

ЛЕКЦІЯ № 4. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПРОВЕДЕННЯ ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ ПРОЕКТОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ У САПР

План лекції. Методи розв'язку рівнянь фізики в механічних САПР. Структурна механіка - лінійна та нелінійна задача. Аерогідродинаміка й теплопередача. Проектування елементів механічних систем. Кінематика й динаміка. Листовий метал - розгорнення й заготовки. Світлотехнічний аналіз і проектування.

Література: [8], [12] - [15], [23] - [30], [41] - [43], [49] - [55].

Зазвичай для попередньої оцінки міцності/працездатності конструкції інженер-конструктор застосовує інженерні підходи, засновані на представленні конструкції у вигляді простих вузлів і елементів, для яких існують аналітичні оцінки пошуку напружено-деформованого стану. До таких оцінок можна віднести використання найпростіших формул для пошуку напруг у балках при їхньому розтягуванні, вигині або крутінні, пошуку відносного подовження, моментів інерції, сил реакції тощо.

Інженер-конструктор змушений працювати з великою кількістю спеціалізованої літератури для пошуку необхідних виражень і законів. Дані підходи мають істотні обмеження при їхнім застосуванні до реальних складних конструкцій і сьогодні використовуються усе менше й менше в сучасних високотехнологічних виробництвах і конструкторських бюро.

При використанні систем чисельного аналізу, інженер одержує можливість моделювати конструкції й машини будь-якої складності з кожним необхідним (раціональним) ступенем деталізації. Для цього він використовує модулі CAE - тобто це інструменти для аналізу реального розподілу напруг і деформацій у конструкції, які дають інженерові можливість працювати з різними додатками, залишаючись у єдиному середовищі проектування (CAD-середовищі).

Зокрема в системі середнього рівня **SolidWorks**, це **розрахункові модулі сімейства Simulation**: власне це сам Simulation (раніше він мав назву CosmosWorks), Flow Simulation (раніше -

CosmosFloWorks) і SolidWorks Motion (раніше CosmosMotion).

У системі високого рівня **NX**, яка на сьогодні стає стандартом в автомобільному проектуванні, це **модуль Advanced Simulation** побудований на базі промислового вирішувача Nastran. Причому в САПР NX, розроблювачами від самого початку була передбачена масштабованість модуля Advanced Simulation. Такий підхід у розробці системи дозволяє вирішувати як дуже прості, так і самі складні завдання з різних областей механіки деформованого твердого тіла, механіки рідин і газів, механіки теплопереносу та ін.

Але, яка б складна система САПР не застосовувалася для проектування, сама процедура виконання інженерного аналізу (CAE) розробленої конструкції залишається однаковою, і схематично її можна представити у вигляді декількох етапів (рис. 4.1).

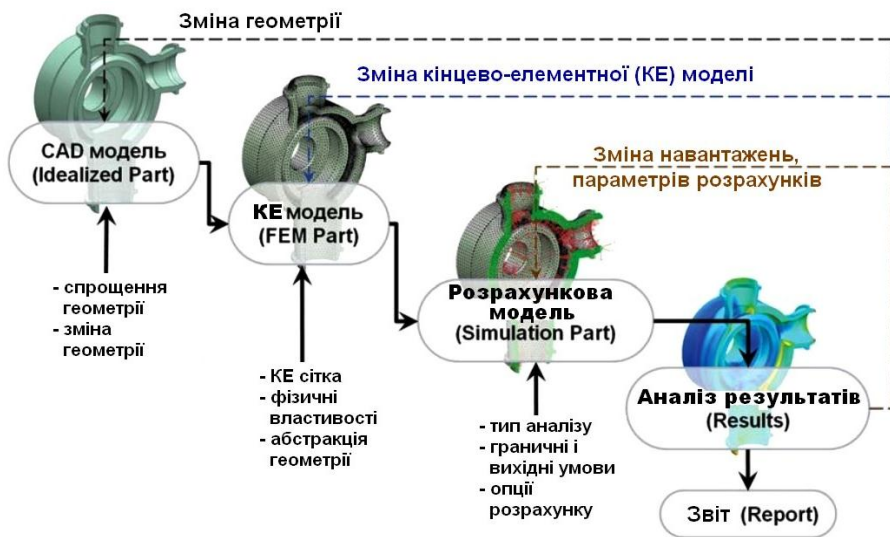


Рисунок 4.1 - Процес інженерного аналізу розробленої конструкції

Окремо слід зауважити, що **при виконанні будь-яких кінцево-елементних розрахунків в САПР, необхідно чітко розуміти фізику розглянутого процесу**, тому що програмний продукт використовує тільки дані введені інженером-конструктором, та внутрішні вирішувачі (математичні алгоритми). У випадку некоректно поставленої користувачем задачі, отримане кінцеве рішення буде неточним або й взагалі

невірним! Отже треба розуміти не тільки креслення, 3D-моделювання, але й такі науки як математика, фізика, конструкційні матеріали, опір матеріалів. Згідно наведеної вище схеми (рис. 4.1), розглянемо більш детально процедуру виконання інженерного аналізу (розрахунку) розроблюваних конструкцій методом кінцевих елементів.

При цьому в ході створення моделі й виконання розрахунків створюються файли, які містять певні типи даних про розрахункову модель. Для ефективної роботи в САПР, необхідно чітко розрізняти, які дані зберігаються в певному файлі і який файл повинен бути активним при створенні й роботі з розрахунковою моделлю.

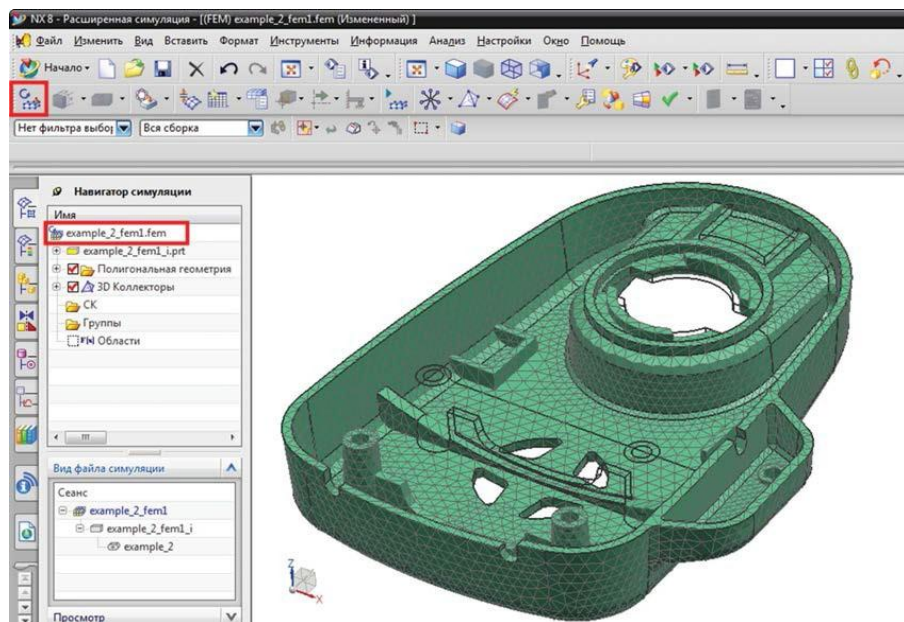


Рисунок 4.2 - Загальний вигляд кінцево-елементної сітки розроблюваної CAD-моделі деталі

Нижче приводиться опис кожного етапу створення розрахункової моделі.

1. Створення ідеалізованої геометричної моделі (Idealized Part). Для ефективного застосування методу кінцевих елементів (КЕ), повинна бути побудована коректна й максимально проста геометрична модель. Для цього необхідно провести ідеалізацію (спрощення) ви-

хідної геометрії майстер-моделі. Тобто рекомендується виключити всі геометричні елементи, які приводять до ускладнення розрахункової моделі (технологічні отвори, скруглення, фаски), але істотно не впливають на очікувані результати виконуваних розрахунків. Якщо у вихідній геометрії присутні видимі поверхневі дефекти, то слід перебудувати відповідні геометричні елементи, для цього в САПР є відповідні інструменти.

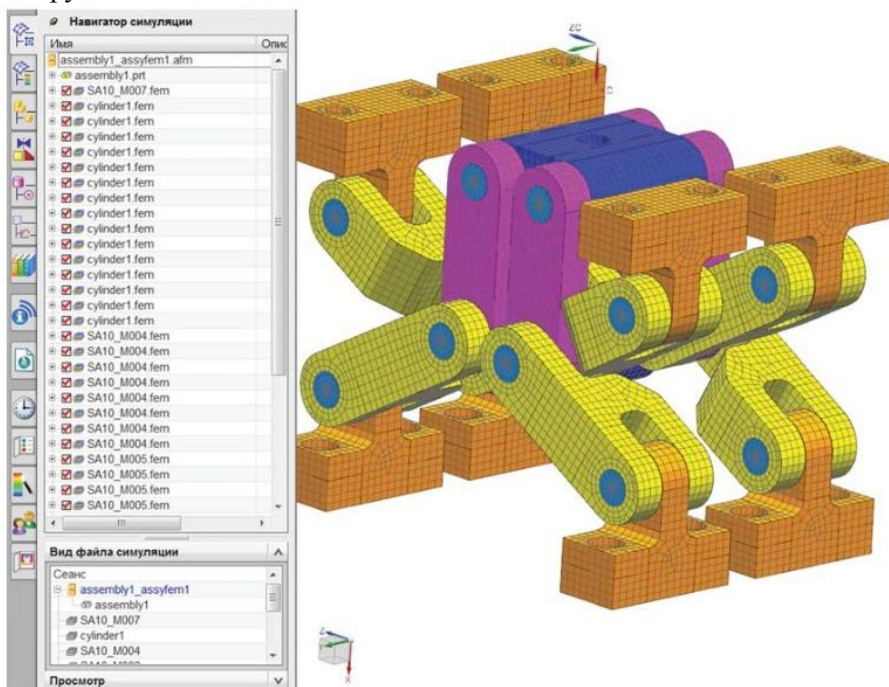


Рисунок 4.3 - Приклад кінцево-елементної сітки CAD-моделі складання

Виконання ідеалізації геометрії (тобто зміна геометрії або спрощення) реалізується без зміни майстер-моделі. Система автоматично створює ідеалізовану геометричну модель, для якої створюється спеціальний файл KE моделі.

2. Створення KE-моделі (FEM Part). Для кінцево-елементної моделі (KE-моделі), створюється спеціальний файл, який наприклад може мати розширення `"*.fem"`. Крім побудови безпосередньо KE сітки, у даному файлі задаються й зберігаються фізичні властивості час-

тин моделі, такі як властивості матеріалів або параметри оболонкових і стрижневих елементів.

Геометрія в створеному файлі FEM є полігональною, тобто складається з фасетів, вершин і ребер. Надалі саме полігональна геометрія використовується для завдання спеціалізованих правил генерації сітки, таких як кількість або розмір елементів на геометричному об'єкті, абстракція геометрії.

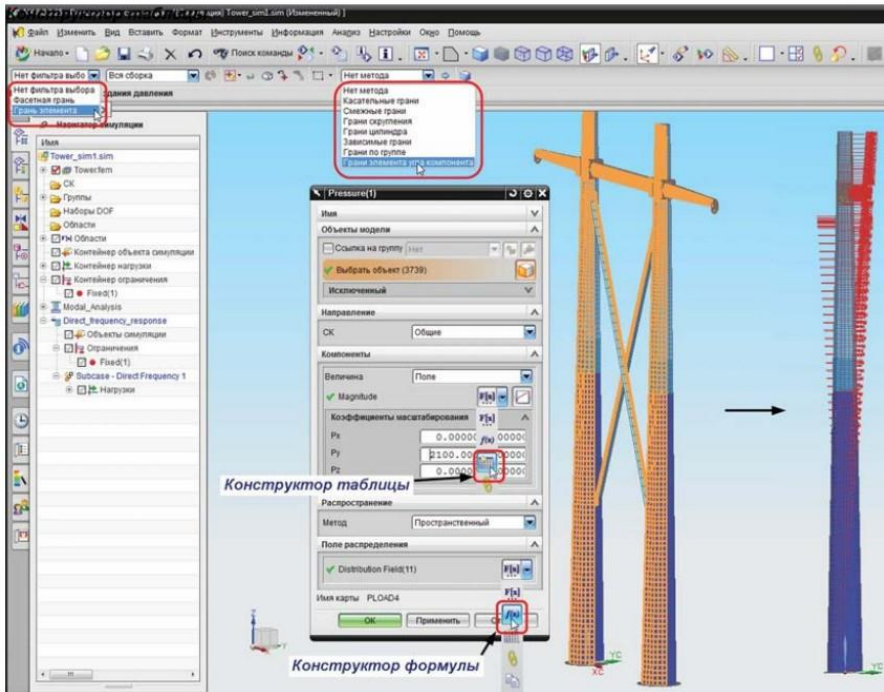


Рисунок 4.4 - Приклад завдання навантажень та граничних умов кінцево-елементної моделі

При цьому файл FEM асоціативно пов'язаний з ідеалізованою геометрією, тобто може бути оновлений автоматично у випадку внесення змін у вихідну або ідеалізовану геометрію.

Спеціальні CAE-модулі дозволяють проводити чисельне моделювання не тільки для окремих елементів конструкцій, але й для декількох деталей, об'єднаних у єдине складання. У цьому випадку структура розрахункового складання (Assembly FEM або AFEM) небагато

відрізняється від структури розрахункової моделі.

В залежності від типу САПР, для створення кінцево-елементної моделі складання, попередньо створюються КЕ моделі кожної з деталей, а потім створюється КЕ модель складання AFEM, де всі КЕ моделі деталей поєднуються в єдине складання.

При цьому позиціонування КЕ моделей окремих деталей відносно одне одного в складанні, відбувається автоматично відповідно до їхнього вихідного положення в САД-складанні. У разі відсутності вихідного САД-складання, можна використовувати спеціальні інструменти для позиціонування КЕ моделей окремих деталей вручну.

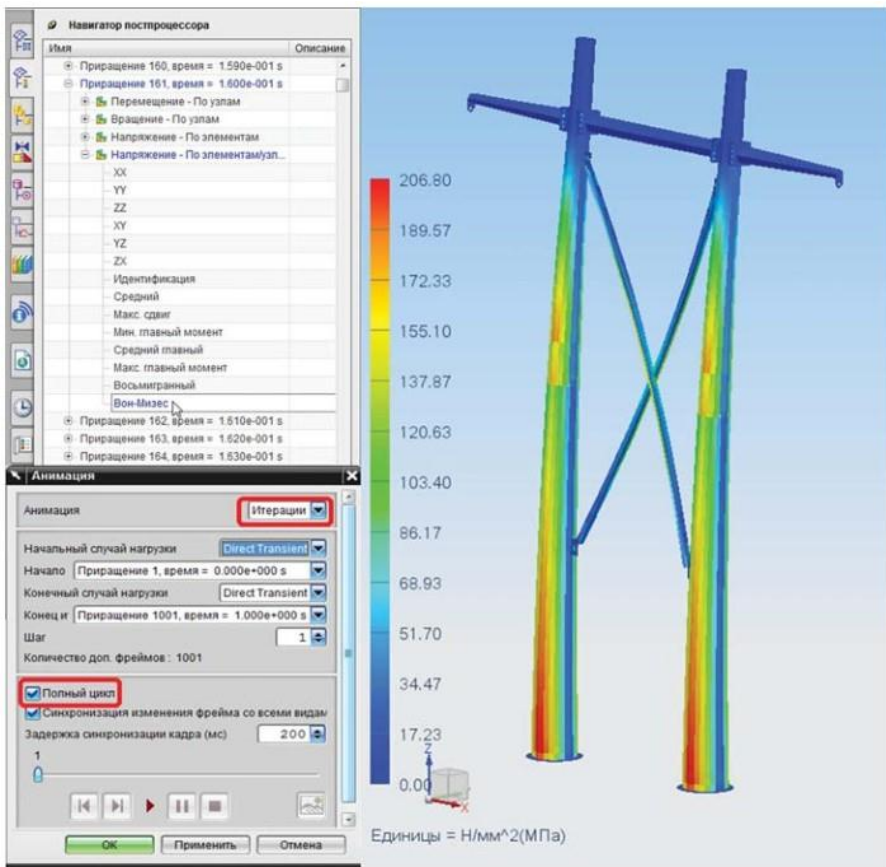


Рисунок 4.5 - Приклад отриманих результатів розрахунків для аналізу

3. Створення розрахункової моделі (Simulation Part). Спеціальний SIM файл - містить інформацію про постановку розрахункового завдання. Тобто на даному етапі для розробленої KE моделі визначаються граничні й початкові умови, умови можливої контактної взаємодії, один або кілька типів аналізу, а також опції вирішувача.

Створений файл симуляції з розширенням "*.sim" містить усі параметри й властивості поведінки конструкції, розрахункових випадків, налаштування вирішувача, такі як тип рішення, крок розрахунку, об'єкти симуляції (контактні граничні умови та ін.), навантаження, обмеження, фізичні властивості, створені при перезаписі таблиць фізичних властивостей. Існує можливість створювати кілька файлів симуляції SIM, асоціативно пов'язаних з одним файлом FEM.

4. Чисельне рішення завдання (Solution). Цей етап не вимагає особистої участі інженера, але звичайно супроводжується так званим моніторингом ходу рішення.

Для виявлення проблем з розрахунком, на ранньому етапі необхідно стежити за збіжністю вирішувача, за збіжністю контактного алгоритму, за нелінійною або нестационарною історією розрахунку. У випадку виявлення розбіжності розрахунку або інших проблем, завдання можна перервати й внести корективи у файли FEM або SIM.

5. Аналіз отриманих результатів (Results). Після одержання коректних результатів, які записуються у спеціальний файл (наприклад для вирішувача NX Nastran - файл OP2), вони аналізуються, будуються необхідні графіки й діаграми розподілу напружень, складається звіт.

Далі на цій лекції ми коротко розглянемо особливості використання системи SolidWorks як універсального середовища моделювання та аналізу.

SolidWorks спочатку створювався як система твердотільного параметричного моделювання. Програма містить всю необхідну номенклатуру інструментів, причому деякі можливості вкрай ефективні для розробки об'єктів, орієнтованих на подальше використання програм розрахунку. Це проектування виробів з листового матеріалу, зварні деталі. Вони дозволяють отримати моделі, вельми близькі до вимог даних інструментів. Підмножина функцій, орієнтованих на роботу з криволінійними об'єктами: інструменти сплайнів, команди створення тіл, що мають криволінійні поверхні, процедури забезпечення гладко-

сті, побудови сполучень, дозволяють - в абсолютній більшості випадків - з прийнятною точністю готувати моделі для аерогідродинамічного аналізу або світлотехніки (в задачах розрахунку на міцність якості представлення поверхні менш важливий фактор).

У середу проектування SolidWorks також вбудований модуль інженерного аналізу, що дозволяє виконувати структурний і тепловий аналіз, аналізувати кінематику і динаміку, розраховувати аерогідродинаміку і теплоперенос, виконувати світлотехнічний аналіз, проектування відбивачів; для моделювання елементів трансмісій призначений модуль GearTrax.

Навіть перерахувати всі можливості SolidWorks, які можуть бути корисні при створенні розрахункових моделей, дуже важко. Тому краще всього звернутися до документації програми самої останньої версії, оскільки в кожен новий реліз програми, розробники крім виправлення помилок в минулих релізах, додають нові функції.

SolidWorks володіє найрізноманітнішими можливостями для створення і модифікації збірок. Розрахункові додатки, відповідно, що функціональність враховують. Як і для моделей твердотільних і поверхневих деталей, відповідальність за коректну підготовку вихідних даних для збірок покладається на CAD-систему.

Це означає, що взаємне положення деталей, як в сенсі геометрії, так і в тому, що стосується призначення параметрів їх взаємодії у фізичній моделі, має визначатися за допомогою сполучень. В явному вигляді вони ні в одну програму, за винятком COSMOSMotion, не транслюються. Розрахункові модулі мають справу виключно з геометрією, але не з семантикою.

COSMOSMotion в даному ряду є винятком. Його математичний апарат допускає відсутність в моделі збірки зв'язку між деталями, але при цьому операції, по суті ідентичні тим, які виконуються в SolidWorks, доведеться виробляти в процесі формування механізму. Після запуску розрахунку програма повинна буде "зібрати" збірку відповідно до логіки, визначеної в з'єднаннях COSMOSMotion.

Методи розв'язку рівнянь фізики в механічних САПР.

Фізичні процеси, що характеризують напружено-деформований стан твердих тіл, рух і теплообмін текучого середовища, моделюються за допомогою рівнянь. При математичному моделюванні різних фізичних процесів в середовищі SolidWorks, для вирішення рівнянь на-

пружено-деформованого стану твердих тіл - в COSMOSWorks, і для вирішення рівнянь руху і теплообміну текучого середовища - в COSMOSFloWorks, використовуються два методи: метод скінченних елементів і метод кінцевих об'ємів.

Метод скінченних елементів (MCE) - в даний час є стандартом при вирішенні задач механіки твердого тіла за допомогою чисельних алгоритмів. Популярний свого часу метод кінцевих різниць, а також претендувавший на універсальність метод граничних елементів (граничних інтегральних рівнянь) зараз займають досить вузькі ніші, обмежені дослідними або спеціальними завданнями. MCE зайняв лідируюче положення завдяки можливості моделювати широке коло об'єктів і явищ. Абсолютна більшість конструктивних елементів, вузлів і конструкцій, виготовлених з найрізноманітніших матеріалів, що мають різну природу, можуть бути розраховані за допомогою MCE.

При цьому, зрозуміло, потрібно враховувати неминучі при будь-якій чисельній апроксимації умовності і похибки. Тому питання відповідності між розрахунковою моделлю і реальністю є, мабуть, основним при використанні програм аналізу.

Незважаючи на те, що такі програми мають більш-менш докладну документацію, вони все одно залишаються певною мірою чорними ящиками. Це означає певну непередбачуваність результатів, а також деяке "свавілля" в їх інтерпретації.

Отже, **якість висновків**, прийнятих на основі результатів, **цілком залежить від рівня кваліфікації** того, хто проводить розрахунок, а також, стосовно розрахунку на міцність, принципового знайомства з основами MCE. На цю тему опубліковано чимала кількість спеціалізованої літератури.

Метод кінцевих об'ємів є спрощеним, а отже, більш швидкодіючим, варіантом методу скінченних елементів (хоча розробники методу скінченних об'ємів його таким не вважали, він був розроблений як альтернатива методу скінченних різниць, а застосування методу скінченних елементів для газогідродинамічних розрахунків було розпочато пізніше), а консервативні схеми методу скінченних різниць є варіантами методу скінченних об'ємів на регулярній розрахунковій сітці, пов'язаної з використовуваною системою координат.

Ми розглядаємо ці методи стосовно завдань механіки деформованого твердого тіла, і в даному курсі лекцій не передбачено поглиблене вивчення математичної складової цих методів рішення. Оскільки

метою інженерної діяльності є створення "найкращих" конструкцій. А вона досягається, взагалі кажучи, за допомогою декількох інструментів.

Перший - це дотримання певних нормативів і стандартів, в яких закладено досвід "попередніх поколінь". Ці джерела створювалися різними шляхами: систематизацією досвіду, експериментальним відпрацюванням, не виключені і випадки, коли аргументи розробників стандартів не дуже легко зрозуміти. Проте в переважній більшості ситуацій дотримання нормативів є найбільш надійний шлях. Також конструктори використовують інженерну інтуїцію, практичні навички, досвід попередніх розробок. Іноді цей шлях дає непогані результати, особливо коли вирішуються концептуальні питання-алгоритми генерації нових знань, незважаючи на певний прогрес в деталях, до сих пір невідомі.

Другий спосіб створення "кращих" виробів - це використання алгоритмів оптимального проектування. Зрозуміло, що найбільш підходящим варіантом є спільне використання всіх засобів.

Структурна механіка - лінійна задача (COSMOSWorks).

COSMOSWorks - це програмне забезпечення для вирішення завдань розрахунку на статичну міцність і стійкість в лінійній та нелінійній постановці, виділення власних частот, оптимізації форми деталей і складань в лінійній постановці, аналізу втоми і поведінки конструкції при падінні.

COSMOSWorks позиціонується як інструмент "інженерного" аналізу, тобто передбачається, що для фахівця-розраховувача потрібні більш "серйозні" розрахункові системи. Однак, як показує практика використання COSMOSWorks, переважна частина повсякденних завдань вітчизняного машинобудування (в тій їх частині, яка в принципі "підходить" для програм чисельного аналізу), може бути вирішена за допомогою даної програми. Більше того, раціональний інтерфейс і розумно обмежена функціональність дають інженеру можливість зосередитися на проектуванні, не відволікаючись на властиві "універсальним" пакетам подробиці. Як правило, запорукою створення вдалої конструкції є кваліфікація виконавця, а розрахункові програми використовуються для перевірки того, що вийшло, а також надають матеріал для подальших спроб. У цьому випадку застосування інструментів, інтегрованих в конструкторські програми, дозволяє перебирати

варіанти з мінімальними втратами часу на виконання рутинних операцій. COSMOSWorks дозволяє виконувати наступні види моделювання:

- статичний аналіз з розрахунком окремих деталей по просторовій або оболонковій моделі, а також складань в тривимірній постановці з урахуванням взаємодії деталей;
- розрахунок власних частот і відповідних їм форм для деталей у твердотільному або оболонковому поданні, а також складань з нерухомими деталями;
- розрахунок величин критичних навантажень втрати стійкості і відповідних їм форм для деталей в твердотільному або оболонковому поданні, а також збірок з нерухомими деталями;
- тепловий розрахунок з урахуванням явищ теплопровідності, конвекції, випромінювання, але без урахування руху середовищ;
- аналіз термопружності на базі результатів теплового розрахунку;
- параметрична оптимізація за критерієм мінімізації / максимізації маси, об'єму, власних частот і критичної сили;
- імітація деформування конструкції з урахуванням фізичної і геометричної нелінійності, а також з огляду на зміни навантажень і температури в часі;
- моделювання ефекту падіння конструкції на жорстку або пружну поверхню;
- втомний розрахунок з урахуванням кривих втоми, форми кривої навантаження, а також лінійної гіпотези підсумовування пошкоджень.

Послідовність розрахунку.

COSMOSWorks вимагає дотримання базової канви алгоритму методу скінченних елементів, надаючи всередині кожного етапу певну свободу в послідовності кроків підготовки моделі та розгляду результатів. Для розрахунку моделей в твердотільному поданні передбачена послідовність дій описана нижче.

1. Створення аналізу певного типу і визначення його параметрів. Останні можуть бути змінені в будь-який момент перед виконанням розрахунку.

2. Заповнення, якщо необхідно, таблиці параметрів, що визначає набір величин, які можуть змінюватися (конкретно - для яких можуть призначатися списки значень) в ході розрахунку.

3. Підготовка вихідних даних всередині заданого аналізу:
 - призначення матеріалу деталі або деталей;
 - призначення кінематичних граничних умов;
 - призначення статичних граничних умов;
 - призначення контактних граничних умов, якщо розраховується складання або деталей з декількох тіл;
 - створення сітки.
4. Зв'язування, в разі необхідності, параметрів з таблиці параметрів з відповідними аналізами.
5. Виконання розрахунку.
6. Обробка результатів:
 - створення необхідних діаграм;
 - аналіз діаграм;
 - експорт результатів.

Структурна механіка - нелінійна задача (COSMOSWorks).

Модуль нелінійного аналізу COSMOSWorks призначений для вирішення завдань механіки з урахуванням фізичної нелінійності середовищ і геометричної нелінійності об'єктів, зокрема оболонкових.

Типові види і джерела нелінійності в структурній механіці такі:

- **геометрична нелінійність**, пов'язана з тим, що вплив переміщення елементів механічної системи на величину або напрямок дії граничних умов (сил і затискань), а також на властивості самої конструкції стає значним у порівнянні з тим, коли ці явища не враховуються. Один з прикладів - розрахунок прогину опертої по краях пластини під дією розподіленого тиску. Коли величина прогину перевищує половину товщини пластинки, то лінійне рішення призводить до значної похибки (в алгоритмі, реалізованому в COSMOSWorks, враховується та його компонента, яка обумовлена зміною площі під навантаженням). Інший приклад пов'язаний з моделюванням втрати стійкості. Якщо для тонкої довгої пластини при дії стискаючої сили лінеаризований підхід дає прийнятне рішення, то навантаження дугової арки нормальною до поперхні силою призводить до переходу системи в новий рівноважний стан;
- **фізична нелінійність матеріалів** - вона виражається в залежності характеристик пружності матеріалу від історії наван-

- таження. Наприклад, це нелінійність кривої "напруга - деформація" (пластичність) або залежність деформації від часу (в'язкопружність, повзучість);
- **контактна нелінійність** - при аналізі складань може зустрічатися кілька ситуацій, здатних призводити до відхилення від лінійної реакції системи на вплив. По-перше, це ефекти, що виникають на кордоні контакту тіл при вході їх в контакт, коли навіть невелике навантаження в початковий момент передається через відносно малу площу. Як наслідок, в цій зоні можлива істотна зміна форми. По-друге, зустрічаються моделі, що мають деталі, здатні переміщатися "майже" як жорстке ціле. Багато роз'ємних з'єднань, будучи включені в якесь складання, породжують такі розрахункові випадки. Схожі наслідки здатні спричинити використання сполучних елементів COSMOSWorks. Ще одне потенційне джерело нелінійності при розрахунку складань - контактне тертя. Починаючи з версії 2007 року, в COSMOSWorks, дозволяє одночасно враховувати фізичну нелінійність та тертя.

Аерогідродинаміка й теплопередача.

Розрахунковий модуль Flow Simulation (раніше він називався COSMOSFloWorks, а до 2002 року просто FloWorks) повністю інтегрований в систему SolidWorks і призначений для моделювання аеродинамічних і теплових процесів. Він в першу чергу, призначений для використання в галузях промисловості з коротким циклом розробки (радіоелектронна, виробництво трубопровідної арматури, проектування вентиляції і теплообміну в житлових і виробничих приміщеннях тощо). У порівнянні з традиційними пакетами CFD (вирішення задач обчислювальної аеро- і гідродинаміки), цей продукт, безумовно, має важливі переваги:

- завдання вихідних даних і перегляд результатів безпосередньо у вікні графічного проектування;
- можливість використання інженером, а не CFD-спеціалістом;
- мінімальний час на підготовку вихідних даних і аналіз отриманих результатів.

Необхідність застосування модуля Flow Simulation в інженерній практиці виникає в разі проведення розрахунків течій текучих середовищ (газів і рідин). А у випадку інженерно-технічного проектування,

такі завдання виникають дуже часто. Наприклад, в таких випадках.

Для розрахунку силового (стаціонарного або нестаціонарного) впливу текучого середовища на обтічне нею тіло або його елементи, наприклад, в наступних випадках.

Тіло нерухоме, а середовище рухається:

- вітрові навантаження на споруди, наприклад, будівлі, телевежі, труби, мости, рекламні щити і т.п.;
- для визначення міцної стійкості споруд до дії таких навантажень;
- сили, що приводять у рух тіла, наприклад, вітрила кораблів, повітряні змії, рухливі деталі лічильників води, регулятори тиску, вітроенергетичні установки, сопла двигунів і т.п., - для визначення руху тіл під дією цих сил;
- сили і моменти, які необхідно долати при управлінні різними тілами, наприклад трубопровідною арматурою - затворами, вентиллями, клапанами. У разі великих розмірів цієї арматури (гідроелектростанції, магістральні трубопроводи і т.п.) Ці сили і моменти можуть бути значними.

Середина нерухоме, а тіло рухається:

- сила опору, підйомна, бічна та інші сили впливу текучого середовища на рухомі в ній (наприклад, що рухаються по твердій або рідкій поверхні, що летять в атмосфері або плывуть під водою) тверді тіла (автомобілі, поїзди, літаки, планери, дирижаблі, ракети, снаряди, підводні човни і т.п.).

Рухаються тіло і середовище:

- різні насоси, турбіни, крильчатки, шнеки, вентилятори, мішалки - необхідно, наприклад, визначити зусилля (моменти), які до цих тіл треба докласти, щоб забезпечити задану швидкість їх обертання; або навантаження (сили), що діють на елементи цих пристроїв (наприклад, на лопатки турбіни), з метою подальшої оцінки їх міцної стійкості до дії цих навантажень.

Для розрахунку силового (стаціонарного або нестаціонарного) впливу твердого тіла на текучу середу, наприклад:

- силового впливу каналу на середу що протікає через цей канал, тобто сили гідравлічного опору каналу;
- втрати повного тиску потоку при проходженні через трубопровідну арматуру (клапани, вентилі, коліна, звуження, роз-

- ширення, трійники і т.п.);
- витрати плинного середовища через насоси, компресори, крильчатки, шнеки, вентилятори в результаті впливу на це середовище рухомих частин цих пристроїв;
- перемішуючого впливу твердого тіла на склад текучого середовища, тобто наприклад визначення часу, за який дві раніше окремі рідини будуть повністю перемішані одна з одною в посудині до заданої однорідності за допомогою обертової мішалки;
- визначення відстані, на якому дві рідини, що надійшли в канал даного середовища, змішуються одна з одною до заданої однорідності.

Для розрахунку впливу різних фізичних факторів на склад і рух текучого середовища:

- визначення ефективності витяжної і/або припливної вентиляції (наприклад, в хімічній лабораторії) з урахуванням сил плавучості;
- визначення ефективності нагріву (охолодження) повітряного середовища в приміщенні (кімнаті, салоні) системою кондиціонування (штучного клімату) і формованих цією системою повітряних потоків в цьому приміщенні, розподілу відносної вологості по приміщенню;
- закипання рідин, вплив закипання на гідравлічний опір і теплообмін у каналах;
- зміни опору каналів і тіл;
- визначення місця розташування кавітаційних областей.

Для вирішення завдань сполученого теплообміну:

- визначення ефективності нагріву або охолодження твердих тіл текучим середовищем, наприклад в системах проточного зовнішнього охолодження (камерах згоряння двигунів, соплах ракетних двигунів);
- в системах вимушеного проточного і вільно-конвективного охолодження (наприклад, процесорів і різних пристроїв в комп'ютерах);
- визначення ефективності нагріву або охолодження текучого середовища твердими тілами;
- в теплообмінниках (хімічні виробництва, радіатори, апарати дистиляції і т.п.);

- в системах кондиціонування (штучного клімату).

Для розрахунку руху твердих та/або рідких частинок в потоці газу:

- визначення ефективності уловлювання частинок різними пристроями (циклонами та ін.);
- визначення ефективності розгону часток різними пристроями (піскоструйками та ін.);
- визначення ерозії твердих тіл в результаті випадання на них частинок (різної трубопровідної арматури, використовуваної в нафтовидобутку; лопаток та інших деталей компресорів, що працюють в запиленій атмосфері; сопел ракетних двигунів, що працюють на металізованих паливах і т.п.);
- визначення налипання крапель на тверді тіла (в металургії на фурмах конвертерів, в порошкової металургії при виробництві порошків металів).

Сьогодні для вирішення деяких з перерахованих вище завдань можна обійтися без проведення складних розрахунків з вирішенням диференціальних рівнянь течії і теплообміну (наприклад, рівнянь Нав'є-Стокса). Оскільки паралельно з розвитком техніки розвивалися також інженерні методи оцінки потрібних для інженерної практики величин, тобто методи які не потребують вирішення диференціальних рівнянь. Наприклад, опір труб течії однорідного середовища визначається за допомогою досить простих напівемпіричних залежностей.

Щоб розрахувати фізичний процес, тобто зміну фізичних параметрів в просторі і часі, його треба спочатку математично змодельовати. Оскільки фізичні процеси - це результат дії законів фізики, то найбільш адекватні фізичним процесам математичні моделі, являють собою систему що відображає закони фізики диференціальних і/або інтегральних рівнянь (із залученням, якщо треба, напівемпіричних і емпіричних констант і залежностей) з граничними і початковими умовами, прив'язують дану математичну модель до поставленої конкретної фізичної (інженерної) задачі, тобто визначають дані фізичні процеси в цьому завданні.

Оскільки використовувані в математичній моделі системи диференціальних і/або інтегральних рівнянь зазвичай не мають аналітичного рішення, вони зводяться до дискретного виду і вирішуються на деякій розрахунковій сітці. Зрозуміло, що рішення математичної задачі істотно залежить як від способу дискретизації рівнянь, так і від спосо-

бу вирішення отриманих в результаті рівнянь.

Очевидно, рішення математичної задачі буде тим точнішим, чим краще розрахункова сітка дозволяє області нелінійного поведіння рішення рівнянь, що як правило досягається використанням меншої розрахункової сітки в цих областях. Таким чином, в основі COSMOSFloWorks, як і будь-якій іншій розрахунковій методиці (наприклад, COSMOSWorks), лежить, по-перше, математична модель фізичних процесів які розраховуються, і по-друге, спосіб вирішення поставленої математичної задачі.

Проектування елементів механічних систем.

Для проектування типових елементів конструкцій у SolidWorks є спеціалізовані додатки: Toolbox - містить базу стандартних деталей, процедури розрахунку балок і підшипників; GearTrax - призначений для створення моделей зубчастих зачеплень, а також елементів зубчастих коліс, коробок передач; інші модулі групи SolidWorks Office, це зокрема - Animator, FeatureWorks, PhotoWorks. Всі вони мають фірмову локалізацію. Елементи інтерфейсу Toolbox надаються тільки в російськомовному варіанті.

За допомогою SolidWorks Toolbox можна створювати лінійні або кругові кулачки, для яких користувач визначає як тип штовхача, так і траєкторію. Можливе призначення 14 типів руху, включаючи постійний, гармонійний, циклоїдний, постійну швидкість і прискорення, поліноми різного ступеня. Штовхач може здійснювати зворотно-поступальний рух ортогонально напрямку руху для лінійного кулачка, а для кругового - в радіальному напрямку. Можна задати напрямок руху під кутом до нормалі (радіусу), а також вважати штовхач таким що коливається.

В SolidWorks Toolbox включена процедура розрахунку балок. Вона пов'язана з базою даних "**Конструкционная сталь**", з якої Toolbox бере інформацію про геометричні параметри перерізів.

Можливості Toolbox, що пов'язані з балками, базуються на двох функціях: базі даних зі стандартними профілями і процедурі розрахунку балок. База містить стандарти ANSI, ISO, DIN тощо. У кожен з каталогів включені кілька типів профілів, які, в свою чергу, містять номенклатуру розмірів. Для профілів доступні масово-інерційні характеристики. Створення профілю має на увазі створення ескізу на поточній активній площині редагованої деталі і копіювання на цей ескіз

контуру профілю. Подальші дії повністю залежать від користувача.

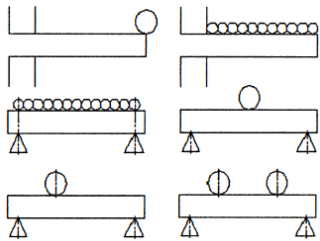


Рисунок 4.6 - Види статичних схем

Розрахунок балок заснований на застосуванні залежностей опору матеріалів, що мають на увазі недеформованість поперечного перерізу, лінійний розподіл напружень по висоті перерізу, відсутність поперечного зсуву. Причому ці гіпотези діють незалежно від співвідношення розмірів конкретного об'єкта. Доступні шість типів розрахункових схем (рис. 4.6). Дві з них - консольна балка з зосередженою силою на кінці і розподіленим по довжині навантаженням.

Решта - балка на двох опорах з однією або двома зосередженими силами і під дією розподіленого навантаження. Обчислювати можна як прогин, так і максимальне нормальне напруження.

Навантаження щодо перетину балки може бути зорієнтоване тільки в двох напрямках. SolidWorks включає в себе різноманітні інструменти для роботи з типовими об'єктами: конфігурації, стандартні елементи, деталі, складання з бібліотеки проектування. Найбільш універсальним засобом з точки зору організації конструкторської діяльності є Toolbox - модуль SolidWorks, призначений для управління базами стандартних елементів.

Toolbox містить базу даних типових елементів деталей - каналів, профілів прокату, а також базу стандартних деталей: кріплення, прокату, підшипників, штамів і ущільнень, елементів трансмісій тощо, згрупованих у відповідності зі стандартами: ISO, DIN, JIS і т.д. База містить можливості поповнення. Тому в офіційну поставку входить бібліотека деталей ГОСТ (для країн СНД), розроблена фірмою SolidWorks Russia.

Кінематика й динаміка.

Для моделювання динамічних систем в середовищі SolidWorks призначений додаток COSMOSMotion. Оскільки продукт побудований на базі розробок фірми ADAMS, використовуваних, зокрема, в програмах лінії visualNastran і Dynamic Designer фірми MSC.

COSMOSMotion призначений для імітації руху механізмів з урахуванням кінематичних і силових факторів. Програма повністю

інтегрована в SolidWorks, функціонує на геометричній моделі SolidWorks, запис розрахункових параметрів і результатів також здійснюється в модель SolidWorks.

Ми не будемо детально розбирати можливості програми, обмежившись загальним описом її функціональності. Причина тут така. Розробники програми, в загальні не приховують великого числа "підводних каменів". На відміну від розглянутих раніше завдань міцності і аерогідродинаміки, тут видимий результат і фактичний стан речей відрізняються, як правило, незначно.

Тобто досить підібрати розумні параметри, що визначають точність і якість відображення результатів. Це твердження, звичайно, справедливо по відношенню до тих завдань, які в принципі "підходять" для цієї програми.

Помилки і похибки, як правило, досить просто ідентифікуються після анімації результату. Крім того, незважаючи на згадану актуальність програмних продуктів для аналізу кінематики і динаміки, фактична їх затребуваність зараз невелика.

Справа в тому, що якщо пару десятків років назад застосування складних механізмів було повсюдним, то тепер функції управління взяла на себе мікропроцесорна техніка, а приводи почали будуватися на базі контролерів. В результаті найскладніші рухи можуть бути реалізовані системами, цілком елементарними з точки зору кінематики.

Тому проектування руху звелось до програмування в тій чи іншій його формі. Область же застосування програм звузилася до розрахунку силових факторів, що діють в механізмах. Не слід також забувати і про власні можливості SolidWorks по симуляції кінематики.

Листовий метал - розгорнення й заготовки.

Завдання проектування виробів з листового металу в практиці конструктора зустрічається досить часто. Його особливість в тому, що воно найтіснішим чином пов'язане з питанням технологічної можливості бути реалізованим на даному підприємстві.

Функціональність, наявна в SolidWorks, дозволяє моделювати форми, що допускають отримання точних в геометричному сенсі розгорток, а також деяких типів наближених і умовних розгорток. Спеціальний додаток до SolidWorks - BlankWorks, здатний оперувати з поверхнями подвійної кривизни, супроводжуючи отримання розгорток первинною оцінкою технологічності (рис. 4.7).

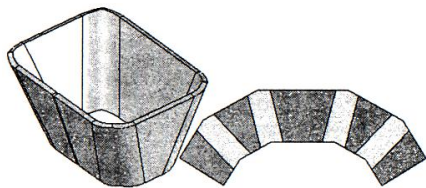


Рисунок 4.7 - Приклад об'єкта що точно розгортається

Як відомо, класифікація розгорткок криволінійних поверхонь в нарисній геометрії ділить їх на точні, наближені і умовні. Перші мають на увазі збереження всіх лінійних і кутових розмірів, тобто деформування матеріалу без розтягування / стиснення (за умови, що товщина прагне до нуля).

Точні розгортки можуть бути отримані тільки для певного класу об'єктів. Якщо користуватися поняттями аналітичної геометрії, то до них відносяться поверхні, у яких в будь-якій точці одна головна кривизна дорівнює нулю.

Нарисна геометрія вимагає для поверхні що розгортається, існування в будь-якій точці площини, яка торкається поверхні по прямій. Зрозуміло, фізичний зміст цих визначень еквівалентний. Прикладами точно розгорнутих поверхонь є циліндричні і конічні поверхні загального виду, а також лінійчаті поверхні з двома напрямними і площиною паралелізму. На рис. 4.7 наведено приклад точної розгортки твердого тіла, що імітує лінійчатую поверхню. Вона являє собою поєднання плоских і конічних поверхонь. Очевидно, що всі грановані поверхні, у яких будь-яка вершина належить максимум одній лінії згину, також мають точну розгортку.

Світлотехнічний аналіз і проектування.

Для проведення світлотехнічного та оптичного аналізу і проектування - призначений модуль OptisWorks. Так повелося, що в нашій країні, програмне забезпечення для моделювання оптичних явищ і об'єктів не дуже часто використовується в інженерній практиці.

З одного боку, це пояснюється недостатньою затребуваністю відповідних інструментів - оптична і світлотехнічна промисловість практично не розвиваються. Крім того, на відміну від вимог, наприклад, до механічних або теплових характеристик, які визначають функціональність об'єктів, запити до світлотехнічних параметрів не завжди формуються строго, а, будучи сформульовані, нерідко порушуються. Наприклад, якщо придивитися уважно до побутових освітлювальних приладів, можна виявити приклади вельми невдалих проєктів: низький ККД, нерівномірність світлового потоку, локальний пе-

регрів. В якості компенсації споживачеві пропонується химерний дизайн, який і служить основним критерієм для вибору. Після установки приладу виникає відчуття незручності, формалізувати яке дуже важко.

Аналогічна ситуація в автомобілебудуванні: динаміка, гальмівний шлях - об'єктивні затребувані характеристики, а от якості же підсвічування панелі приладів - це те, на що увагу звертають лише після покупки. Те ж, до речі, стосується системи опалення та вентиляції. Базові технічні вимоги в принципі дотримані, але почуття комфорту відсутнє. В автомобільній промисловості у провідних виробників, програмне забезпечення для світлотехніки за значимістю стоїть на тому ж рівні, як для динаміки і міцності.

Питання для самоперевірки

1. Які математичні методи використовуються в програмах інженерного аналізу?
2. В яких галузях застосовуються CAE-системи?
3. На чому заснований метод кінцево-елементного аналізу?
4. Для вирішення якого типу задач застосовують метод кінцевих об'ємів?
5. Для вирішення якого типу задач застосовують метод кінцевих різниць?
6. Які види моделювання які дозволяє виконувати COSMOSWorks?
7. Розкажіть базовий алгоритм розрахунку у COSMOSWorks.
8. Назвіть види і джерела нелінійності в структурній механіці.
9. Які переваги й недоліки розрахункового модуля Flow Simulation?
10. Для розрахунку якого типу задач призначений Flow Simulation?
11. До якого типу задач відноситься розрахунок закипання рідин, вплив закипання на гідравлічний опір і теплообмін у каналах?
12. За допомогою яких додатків SolidWorks виконується проектування елементів механічних систем?
13. До якого типу задач відноситься розрахунок ерозії твердих тіл в результаті випадання на них частинок?
14. На чому заснований розрахунок балок у SolidWorks?
15. Для вирішення яких задач призначений додаток COSMOSMotion?
16. В чому особливість роботи із розгортками листового металу?
17. Для чого призначений модуль світлотехнічного аналізу?
18. В якому модулі можна вирішити задачі сполученого теплообміну?
19. Для чого призначений модуль GearTrax?