симетрія*;

– рівність радіусів дуг і кіл;

– рівність довжин відрізків;

– дотик кривих*;

– об’єднання характерних точок об’єктів*;

– належність точки кривій*;

– фіксація характерних точок об’єктів;

– фіксація* й редагування розмірів;

– присвоєння розміру імені змінної.

Зв’язки й обмеження, позначені зірочкою (*), можуть накладатися автоматично.

Команди накладання перелічених зв’язків і обмежень згруповані на панелі «Параметризація» (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Види зв’язків та обмежень

Обмеження	Розташування позначки	Результат
Вертикальність	Риска посередині відрізка	Забезпечує вертикальність прямолінійного об’єкта (відрізка, осьової лінії, допоміжної прямої, стрілки напряму погляду, лінії розрізу тощо)
Горизонтальність	Риска посередині відрізка	Забезпечує горизонтальність прямолінійного об’єкта (відрізка, осьової лінії, допоміжної прямої, стрілки напряму погляду, лінії розрізу тощо)
Вирівнювання за вертикаллю	Штриховий вертикальний відрізок, що з’єднує вирівняні точки	Забезпечує розташування точок на одній вертикальній прямій. Накладається на об’єкти, яким належать ці точки
Вирівнювання за горизонталлю	Штриховий горизонтальний відрізок, що з’єднує вирівняні точки	Забезпечує розташування точок на одній горизонтальній прямій.

Обмеження	Розташування позначки	Результат
		Накладається на об’єкти, яким належать ці точки
Паралельність	Похила подвійна риска посередині відрізка	Забезпечує паралельність прямолінійних об’єктів (відрізків, допоміжних прямих, осьових ліній, стрілок напряму погляду, ліній розрізу тощо)
Колінеарність	Дві поздовжні риски біля середини відрізка	Забезпечує розміщення відрізків на одній прямій
Концентричність*	Два концентричні кола збоку від контуру	Забезпечує збіг центрів кіл/еліпсів та/або їхніх дуг
Дотик	У точці дотику; за потреби криві продовжуються до точки дотику штриховою лінією	Забезпечує дотик кривих (дотикатися можуть як самі криві, так і їхні продовження)
Бісектриса*	Посередині кожного відрізка	Забезпечує розташування прямолінійного об’єкта на бісектрисі кута, утвореного двома іншими прямолінійними об’єктами
Об’єднати точки*	У точці	Забезпечує збіг точок. Накладається на об’єкти, яким належать ці точки
Фіксована точка/довжина/кут	Трикутник у точці; дві риски кутом посередині	Забезпечує збереження положення точки, довжини або кута. Накладається на

Обмеження	Розташування позначки	Результат
	відрізка; дві зворотні риски посередині відрізка	об’єкт, якому належить відповідна точка
Рівність	Дві паралельні риски посередині відрізка або дві короткі дуги поряд із колом	Забезпечує рівність довжин прямолінійних об’єктів (відрізків, осьових ліній), радіусів дуг та/або діаметрів кіл
Симетрія двох точок	Штриховий відрізок, що поєднує симетричні точки, та квадрат у точці його перетину з віссю	Забезпечує симетричне розташування об’єктів

Можливість параметризації деяких складних об’єктів, зокрема ламаної, кривої Безьє, контуру, еквідистанти, тексту, таблиці, макроелемента й елементів оформлення креслення, не передбачена.

5. МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ І ВИРОБІВ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ

5.1. Проєктування металоконструкцій за допомогою прикладних бібліотек

Конструктору-машинобудівнику час від часу доводиться працювати з виробами з металопрокату. Це актуально в багатьох сферах: установити електропривод на раму, зібрати каркас для обладнання тощо. У AUTOCAD-3D для таких робіт розроблено спеціалізований застосунок, призначений для автоматизації типових завдань проєктування металоконструкцій. Застосунок «Обладнання: Металоконструкції» використовують для створення металоконструкцій і каркасних споруд із профілів металопрокату.

Застосунок дає змогу:

– створювати просторові конструкції за допомогою каталогу сортаментів, довідника «Матеріали й сортаменти» або бібліотеки фрагментів користувача;

– обробляти торці, кутові ділянки та стики об’єктів;

– редагувати профілі шляхом зміни довжини, обрізання поверхнями тощо;

– будувати пластини й ребра жорсткості, що з’єднують профілі з іншими об’єктами моделі;

– створювати на об’єктах фаски, пази та групи отворів;

– вставляти графічне зображення перерізу профілю з каталогу в документ (*.cdw, *.frw).

5.2. Створення тривимірних ескізів і каркасів

Основні поняття:

Профіль – модель, створена за однією або кількома напрямними з використанням екземпляра сортаменту.

Каталог – набір екземплярів сортаментів (кутників, швелерів, двотаврів тощо), які застосовують для побудови профілів.

Напрямна – просторова крива, за якою будують профіль. Якщо профіль побудовано за точками, напрямною вважають відрізок, що з’єднує початкову й кінцеву точки.

Позиціонувальні точки – точки на перерізі профілю або пластині, які використовують для побудови об’єктів або їх розміщення в моделі.

Напрям за об’єктом – задання напрямній профілю, стороні пластини або осям групи отворів напряму, який збігається з напрямом наявного в моделі об’єкта.

Орієнтація за об’єктом – задання профілю орієнтації (позиціонувальної точки, кута повороту перерізу й зміщення відносно напрямної), що збігається з орієнтацією наявного профілю.

Конструкцію створюють на основі напрямних і вибраного сортаменту. Як напрямні можна використовувати прямолінійні сегменти ескізів або ламаних, а також прямолінійні ребра твердих тіл. Сортамент користувач вибирає вручну з контейнера шаблонів або він задається автоматично під час вибору його екземпляра в бібліотеці «Матеріали й сортаменти» (або аналогічному корпоративному довіднику).

Під час побудови нового елемента користувачеві доступні різні способи визначення просторової орієнтації конструкції: зміна позиціонувальної точки, дзеркальне відображення, поворот і зміщення. Можна також задавати способи оброблення деталей: кутове оброблення ділянок, поділ прямолінійних елементів металоконструкції, відступ від вузлів напрямних.

Передбачено коригування довжини деталей одного чи кількох каркасів шляхом обрізання або подовження до площин, кутове оброблення торців, створення відступів торців деталей металоконструкцій від вузлів напрямних.

Усі параметри й властивості побудованих об’єктів можна редагувати. Для полегшення роботи бібліотека «Металоконструкції 3D» містить контейнер шаблонів із сортаментами за вітчизняними стандартами (ДСТУ, ТУ тощо). Проте найефективнішою є спільна робота цієї бібліотеки з довідником «Матеріали й сортаменти».

Створення металоконструкції у застосунку починається з побудови тривимірного каркаса – геометричних осей, які є ескізом конструкції. Після цього кожній осі призначають профіль. Його сортамент можна вибрати з нового «Каталогу профілів», який постачається із застосунком, або з довідника «Матеріали й сортаменти» для AUTOCAD-3D.

Для зручності побудови й редагування металоконструкцій реалізовано механізм характерних точок, що дозволяє задавати довжину й кут повороту профілю безпосередньо у вікні побудови. Коли тривимірний каркас змінюється, металоконструкція автоматично перебудовується.

Профіль будують відповідними командами:

– профіль за точками;

– профіль за кривою;

– профілі за напрямними.

Після призначення профілів необхідно опрацювати окремі вузли металоконструкції. Застосунок містить спеціальні інструменти для коригування довжин деталей, кутового або стикового оброблення.

Сортаменти вибирають із каталогу, що містить різні типи профілів, зокрема кутники, швелери, двотаври тощо.

У вікні розміщено панель перемикання типів сортаментів, область перегляду й таблицю типорозмірів. У вікні перегляду показано поточний профіль, а поруч – елементи керування для вибору типорозміру або введення значення з клавіатури. Таблиця містить перелік марок сортаментів, доступних для вибору. Параметри поточного сортаменту відображаються в полях перегляду.

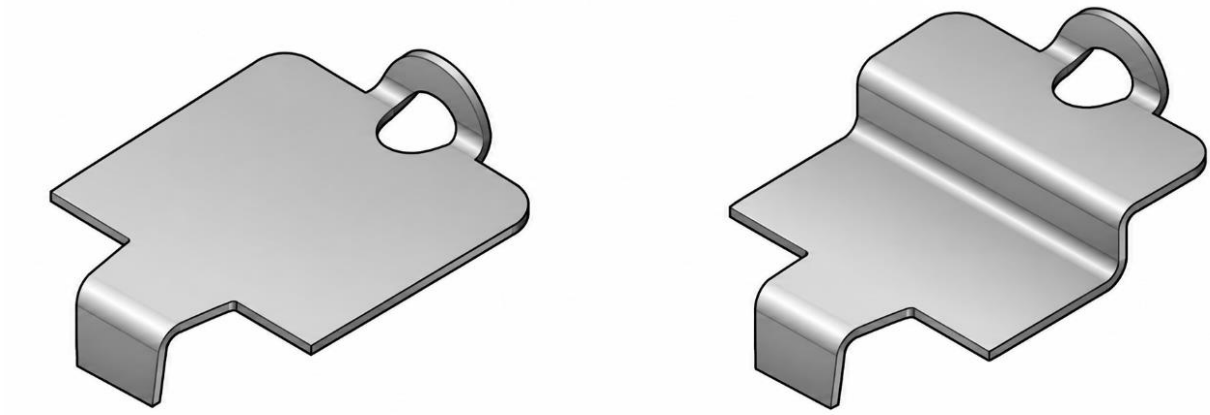
5.3. Побудова підрізів, ребер жорсткості та груп отворів

Із листовою деталлю можна працювати як зі звичайною моделлю: додавати й вирізати формоутворювальні елементи будь-якого типу, а також створювати конструктивні елементи – заокруглення, фаски, ребра, отвори тощо.

У застосунку є спеціальні інструменти для побудови додаткових елементів, зокрема ребер жорсткості або фасок.

Підріз – команда для створення одразу двох згинів уздовж прямої лінії відносно певної грані деталі.

Приклад використання команди «Підріз» наведено на рис. 5.1.



а) без ребра жорсткості б) з ребром жорсткості

Рис. 5.1. Приклад формування двох згинів уздовж прямої лінії:
а – ескіз; б – результат побудови підрізу.

5.4. Формування КД на металоконструкції

На основі отриманої тривимірної моделі легко сформувати проєкційні види, розрізи й виносні вузли, які можна розмістити на початковому кресленні або в нових документах.

Для конструкції, створеної за допомогою застосунку, можна автоматично отримати специфікацію або інші види налаштовуваних звітів. Спроєктовану металоконструкцію можна перевірити на перетини: тривимірна модель дає змогу відразу виявити можливі неузгодженості.

5.5. Методика створення виробів із листового прокату

Сьогодні з листового матеріалу виготовляють понад половину всіх деталей і вузлів різноманітних конструкцій. Несівні корпуси літаків, автомобілів, суден, космічних апаратів, механізмів і приладів сконструйовано з листових матеріалів. Це насамперед пов’язано зі зменшенням маси конструкції та оптимізацією коефіцієнта використання матеріалу.

Виготовлення виробів із листового матеріалу безпосередньо пов’язане з такими технологіями, як механічне, газове й лазерне різання; згинання; листове штампування (витягування, формування, обтискання, обтягування тощо).

До листових деталей належать конструкції з листового металу однакової товщини S. Їх використовують як кронштейни, резервуари, короби, кожухи, скоби, шайби тощо (рис. 5.2).

Особливістю листової деталі є можливість її згинання та розгинання.

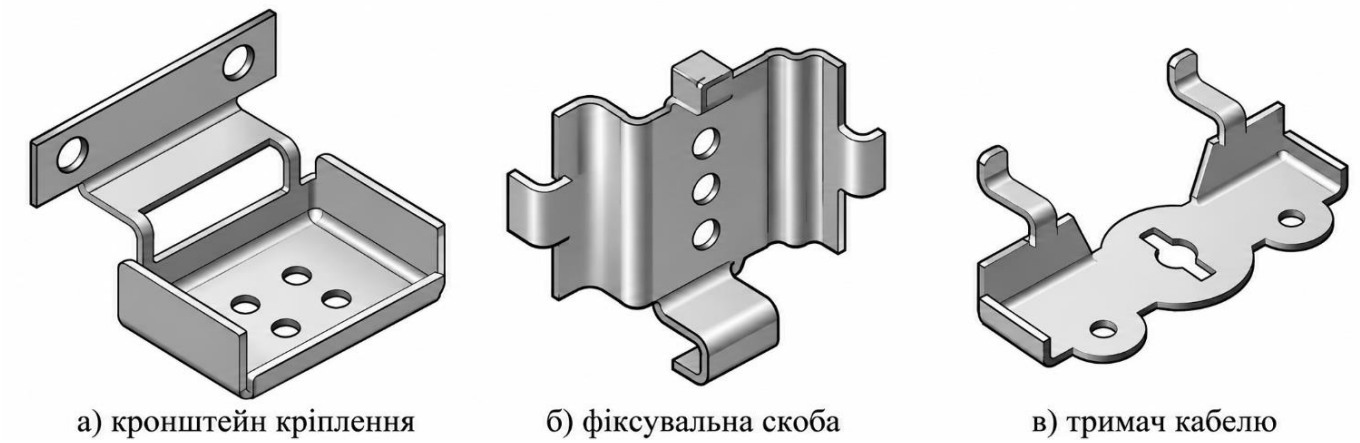


Рис. 5.2. Приклади листових деталей.

Оскільки методика моделювання листових деталей істотно відрізняється від моделювання інших твердих тіл, у AUTOCAD-3D передбачено окрему інструментальну панель «Листове моделювання» з командами для роботи з такими деталями.

Побудова листового тіла. Листове тіло будують командою «Листове тіло». Її можна викликати через інструментальну область: «Листове моделювання → Елементи листового тіла → Листове тіло» або меню: «Моделювання → Листове моделювання → Листове тіло» (рис. 5.3).

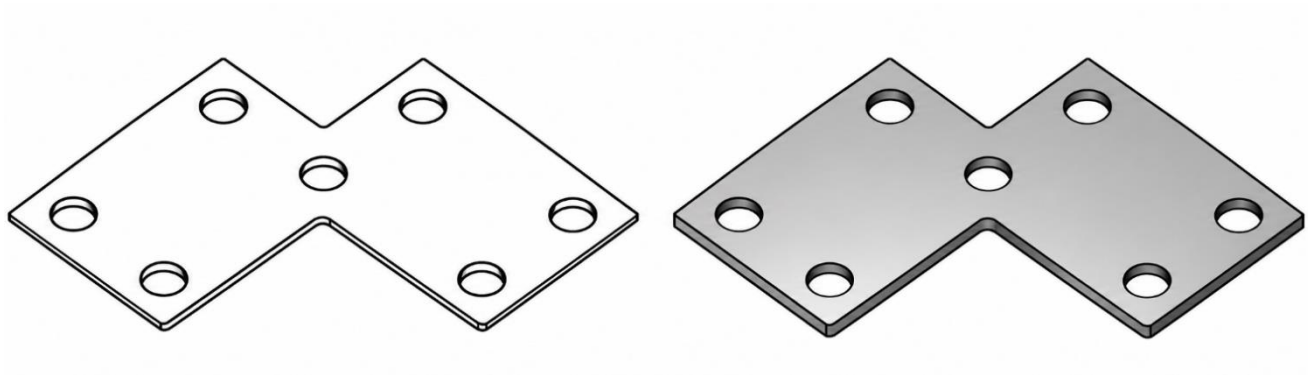


Рис. 5.3. Інструментальна панель «Листове моделювання».

Моделювання листової деталі починають зі створення листового тіла – першого елемента деталі. Далі до нього додають решту елементів: згини, виступи, лапки, у яких згодом можна створювати отвори й вирізи.

Існує два способи побудови листового тіла:

– на основі замкненого ескізу;

– на основі незамкненого ескізу.

Замкнений ескіз видавлюють на задану величину в напрямі, перпендикулярному до його площини.

Незамкнений ескіз видавлюють в один або обидва боки на задану відстань, а до отриманої поверхні додають товщину. Відрізки ескізу формують плоскі ділянки листового тіла, дуги – згини відповідних радіусів, а кути контуру – згини з радіусом, заданим користувачем (рис. 5.4).

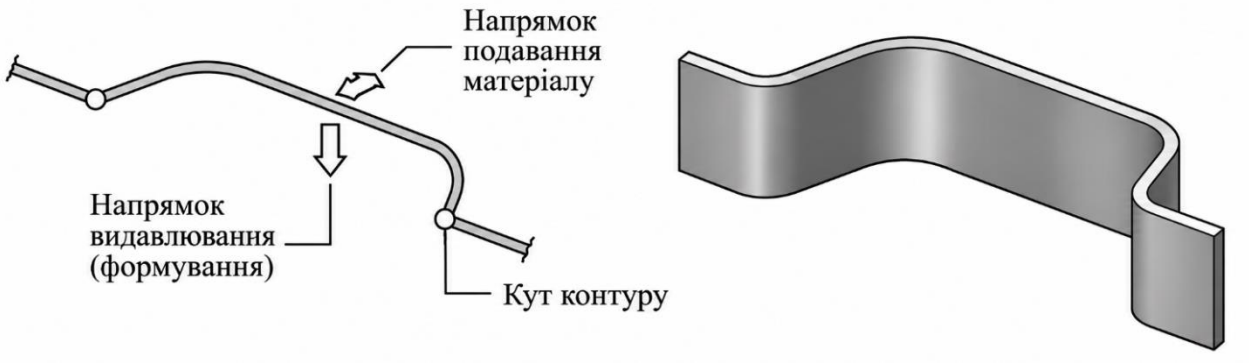


Рис. 5.4. Побудова листового тіла на основі незамкненого ескізу:

а – ескіз; б – листове тіло.

5.6. Створення конструктивних елементів листових тіл

До конструктивних елементів листових тіл належать:

– пластина;

– відкрите/закрите штампування;

– жалюзі;

– буртик;

– ребро підсилення.

Для створення цих елементів потрібно вибрати відповідну команду з меню «Моделювання» на панелі «Листове моделювання».

У листовій деталі можна створювати отвори й вирізи довільної форми. Теоретично їх можна виконати звичайною для тривимірних моделей командою «Вирізати видавлюванням». Проте для отворів і вирізів у листових деталях рекомендовано використовувати спеціальні команди «Отвір у листовому тілі» та «Виріз у листовому тілі» на панелі «Елементи листового тіла», оскільки вони враховують особливості побудови листових тіл (рис. 5.5).

Команда «Пластина» дозволяє додавати до листової деталі плоскі елементи – пластини. Пластину формують видавлюванням замкненого ескізу на глибину, що дорівнює товщині матеріалу деталі (рис. 5.6). Контур ескізу пластини має перетинати контур базової грані.

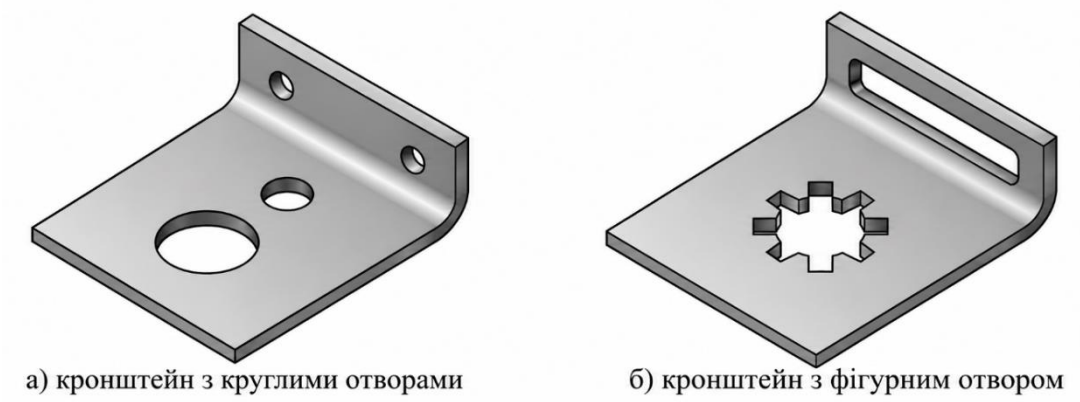


Рис. 5.5. Приклади побудови в листовій деталі:

а – отворів; б – вирізів.

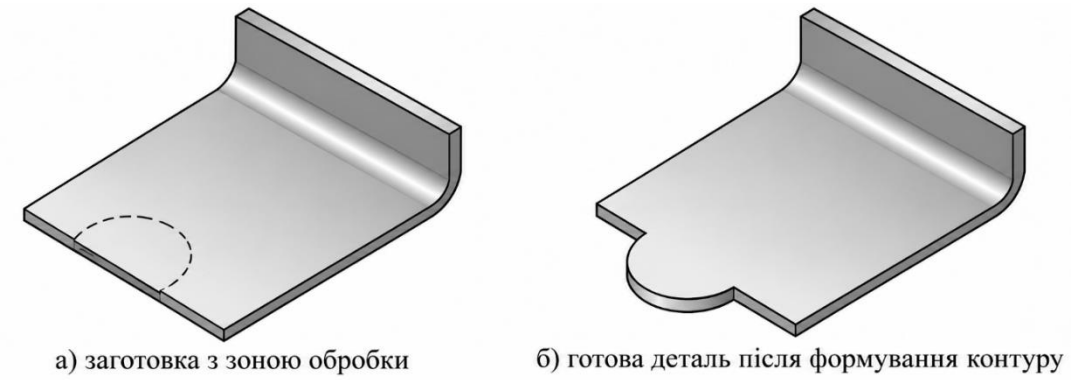


Рис. 5.6. Формування пластини в листовій деталі: а – ескіз; б – результат операції.

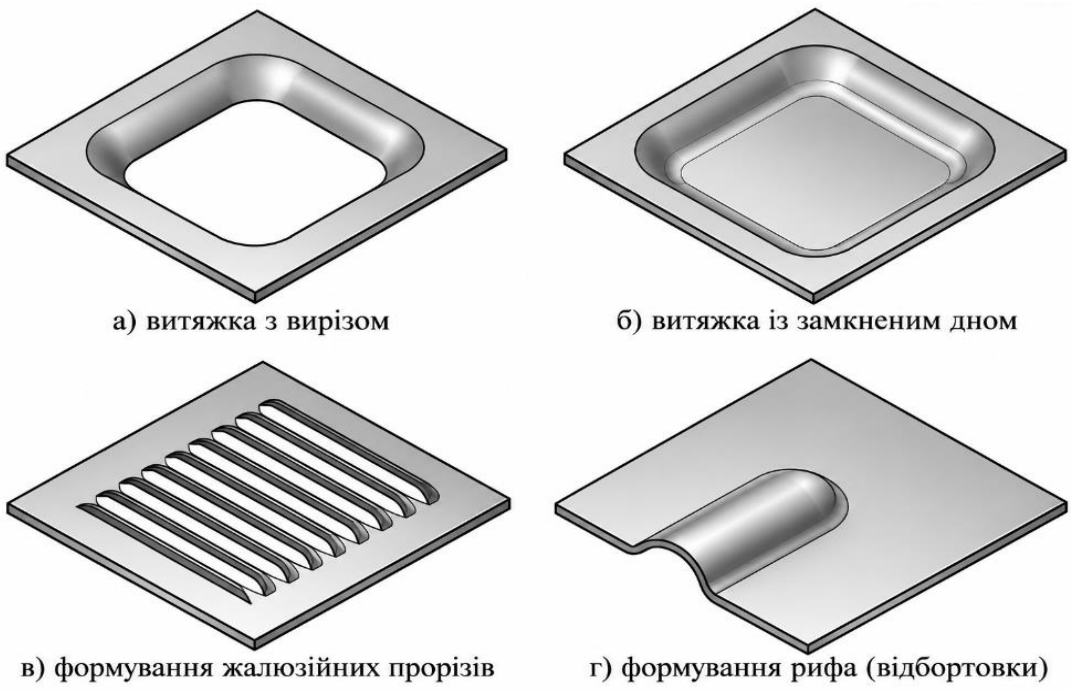


Рис. 5.7. Формування штампованих деталей:

а – відкрите штампування; б – закрите штампування; в – жалюзі; г – буртик.

Штамповані деталі, сформовані за допомогою команд «Відкрите штампування», «Закрите штампування», «Жалюзі», «Буртик», показано на рис. 5.7.

Фактично штампування належить не до операцій згинання, а до деформування, під час якого листовий матеріал витягується й зменшується його товщина. Під час виконання команд формування штампованих деталей у AUTOCAD-3D ця зміна товщини матеріалу не враховується.

5.7. Створення розгорток

Фактично штампування належить не до операцій згинання, а до деформування, під час якого листовий матеріал витягується й зменшується його товщина. Під час виконання команд формування штампованих деталей у AUTOCAD-3D ця зміна товщини матеріалу не враховується.

Отвори, вирізи та деякі інші конструктивні елементи зручніше формувати, коли згини листового тіла розгорнуті. Щоб розігнути чи зігнути один або кілька згинів листової деталі, застосовують відповідно команди «Розігнути» або «Зігнути» на панелі «Елементи листового тіла».

Розгинання згину показано на рис. 5.8.

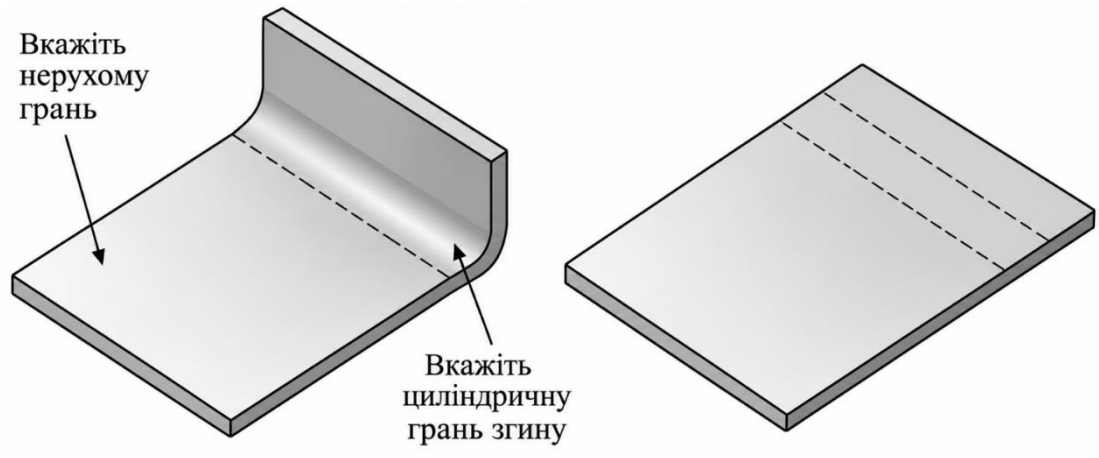


Рис. 5.8. Розгинання згину:

а – задання параметрів згину; б – результат операції.

Можна одночасно розігнути всі згини листової деталі й отримати її плоску проєкцію – розгортку.

Для формування розгортки в системі передбачено дві команди: «Параметри розгортки» та «Розгортка».

Команду «Параметри розгортки» використовують для встановлення її характеристик: вибору нерухомої грані й визначення станів згинів.

Після встановлення параметрів стає доступною команда «Розгортка», яка переводить модель у режим розгорнутого відображення.

Якщо для листової деталі задано параметри розгортки, надалі можна легко створити її асоціативне креслення. Для цього необхідно:

1. Створити документ типу «Креслення».

2. Задати потрібний формат та орієнтацію аркуша.

3. Створити «Довільний вид» на інструментальній панелі «Асоціативні види».

4. На панелі властивостей розкрити список «Орієнтація», вибрати «Розгортка», задати масштаб та активувати спеціальну кнопку-перемикач «Розгортка».

5. Указати положення виду на аркуші – система побудує двовимірне креслення розгортки листової деталі.

5.8. Методика формування КД на вироби з листового прокату

Креслення листових деталей, окрім основних зображень готової деталі, містять повну або часткову її розгортку, яку креслять суцільними основними лініями. Розгортка визначає форму й розміри деталі до згинання. На кресленні зазначають внутрішній радіус згину, а довжину дуги для розгортки розраховують за середньою лінією.

На зображенні розгортки наносять лише розміри, які неможливо вказати на зображенні готової деталі.

Приклад оформлення креслення листового тіла з розгорткою наведено на рис. 5.9. Над її зображенням ставлять умовний знак розгортки.

Якщо розгортку неможливо розмістити разом із кресленням, її виносять на окремий аркуш креслення деталі.

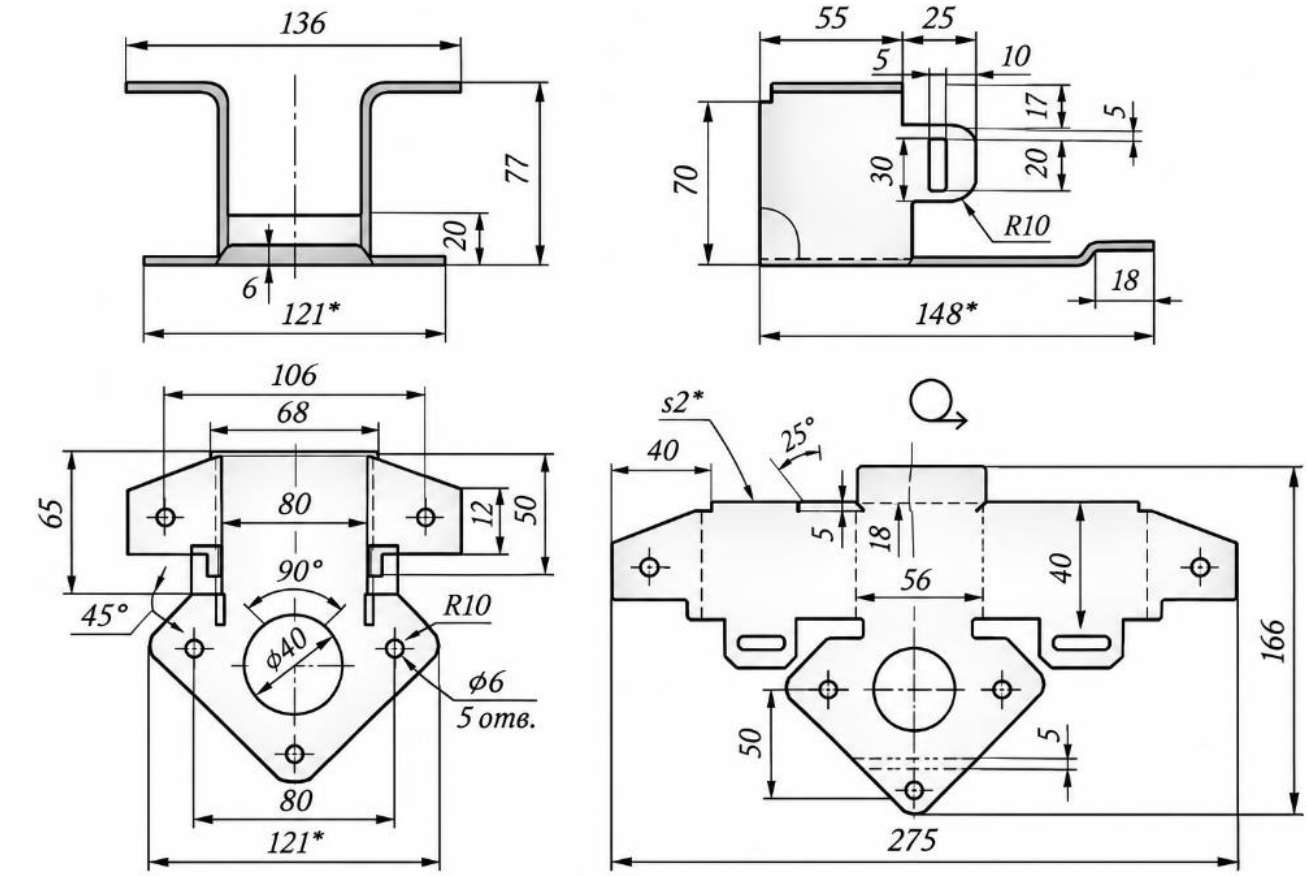


Рис. 5.9. Оформлення креслення деталі та розгортки на одному аркуші.

На розгортці позначають лінії згину й роблять відповідні написи. Мінімально допустимий радіус згину Rmin залежить від товщини, пластичних властивостей вихідного матеріалу та кута згину й регламентується стандартами.

Для навчальних цілей можна прийняти:

$$Rmin = S,$$

де S – товщина листа.

Особливу увагу необхідно приділяти правильному визначенню розмірів у місцях згину деталі.

6. ПРИКЛАДНІ БІБЛІОТЕКИ САПР

6.1. Прикладні бібліотеки (модулі, застосунки) САПР

Бібліотека – застосунок, створений для розширення стандартних можливостей AUTOCAD, який працює в його середовищі. Типовий приклад – бібліотека, що постачається разом із системою. Вона містить функції побудови поширених

геометричних фігур, гладких і різьбових отворів тощо, а також окрему бібліотеку стандартних машинобудівних елементів, що значно прискорює проєктування складальних одиниць і оформлення складальних креслень.

Окрім зазначених, AUTOCAD містить такі основні бібліотеки:

– AUTOCAD-SHAFT 2D, 3D – системи розрахунку (разом із комплексом програм Gears) і 2D-, 3D-моделювання тіл обертання та механічних передач;

– «Механіка: Пружини» – система розрахунку й проєктування пружин розтягу, стиску, кручення, а також тарілчастих, конічних і фасонних пружин;

– «Обладнання: Металоконструкції» – автоматизація типових завдань проєктування каркасів і рам із металопрокату;

– «Обладнання: Трубопроводи» – автоматизація типових завдань проєктування трубопроводів;

– «Обладнання: Системи вентиляції» – побудова розгалужених тривимірних моделей елементів вентиляційних систем (повітропроводів);

– «Обладнання: Розгортки» – швидке проєктування елементів пило-, газо-, повітропроводів, трубопроводів і подібних деталей листової конструкції;

– «Обладнання: Зварні з’єднання» – автоматизація типових робіт із позначення зварних з’єднань;

– «Штампи 3D» – автоматизація конструкторських і технологічних робіт під час проєктування штампів для виробів із листового матеріалу, з формуванням необхідного комплекту технічної документації.

– «Пресформи 3D» – автоматизація проєктно-конструкторських і технологічних робіт зі створення пресформ для лиття пластмасових виробів під тиском та формування комплекту технічної документації, необхідної для виготовлення пресформи;

– АРМ FEM – система міцнісного аналізу для експресрозрахунків твердотільних об’єктів у AUTOCAD-3D та візуалізації результатів;

– «АРМ FEM. Топологічна оптимізація» – застосунок для оптимізації розподілу матеріалу в області проєктування з урахуванням навантажень і закріплень. Дає змогу створювати модель із заданими експлуатаційними характеристиками, зменшуючи матеріаломісткість деталі або конструкції загалом;

– «Механіка: Анімація» – імітація руху вузлів і ланок машин, пристроїв, механізмів та приладів; перевірка можливих зіткнень компонентів під час їх руху для виявлення проєктних помилок;

– «Універсальний механізм Express» – спеціалізований багатофункціональний розрахунковий застосунок для завдань кінематики й динаміки механічних систем;

– KompasFlow – експресаналіз аерогідродинаміки виробу в AUTOCAD-3D на ранніх етапах проєктування, первинна оцінка впливу змін геометрії пристрою на його ефективність;

– «AUTOCAD-Експерт» – пошук і виправлення помилок у документах AUTOCAD-3D. Перевіряє моделі, креслення й специфікації, щоб конструктор міг виправити помилки до передачі документації у виробництво;

– «Система захисту документів» (у розробці) – захист електронних документів (креслень, специфікацій, тривимірних моделей тощо) AUTOCAD-3D від несанкціонованого доступу.

Прикладну бібліотеку можна створити в одному зі стандартних середовищ програмування для Windows (Borland C++, Microsoft Visual C++, Borland Pascal тощо), використовуючи функції спеціального комплекту розроблення застосунків «AUTOCAD-Майстер».

За архітектурою бібліотека є стандартним динамічно під’єднуваним модулем (dll) Windows. За замовчуванням файли бібліотек мають розширення *.dll або *.rtw.

Розглянуті бібліотеки забезпечують повне зчитування моделей AUTOCAD-3D. Процес роботи й результати бібліотеки візуалізуються в окремому вікні, де користувач може безпосередньо під час моделювання отримувати наочну інформацію про об’єкт і його характеристики (наприклад, динамічні та кінематичні).

6.2. Моделювання механічних передач, пружин та інших деталей із використанням прикладних бібліотек (застосунків) САПР

Механічні передачі призначені для перетворення кінематичних характеристик двигуна на необхідні параметри руху виконавчих органів машин.

Застосунок AUTOCAD-SHAFT 2D призначений для проєктування шліцьових, різьбових і шпонкових ділянок на ступенях моделей, а також інших конструктивних

елементів – канавок, проточок, пазів, лисок тощо. Такі елементи можна моделювати на простих геометричних тілах (рис. 6.1).

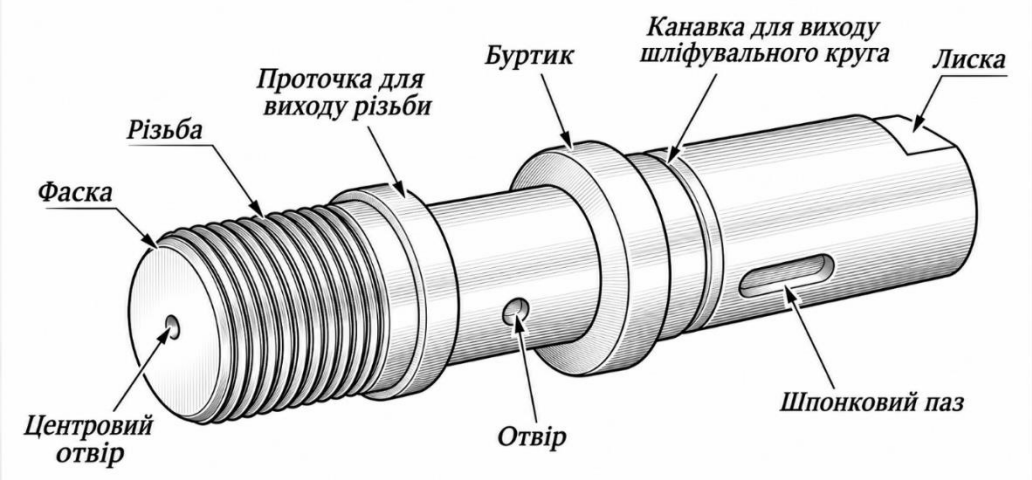


Рис. 6.1. Вал із різними конструктивними та технологічними елементами.

Ця бібліотека забезпечує параметричну побудову креслень шліцьових, різьбових і шпонкових ділянок на ступенях моделей, побудову валів і втулок, циліндричних та конічних зубчастих коліс, черв'ячних коліс і черв'яків.

Бібліотека також містить модуль розрахунку механічних передач AUTOCAD-GEARS 2D, призначений для геометричних і міцнісних розрахунків таких видів передач:

– циліндричної передачі із зовнішнім зачепленням;

– циліндричної передачі з внутрішнім зачепленням;

– конічної передачі з круговими зубцями;

– конічної передачі з прямими зубцями;

– черв'ячної циліндричної передачі;

– роликової ланцюгової передачі;

– клинопасової передачі;

– зубчастопасової передачі.

AUTOCAD-SHAFT 2D підтримує зв'язок із AUTOCAD-3D, що дає змогу автоматично створювати тривимірні моделі за побудованими кресленнями. Так, можна отримати моделі шківів пасових передач або зірочок приводних ланцюгових передач за їхніми плоскими кресленнями.

На рис. 6.2 показано комбінований вал із різними ступенями (справа наліво: шків пасової передачі, зірочка ланцюгової передачі, циліндрична шестерня, конічна шестерня та ділянка з метричною різьбою).

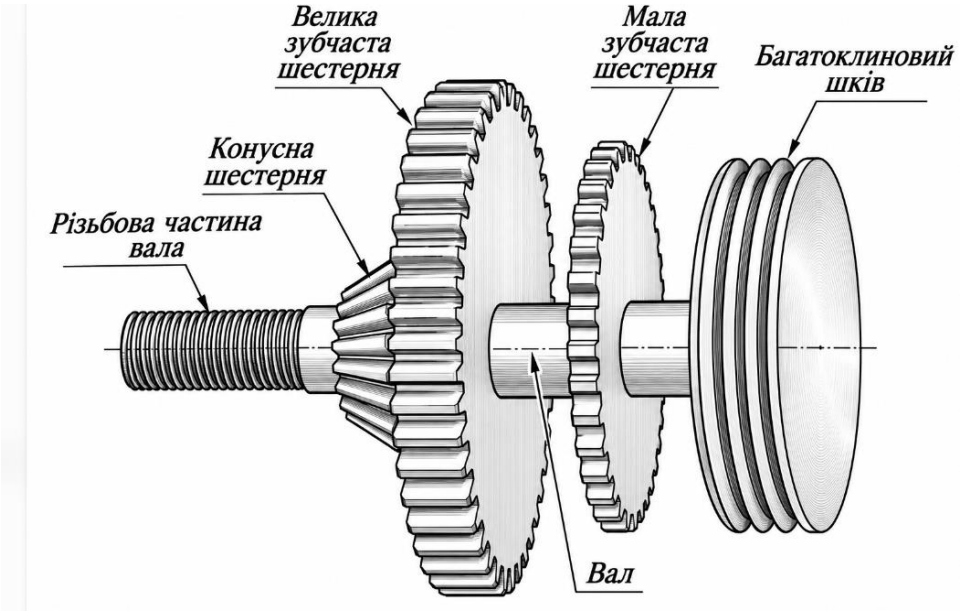


Рис. 6.2. Комбінований вал.

Застосунок «Механіка: Пружини» призначений для проєктних і перевірних розрахунків циліндричних гвинтових пружин стиску й розтягу, тарілчастих, конічних і фасонних пружин, а також для побудови їхніх креслень (із формуванням виду, діаграми, технічних вимог, заповненням основного напису) у AUTOCAD-3D.

Під час розрахунку конструктор може змінювати параметри пружини, щоб отримати найкращий результат: для кожного набору вихідних даних визначають кілька варіантів, які максимально задовольняють задані умови й критерії міцності. Результати розрахунків можна зберегти для подальшої побудови моделі або надрукувати.

Застосунок «Механіка: Пружини» інтегровано з бібліотекою «Матеріали й сортаменти», з якої можна вибрати матеріал проєктованої пружини.

Під час створення креслення пружини можна вибирати типи зачепів, автоматично наносити розміри, будувати виносні види, діаграми деформації або зусиль.

За досвідом користувачів, застосунок «Механіка: Пружини» дозволяє підвищити швидкість проєктування пружин і випуску документації в 15–20 разів.

6.3. Призначення та особливості роботи з прикладною бібліотекою «Універсальний механізм Express»

Прикладна бібліотека «Універсальний механізм Express» (англ. UMExpress) призначена для експресаналізу динамічних, кінематичних і статичних систем, спроєктованих у САПР AUTOCAD-3D.

Система орієнтована на інженерів, які аналізують динамічну поведінку машин і механізмів, і є стандартним застосунком для AUTOCAD-3D.

Механізми описують як системи твердих тіл, шарнірів і силових елементів. Під час аналізу підтримується безпосередня анімація руху тривимірної моделі у процесі розрахунку.

Для аналізу доступні практично всі необхідні величини: координати, швидкості, прискорення, сили реакцій у шарнірах, зусилля у пружинах тощо.

Система забезпечує такі можливості:

– роботу з лінійними силовими елементами або елементами, які змінюються за гармонічним законом і вибираються з фіксованої бази моделей;

– задання для задач кінематики рівномірного, рівноприскореного чи рівносповільненого руху або руху за гармонічним законом;

– розв’язання задач контактної взаємодії тіл за умови їх неперетину під час кінематичного чи динамічного руху.

У прикладній бібліотеці «Універсальний механізм Express» реалізовано:

– параметризацію силових елементів і кінематичних співвідношень;

– створення анімаційних файлів за результатами моделювання руху із збереженням відео у форматі AVI;

– побудову графіків будь-яких динамічних або кінематичних характеристик;

– розрахунок положень рівноваги та власних частот моделі залежно від параметрів.

Забезпечується повне зчитування моделей AUTOCAD-3D. Робота бібліотеки та її результати візуалізуються в окремому вікні. Користувач може отримувати інформацію про рух об’єкта, його динамічні й кінематичні характеристики безпосередньо під час моделювання. Це дозволяє створювати на основі тривимірних

складальних моделей AUTOCAD-3D об’єкти з необмеженою кількістю абсолютно твердих тіл.

Широкий вибір шарнірів дає змогу створювати кінематичні схеми механізмів практично будь-якої складності.

Доступні типи шарнірів (кінематичних пар):

– поступальний;

– обертальний;

– карданний;

– сферичний;

– із шістьма ступенями вільності.

У застосунку «Універсальний механізм Express» передбачено такі методи аналізу динамічних моделей.

1. Кінематичний і динамічний аналіз механізмів шляхом інтегрування автоматично сформованих рівнянь руху з обчисленням основних кінематичних і динамічних характеристик:

– координат, швидкостей і прискорень центрів мас тіл;

– шарнірних координат, швидкостей і прискорень; кутових швидкостей і прискорень тіл;

– сил реакцій у шарнірах;

– сил в активних силових елементах (пружинах, демпферах тощо);

– сил і моментів сил інерції для всіх тіл.

2. Лінійний аналіз механізмів:

– розрахунок положень рівноваги, значень координат і сил реакцій залежно від параметрів силових елементів;

– розрахунок власних частот і форм коливань, коренів характеристичних рівнянь та динамічних форм;

– визначення ступеня демпфування системи за динамічними формами;

– визначення стійкості положень рівноваги;

– розрахунок кореневих годографів (коренів характеристичних рівнянь залежно від параметрів) і власних частот залежно від параметрів.

У системі реалізовано два режими роботи: «Режим коригування» («Режим конструктора») та «Режим моделювання». Перший призначено для створення й коригування динамічної моделі. Другий – для дослідження створеної моделі за допомогою аналітичного аналізу динамічних систем (модуль лінійного аналізу) і чисельного моделювання динаміки. Він також містить засоби відображення результатів і процесу моделювання.

6.4. Створення фотореалістичних зображень та анімації

Для створення фотореалістичних зображень машинобудівних виробів і будівельних об’єктів у AUTOCAD-3D використовують застосунок Artisan Rendering.

Artisan Rendering забезпечує поєднання матеріалів і освітлення для отримання високоякісного зображення на основі тривимірної моделі. Конструктори й дизайнери широко використовують його для якісної фотореалістичної візуалізації розроблюваного об’єкта. Інтерфейс застосунку показано на рис. 6.3.



Рис. 6.3. Інтерфейс застосунку Artisan Rendering.

Робота з Artisan Rendering ґрунтується на типових завданнях, зокрема налаштуванні матеріалів, освітлення, положення камери й фону. Кожне завдання має

власну вкладку, яку відкривають натисканням відповідної кнопки вгорі вікна застосунку, після чого стають доступними різні параметри.

У нижній частині вікна розташовано наочний каталог матеріалів, типів камер і фонів залежно від активної вкладки. Відповідний параметр призначають перетягуванням матеріалів, джерел освітлення та зображень фону за допомогою миші.

Позначення елементів інтерфейсу на рисунку: вкладки; вікно рендерингу; панель інструментів для доступу до функцій; засоби керування видом і рендерингом; створення знімка; посилання на інтернет-магазин; діалогове вікно, яке змінюється залежно від вкладки; область перетягування до вікна рендерингу.

Більшість змін одразу відображається у вікні попереднього перегляду.

Бібліотека «Механіка: Анімація» призначена для:

– імітації рухів машин, пристроїв, механізмів і приладів, змодельованих у AUTOCAD-3D;

– імітації процесів складання та розбирання виробів;

– перевірки можливих колізій (зіткнень) компонентів під час руху деталей;

– створення відеороликів, що демонструють роботу ще не створених пристроїв, для презентацій або інтерактивних технічних настанов (IETP);

– створення двовимірних кінограм (послідовних кадрів) для детального дослідження руху механізмів.

Бібліотеку можна застосовувати як у процесі проєктування, так і для реклами. Під час розроблення виробу вона дає змогу оцінити взаємний рух ланок механізму й перевірити траєкторії для виявлення колізій через проєктні недоліки. Анімація допомагає працівникам ремонтно-експлуатаційних підрозділів швидко ознайомитися з будовою виробу й навчитися порядку його складання та розбирання.

Для роботи з бібліотекою слід відкрити в AUTOCAD-3D документ – тривимірну модель складальної одиниці (*.a3d). З іншими типами документів система не працює. Після відкриття документа запускають бібліотеку.

Під час роботи бібліотеки компоненти складальної одиниці фізично переміщуються у просторі, а стан спряжень може змінюватися. Щоб вимкнути спряження, які заважають переміщенню компонентів на певному кроці, перед

створенням наступного кроку виконують команду AUTOCAD-3D «Виключити з розрахунку».

Для полегшення повернення складальної одиниці до певного положення можна зберігати в сценарії окремі стани на визначеному кроці. Рекомендується робити це на початку кроку, коли компоненти перебувають у вихідному положенні.

Щоб запам’ятати стан на початку кроку, установіть курсор на потрібному кроці й виконайте команду «Крок → Запам’ятати початковий стан». Для повернення до початкового стану після анімаційного сценарію можна послідовно знизу вгору вибирати кроки й виконувати «Крок → Установити початковий стан».

Щоб повернути складальну одиницю до стану, у якому вона перебувала під час запуску бібліотеки, потрібно виконати «Анімація → Повернення у вихідний стан».

Крім того, бібліотека дозволяє відстежувати колізії, тобто виявляти зіткнення компонентів під час їх руху. Цей механізм корисний для кінематичного аналізу складальної одиниці.

7. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ САПР ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ (CAE)

7.1. CAE-системи функціонального проєктування: призначення, можливості й особливості застосування

У сучасному проєктуванні широко використовують програмні комплекси автоматизованого конструювання, які дозволяють проводити інженерний аналіз комп’ютерних моделей без реальних експериментів.

CAE (Computer-aided engineering) – загальна назва програм і програмних комплексів для розв’язання різних інженерних завдань: розрахунків, аналізу й моделювання фізичних процесів. Розрахункова частина таких програм найчастіше ґрунтується на чисельних методах розв’язання диференціальних рівнянь (методі скінченних елементів – МСЕ, методі скінченних об’ємів – МСО, методі скінченних різниць тощо).

Сучасні системи автоматизації інженерних розрахунків (CAE) застосовують разом із CAD-системами, нерідко інтегруючи в них. У такому разі отримують гібридні CAD/CAE-системи.

CAE-системи – різноманітні програмні продукти, які за допомогою розрахункових методів дають змогу оцінити поведінку комп'ютерної моделі виробу в реальних умовах експлуатації. Вони допомагають перевірити працездатність виробу без значних витрат часу й коштів.

Світовими лідерами в розробленні, постачанні й супроводі CAE-програм є ANSYS, Inc. (США), SAMTECH (Бельгія) та MacNeal Schwendler Corporation (MSC, США). У цій сфері працюють і менші компанії, однак їх кількість скорочується, оскільки більші гравці купують їх заради технологій.

Найпоширеніші CAE-системи:

– T-FLEX Аналіз – універсальна система скінченноелементного аналізу з вбудованим пре- і постпроцесором;

– ANSYS – універсальна система скінченноелементного аналізу з вбудованим пре- і постпроцесором;

– MSC.Nastran – універсальна система скінченноелементного аналізу з пре- і постпроцесором MSC.Patran;

– OpenFOAM – вільно поширювана універсальна система моделювання механіки суцільних середовищ методом скінченних об'ємів;

– SALOME – платформа для виконання розрахунків (підготовка даних, моніторинг розрахунку, візуалізація й аналіз результатів);

– STAR-CD (STAR-CCM+) – універсальна система аналізу методом скінченних об'ємів із пре- і постпроцесором;

– ADAMS – система моделювання та розрахунку динаміки багатотільних систем;

– «Універсальний механізм» (UM) – програмний комплекс моделювання динаміки й кінематики плоских та просторових механічних систем;

– EULER (Ейлер) – програмний комплекс автоматизованого динамічного аналізу багатокомпонентних механічних систем;

– QForm 2D/3D – спеціалізований комплекс моделювання й оптимізації технологічних процесів об’ємного штампування;

– MBDyn – система комплексного аналізу нелінійної динаміки твердих і пружних тіл, фізичних систем, «розумних» матеріалів, електричних мереж, активного керування, гідравлічних мереж, аеродинаміки літаків і вертольотів;

– Simulation X – комплекс моделювання й аналізу динаміки та кінематики автомобілів, електричних, пневматичних і гідравлічних приводів, ДВЗ, гібридних двигунів тощо.

Стислий аналіз можливостей універсальних програм показує, що в них найповніше реалізовано різні види інженерного аналізу: статичний і динамічний аналіз, аналіз стійкості, нелінійний температурний аналіз (зокрема з урахуванням фазових переходів або хімічних реакцій), спектральний аналіз, статичний аналіз циклічних структур, розрахунок електричного поля тощо.

Універсальні програми застосовують у машинобудуванні, суднобудуванні, аерокосмічній та електротехнічній галузях для специфічних завдань, зокрема нелінійного теплообміну (у перехідному або стаціонарному режимі, включно з радіаційним впливом).

До таких завдань також належать структурна оптимізація, аналіз пружних механізмів, втомне руйнування, в’язкопластичні явища тощо. Багатоцільовість програм дозволяє розв’язувати змішані задачі, як-от аналіз міцності за теплового навантаження, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасоперенесення в електромагнітному полі. Програми враховують різні конструктивні нелінійності й великі деформації, дають змогу розв’язувати задачі гідро- та аеродинаміки.

7.2. Програмне забезпечення інженерного аналізу

Інженерний аналіз – комплекс випробувань, призначених для визначення здатності обладнання, конструкцій і продукції витримувати проєктні навантаження та безперервно функціонувати за розрахункових умов експлуатації.

Умовно виділяють чотири основні групи програм аналізу.

I. Програмні системи проєктування. Перша група охоплює програмні системи, які поєднують конструювання та аналіз в одному комплексі, зокрема CATIA, EUCLID, UNIGRAPHICS тощо.

Характерні особливості:

1. Не виникає труднощів зі створенням складної та математично точної моделі виробу, оскільки ці системи мають найпотужніші засоби геометричного моделювання.

2. Обмін між підсистемами конструювання й аналізу майже непомітний користувачеві: вони працюють зі спільною базою даних або внутрішніми форматами.

3. Перелік видів аналізу обмеженіший, ніж в універсальних програмах, і здебільшого охоплює:

– структурний аналіз;

– лінійний статичний аналіз;

– модальний аналіз;

– аналіз поздовжніх деформацій;

– тепловий аналіз;

– аналіз стійкості (електропровідність, лінійна конвекція) тощо.

II. Універсальні програми аналізу. Друга група – універсальні програми для аналізу машинобудівних виробів.

Провідними розробниками й постачальниками є ANSYS, Inc. (США), SAMTECH (Бельгія), MacNeal Schwendler Corporation (MSC, США). У 1970-х роках одним із провідних способів комп'ютерного моделювання став метод скінченних елементів. Завдяки розробкам цих та інших компаній інженерний аналіз набув повсюдного застосування й поступово перетворився на окремий потужний напрям – системи автоматизованого аналізу (CAE).

Характерні особливості:

1. Універсальні програми аналізу містять власні засоби створення геометричних моделей. Проте їх можливості геометричного моделювання значно поступаються спеціалізованим системам проєктування, оскільки вони орієнтовані на твердотільні моделі порівняно простих форм.

2. Усі універсальні програми аналізу мають стандартні формати обміну графічною інформацією з пакетами конструювання. За потреби геометричну модель виробу можна попередньо створити в CAD-системі.

3. Універсальні програми застосовують у машинобудуванні, суднобудуванні, аерокосмічній та електротехнічній галузях для розв'язання спеціальних завдань:

– нелінійного теплообміну (у перехідному або стаціонарному режимі);

– структурної оптимізації й аналізу пружних механізмів;

– втомного руйнування;

– аналізу в'язкопластичних явищ тощо.

Багатоцільове призначення програм дозволяє розв'язувати також змішані задачі:

– аналіз міцності за теплового навантаження;

– оцінювання впливу магнітних полів на міцність конструкції;

– тепломасоперенесення в електромагнітному полі;

– задачі аеро-, гідро- та газодинаміки;

– врахування конструктивних нелінійностей, великих деформацій тощо.

III. Спеціалізовані програми аналізу. Третя група – численні спеціалізовані програми моделювання окремих операцій і процесів для розв'язання специфічних технологічних завдань.

Приклади:

– MSC.SuperForge (компанія MSC) – об'ємне моделювання процесів штампування та кування. Результати аналізу застосовують для проєктування оснащення й технологічних процесів;

– визнані розробники систем моделювання штампування й кування: американська компанія SFTC (DEFORM), французька TRANVALOR (FORGE) «Квантор».

Значних результатів у створенні програмних середовищ інженерного аналізу досягнуто українськими компаніями. Приклади програм, розробників і завдань:

– ІСПА («АЛЕКСОФТ») – розрахунок і аналіз міцності;

– ПОЛІГОН (ЦНДІ матеріалів) – моделювання ливарних, гідродинамічних, теплових та усадкових процесів у SD-постановці;

– РІМАН («ПроПроГруппа») – розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану конструкцій, розв’язання пружних і пластичних задач, зокрема штампування та ударних напружень;

– АРМ WinMachine (НТЦ АПМ) – комплекс проєктування й розрахунків деталей машин, аналізу напружено-деформованого стану конструкцій та їх елементів;

– ДІАНА (НДЦ АСК) – аналіз конструкцій та їхніх елементів;

– GasDinamics Tool (Тульський державний університет) – моделювання газодинамічних процесів тощо.

Приклади завдань:

– об’ємне моделювання процесів штампування та кування;

– розрахунок і аналіз міцності;

– моделювання гідродинамічних, теплових та усадкових процесів у заготівельному виробництві;

– аналіз напружено-деформованого стану конструкцій;

– розв’язання пружних і пластичних задач та аналіз ударних напружень під час штампування;

– проєктування й розрахунки деталей машин і механізмів;

– моделювання газодинамічних процесів.

Недолік: на жаль, деякі з перелічених комплексів не мають стандартних інтерфейсів, тому їх використання в наскрізному проєктуванні ускладнене.

IV. Програми аналізу систем керування. Для дослідження динамічних процесів у системах автоматичного регулювання й керування, а також для аналізу, імітаційного моделювання, прогнозування та дослідження випадкових процесів широко застосовують спеціальні програмні комплекси MATRIX, Matlab Simulink, VisSim, LabView, EASY5. Вони становлять четверту групу програм.

7.3. Аналіз міцності методом скінченних елементів (МСЕ), статичний, динамічний, тепловий, кінематичний та інші види аналізу

Види завдань, які розв’язують за допомогою інженерного аналізу:

1. Статичний розрахунок. Використовують для визначення переміщень, напружень, деформацій і дії прикладених навантажень.

2. Динамічний розрахунок. Виконують, якщо конструкція зазнає дії навантаження, що змінюється з часом.

3. Розрахунок на стійкість. Застосовують для визначення рівня навантаження, за якого конструкція втрачає стійкість, або для перевірки її стійкості за заданого навантаження.

4. Нелінійні розрахунки. Використовують, коли реакція конструкції або деталі на прикладене навантаження змінюється непропорційно до нього.

5. Тепловий розрахунок. Призначений для задач теплопередачі: теплопровідності, вільної та вимушеної конвекції й випромінювання.

6. Розрахунки магнітної дії. Виконують для дослідження аспектів магнітних полів: індукції, густини потоку, силових ліній, втрат потужності та пов'язаних явищ.

7. Розрахунок течії рідини або газу. Дає змогу вивчати характеристики течії чи хвильового тиску рідини або газу в заданому об'ємі, а також розв'язувати задачі чисельної гідродинаміки.

8. Змішані задачі. Використовують для аналізу деталей, які одночасно перебувають під дією теплових, механічних, електричних або магнітних полів.

7.4. Можливості виконання інженерного аналізу з використанням прикладних бібліотек

Застосунок APM FEM, що входить до складу AUTOCAD-3D, призначений для експресрозрахунків твердотільних об'єктів і візуалізації результатів цих розрахунків.

APM FEM містить засоби підготовки деталей і складальних одиниць до розрахунку, задання граничних умов і навантажень, вбудовані генератори скінченноелементної сітки (зі сталим або змінним кроком) і постпроцесор. Цей набір дозволяє змоделювати твердотільний об'єкт та комплексно проаналізувати поведінку розрахункової моделі за різних впливів з погляду статики, власних частот, стійкості й теплового навантаження.

Для скінченноелементного подання об'єкта в APM FEM передбачено функцію генерації МСЕ-сітки, яка розбиває об'єкт із заданим кроком. Якщо модель має

складні нерівномірні геометричні переходи, можна застосувати адаптивне розбиття. Щоб підвищити якість результату, генератор автоматично змінює крок сітки з урахуванням максимального коефіцієнта згущення, установленого користувачем.

Міцнісний аналіз APM FEM дає змогу розв'язувати лінійні задачі:

– визначення напружено-деформованого стану (статичний розрахунок);

– оцінювання статичної міцності складальних одиниць;

– стійкості;

– термопружності;

– стаціонарної теплопровідності.

Динамічний аналіз дозволяє визначати частоти та форми власних коливань, зокрема для попередньо навантажених моделей.

Результат аналізу напружено-деформованого стану (статичний розрахунок) із використанням бібліотеки APM FEM показано на рис. 7.1.

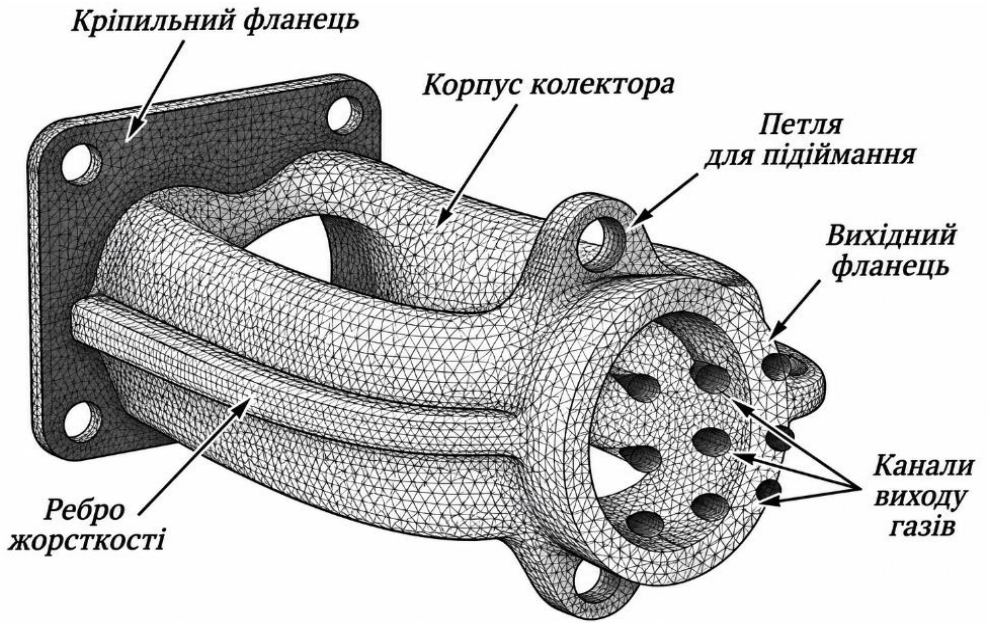


Рис. 7.1. Результат аналізу напружено-деформованого стану (статичний розрахунок) у бібліотеці APM FEM.

Результати розрахунків:

– розподіл еквівалентних напружень та їх складових, а також головних напружень;

– розподіл лінійних, кутових і сумарних переміщень;

– розподіл деформацій за елементами моделі;

– карти й епюри розподілу внутрішніх зусиль;

– коефіцієнт запасу стійкості та форми втрати стійкості;

– розподіл коефіцієнтів запасу й числа циклів за критерієм втомної міцності;

– розподіл коефіцієнтів запасу за критеріями текучості та міцності;

– розподіл температурних полів і термічних напружень;

– координати центра ваги, вага, об’єм, довжина, площа поверхні, моменти інерції моделі, а також моменти інерції, статичні моменти й площі поперечних перерізів;

– реакції в опорах конструкції та сумарні реакції, приведені до центра ваги моделі.

«APM FEM. Топологічна оптимізація» – застосунок для оптимізації розподілу матеріалу в області проєктування з урахуванням навантажень і закріплень. Він містить модуль «Процедура згладжування поверхонь (Вільна форма)».

Топологічна оптимізація дозволяє створити модель із заданими експлуатаційними характеристиками, зменшуючи матеріаломісткість деталі або цілої конструкції.

Критеріями оптимальності можуть бути:

– жорсткість;

– міцність;

– маса.

Важливий етап – визначення області проєктування, у межах якої може розташовуватися матеріал. Для кращого результату слід задавати завідомо більший об’єм з урахуванням конструктивних і технологічних обмежень.

Послідовність дій відповідає звичайному статичному розрахунку в APM FEM: задають навантаження, закріплення та генерують скінченноелементну сітку. Відмінність полягає у визначенні параметрів задачі оптимізації.

Послідовність постановки задачі оптимізації:

1. Створення відгуків – контрольних величин конструкції, що розраховується. Доступні такі відгуки:

– об’єм деталі;

– загальна енергія деформації;

– маса;

– переміщення вузла або його проєкція;

– зміщення двох вузлів;

– напруження групи елементів.

2. Вибір цільової функції для одного з відгуків – мінімізації або максимізації.

3. Задання обмежень як нижньої або верхньої межі відгуку.

4. Задання технологічних обмежень:

– максимальної й мінімальної товщини матеріалу;

– симетрії деталі;

– штампування;

– екструзії;

– 3D-друку.

5. Постановка задачі оптимізації з вибором цільової функції та обмежень для неї.

Результатом оптимізації є розподіл об’ємних часток на карті результатів. За ним можна створити ізоповерхню, що відповідає певній об’ємній частці. Надалі цю поверхню можна згладити й перетворити на тверде тіло за допомогою інструментів «Вільної форми» (рис. 7.2).

«Процедура згладжування поверхонь (Вільна форма)» – застосунок для AUTOCAD-3D, який дозволяє формувати згладжені поверхні на основі полігональної моделі. Його застосовують у промисловому дизайні, адитивному виробництві, топологічній оптимізації та реверс-інжинірингу.

Вільна форма – поверхня багатогранника, заокругленого по вершинах і ребрах. Її створюють на основі полігональної сітки, яку можна змінювати, наприклад, перетягуванням вершин, граней чи ребер та іншими діями.

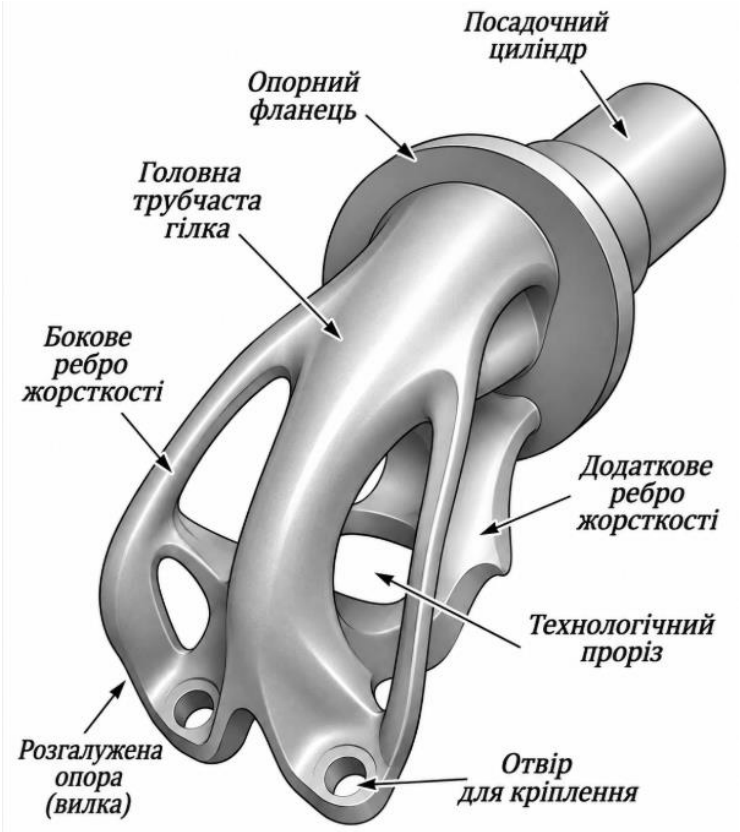


Рис. 7.2. Результат використання застосунку «APM FEM. Топологічна оптимізація».

Полігональна сітка може бути результатом 3D-сканування або топологічної оптимізації моделі. Результат застосування модуля «Процедура згладжування поверхонь (Вільна форма)» показано на рис. 7.3.

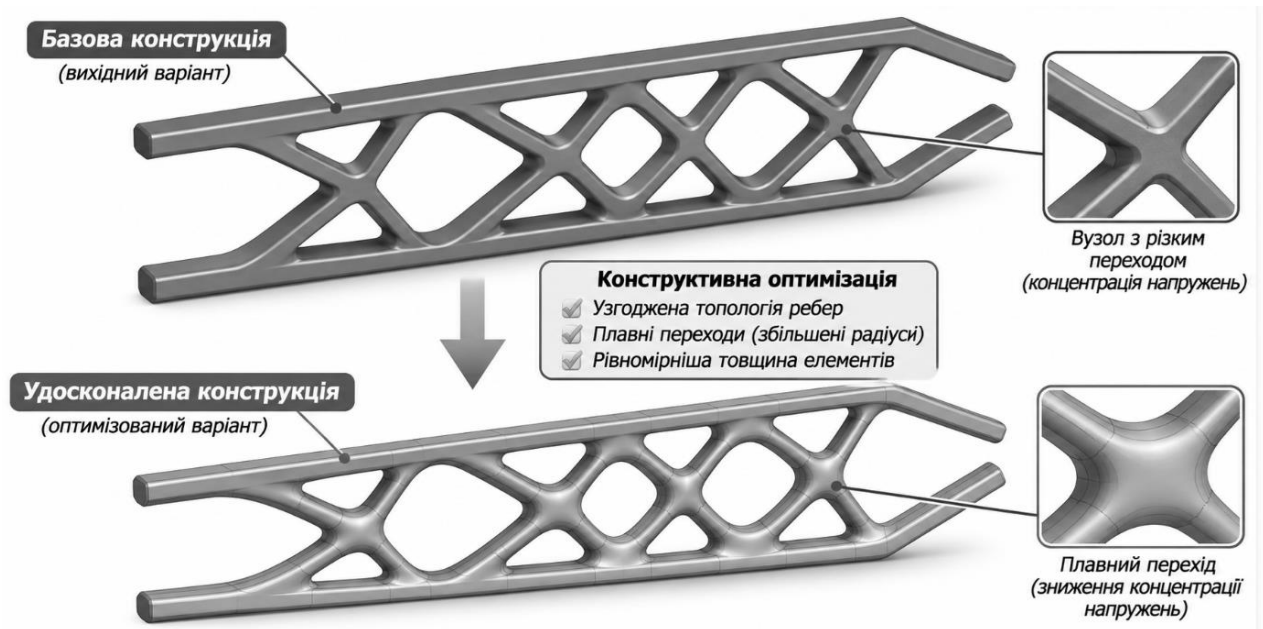


Рис. 7.3. Результат використання модуля «Процедура згладжування поверхонь (Вільна форма)».

Застосунок «Процедура згладжування поверхонь» дозволяє:

– моделювати нові конфігурації вільної форми;

– переміщувати та вирівнювати об’єкти вільної форми;

– імпортувати полігональні об’єкти (*.ply) й створювати за ними вільні форми;

– зберігати вільні форми у форматі полігональних об’єктів (*.ply);

– створювати полігональні об’єкти й вільні форми за наявною полігональною моделлю.

8. ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У САПР

8.1. Огляд адитивних технологій виготовлення деталей

Адитивні технології (АТ) – одні з технологій, що найдинамічніше розвиваються у XXI столітті. Вони дозволяють істотно зменшувати собівартість виробів, підвищувати коефіцієнт використання матеріалу (КВМ), виготовляти принципово нові й складні деталі, застосовувати різні матеріали для 3D-друку – від полімерів, кераміки й металів до біоматеріалів – і прискорювати вихід дослідної чи серійної продукції на ринок.

Існує близько 30 адитивних технологій, що різняться способом нанесення й з’єднання шарів та використовуваним матеріалом. За міжнародним стандартом ISO/ASTM 52900:2015 і українським ДСТУ EN ISO/ASTM 52900:2022 розрізняють сім типів (класів) АТ:

– екструзія (видавлювання) матеріалу (Material Extrusion), технологія FDM;

– струминне нанесення зв’язувальної речовини (Binder Jetting), технологія BJ;

– фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization), технології SLA, DLP, CDLP;

– струминне нанесення матеріалу (Material Jetting), технології MJ, NPJ, DOD;

– сплавлення порошкового шару (Powder Bed Fusion), технології MJF, SLS, SLM/DMLS, EBM;

– спрямоване підведення енергії та матеріалу (Direct Energy Deposition), технології LENS, EBAM;

– з’єднання листових матеріалів (Sheet Lamination), технологія LOM.

Більшість великих промислових підприємств машинобудівного й оборонного комплексів працюють із металевими виробами, тому далі йтиметься про технології 3D-друку металами.

До промислово використовуваних технологій належать SLM, EBM, LENS, EBAM, Metal BJ. Нові технології MCP, MHD (Material Jetting), MELD перебувають у процесі розвитку.

Їх можна порівнювати за загальними характеристиками: об'ємом камери побудови, товщиною шару, продуктивністю, вартістю та матеріалами.

Ці характеристики безпосередньо впливають на розміри, точність, шорсткість, вартість, тривалість виготовлення та фізико-механічні властивості заготовки або деталі.

Технологія SLA (Stereolithography) ґрунтується на полімеризації рідких фотополімерів ультрафіолетовим лазером під час послідовної побудови шарів. Її головна перевага – висока деталізація виробу, основний недолік – порівняно тривалий процес полімеризації.

Технологія FDM (Fused Deposition Modeling) передбачає пошарову побудову виробу з розплавленої сировини. Вона найпопулярніша на ринку адитивних технологій завдяки невисокій вартості пластикових витратних матеріалів, які найчастіше використовують для такого друку. Недоліки – невисока швидкість і низька роздільна здатність.

Технологія SLS (Selective Laser Sintering) ґрунтується на пошаровому розподілі нагрітої порошкової маси з подальшим спіканням окремих ділянок лазерним променем. Основні переваги – висока швидкість друку, широкий вибір матеріалів і можливість створення великих моделей. До недоліків належать необхідність попередніх робіт і додаткового обладнання.

Технологія MJM (Multi-jet Modeling) працює за принципом струминного друку. Розплавлений матеріал подається через екструдер, пошарово твердне й надає виробу потрібної форми. MJM-принтери досить компактні й забезпечують багатоколірний друк тонкими шарами. Матеріали можна комбінувати, але їх кількість доволі обмежена.

Отже, тривимірний друк моделей і макетів є найсучаснішим рівнем прототипування. Для кожної потенційної сфери можна вибрати технологію, яка зробить виробничий процес швидшим, ефективнішим і надійнішим.

8.2. Методика створення фізичного об'єкта на основі цифрової 3D-моделі

Якісний прототип має бути наочним, точним і функціональним. Точність переважно залежить від якісного професійного 3D-моделювання.

Процес прототипування охоплює такі етапи:

1. Створюють комп'ютерну модель майбутнього об'єкта.
2. За допомогою 3D-друку виготовляють макет.
3. Готовий прототип випробовують.
4. За потреби виріб доопрацьовують і коригують.

3D-моделювання виконують на комп'ютері з використанням спеціальних програм інженерної тривимірної графіки. Для створення моделі використовують рисунки, ескізи, графіки, креслення та потрібну технічну документацію.

Після моделювання друкують майстер-модель – макет продукту, який має задовольняти всі базові потреби.

Майстер-модель перевіряють на відповідність установленим вимогам: зовнішній вигляд, ергономічність, правильність форми тощо – залежно від сфери застосування майбутнього виробу.

Якщо під час випробування виявлено неточності або невідповідності вимогам, їх виправляють у комп'ютерній моделі.

Після цього всі попередні етапи повторюють. Якщо майстер-модель пройшла всі випробування, створюють прототип – повнофункціональний продукт.

8.3. Ґратчасті структури для адитивного виробництва

Однією з важливих сучасних проблем є зменшення маси виробів зі збереженням їх функціональності. Іноді під час модернізації вже наявних механізмів ставлять ще складніше завдання: зменшити масу, зберігши об'єм і експлуатаційні показники.

Це можна зробити заміною матеріалу на інший із меншою густиною, однак тоді можливе погіршення експлуатаційних властивостей, зокрема діапазону робочих температур. Альтернативою є інноваційний підхід – введення до конструкції виробу ґратчастих структур (рис. 8.1). Це дає змогу істотно зменшити масу – на 20–40 % залежно від параметрів ґратчастої структури.

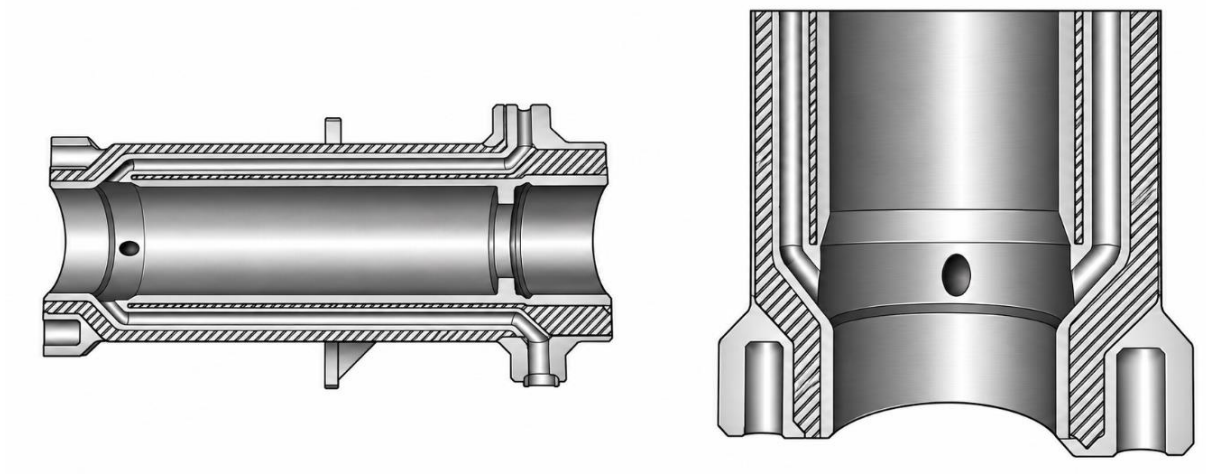


Рис. 8.1. Приклад застосування ґратчастих структур у конструкції деталі.

Виготовлення таких структур традиційними технологіями неможливе, тому слід звернутися до адитивних технологій, розглянути можливості виготовлення та обмежувальні чинники.

Сутність адитивних технологій полягає в пошаровій побудові об’єктів із вихідного матеріалу (порошку, нитки, рідкого фотополімеру) за комп’ютерною CAD-моделлю.

Адитивні технології за фізичною сутністю процесу принципово відрізняються від традиційних, а отже, відрізняються й їхні можливості.

Існують різні одиничні елементи ґратчастих структур, що дають змогу уникати потреби в підтримувальних структурах на навислих містках (рис. 8.2).

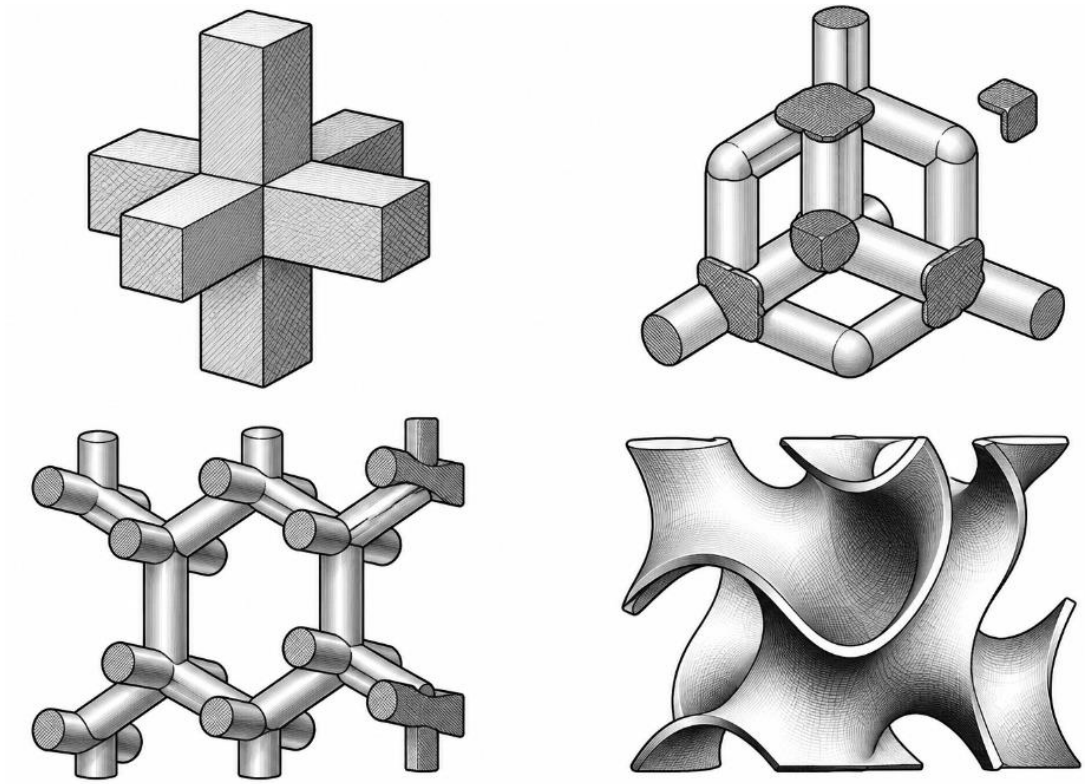


Рис. 8.2. Теоретичні одиничні елементи різних ґратчастих структур.

Під час виготовлення об’єктів адитивними технологіями існує низка обмежень. Вони дещо різняться залежно від технології (SLA, SLS, SLM, FDM тощо), проте їхній основний принцип однаковий – виготовлення окремого шару.

Окремий шар можна розглядати як двовимірну модель, побудова якої визначає траєкторію руху інструмента (лазерного променя, друкувальної головки тощо). Під час формування шару необхідно враховувати такі чинники:

– траєкторія інструмента (лазера, сопла) не повинна двічі проходити через одну точку площини, інакше товщина шару в цій точці відрізнятиметься від загальної товщини;

– не можна допускати значного температурного градієнта вздовж шару: велика різниця температур може спричинити значні внутрішні напруження й короблення;

– не можна допускати охолодження шару або його частини нижче певних температур, інакше не забезпечуватиметься адгезія між шарами й виріб розшаровуватиметься.

Розроблені ґратчасті структури мають різні міцнісні властивості та експлуатаційні характеристики. Аналіз показує, що найбільші напруження можуть

виникати в кубічній ґратці, яка, відповідно, матиме нижчі показники міцності. Крім того, під час її виготовлення можливе порушення суцільності перерізу ребер сітки.

Однак поверхні ґратчастих структур мають дуже складну форму, тому сучасні CAE-системи не завжди можуть надати об’єктивну кількісну оцінку.

Використання таких структур під час проєктування й виготовлення деталей дозволяє істотно зменшувати загальну масу виробу, що особливо важливо в літако- й ракетобудуванні. При цьому міцність виробів залишається досить високою, а трудомісткість виготовлення не зростає, а іноді навіть зменшується.

Упровадження адитивних технологій у виробництво є складним багатогранним завданням, але його реалізація забезпечує значні переваги, недосяжні для традиційних субтрактивних («віднімальних») технологій, навіть найсучасніших.

8.4. Програмне забезпечення для реалізації адитивних технологій. Програми-слайсери

Еталонним програмним продуктом для адитивного виробництва вважають Magics компанії Materialise. Альтернативою Materialise Magics та Autodesk Netfabb є VoxelDance Additive – розробка китайської компанії VoxelDance, що поєднує властивості обох рішень.

VoxelDance Additive – потужна програма підготовки даних для адитивного виробництва за технологіями DLP, SLA, SLS і SLM. Вона має всі необхідні функції підготовки моделей до 3D-друку: імпорт CAD-моделей, редагування STL-файлів, інтелектуальне 2D/3D-компонування (нестинг), створення підтримок, нарізання на шари (слайсинг) тощо. Це скорочує витрати часу й підвищує ефективність друку. Процес підготовки даних у VoxelDance Additive показано на рис. 8.3.

Етапи: імпорт; перетворення; редагування; оптимізація; створення підтримок; автоматичне розміщення; слайсинг; штрихування шарів.

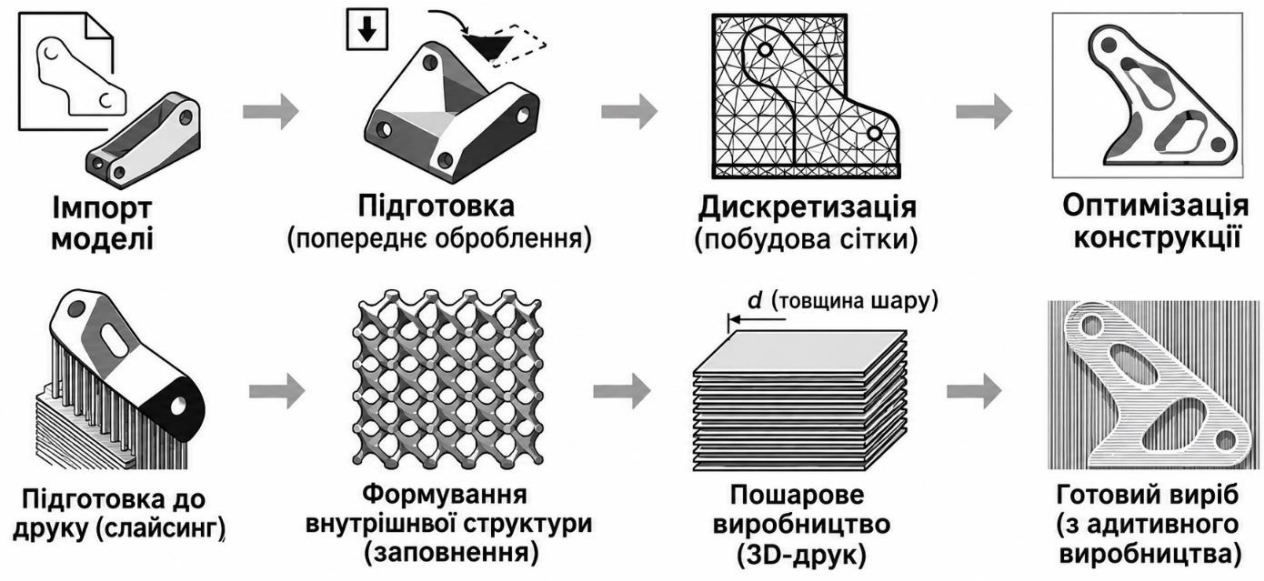


Рис. 8.3. Процес підготовки даних у VoxelDance Additive.

VoxelDance Additive підтримує більшість форматів, зокрема CLI (*.cli), STL (*.stl), 3D Manufacturing Format (*.3mf), WaveFront OBJ Files (*.obj), 3D Experience (*.CATPart), IGES (*.igs, *.iges), Pro/E/Cro Files (*.sldprt, *.sldam, *.slddrw), STEP (*.stp, *.step).

Переваги VoxelDance:

– широкий вибір програмних рішень для всіх етапів підготовки моделей до 3D-друку;

– швидке опрацювання складних масивів даних;

– універсальні засоби технологічної підготовки адитивного виробництва;

– використання провідними виробниками обладнання для 3D-друку.

Програми-слайсери

Cura – один із найпопулярніших і найуживаніших слайсерів для 3D-друку. Це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом створила компанія Ultimaker для власних 3D-принтерів, але його можна вважати загальним стандартом завдяки сумісності з більшістю інших пристроїв. Функціональність легко розширити за допомогою системи плагінів. Інтерфейс Cura показано на рис. 8.4.

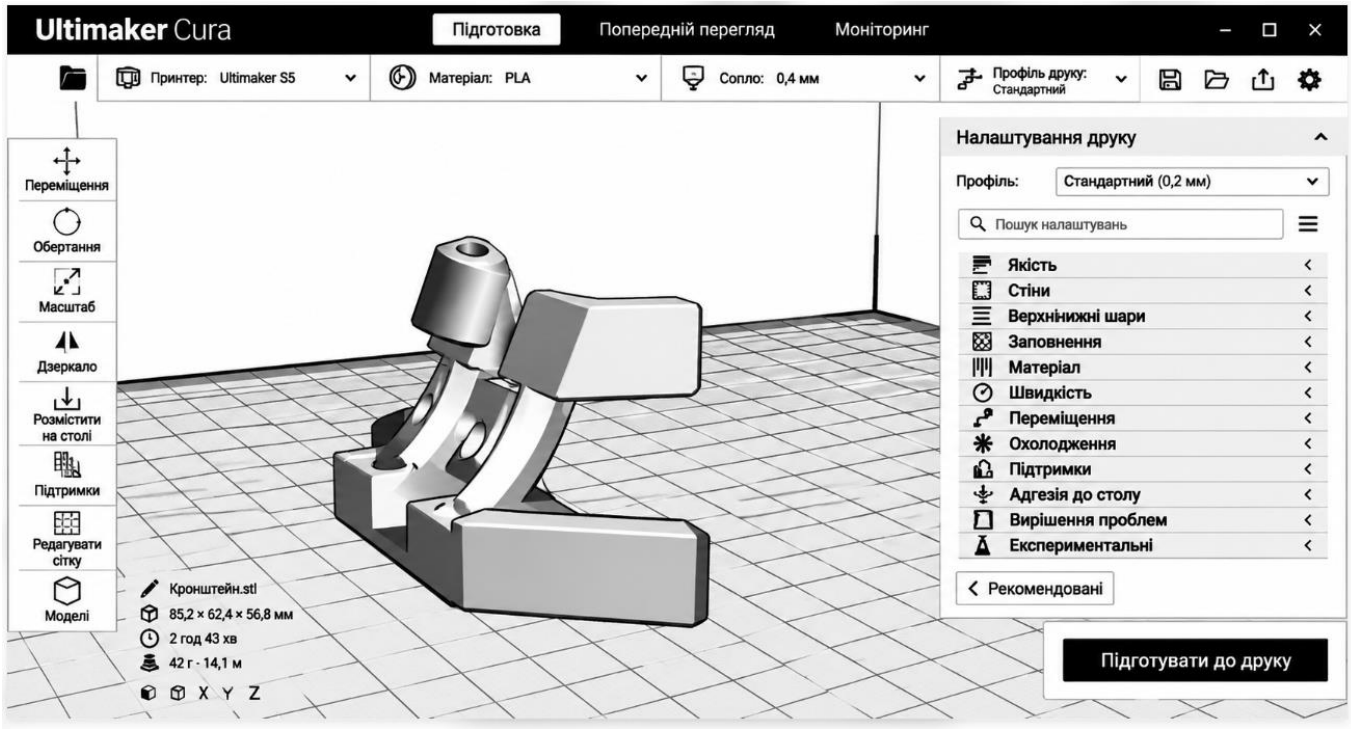


Рис. 8.4. Інтерфейс програми Cura.

Повна інтеграція з CAD-системами SolidWorks і Siemens NX робить це програмне забезпечення цінним навіть для професійного застосування. Водночас для переважної більшості домашніх користувачів Cura є простим і доступним слайсером.

PrusaSlicer. Компанія, яка створила оригінальні 3D-принтери Prusa, розробила власний слайсер PrusaSlicer. Він швидко набув популярності з кількох причин.

PrusaSlicer дозволяє нарізати моделі як для FDM-принтерів, так і для принтерів, що використовують фотополімерні смоли. Він має кілька режимів редагування налаштувань залежно від рівня підготовки користувача (рис. 8.5).

Серед основних особливостей – налаштовувані опорні структури, підтримка різних матеріалів і плавна зміна висоти шару.

IdeaMaker. Програмне забезпечення Raise3D для нарізання моделей IdeaMaker оптимізоване для обладнання цієї компанії так само, як PrusaSlicer – для оригінальних принтерів Prusa, а Ultimaker Cura – для обладнання Ultimaker. Водночас, як і інші слайсери, воно добре працює зі сторонніми принтерами.

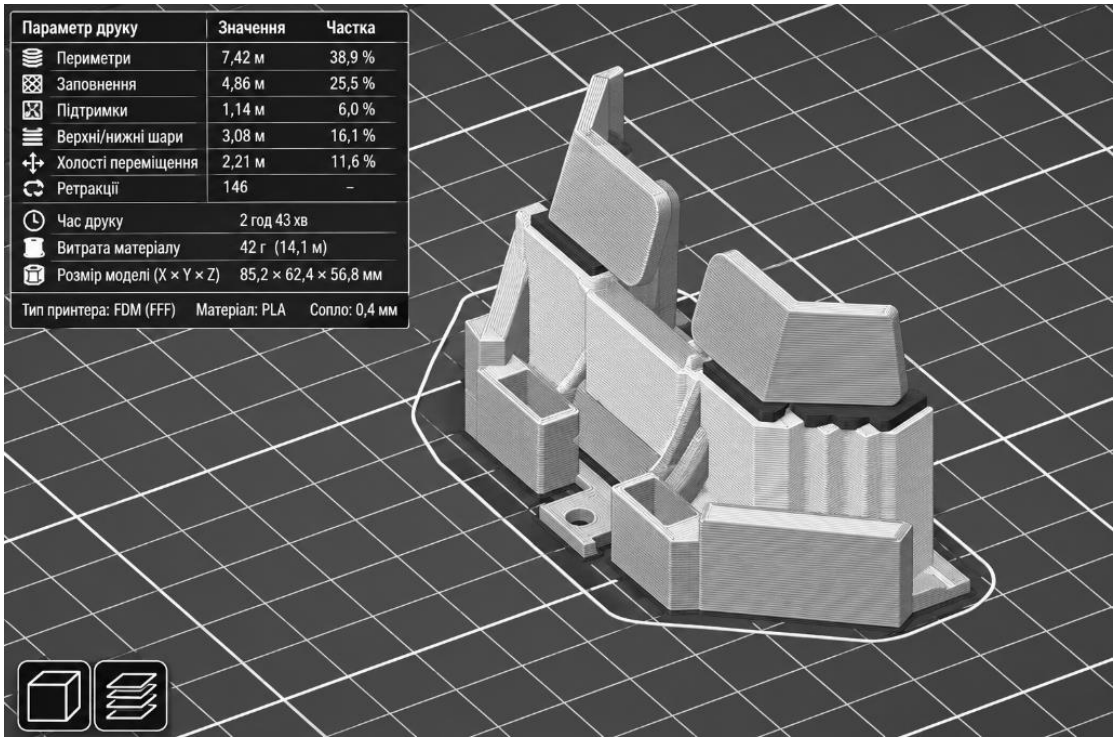


Рис. 8.5. Інтерфейс програми PrusaSlicer.

Інтерфейс IdeaMaker наведено на рис. 8.6.

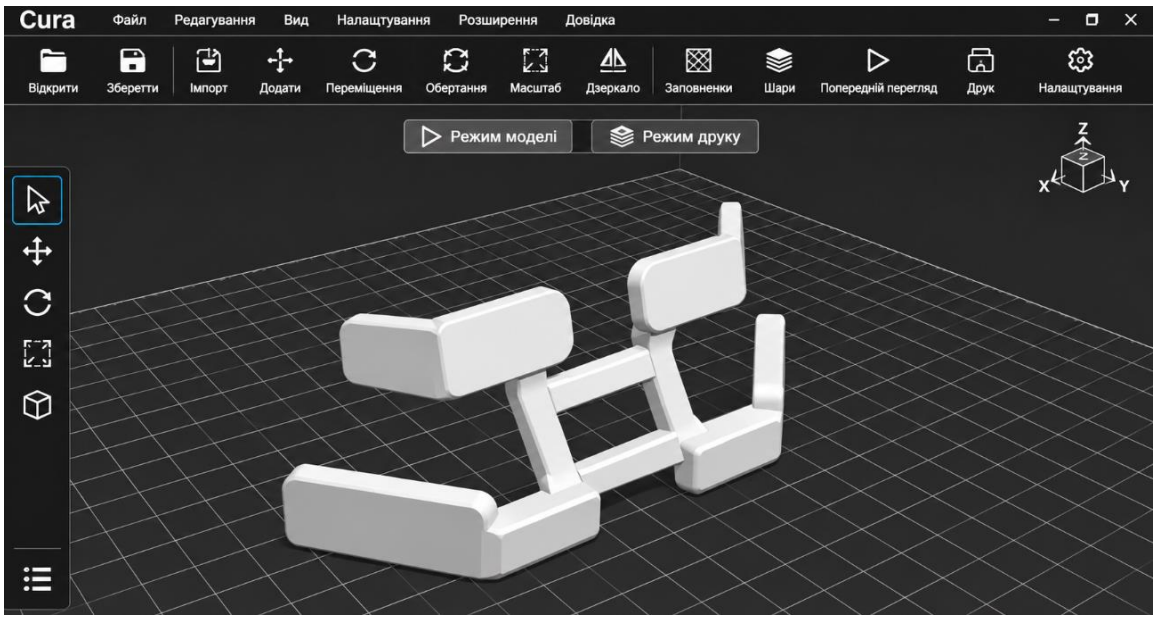


Рис. 8.6. Інтерфейс програми IdeaMaker.

Під’єднавшись до хмарних сервісів Raise3D, можна завантажити сотні профілів принтерів і матеріалів, створених спільнотою та компанією Raise3D, для швидшого й якіснішого друку або сформувати власну бібліотеку улюблених налаштувань і профілів.

Налаштовувані опори, об’єднання моделей для оптимізації друку великих виробів, інструменти відновлення сітки – усе це робить IdeaMaker універсальним засобом для повсякденного 3D-друку. Черга друку та вбудована сумісність із OctoPrint також є корисними додатковими функціями, які підвищують зручність роботи.

9. ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБУ. СИСТЕМИ PDM, ERP, PLM

9.1. Поняття про життєвий цикл виробу

Життєвий цикл виробу (ЖЦВ, англ. life cycle) за ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2025 – сукупність явищ і процесів, що повторюються з періодичністю, визначеною часом існування типової конструкції виробу від задуму до утилізації або конкретного екземпляра виробу від завершення виробництва до утилізації.



Рис. 9.1. Інформаційна підтримка етапів життєвого циклу виробу.

До основних стадій життєвого циклу виробу належать:

– маркетинг;

– проєктування та розроблення продукції;

– планування й контроль процесів;

– закупівля матеріалів і комплектувальних виробів;

– виробництво або надання послуг;

– пакування та зберігання;

– монтаж і введення в експлуатацію;

– технічна допомога й сервісне обслуговування;

– післяпродажна діяльність або експлуатація;

– утилізація й переробка наприкінці корисного терміну служби.

Основні параметри, які характеризують межі стадій життєвого циклу виробу, наведено в таблиці.

Таблиця 9.1

Параметри стадій життєвого циклу виробу

Стадія	Початок стадії	Завершення стадії
Маркетингові дослідження ринку	Укладення договору на проведення досліджень	Подання звіту за результатами досліджень
Генерування ідей та їх відбір	Збирання й фіксування пропозицій щодо проєктів	Завершення відбору конкуруючих проєктів
Технічна й економічна експертиза проєктів	Формування груп оцінювання проєктів	Подання звіту про експертизу проєктів, вибір проєкту-переможця
НДР	Затвердження технічного завдання (ТЗ) на НДР	Затвердження акта про завершення НДР
ДКР	Затвердження ТЗ на ДКР	Наявність комплекту конструкторської документації, скоригованої за результатами випробувань дослідного зразка

Стадія	Початок стадії	Завершення стадії
Пробний маркетинг	Початок підготовки виробництва дослідної партії	Аналіз звіту про результати пробного маркетингу
Підготовка виробництва на підприємстві-виробнику	Прийняття рішення про серійне виробництво та комерційну реалізацію виробів	Початок усталеного серійного виробництва
Власне виробництво та збут	Продаж першого серійного зразка виробу	Постачання споживачеві останнього екземпляра виробу
Експлуатація	Отримання споживачем першого екземпляра виробу	Зняття з експлуатації останнього екземпляра виробу
Утилізація	Момент списання з експлуатації першого екземпляра виробу	Завершення робіт з утилізації останнього виробу, знятого з експлуатації

Розроблення (development) – стадія життєвого циклу, на якій виконують проєктування конструкції виробу, виготовлення та випробування дослідних зразків, технологічну підготовку виробництва.

Виробництво (manufacturing) – стадія життєвого циклу, під час якої виготовляють вироби для постачання замовникам (серійні вироби).

Експлуатація (operation) – стадія життєвого циклу, під час якої реалізують, підтримують і відновлюють якість виробу. Загалом вона охоплює використання за призначенням, транспортування та технічну експлуатацію: зберігання, технічне обслуговування й усі види ремонту, окрім тих, які виконують за умов тимчасового виведення виробу з експлуатації, наприклад капітального ремонту.

9.2. CALS-технології

CALS-технології (англ. computer aided logistic systems) – технології безперервної інформаційної підтримки життєвого циклу виробів: опису виробів, виробничого середовища й процесів у ньому. Дані, які створюють та перетворюють ці інформаційні технології, подають у формі, установленій нормативним документом з інформаційної підтримки життєвого циклу продукції, для обміну або спільного використання учасниками життєвого циклу.

Ефективність такого підходу в логістиці зумовила його поширення на всі стадії життєвого циклу виробу.

Мета CALS-технологій – постачати готовий виріб разом із тривимірною електронною моделлю, що містить необхідну інформацію про нього: конструкторську, технологічну й експлуатаційну документацію, технічні характеристики, регламенти профілактичних і ремонтних робіт.

Відмінність CALS від PLM полягає у термінології та стандартизації. CALS-технології використовують у США, тоді як PLM-платформи – у Європі.

Подальшого розвитку CALS-технології набули в концепції PLM – керування інформацією про виріб на всіх етапах життєвого циклу, запропонованій компанією Dassault Systems.

9.3. Системи керування виробничою інформацією

Системи керування виробничою інформацією (PDM, англ. Product Data Manager) – організаційно-технічні системи, які забезпечують керування всією інформацією про виріб.

Виробами можуть бути найрізноманітніші товари й об’єкти – від мікросхем до автомобілів, від мостів до комп’ютерних мереж. PDM-системи є невіддільною частиною PLM-систем.

Щоб машинобудівні підприємства могли максимально скоротити терміни та вартість підготовки до випуску нової продукції, затребуваної ринком, необхідно

автоматизувати робочі місця конструктора й технолога. Проте розрізнена автоматизація праці не дає повного ефекту.

Підхід залишається традиційним і послідовним: конструктори випускають документацію, передають її технологам на погодження, отримують назад для коригування, повторно передають виправлені документи, технологи готують технологічну документацію та звіти, погоджують їх із відділами постачання й економістами та зрештою передають у виробництво.

Унаслідок цього автоматизація не забезпечує ані повної економічної віддачі, ані справді значного скорочення строків підготовки виробництва, хоча початковий позитивний результат є. Причина полягає в тому, що розроблення та підготовка виробництва складної високотехнологічної продукції – колективний процес, до якого залучено десятки й сотні фахівців підприємства або групи підприємств.

Без організації паралельного виконання робіт і взаємодії конструкторів, технологів, фахівців із постачання, економістів та інших працівників під час розроблення документації на виріб неможливо досягти справді значного скорочення термінів.

Така взаємодія можлива лише за умови створення всередині підприємства або групи підприємств єдиного інформаційного простору (ЄІП) даних про корпоративну продукцію. На машинобудівних і приладобудівних підприємствах ядром ЄІП виступають корпоративні системи керування даними про виріб (PDM, Product Data Management), призначені для організації та координації роботи інженерного персоналу.

Конструктори, технологи та інші фахівці не лише отримують інформацію про виріб, а й доповнюють її, формуючи склад виробу, оптимальний для різних служб підприємства. Після виготовлення ця інформація використовується сервісними підрозділами для планового обслуговування, замовником – для налаштування готової продукції під власні потреби, а інженерами – для модернізації та створення нового виробу на основі раніше спроєктованого.

PDM-системи працюють із файлами й записами баз даних на всіх етапах розроблення, виготовлення та підтримки виробу. Вони охоплюють конфігурації виробів, описи деталей, специфікації, CAD-креслення, геометричні моделі,

зображення, моделі інженерного аналізу й результати розрахунків, маршрути виготовлення, програми оброблення деталей, електронні документи, нотатки, листування, аудіо- й відеоматеріали, посилання на паперові документи, плани проєктів тощо.

PDM-системи узагальнюють такі технології:

– керування інженерними даними (EDM);

– керування документами та інформацією про виріб (PIM);

– керування технічними даними (TDM);

– керування технологічною інформацією (TIM);

– керування зображеннями;

– інші системи роботи з інформацією, що всебічно визначає конкретний виріб.

Компанія АСКОН розробила корпоративну систему керування інженерними даними та життєвим циклом виробу. Упровадження «ЛОЦМАН:PLM» забезпечує:

– створення електронного середовища спільного розроблення та підготовки виробництва виробу;

– формування електронного опису виробу, який об’єднує всю інформацію для використання як усередині підприємства, так і зовнішніми постачальниками та замовниками;

– підтримку всіх етапів життєвого циклу: визначення потреб у матеріалах, проєктування, виробництва, збуту та супроводу;

– захист даних і гарантований доступ до інформації про виріб для кожного користувача з відповідними правами.

Фахівці всіх виробництв, залучених до реалізації великого проєкту, можуть будь-коли отримувати актуальні дані про виріб і процеси роботи над ним, відомості про зміну конфігурацій, заплановані й фактичні ресурси тощо. Повну інформаційну модель виробу можна використовувати як під час виробництва, так і на інших стадіях його життєвого циклу.

«ЛОЦМАН:PLM» містить усі відомості, необхідні для проєктування, виготовлення та експлуатації продукції промислового підприємства. На стадії підготовки виробництва система накопичує результати конструкторсько-технологічного проєктування й забезпечує інформаційний обмін між інженерними

службами. Затверджені дані та документацію передають іншим підрозділам для матеріально-технічного забезпечення, виробництва й експлуатації виробів.

9.4. Планування ресурсів підприємства (ERP)

Система планування ресурсів підприємства (ERP, англ. Enterprise Resource Planning) – програмне забезпечення, яке допомагає автоматизувати основні бізнес-процеси підприємства та керувати ними для досягнення оптимальної продуктивності. ERP-система координує потоки даних між корпоративними бізнес-процесами, забезпечує єдине достовірне джерело даних і оптимізує бізнес-процеси в межах усього підприємства.

ERP об’єднує фінанси, ланцюги постачання, бізнес-процеси, комерційну діяльність, звітність, виробництво й керування персоналом на єдиній платформі.

Концепція ERP особливо популярна у виробничій сфері, адже планування ресурсів дозволило скоротити терміни випуску продукції, знизити запаси товарів і матеріалів, поліпшити зворотний зв’язок зі споживачами та одночасно зменшити адміністративний апарат. ERP-системи забезпечують облік і контроль не лише на однорідних локальних виробництвах, а й у багатопрофільних підприємствах і корпораціях із філіями в різних містах і країнах.

Основні постачальники міжнародного ринку:

1. SAP – пропонує модульну архітектуру та інтеграцію з іншими застосунками.

2. Oracle – пропонує численні модулі для різних галузей і підприємств.

3. Microsoft Dynamics – забезпечує гнучкі рішення, що інтегруються з продуктами Microsoft, зокрема Azure й Power BI.

4. Infor – пропонує комплексні рішення для різних галузей, зокрема виробництва, роздрібної торгівлі та керування активами.

5. Epicor – пропонує ERP-системи для малого й середнього бізнесу, включно з модулями керування виробництвом, фінансами та продажами.

9.5. PLM-технології

PLM-технології (англ. Product Lifecycle Management). Робота підприємства регламентується великою кількістю документації: кресленнями, технологічними

картами, нормативними документами, змінами, що виникають під час погодження, тощо.

Систематизувати й контролювати цей потік інформації складно навіть на невеликому підприємстві. Упровадження PLM-технологій створює контрольоване середовище поширення інформації на підприємстві.

У такому середовищі зберігається вся документація, доступна на першу вимогу. PLM-платформа містить інформацію про всі версії виробу, що дозволяє повторно застосовувати рішення попередніх проєктів. PLM-технології також збирають дані про функціонування виробу у замовника.

Збирання й аналіз інформації про способи та умови експлуатації виробу й їхній вплив на нього дають розробникові можливість удосконалювати виріб через усунення виявлених недоліків та оптимізацію технічних характеристик.

Виокремлюють шість головних завдань PLM-систем під час розроблення продукту:

1. Керування даними про продукт.

Дані про продукт становлять значну частку інформації про життєвий цикл виробу. Їх використовують для розв'язання завдань виробництва, матеріально-технічного постачання, збуту, експлуатації та ремонту.

2. Керування основними засобами виробництва.

Забезпечує високий рівень контролю й точності роботи обладнання для безперервного виробничого циклу.

3. Керування програмами й проєктами.

Надає інформацію про взаємопов'язані роботи для ефективного керування проєктом: бюджет проєктованого виробу, планування необхідних виробничих потужностей, установлення логістичних і комунікаційних зв'язків.

4. Співпраця протягом життєвого циклу продукту.

Підвищує ефективність розроблення виробу, зменшує його собівартість і скорочує час виходу на ринок завдяки безперервному зворотному зв'язку між інтегрованими процесами проєктування, виробництва, збуту й обслуговування.

5. Керування якістю.

PLM-системи дозволяють ефективно контролювати якість на всіх етапах життєвого циклу виробу:

– маркетинг;

– проєктування;

– розроблення технічних умов;

– матеріально-технічне постачання;

– закупівля;

– розроблення виробничих процесів;

– виробництво;

– випробування;

– сертифікація;

– монтаж;

– експлуатація;

– технічне обслуговування;

– утилізація.

6. Охорона довкілля й праці, виробнича медицина.

Дозволяє знизити витрати та мінімізувати виробничі ризики відповідно до вимог законодавства у сфері охорони довкілля й праці, зокрема шляхом скорочення часу заповнення бланків та приписів з техніки безпеки.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Логунов, О. М., Мелконов, Г. Л., & Ніколаєнко, А. П. (2024). Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Основи CAD, CAM, CAE». СНУ ім. В. Даля. https://dspace.snu.edu.ua/items/eff389fb-822c-4a42-a8ea-fff6311df118
2. Цибульник, С. О. (2020). Системи CAE/CAD. Практикум. КПІ ім. Ігоря Сікорського. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38914
3. Даниленко, О. В., & Верба, І. І. (2020). Використання сучасних CAD/CAE систем у розрахунках деталей машин. КПІ ім. Ігоря Сікорського. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31515
4. Холодняк, Ю. В. (2021). Комп’ютерне проєктування промислових виробів. ТДАТУ. http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/15421
5. Годунко, М. О., & Сторожук, М. О. (2014). Основи САПР та автоматизовані системи конструкторської підготовки виробництва. КНТУ. https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/8575
6. Пархоменко, А. В., Притула, А. В., & Крищук, В. М. (2016). Автоматизоване проєктування електронних засобів у Creo та Altium Designer. Запорізький національний університет. https://eir.zp.edu.ua/items/d01f33cd-4a2d-4522-987a-3666913bea30
7. Вишнепольський, Є. В. (2025). CAD/CAM/CAE від концепції до виробу. Запорізька політехніка. https://eir.zp.edu.ua/items/2c7dd892-b811-4730-86e6-416e0fdba24d
8. Піонткевич, О. В., Лозінський, Д. О., & Сердюк, О. В. (2024). Забезпечення результатів вивчення CAD/CAE/CAM систем для підготовки фахівців із прикладної механіки. Вінницький національний технічний університет. https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/43546
9. Петров, О. В., Піонткевич, О. В., Буда, А. Г., & Коломієць, В. С. (2024). Застосування CAD/CAE-системи SolidWorks у задачах аналізу міцності деталей. Вісник машинобудування та транспорту. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-95-102

10. Національний університет «Львівська політехніка». (2024). САПР у проєктуванні машин: питання впровадження та навчання (CADMD 2024). https://cadmd.lpnu.ua/doc/CADMD_2024_book.pdf
11. Zubiekhina-Khaiiat O., Hruban V., Lymar O., Marchenko D. Designing Technologies for Strengthening Tractor and Self-Propelled Machine Parts in Agricultural Conditions. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science. 2026. Vol. 30, No. 1. P. 46–63. DOI: https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/1.2026.46
12. Marchenko D. D., Matvyeyeva K. S. Development and Investigation of the Technology of Electro-Induction Surfacing of Parts of Working Bodies of Agricultural Machines. Problems of Tribology. 2026. Vol. 31, No. 2 (120). P. 72–79. DOI: https://doi.org/10.31891/2079-1372-2026-119-1-72-79
13. Marchenko D. D. et al. Development of Methods for Digital Diagnostics of Engines by Electronic Indication. In: 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022
14. Marchenko D. D. et al. Development and Research of an Automatic System for Regulating the Frequency of Rotation of a Diesel Engine Crankshaft. In: 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023
15. Марченко Д. Д., Лимар О. О. Системи автоматизованого проєктування в мехатроніці : курс лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності Н7 «Агроінженерія» денної і заочної форм здобуття вищої освіти. Миколаїв : Миколаївський національний аграрний університет, 2025. 139 с.
16. Білодіденко, С. В., Баюл, К. В., & Гануш, В. І. (2024). Основи автоматизованого проєктування технологічного обладнання: параметричне проєктування деталей машин. Український державний університет науки і технологій. https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/18187
17. Гаран, Я. О. (2022). Системи автоматизованого проєктування: лабораторний практикум. КПІ ім. Ігоря Сікорського. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48686

18. Мажара, В. А., Щербина, К. К., Артюхов, А. М., Тененика, С. А., & Шестаков, І. С. (2024). Система автоматизованого проєктування технологічного оснащення. Центральноукраїнський національний технічний університет. https://dspace.kntu.kr.ua/items/69005ef6-7a9d-459a-8764-ec0137defc29
19. Сафіулін, Є. І. (2025). Система автоматичного проєктування машин та транспортних засобів. Національний гірничий університет. https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/cd1ba926-b4d0-4f75-b5a5-0618270f2383
20. Біднiченко, О. (2022). Сучасні тенденції розвитку систем автоматизованого комп'ютерного моделювання. Управління розвитком складних систем. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.49.59-65
21. Матеріали з навчальної дисципліни узагальнено у освітній платформі Moodle за посиланням – https://moodle.mnau.edu.ua/course/view.php?id=4597
22. Бібліотека Миколаївського національного аграрного університету за посиланням – https://lib.mnau.edu.ua/.
23. Репозитарій Миколаївського національного аграрного університету за посиланням – http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/.

Навчальне видання

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Методичні рекомендації

Укладач: **Марченко** Дмитро Дмитрович

Формат 60х84 1/16. Ум. друк. арк. 5,81.
Тираж 100 прим. Зам. № ___

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.