

004.89:621(075.8)

Ц 93

О. С. Цибенко, М. Г. Крищук

**Системи
автоматизованого
проектування
та інженерного аналізу
в машинобудуванні**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

19 004.89:621(075.8)
Ц 93

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

О. С. Цибенко, М. Г. Крищук

**Системи
автоматизованого
проектування
та інженерного аналізу
в машинобудуванні**

Навчальний посібник

РЕФЕРАТ
25



004.89:621(075 Ц93 2008

Цибенко О.С. Системи автоматизованого проєктування

КНИГОСХОВИЩЕ

Київ
НТУУ «КПІ»
2008

УДК 593.3:621.787

Ц93

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»
(Протокол № 2 від 16.10.2008 р.)*

Рецензенти: *М. Б. Штерн*, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,
Інститут проблем матеріалознавства
Національної академії наук України
С. В. Штефан, канд. техн. наук, доц.,
Національний університет харчових технологій

Відповідальний
редактор

К. М. Рудаков, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Цибенко О. С.

Ц93 Системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу в
машинобудуванні [Текст]: навч. посіб. / О. С. Цибенко, М. Г. Кришук. –
К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 100 с. – Бібліогр.: с. 93 – 96. – 100 пр.

Подано загальне уявлення про призначення і можливості інформаційних
CALS-технологій для автоматизованих інженерних розрахунків у машино-
будуванні та комп'ютерних систем інженерного аналізу конструкцій. Наведено
характеристику CAD/CAM/CAE/PDM систем та універсальних і спеціалізованих
програм інженерного аналізу конструкцій методом скінченних елементів.
Подано приклади розв'язування типових задач механіки в системі ANSYS як
основи для виконання практичних і домашніх завдань з курсу «Сучасні системи
проектування».

Для бакалаврів та магістрів Механіко-машинобудівного інституту, які
навчаються за спеціальністю «Динаміка і міцність машин».

УДК 593.3:621.787

448642



© О. С. Цибенко,
М. Г. Кришук, 2008

ВСТУП

Автоматизація проектування займає особливе місце серед сучасних інформаційних технологій. Технічне забезпечення систем автоматизованого проектування (САПР) засновано на використанні персональних комп'ютерів і робочих станцій, обчислювальних мереж і телекомутаційних технологій. Математичне забезпечення САПР відрізняється багатством і розмаїтістю використовуваних методів обчислювальної математики, статистики, математичного програмування, штучного інтелекту.

Програмні комплекси САПР ставляться до числа найбільш складних сучасних програмних систем, що працюють у середовищі операційних систем Unix, Windows-NT/2000/XP/Vista, що використовують мови програмування C, C++, Java і інші сучасні CALS (Computer Aided Logistic Support – комп'ютерна підтримка логістичного супроводження) технології, об'єктивно-орієнтовані системи керування базами даних (СУБД), стандарти відкритих систем обміну даними в комп'ютерних середовищах – PDM (Product Data Management – система управління даними) системи.

Тема САПР і промислової автоматизації залучає все більшу увагу технічних фахівців, і це не випадково. В 1990-і роки підприємства захопилися автоматизацією бухгалтерського і фінансового обліку, корпоративного керування. Поза полем зору найчастіше залишався виробничий сектор, але ж саме він є основою функціонування підприємства і найважливішим джерелом прибутку.

Щоб випустити на ринок конкурентоздатний виріб, необхідно надати йому високі споживчі якості. Для цього, перш за все, необхідно оцінити, як поведеться майбутній виріб в реальних умовах експлуатації. Проводити випробування на його прототипі - трудомістке, дороге і довготривале заняття. Переконатися в працездатності конструкцій машин або виробів, перевірити їх міцнісні характеристики, оцінити реакцію на зовнішні дії і розрахувати

довговічність, не вдаючись до великих витрат часу і засобів, дозволяє використання систем автоматизованого проектування та інженерного аналізу. Цінність комп'ютерного «випробування» моделей конструкцій та виробів полягає і в тому, що воно дозволяє оперативно вносити зміни до його конструкції ще на етапі конструкторської розробки.

Знання основ автоматизованого проектування і вміння працювати із сучасними засобами САПР (CAD (Computer Aided Design – комп'ютерна підтримка проектування) /CAM (Computer Aided Manufacturing- комп'ютерна підтримка виробництва) /CAE (Computer Aided Engineering - комп'ютерна підтримка інженерних розрахунків) і PDM системами) потрібно практично будь-якому інженеру. Комп'ютерами насичені проектні підрозділи, конструкторські бюро і офіси. Робота конструктора за звичайним кульманом, розрахунки за допомогою калькулятора або оформлення звіту на друкарській машинці стали анахронізмом. Підприємства, що ведуть розробки без САПР або з малим ступенем їхнього використання, виявляються неконкурентоздатними, як внаслідок більших матеріальних і часових витрат на проектування, так і через невисоку якість проектів.

До теперішнього часу створена велика кількість програмно-технічних комплексів для САПР із різними ступенями спеціалізації і прикладної орієнтації. Автоматизація проектування стала необхідною складовою частиною підготовки інженерів різних спеціальностей. Інженер, що не володіє знаннями і не вміє працювати в САПР, не може вважатися повноцінним фахівцем.

На сучасному українському ринку і ринку СНД усе помітніше стають важливі структурні зміни: підприємства переходять від автоматизації розрізнених ділянок конструкторсько-технологічної підготовки виробництва до створення єдиного інформаційного простору, як у рамках заводу, так і в рамках холдингових структур. Дана тенденція, хоча і з деяким запізненням,

починає відповідати загальносвітовій практиці. CALS - технології є інструментом підвищення ефективності виробництва і конкурентоспроможності виробів. Вони дозволяють перейти від паперового документообігу до електронного і впровадити нові прискорені методи розробки виробів різного виробничого призначення.

Завдання, які вирішують сучасні САПР, на початку нового тисячоріччя вкрай важливі. Це висока ефективність роботи, максимальне використання інтелектуального ресурсу конкретного підприємства, країн СНД і світового співтовариства.

1. ІНФОРМАЦІЙНІ КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

1.1. Сучасні CALS-технології

У сучасному динамічному економічному середовищі машинобудівному підприємству життєво важливо максимально ефективно використовувати наявні в нього ресурси. Від ефективного використання ресурсів залежить не тільки рентабельність і конкурентоспроможність компанії, але й швидкість випуску нової продукції на ринок, що в цей час є визначальним чинником у формуванні конкурентної переваги.

В даний час у світі є ряд бізнес-стратегій, які дозволяють максимально ефективно використовувати ресурси компанії і будувати бізнес-процеси таким чином, щоб виробничий ланцюжок був гнучким і мав прозору і чітку структуру. Тут потрібно перш за все виділити одну з технологій, визнану в усьому світі – CALS - технологія [26]. Це стратегія переходу на безпаперову електронну технологію і підвищення ефективності бізнес-процесів за рахунок інформаційної інтеграції і спільного використання в компанії інформації.

Впровадження CALS - технологій є одним із пріоритетних завдань у розвитку підприємств машинобудівної галузі. Елементи CALS - технологія почала формуватися в 80-х роках у США, на першому етапі ініціатива одержала назву CALS. Довівши свою ефективність, концепція CALS спочатку

активно застосовувалась в промисловості, будівництві, транспорті та інших галузях економіки, розширюючись і охоплюючи всі етапи життєвого циклу продукту – від маркетингу до утилізації. Ця технологія одержала визнання і підтримку в багатьох країнах, у тому числі в Україні і країнах СНД, де термін CALS часто замінюється терміном **І П В (інформаційна підтримка виробу)** .

Розробка рішень в області CALS - технологій дозволяє підвищити ефективність інформаційної взаємодії на етапах проектування, сервісного обслуговування і експлуатації, а також забезпечує задану якість продукції. В актуальності розробок в області CALS - технологій слід зазначити, що провідні вітчизняні підприємства-експортери країни вже сьогодні зіштовхнулися з такою ситуацією, коли обов'язковою умовою висновку контракту на поставку наукомісткої продукції є вимога подання користувачеві технічної документації в електронній формі відповідно до вимог стандартів CALS, а також до засобів комп'ютерної інформаційної підтримки процесів технічного обслуговування, матеріально-технічного забезпечення, замовлення запасних частин і ремонту. Аналогічні проблеми, пов'язані з електронною взаємодією і спільним використанням конструкторської, виробничої і комерційної інформації в електронній формі, виникають у рамках спільних проектів з розробки і виробництва наукомісткої продукції, виконуваних із закордонними партнерами. Таким чином, практичне застосування CALS - технологій є надзвичайно актуальним завданням.

Для розв'язку завдань створення електронної документації на готові вироби у відповідності зі стандартами CALS потрібна розробка модулів PDM системи, комплексу програмних засобів, що забезпечують інтегроване керування даними про машинобудівні вироби і технології організації процесів конструкторсько-технологічної діяльності в безпаперовому середовищі.

Існує величезний перелік стандартів, що регламентують електронне подання конструкторської, технологічної, виробничої, експлуатаційної

інформації. Прикладами таких стандартів можуть бути: STEP, PLib, MANDATE, Parametrics і ін. [14, 29]

В основі CALS лежать дві базові технології: одна для подання даних, інша для подання документації. Прикладом першої є стандарт ISO 10303 STEP [14, 27, 28], другий - стандарт ISO 8879 SGML, що регламентує технологію подання документації у вигляді розміченого тексту.

Стандарт STEP (**Standard for the Exchange of Product Model Data - стандарт для обміну виробничими даними моделі**) призначений для зберігання даних про виріб: склад виробу, структури геометричних моделей, властивостей і характеристик. Роботу із цим стандартом підтримують найпоширеніші CAD/CAM/CAE системи і PDM системи такі як Windchill, Optegra, CADD5, Unigraphics, ProEngineer, Autodesk Mechanical Desktop, AutoCAD 2000-2008, SolidWorks і ін. [29]. Крім того, існує ряд комерційних програмних продуктів, що забезпечують перетворення даних з різних форматів у формат STEP. Використання єдиного електронного опису (електронної моделі) виробу дозволить забезпечити наступність використання інформації, скоротити витрати на її повторне уведення, підготовку і обробку. STEP - це універсальний формат повного подання даних про виріб на всіх етапах його життєвого циклу. Таке подання забезпечує обмін нейтральними файлами і служить як основа для баз даних і архівування, а також при передачі твердотільних моделей між різноманітними системами САПР.

Роботу із стандартом STEP підтримують практично всі найпоширеніші CAD/CAM і CAE системи (Unigraphics, ProEngineer, CADD5, SolidWorks, Autodesk Inventor, Autodesk Mechanical Desktop і ін.) [29]. Таким чином, за допомогою CALS - технології на основі стандартів сімейства STEP можна вирішити наступні задачі: 1) Створення структурованого електронного сховища конструкторських даних про виріб, що інтегрує процеси розробки і одержувані результати в єдине ціле, 2) Підготовка ліцензійної документації, при продажі ліцензії і передачі її в електронній формі, 3) Обмін даними між

підприємствами, що застосовують різномірні системи автоматизованого проектування.

Стандарт ISO 8879 SGML використовується для підготовки електронної документації - тобто наборів даних, призначених для сприйняття людиною. На цій основі розробляються інтерактивні електронні технічні центри управління. Це мультимедійні комплекси, призначені для підтримки процесів обслуговування, ремонту, пошуку несправностей і т.д. На основі стандартів сімейства SGML можна вирішити наступні завдання: 1) Підготовка електронної експлуатаційної і ремонтної документації, 2) Організація обміну електронними документами між підприємствами або замовником.

Очевидно, що використання єдиного електронного опису (електронної моделі) виробу дозволить вирішити перераховані вище проблеми, а також забезпечує наступне використання інформації, скорочує витрати на її повторне введення, підготовку і обробку.

Фізичне зберігання даних в PDM-системах здійснюється на основі СУБД Oracle або Informix, Sybase, Ingres та інші, що підтримують архітектуру клієнт-сервер, яка функціонує у відкритих системах.

Ще в 1980-х роках постачальники САПР почали вирішувати проблему зберігання цифрової документації - так з'явилися перші системи електронного архіву [11]. Архівування і зараз залишається однією з функцій PDM-систем. Однак сучасні PDM вирішують набагато більше широке коло завдань, дозволяючи повноцінно реалізувати наступний етап розвитку САПР - технологій, акумулювати цифрову інформацію про виріб і безупинно управляти даною інформацією протягом усього життєвого циклу виробу PLM (**Product Lifecycle Management - інформаційне управління життєвим циклом продукції**). Такий підхід є принциповим моментом сучасного етапу автоматизації промислового виробництва.

В PDM - системах удосконалювання і полегшення доступу до даних про виріб досягається завдяки інтеграції всієї інформації про виріб у логічно єдину

модель. PDM - система управляє всіма пов'язаними з виробом інформаційними процесами (у першу чергу, проектуванням виробу і технологією його виробництва), а також всією інформацією про виріб - його складом і структурою, геометричними даними, кресленнями, планами проектування і виробництва, нормативними документами, програмами для верстатів з ЧПУ, результатами аналізу, кореспонденцією, даними про партії і окремі екземпляри виробу і багато іншим.

PDM - система виступає як засіб інтеграції багатьох використовуваних на підприємстві прикладних автоматизованих систем (CAD/CAM/CAE і інших) за рахунок збору поступаючих з них інформаційних потоків в логічно єдину модель на основі стандартних інтерфейсів взаємодії (рис.1). Для управління та забезпечення функціонування виробничої інформації застосовуються інтегровані системи управління (ICU) другого, третього і четвертого покоління - напрямком MRP (**Material Resource Planning - планування матеріальних ресурсів**) і MRP-II - ERP (**Enterprise Resource Planning - планування ресурсів підприємства**). PDM система, виділена з ICU автономно (незалежно від MRP/ERP системи), на основі єдиного електронного опису продукції, забезпечує підтримку всього життєвого циклу продукції від розробки (CAE/CAD) до маркетингу [6, 16, 17].

Конструктори, технологи і інші фахівці не тільки одержують інформацію про виріб, але і доповнюють її, формуючи состав виробу, що буде актуальним для різних служб підприємства. Надалі, після виготовлення виробу, інформація про нього буде використана сервісними підрозділами для планового обслуговування, замовником - для конфігурування готової продукції під свої специфічні потреби, а інженерним составом - для модернізації і виготовлення нового виробу на основі вже спроектованого.

Існує багато задач, які вирішуються за допомогою PDM - системи. Серед них можна виділити найпоширеніші: 1) Створення електронного архіву креслень і іншої технічної документації; 2) Створення єдиного інформаційного

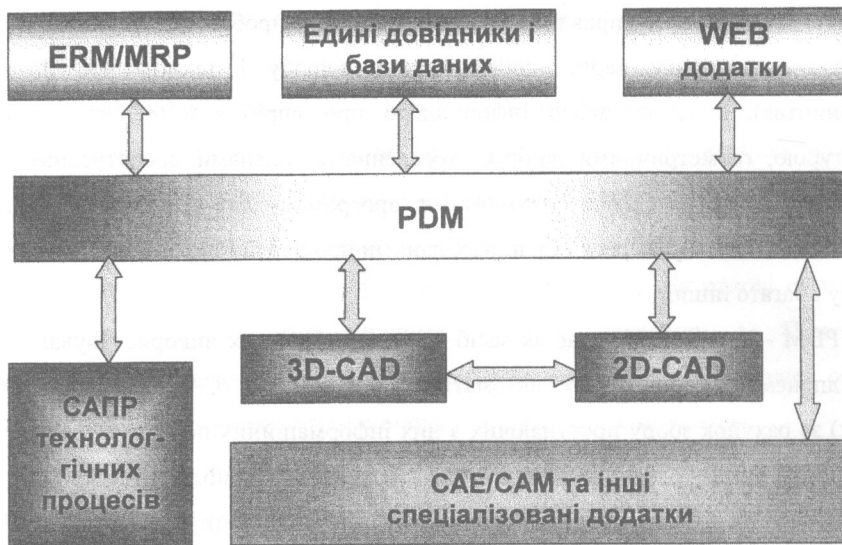


Рис.1. Стандартні інтерфейси взаємодії в PDM-системі

простору для всіх учасників життєвого циклу виробу; 3) Автоматизація керування конфігурацією виробу; 4) Побудова системи якості продукції відповідно до міжнародних стандартів якості серії ISO 9000.

1.2. CAD/CAM/CAE/PDM системи

Сучасні CAD/CAM/CAE/PDM системи є стратегічним засобом підвищення конкурентоспроможності продукції, і забезпечують підприємству перехід на якісно новий рівень рішення конструкторсько-технологічних і виробничих завдань [26].

Процес проектування з використанням CAD/CAM/CAE/PDM - систем, перехід на інформаційні комп'ютерні технології, електронне визначення виробу - все це звучить уже звично для наших вітчизняних спеціалістів. Разом з тим, як показує досвід використання таких систем вітчизняними підприємствами, їхнє впровадження в більшості випадків не дозволяє досягти показників продуктивності праці, що відповідають показникам передових промислових країн.

Це відбувається, тому, що ефект від застосування CAD/CAM/CAE/PDM не може бути досягнутим частинними змінами традиційних методів роботи і вкрапленим впровадженням засобів автоматизації. Процес автоматизації підготовки виробництва не може мати часових рамок і повинно протікати постійно поки існує підприємство. Тому першочергове питання - визначення стратегії впровадження засобів автоматизації. Неправильно обрана стратегія або ніяк не відіб'ється на техніко-економічних показниках об'єкта впровадження, або, найімовірніше, погіршить їх. Необхідно визначити ефективну стратегію впровадження автоматизованих систем у виробництво.

Цим вимогам відповідає **концепція** наскрізного циклу проектування і виробництва **"від ідеї до металу"**. Суть її полягає в тому, що комп'ютерні системи і устаткування повинні розглядатися, як єдиний інформаційний технологічний процес на всіх етапах від проектування до виготовлення виробів. Принципова схема побудови таких технологій показана на рис.2.

Зі схеми видно, що концепція наскрізного циклу використовує 3-х вимірну модель механічної системи, як базовий елемент для об'єднання окремих етапів підготовки і виробництва в єдину інформаційну технологію.

Блок "PDM-система" [29]. На отримане замовлення в PDM – системі відкривається проект, у якому буде надалі реєструватися вся конструкторсько-технологічна документація по виробу. На цій стадії визначаються концептуальні рішення по виробу, розробляється структура виробу, призначаються виконавці і строки виконуваних робіт. Дуже важливо, що PDM - система може автоматично відслідковувати процес виконання робіт і внесення змін у документацію, урахувати модифікації і варіантність виконання виробу, становити специфікації, створювати і підтримувати архів документації.

Користувачами PDM-системи можуть бути всі співробітники всіх підприємств-учасників життєвого циклу виробу: конструктори, технологи, працівники технічного архіву, а також співробітники, що працюють в інших

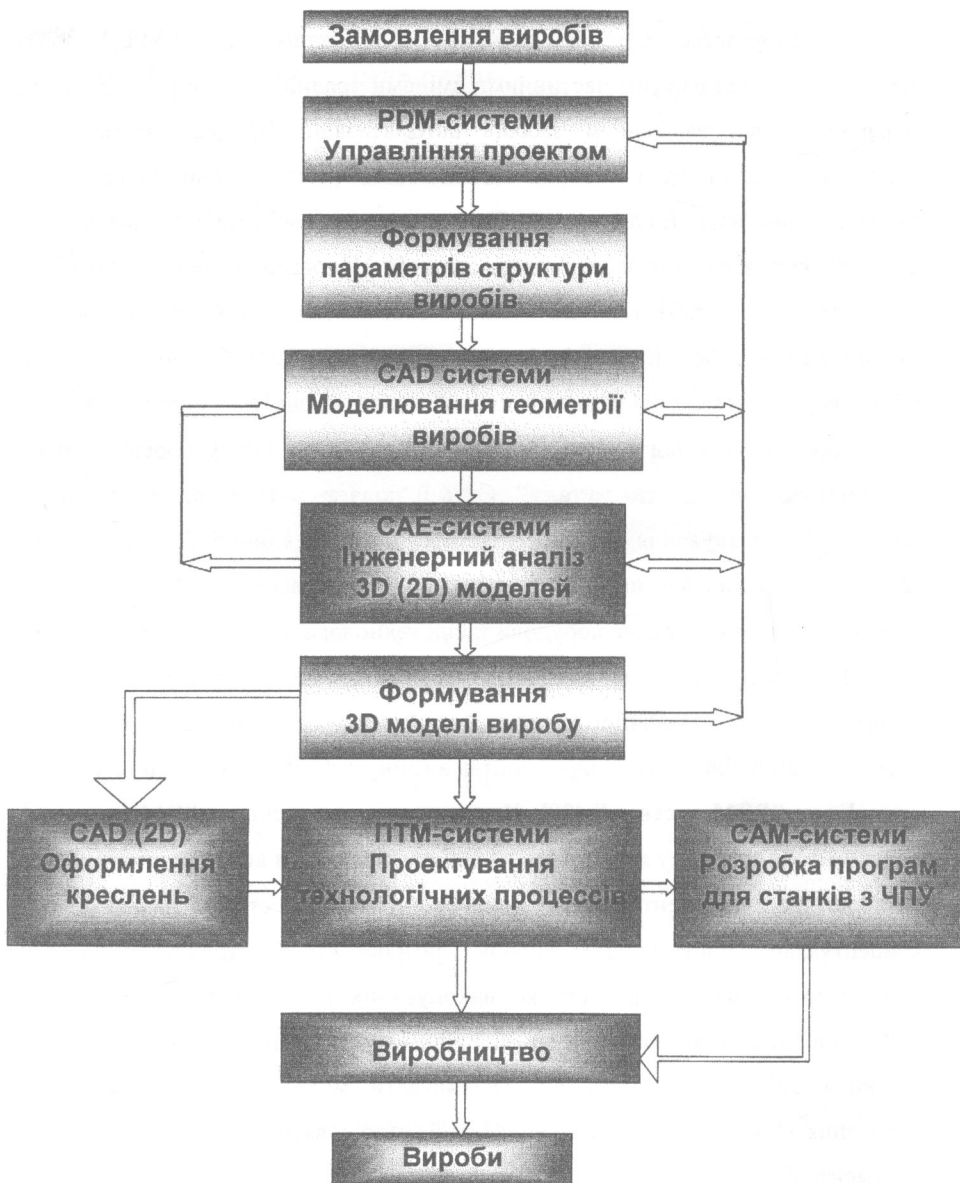


Рис.2.Принципова схема побудови процесу проектування і виробництва "від ідеї до металу" в машинобудуванні

предметних областях (збут, маркетинг, постачання, фінанси, сервіс, експлуатація і т.п.). Головне завдання PDM-системи - надати відповідному співробітникові необхідну інформацію в потрібний час і в зручній формі.

Блок "CAD(3D)-системи" [3, 19, 25, 27]. Для кожної оригінальної деталі конструктор в CAD-системі створює її просторову геометричну модель. При цьому він може використовувати апарат поверхневого і твердотілого (відповідно до прав доступу) моделювання.

Широкий спектр різних типів поверхонь у геометричному моделюванні дозволяє створювати моделі будь-яких виробів складних форм. Твердотільне моделювання дає можливість конструкторові швидко і ефективно створювати потрібні об'єкти із просторових примітивів - компонентів. Можлива побудова гібридних моделей, у яких одночасно використовується апарат, як поверхневого, так і твердотілого моделювання. Моделі деталей можуть бути об'єднані при конструюванні. Будь-які зміни, виконані над об'єктом окремої моделі, відібраються на всіх етапах конструювання, що містять цей об'єкт. Результати роботи конструкторів - 3-х вимірні моделі деталей, вузлів, виробів, є інформаційною базою для виконання всіх наступних робіт з технології наскрізного циклу.

Блок "CAE-Системи" [3, 9, 16, 20, 23, 29]. CAE – системи забезпечують розв'язок широкого кола інженерних завдань. Всі системи інженерних розрахунків використовують 2-х та 3-х вимірні моделі, як вхідні дані для розрахунків. На цьому етапі сформована модель досліджуваного об'єкта піддається розрахунковому дослідженню на механічні, теплові, електромагнітні та інші види впливів з метою одержання відомостей про міцнісні, динамічні, теплофізичні і інші властивості виробу, що мають зв'язок з вихідними показниками якості виробу. Крім того, CAE-системи дозволяють виконати моделювання технологічних процесів виготовлення виробів - лиття, штампування, зварювання і т.д. Все це забезпечує обґрунтований вибір найбільш ефективних варіантів технології. За результатами розрахунків

вносяться зміни в геометрію моделей деталей і, якщо необхідно, в техногію. Цей процес може мати кілька ітерацій.

Методика комп'ютерного моделювання [10], верифікована за результатами експериментів, дозволяє визначити найбільш вразливі місця елементів конструкцій, замінивши тим самим частину випробувань розрахунками, заздалегідь підсилити проблемні зони і створити спрощені, але достовірні інженерні методики, у тому числі і спеціалізовані математичні калькулятори, вбудовані в CAD-системи.

Блок "CAD(2D)-системи" [15, 19, 29]. Двовимірні CAD-системи забезпечують оформлення і випуск креслень. Використання на вході 3-х вимірних моделей дозволяє автоматизувати створення видів, розрізів, перетинів, проставити геометричні розміри, поліпшити наглядність і читаність креслення за рахунок широкого використання ізометричних проекцій. Розподіл робіт з випуску конструкторської документації між 2-х і 3-х вимірними CAD-системами дозволяє істотно знизити витрати на автоматизацію даної ділянки підготовки виробництва за рахунок більш низької вартості 2-х вимірних систем (на їхню частку доводиться до 80% об'єма конструкторських робіт).

Блок "ПТМ-системи" [28, 29]. Системи проектування технологічних процесів автоматизують складання технологічної документації по видах обробки: металорізання, ливарне, зварювальне, ковальсько-пресове і т.д. Для ефективної роботи в рамках забезпечення стандартів PDM-системи повинна бути створена єдина інформаційна база даних устаткування, інструментів, людських ресурсів, технологічних операцій, трудових і матеріальних нормативів. На даній стадії проектування визначаються матеріальні і трудові витрати на виробництво. Основний ефект від автоматизації проектування технологічних процесів - зниження собівартості виробу за рахунок обґрунтованого вибору варіанту виготовлення.

Блок "САМ-системи" [28, 29]. САМ-системи автоматизують розробку технології обробки виробів на устаткуванні із числовим програмним управлінням (ЧПУ). На підставі 3-х вимірної моделі і заданих технологічних параметрів обробки автоматично генерується управляючі програми для того або іншого устаткування із ЧПУ. Сформована технологія надалі може бути передана по каналах зв'язку безпосередньо в систему ЧПУ верстата і виконана. Таким чином, технічно реалізується ідея безпаперової технології виготовлення виробу.

Наприклад, система MEGACAD [29], призначена для проектування креслень різноманітних деталей (CAD-модуль) з подальшим генеруванням програми (САМ-модуль) для обробки деталі на верстаті з числовим програмним управлінням (ЧПУ). Передача згенерованих програм до ЧПУ верстатів через стандартний порт RS-232 для подальшого їх виконання.

САМ-системи дозволяють збільшити прибутковість виробництва за рахунок: виконання замовлень на складні вироби (як правило такі замовлення більше вигідні); скорочення трудомісткості і матеріалоємності виготовлення; зменшення витрат верстатного часу (майже в 2 рази); випуску продукції "правильно з першого разу".

Як відзначалося вище, вся конструкторська і технологічна документація створюється під керуванням PDM-системи і, пройшовши покладені процедури узгодження і затвердження, в остаточному підсумку надходить в архів проекту, де вона логічно погоджується із структурою виробу, його модифікаціями і варіантами виконання. З архіву документація надходить у виробництво відповідно до технологічних маршрутів виготовлення. Архів дозволяє підтримувати вірогідність робочої документації у виробництві.

Які переваги дає застосування інформаційних технологій за схемою наскрізного циклу? Найбільш вагомими перелічені нижче:

- Скорочення строків підготовки виробництва за рахунок розпаралелювання робіт. Виробництво деяких компонентів виробу

можна починати, не чекаючи закінчення розробки конструкторської документації.

- Мінімізація втрат у виробництві від помилок і прорахунків, допущених при проектуванні виробу, від неузгодженого відпрацьовування змін, внесених у проект.
- Можливість цілеспрямованого поетапного розвитку системи керування підприємством. Це дозволяє оптимізувати вкладення в автоматизацію, можна починати з "вузьких місць" і поступово розширювати границі автоматизації до створення інтегрованих комплексних рішень, домагаючись на кожному кроці максимальної віддачі.

Згідно стратегії впровадження "крок за кроком" необхідно починати з "вузьких місць", де первісне вкладення засобів може дати найбільш швидку віддачу. Традиційно такою ділянкою є виготовлення деталей і формуючої оснастки із складною геометрією.

Оцінка вартості (за даними аналітичної компанії Gartner Group [29] виправлення однієї - єдиної помилки на різних стадіях підготовки виробництва деталей і оснащення має наступну градацію: 1) \$1 – концептуальне проектування; 2) \$10 – конструкторська обробка виробу; 3) \$100 – виготовлення макета виробу; 4) \$1 000 -проектування технологічної оснастки; 5) \$10 000 – виготовлення оснастки; 6) \$100 000 – випуск установчої серії; 6) \$1 000 000 – серійне виробництво.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Для розв'язання яких задач застосовуються інформаційні CALS технології?
2. Які автоматизовані системи використовуються в САПР машинобудування?
3. Наведіть приклади CAD систем, які використовуються в проектуванні машинобудівних конструкцій.

4. Яке функціональне призначення САМ систем?

5. Які системи забезпечують комп'ютерну підтримку інженерних розрахунків?

6. Нведіть назви найпоширеніших на практиці САЕ систем.

7. Яка прикладна орієнтація PDM систем?

8. Дайте характеристику електронної моделі виробу та найпоширеніших форматів обміну даних про його параметри.

1. Охарактеризуйте сучасний етап автоматизації промислового виробництва.

0. Дайте характеристику функціонального призначення MRP/ERP – систем.

1. Охарактеризуйте процес проектування "від ідеї до металу" в машинобудуванні.

2. Які вимоги пред'являють при виборі систем автоматизованого проектування в машинобудуванні.

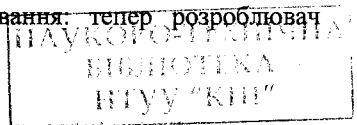
3. Які переваги дає застосування інформаційних технологій?

2. УНІВЕРСАЛЬНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ

4786/22

Двовимірне проектування активно розвивалося до середини 1990-х років. Системи поповнились незліченною кількістю додатків, бібліотек, надбудов, що дозволили максимально автоматизувати та спростити більшість креслярських завдань. Розвиток обчислювальної техніки і CAD/CAM/CAE/PDM систем дозволило вивести технології проектування на новий рівень трьохвимірних об'єктів, формування технологічних даних про виріб, ведення централізованого архіву цієї інформації і автоматизованого випуску технологічної документації.

Поява трьохвимірного моделювання виявилася справжнім проривом, спочатку доступним тільки користувачам потужних графічних Unix-Станцій. По-справжньому масовим 3D - моделювання стало ближче до середини 1990-х років, коли 3D-CAD - системи були переведені на платформу PC. Які ж переваги надало просторове конструювання? Першу перевагу ми вже назвали: конструкторам не доводиться "переводити свої думки" із просторового в плоский вид. Якісно змінився процес проектування, тепер розроблювач



відразу бачить свою конструкцію такою, яка вона і буде в дійсності. Допомагає об'ємна модель і в реалізації маси супутніх функцій. 3D-модель можна використовувати для розв'язування прикладних задач математичної фізики (аналіз механічних напружень, переміщень, коливань, гідродинаміки, електродинаміки, теплопередачі), підготовки управляючих програм для верстатів із ЧПУ, а також реалістичних зображень для технічної документації і рекламних матеріалів, створення фізичних зразків на установках швидкого виготовлення прототипів. Ну і звичайно, по 3D - моделі створюються креслення - причому робити це істотно простіше, ніж вручну, оскільки вся геометрія на кресленні формується автоматично, дозволяючи конструкторові не замислюватися про правильність побудови видів, розрізів і перетинів. Слідом за САД - системами практично всі САМ/САЕ-пакети працюють із тривимірними моделями, дозволивши в деяких випадках відмовитися від креслення взагалі. В даний час, на підході і технологічні САПР, що працюють прямо з конструкторською 3D-моделлю. Якщо підсумувати все вищесказане, то не важко визначити найважливішу перевагу тривимірного моделювання: тепер помилки можна знайти і виправити на ранній стадії проектування, до появи перших дослідних зразків.

У цей час у світі існує великий ринок програмних і апаратних засобів в області автоматизації проектування, технологічної підготовки виробництва і власне виробництва. Номенклатура зазначених засобів досить велика, вони в значній мірі відрізняються одне від одного по основних параметрах і характеристиках, що визначають клас розв'язуваних задач і продуктивність праці. Умовно можна скласти наступну класифікацію широко застосовуваних систем автоматизованого проектування (САПР): 1) легкий рівень (AutoCAD; CADdy, Компас і ін. [19, 29]); 2) середній рівень (Autodesk Inventor, Autodesk Mechanical Desktop, SolidWorks, Компас3D і ін. [9, 18, 29]); 3) важкий рівень (CATIA, CADDSS5, ProEngineer, Unigraphics і ін. [29]).

При виборі систем САПР враховують різні вимоги: 1) відкритість, існування програмних інтерфейсів і базових форматів даних для розв'язування складних комплексних задач; 2) обмін графічними даними між системами в стандарті STEP, що становить основу CALS технології; 3) можливість твердотільного і поверхневого, параметричного і жорсткорозмірного моделювання; 4) робота із складаннями конструкцій з різним числом структурних деталей (виробів); 5) підтримка паралельної роботи над виробами; 6) наявність засобів інженерного аналізу; 7) наявність бібліотек стандартних деталей; 8) можливість керування процесом проектування на основі єдиної інженерної бази даних проекту.

У цей час на підприємствах України широко використовуються наступні системи САПР:

-**AutoCAD, Компас** [19, 29] - програмні продукти для автоматизації конструкторських робіт;

-**Autodesk Mechanical Desktop, Компас 3D** [9, 15, 29] - інтегровані параметричні пакети, що включають засоби твердотільного об'ємного конструювання, які необхідні на всіх стадіях роботи - від розробки ескізів до конструювання деталей і виконання креслень. Системи мають функції розробки вузлів, деталей і моделювання поверхонь. Однак існують обмеження на кількість структурних елементів у складанні (набір зв'язаних між собою деталей і вузлів), наприклад, в Autodesk Mechanical Desktop до 1000;

-**CADDS5** [29]- система автоматизованого проектування, конструювання і інженерного аналізу виробів. Система забезпечує «повне електронне визначення виробу» на базі твердотільної моделі і технології паралельного інжинірингу і дозволяє здійснити одночасну роботу декількох груп фахівців, що беруть участь у розробці проекту.

- **Autodesk Inventor Series/Professional** [18, 29]- це нова, сучасна САПР (2-го рівня) для конструювання машин і механізмів, що використовує

можливості операційної системи Microsoft Windows. Інструментальні засоби Autodesk Inventor забезпечують повний цикл конструювання і створення конструкторської документації. Autodesk Inventor - це інструмент, спрямований на проектування більших складань, що включають десятки тисяч елементів. За допомогою адаптивного механізму керування даними Autodesk Inventor підтримує сегментовану базу і швидке завантаження її на виконання. Шляхом усунення необхідності розбивати проект на досить малі етапи проектування, Autodesk Inventor підвищує швидкість та точність створення і виконання проектів. Адаптивна технологія, іменовані видові подання, доступні компоненти, відстеження креслення і паралельна робота над проектом - все це розширює границі і досвід розробки великих проектів.

За допомогою Autodesk Inventor значно скорочується цикл розробки моделі конструкції. Тут реалізована можливість спільної роботи над конструкцією всіх розробників, включаючи групи інженерів, що перебувають на великому віддаленні один від одного. Забезпечується доступ до тривимірної моделі конструкції не тільки розроблювачам, а всім групам користувачів, задіяним у роботі над проектом. Є можливість введення користувальницьких примітивів у параметричному виді з метою наступного повторного використання. Ці показники підкріплені наступними функціями: 1) адаптивне конструювання; 2) адаптивне компоновання; 3) вбудований конструктор елементів; 4) вбудовані математичні калькулятори механічного розрахунку стандартних елементів; 4) інструментарій, що забезпечує спільну роботу над конструкцією; 5) системи підтримки і супроводу процесу конструювання.

Адаптивна технологія дозволяє поліпшити процес розробки компоновань конструкції. На ранніх етапах конструювання інженер часто не знає, яку форму мають окремі деталі. Тому він воліє користуватися спрощеними конструкціями, які часто являють собою прості 2D малюнки або ескізи. Autodesk Inventor полегшує цю послідовність виконуваних дій за рахунок надання можливості створення складальних конструкцій, у яких деякі

деталі представлені схематично, а інші є повністю певними тривимірними моделями. Коли завершується створення загальної конструкції моделі, система дозволяє змінити форму деталі, представлену у вигляді малюнка або ескізу та накласти всі взаємні зв'язки для даної деталі в конструкції таким чином, яким це передбачено інженером-конструктором на початковому етапі роботи над конструкцією.

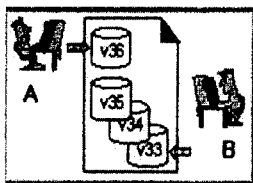
Можливості геометричного моделювання в Autodesk Inventor включають весь набір функцій для об'ємного твердотілого моделювання, які можуть бути використані в процесі роботи над моделями складних вузлів і деталей. Моделювання починається з використання динамічного майстра ескізів з інтерактивним визначенням інтелектуальних профілів, що будуються з використанням ліній, дуг і сплайнів. Майстер ескізів являє собою графічний редактор, пов'язаний з логічним вирішувачем, за допомогою якого не тільки приймаються рішення в процесі роботи над ескізами, але й накладаються обмеження на зв'язки між елементами конструкції. Обмеження визначаються і накладаються автоматично залежно від виду конструкції. Ескізи зберігають свої властивості незалежно від того, де використовуються їхні фрагменти. Це дозволяє розроблявачам переміщувати елементи ескізів у реальному часі відповідно до раніше встановлених правил їхнього включення в складні зборки. Ескізи можуть містити багато різних елементів, кріплення у вигляді хомутив, скоб і т.і., які виявляються і ідентифікуються автоматично. Елементи вузлів і деталей, що мають складну геометрію, можуть бути створені з використанням функцій видавлювання, обертання, розгорнення, протягання профілю по заданій траєкторії. Також можуть бути створені деталі складних форм, що включають комбінації фасок, сполучень, ребер жорсткості, похилих граней, отворів, оболонки і складних просторових елементів. Обмеження можуть бути визначені для окремих елементів як у процесі їхньої розробки, так і безпосередньо в момент їхнього включення в складання. Всі ці

властивості і обмеження можуть бути також перевизначені або відредаговані з використанням середовища адаптивного конструювання.

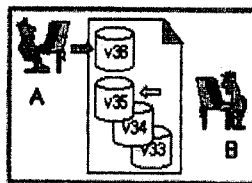
У середовищі для спільної роботи Autodesk Inventor користувачі можуть паралельно працювати над тим самим виробом, але, як правило, над різними деталями або вузлами цього виробу. Використовуючи паралельний доступ, групи проектувальників можуть одночасно відкрити один і той же самий конструктив. Фактично при цьому відкриваються тільки файли компонентів виробу, що редагуються. Інші компоненти виробу зображуються за допомогою посилань на файли цих компонентів, які зберігаються на сервері або на локальному диску.

При редагуванні варто періодично зберігати зміни і замінити файли компонентів виробу новими версіями. Це дозволяє завжди мати саму останню інформацію про виріб у цілому (рис.3).

CAE-системи зовсім недавно займали другорядні позиції, що відбивалось навіть у де-факто стандартному порядку перерахування аббревіатур - CAD/CAM/CAE. Звичайно інструментарій CAE - систем застосовувався для оцінки показників якості (наприклад, міцності або зносостійкості) і технічної/технологічної оптимізації фактично "готової продукції" virtual manufacturing (VM) - моделей конструкцій. Але в межі розвитку ідеї "віртуального виробництва" такий підхід виявився занадто недосконалим: симптоматичне лікування, як відомо, саму хворобу не лікує, а



Конструктор А редагує версію 36 файла деталі. Конструктор В відкрив виріб версії 33



Конструктор А продовжує редагувати версію 36. Конструктор В відновив виріб використовуючи версію 35 деталі

Рис. 3. Організація паралельного доступу до моделі конструкції на ПЕВМ

можливість "запуску у виробництво" свідомо неякісного виробу, що через запізнені спроби оптимізації буде ще й дорогим. Відповідно, "віртуальне виробництво" повністю змінило архітектуру процесу проектування - тепер вона описується так: CAE/CAD/CAE/CAM, а людською мовою виражається послідовністю простих директивних вказівок:

1. Сформулювати принцип дії і основні конструктивні особливості майбутнього пристрою (побудувати високорівневу модель) і оцінити показники якості цієї моделі за допомогою CAE-систем.

2. Провести конструкторську роботу, одержати моделі конкретних конструкцій в CAD-системах.

3. Оцінити показники якості уточненої моделі (з обліком "конструкцій", отриманих на другому етапі) за допомогою CAE-систем, провести оптимізацію.

4. Сформувати технологічну документацію для виробництва за допомогою CAM-систем.

Потреба конструкторських бюро, науково-дослідних організацій і промисловості в універсальних, швидких, надійних і зручних для користувача CAE-програмах, що реалізують широкий спектр розрахунків (статичних, динамічних, теплових і ін.) послужила імпульсом до розробки різними фірмами пакетів прикладних програм скінченно-елементного аналізу [1, 3, 10, 12, 13, 21]. Це відомі програмні продукти ANSYS і DesignSpace фірми ANSYS Corporation (п.2.2); Cosmos/M Designer, Cosmos/DesignStar, Cosmos/Works фірми Structural Research & Analysis Corporation; Design Works фірми CADSI; АПМ WinMachine Центра програмного і наукового забезпечення АПМ і ін.

Всі програмні продукти різних фірм можна розділити на дві основні групи.

Перша група - програми скінченно-елементного аналізу (Cosmos/Works, DesignSpace, MSC.InCheck [1, 20]), що вбудовуються на рівні меню у відомі

пакети САПР і є необхідним інструментарієм для швидкого розрахунку (експрес-аналіз) елементів або складальних одиниць безпосередньо в середовищі їхньої розробки. Для зручності користувачів при цьому реалізуються алгоритми автоматизованого створення скінченно-елементної моделі конструкції, інтуїтивно зрозумілі схеми призначення граничних умов. Незважаючи на зазначені достоїнства, програми даної групи мають обмежений набір можливостей для створення і розрахунку моделей конструкцій з ускладненими властивостями по функціональних схемах, граничним умовам, навантаженням, геометричним особливостям і ін.

Побудовані в цих середовищах розрахункові моделі не завжди вирішують поставлені завдання, що змушує звертатися до більше функціонально повних програм скінченно - елементного аналізу.

Друга група - це програми, орієнтовані в першу чергу на підготовку повноцінної скінченно - елементної моделі з максимальними можливостями моделювання, врахування особливостей геометричного, силового характеру і виконання різних видів розрахунків. У них присутні необхідні інструменти для геометричного моделювання конструкцій і розвинені засоби експорту/імпорту геометричних моделей з інших САПР-програм.

2.1. УНІВЕРСАЛЬНІ ПАКЕТИ ПРОГРАМ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ MSC

До числа всесвітньо відомих фірм, що пропонують комплексні комп'ютерні технології автоматизації інженерних досліджень, відносяться компанія ANSYS Inc. (п.2.2 [2-4]), MacNeal-Schwendler Corporation (MSC) і Mechanical Dynamics Inc. (MDI). Дві останні – виступають в усьому світі як партнери, що пропонують взаємно доповнючі один одного програмні продукти.

Software Corporation (до червня 1999 р. - MSC Corporation), заснована в 1963 році і з 1965 року провідний розробник системи NASTRAN (NAsa

STRuctural ANalysis [20, 29]- аналіз конструкцій національного комітету США по авіонавтиці і космічних дослідженнях).

Компанія MSC має багатий досвід в області розробки систем скінченно-елементного аналізу (MCE), поставляючи на ринок цілий ряд взаємодоповнюючих систем, що дозволяють вирішувати широкий спектр інженерних задач практично у всіх галузях промисловості і науки. У найбільш науковомістких галузях (аерокосмічна промисловість і автомобілебудуванні) системи MSC є стандартом і застосовуються як еталон при сертифікації. Комплексні рішення звичайно пропонуються з урахуванням специфіки підприємства-замовника: визначається склад систем, модулів, черговість впровадження, складаються і плануються довгострокові програми, готуються і проводяться навчальні семінари.

Компанія Mechanical Dynamics також відома як розроблювач програмного комплексу імітаційного моделювання механічних систем ADAMS. Сьогодні продукція марки ADAMS становить приблизно 65% світового ринку програмних засобів кінематичного і динамічного аналізу механічних систем.

Системи MSC мають повністю відкриту архітектуру, тому розробки користувачів можуть одержати новий розвиток у програмному середовищі MSC. Наведені описи програмних продуктів представляють спектр інструментів практично для всіх додатків в області проектування конструкцій або інженерних розрахунків. Різні рівні програмних пакетів можна використовувати на різних платформах - від ПК до робочих станцій і суперкомп'ютерів. Гнучка модульна структура продуктів MSC дозволяє сформувати необхідний для користувача пакет програмних засобів.

До теперішнього часу фірмою MSC [20, 29] випущено широкий набір програмних продуктів скінченно - елементного аналізу (в тому числі система MSC.ADAMS/View в кооперації з фірмою Mechanical Dynamics) ряд яких зазначено нижче:

- MSC.NASTRAN - базова програма;
- MSC.PATRAN (PAtches for NasTRAN) - «заплатки» (доповнення) для NASTRAN - інтегроване середовище моделювання, аналізу і проектування на основі сучасного графічного інтерфейсу;
- MSC.FATIGUE - розрахунки довговічності, втоми, тріщинотійкості, оптимізація конструкцій за критерієм довговічності;
- MSC.DYTRAN - аналіз високочастотних скороминучих динамічних процесів;
- MSC.ABAQUS, MSC.Advanced FEA - комплексний нелінійний аналіз конструкцій і розрахунок складних задач термоміцності;
- MSC.NASTRAN for Windows - реалізація широких можливостей MSC.NASTRAN на персональному комп'ютері в середовищі Windows;
- MSC.InCheck - інженерна програма експрес-аналізу міцності конструкцій, яка інтегрована безпосередньо в широко відомі пакети САПР - Mechanical Desktop (AutoCAD), SolidWorks, SolidEdge та призначена для конструкторів і інженерів, що не є фахівцями в області скінченно-елементного аналізу;
- MSC.SuperForge - тривимірне моделювання процесів ковки і штамповки;
- MSC.AMS - моделювання конструкцій автомобілів;
- MSC.ADAMS/View – моделювання поведінки механічної системи, яка має елементи конструкції, що рухаються, та аналіз їх динамічних і кінематичних характеристик.
- MSC.NVH-Manager (Noise Vibration Harshness) - моделювання і аналіз акустики, вібрацій і низькочастотних впливів для розрахунків в автомобілебудуванні, а також інші спеціалізовані програми.

Більше докладний опис деяких з перерахованих вище програмних продуктів наведено нижче.

2.1.1. MSC.NASTRAN

Головний продукт MSC - MSC.NASTRAN [20] - це одна із кращих на ринку програмних систем, що використовують МСЕ. У сфері, де ненадійні результати можуть обернутися мільйонами доларів додаткових витрат на розробку, MSC.NASTRAN дозволяє одержати необхідну точність і ефективність. Постійно розвиваючись, він акумулює в собі достоїнства нових методик та алгоритмів і тому залишається провідною програмою скінченно-елементного аналізу. MSC.NASTRAN забезпечує повний набір розрахунків, включаючи розрахунок пружно-деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, розв'язку задач теплопереносу, дослідження сталих і несталих процесів, акустичних явищ, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, аналіз частотних характеристик при впливі випадкових навантажень, спектральний аналіз і дослідження аеропружності. Передбачено можливість моделювання практично всіх типів матеріалів, включаючи композитні та гіперпружні. Розширені функції включають технологію суперелементів (підконструкцій), модальний аналіз і можливість застосування макромови DMAP для створення користувальницьких додатків.

Поряд з розрахунком конструкцій MSC.NASTRAN використовується також для оптимізації проектів, яку можна проводити для задач статички, стійкості, що встановилися і несталих динамічних перехідних процесів, власних частот і форм коливань, акустики і аеропружності. І все це робиться одночасно, шляхом варіації параметрів форми, розмірів і властивостей проекту. Алгоритми оптимізації обробляють необмежену кількість проектних параметрів і обмежень. Вага, напруження, переміщення, власні частоти і багато інших характеристик можуть розглядатися або як цільові функції проекту - у цьому випадку їх можна мінімізувати або максимізувати, або як обмеження. Алгоритми аналізу чутливості дозволяють досліджувати вплив

різних параметрів на поведінку цільової функції і управляти процесом пошуку оптимального рішення. Крім того, цільові параметри і обмеження можуть бути визначені користувачем у вигляді функціональних залежностей розрахункових і експериментальних даних, що дає можливість одержувати модифікацію моделі відповідно до даних випробувань - провести ідентифікацію моделі. MSC.NASTRAN - одна з декількох скінченно - елементних програм, здатних робити все це автоматично.

Оснovo MSC.NASTRAN становить відпрацьована технологія методу скінченних елементів і надійні чисельні методи. Програма дозволяє одночасно застосовувати в одній і тій же моделі h- і p-елементи для досягнення точності розрахунку при мінімальних комп'ютерних ресурсах. P-елементи (апроксимація скінченними елементами більш високого порядку [21]), що добре відтворюють криволінійну геометрію конструкції, можуть забезпечувати високу точність при детальному розрахунку механічних напружень. Ці елементи автоматично адаптуються до бажаного рівня точності. Уточнення розрахунків локальних величин напружень та деформацій за допомогою h-елементів відбувається шляхом збільшення густини сітки скінченних елементів визначеного типу [21].

Чисельні методи розріджених матриць, використовувані при будь-якому типі розрахунків, підвищують швидкість обчислень і мінімізують обсяг необхідної дискової пам'яті.

Тісний зв'язок MSC.NASTRAN з MSC.ARIES і MSC.PATRAN дозволяє сформувавши повністю інтегроване середовище для моделювання та аналізу результатів. Всі провідні виробники пре- і постпроцесорів, а також САПР передбачають прямі інтерфейси із цим середовищем. У результаті MSC.NASTRAN гнучко інтегрується в будь-яку наявну в користувача систему проектування.

2.1.2. MSC.PATRAN

Дане середовище забезпечує інтеграцію систем проектування, моделювання, аналізу і оцінки результатів, необхідних для дослідження працездатності конструкцій на стадіях проектування, виробництва і експлуатації.

За допомогою керованого графічного інтерфейсу і інтерактивної довідкової системи PATRAN [29] спрощує розв'язок задач по створенню розрахункової моделі і обробці результатів. Навантажувальні і граничні умови можуть бути зв'язані з геометрією, а також із скінченно - елементною сіткою. Ізоповерхні та інші вдосконалені засоби візуалізації допомагають прискорити оцінку результатів і підвищити її якість. Можливості мови PATRAN Command Language (PCL) дозволяють адаптувати всі ці функції до конкретних вимог користувача. Для інтеграції з CAD-системами PATRAN надає прямий доступ до найбільш популярних програмних пакетів автоматизованого проектування: CADD5, CATIA, Unigraphics, Euclid3 і Pro/ENGINEER. При використанні MSC.PATRAN саме геометрія із системи CAD стає основою скінченно-елементної моделі, тому інженеру-досліднику не потрібно відтворювати її із самого початку.

Інтеграція із системами аналізу фізичних полів забезпечується за допомогою відповідних налаштувань параметрів інтерфейса програмного комплексу PATRAN, у комплекті якого поставляються модулі для роботи з розрахунковими системами MSC.NASTRAN, MSC.DYTRAN, MSC.FATIGUE, MSC.ARIES, DYNA, ANSYS, MARC, ABAQUS, SAMCEF і SINDA. Для інших систем відповідні модулі є і у самих виробників. Система інженерних розрахунків MSC.PATRAN поряд з інтерфейсами до інших систем має потужні власні засоби для аналізу: ADVANCED FEA (Subset ABAQUS) - аналіз нелінійного поведіння конструкції; THERMAL - аналіз теплових процесів; LAMINATE MODELER - проектування конструкцій з

композиційними матеріалами; ANALYSIS MANAGER - багатофункціональна система, що управляє процесом виконання різноманітних задач. І всі вони повністю інтегровані в MSC.PATRAN. Зв'язок з базами даних фізико-механічних властивостей матеріалів в MSC.PATRAN забезпечується через прямий інтерфейс до системи MSC.MVISION.

2.1.3. MSC.FATIGUE

Аналіз довговічності і ресурсу працездатності конструкцій здійснюється на основі результатів скінченно - елементного розрахунку, який виконується системою MSC.NASTRAN [20], а також експериментальних даних і характеристик втоми матеріалів. Історія навантаження конструкції є вхідною інформацією для MSC.FATIGUE [29] і може бути визначена як шляхом розрахунку перехідних динамічних процесів, так і шляхом введення результатів натурних випробувань або статистичних даних. Обчислюється граничне число циклів, час роботи конструкції, поява та ріст тріщин, руйнування, пошкоджуваність і інші параметри працездатності конструкції. MSC.FATIGUE надає можливість оптимізації конструкцій на основі критеріїв довговічності та містить спеціалізовану базу даних з характеристиками втоми матеріалів. Крім цього, забезпечується доступ до банку даних матеріалів системи MSC.MVISION.

2.1.4. MSC.ARIES

MSC.ARIES являє собою комплексну систему автоматизації концептуального проектування і аналізу складних багаторівневих конструкцій, адаптовану до потреб інженерів-конструкторів, що не є фахівцями з розрахунків. MSC.ARIES дозволяє оперативно формувати і змінювати тривимірні геометричні моделі деталей, збирати з них складальні вузли і конструкцію в цілому, проводити всебічний міцністний, динамічний, тепловий, електромагнітний аналіз, аналіз кінематики механізмів, аналіз складання і т.д., а також оптимізувати конструкцію за заданими критеріями.

Для проведення аналізу від користувача не потрібні знання про застосовувані методи, однак і для висококваліфікованих інженерів в MSC.ARIES є досить широкі можливості.

MSC.ARIES має зручний для користувача інтерфейс, ефективні методи геометричного моделювання, надійну технологію генерації скінченно-елементної сітки, опис навантажень і граничних умов на геометричній моделі, широкий ряд типів аналізу і можливості досконалого дослідження результатів. Основа ARIES - стандартне геометричне ядро ACIS, над яким надстроєні функції параметричного геометричного моделювання деталей і складальних вузлів конструкцій з установкою багаторівневих ієрархічних зв'язків, проведення всебічного аналізу їхньої працездатності і автоматичної оптимізації, моделювання механізмів і їхнього кінематичного аналізу, дослідження лиття під тиском, електромагнітного аналізу і моделювання для швидкого макетування. Інші функції дозволяють створювати або змінювати геометричні моделі на основі уведених аналітичних залежностей параметрів моделі, розраховувати необхідні характеристики перетинів і обсягів, створювати і обслуговувати архів властивостей матеріалів. Досягнення заданої точності розрахунків в MSC.ARIES забезпечується за допомогою адаптивних h - і p -елементів або їхньої комбінації (див. п.2.1.1).

Підсистема ARIES Structures поєднує технології автоматизації аналізу і моделювання MSC.ARIES з розрахунковими можливостями NASTRAN за розв'язком задач лінійної і нелінійної статички, дослідження власних частот і форм коливань, стійкості, перехідних динамічних процесів і аналізу теплових процесів.

У ході процесу оптимізації за допомогою варіювання проектних змінних реалізується набір обмежень і значення цільової функції. Підсистема MSC.ARIES Optimization підтримує проектні змінні, що характеризують як форму, так і параметри моделі. При оптимізації форми проєктними змінними є геометричні розміри, а при оптимізації параметрів - властивості скінченних

елементів: товщина, властивості оболонок і т.д. Оптимізацію форми і параметрів можна проводити одночасно.

При оптимізації система ARIES дозволяє враховувати проєктувальні обмеження, отримані від постановки задач статички, власних коливань і стійкості. В один цикл оптимізації можна включати багатоцільові обмеження для кожного з типів аналізу. Численні опції ARIES дають інженерам-конструкторам можливість краще розуміти стратегію вдосконалювання конструкції в процесі її оптимізації.

Функція MSC.ARIES Mechanisms (Subset ADAMS) забезпечує тривимірний аналіз кінематики механізмів. З її допомогою інженери можуть моделювати механізми і розраховувати в будь-якому заданому діапазоні часу переміщення, швидкості, прискорення, сили реакції і моменти для деталей і вузлів механізму в процесі його функціонування.

Функція MSC.ARIES Flowcheck (Subset Mold Flow) автоматизує вибір параметрів процесу лиття, моделює заповнення форми, утворення повітряних порожнин і раковин. Система MSC.ARIES має інтерфейси з іншими системами автоматизованого проєктування через формати IGES, DXF і CATIA-Interface. Передбачений також прямиий інтерфейс із MSC.PATRAN, MSC.NASTRAN, MSC.EMAS, а також з пакетами інших виробників.

За допомогою MSC.ARIES і продукту Micro-WaveLab конструктори можуть прогнозувати експлуатаційні параметри електромагнітних приладів і пристроїв ще до створення дорогих зразків і проведення натурних випробувань, що дає можливість оптимізувати конкретні параметри та ідентифікувати покращені проєктні альтернативи. MicroWaveLab надає докладну інформацію не тільки про електричні і магнітні поля, але і про всі важливі параметри, що представляють інтерес для фахівців в області мікрохвиль: поточні розподіли, імпеданси, різноманітні інтегральні параметри фізичних процесів.

2.1.5. MSC.NASTRAN for Windows

Сьогодні за допомогою ОС Windows власники IBM-сумісних ПК одержали доступ до можливостей MSC.NASTRAN. Продукт MSC.NASTRAN [20, 29] for Windows дозволяє проводити статичний і динамічний аналіз конструкцій у лінійній і нелінійній постановках, розв'язувати задачі теплопереносу: сталі стани, перехідні процеси. У комплексі із системою CFDesign можливо також розв'язок задач гідрогазової динаміки, а за допомогою системи Win Life - втомної довговічності.

Можливості спеціального препроцесора FEMAP (п.2.1.10) включають різні методи формування геометричних моделей, автоматичну та напівавтоматичну генерацію скінченно-елементної сітки, а також інтерфейси з CAD-системами. Застосування спеціальних методів обробки даних підвищує швидкість обчислень і мінімізує обсяг необхідної дискової пам'яті. При роботі з MSC.NASTRAN можливо також використання різних функцій і додатків Windows. Є також вбудована довідкова інтерактивна система, забезпечуються повні можливості з візуалізації результатів: динамічне обертання, анімація, візуалізація ізоліній, ізоповерхні, а також побудова графіків і елюр.

2.1.6. MSC.DYTRAN

Система MSC.DYTRAN призначена для аналізу високонелінійних скороминучих процесів, пов'язаних із взаємодією рідини (газу) і конструкції, елементів конструкцій між собою, або для розв'язування проблем граничних деформацій конструкцій і їхнього руйнування. Типові додатки включають математичні моделі: 1) Взаємодії повітряної подушки, пасажира, автомобіля і перешкоди при автомобільній катастрофі; 2) Зіткнення птахів з літаками; 3) Вибух усередині контейнера на борті літака; 4) Зіткнення суден і посадку на мілину; 5) Удар і пробивання снарядом конструкції, влучення метеорита в обшивку космічного апарату; 6) Штампування металевих листів; 7) Ковки металу та ще цілий ряд завдань подібного типу.

В MSC.DYTRAN застосовується явна схема інтегрування за часом, що не потребує декомпозиції глобальних матриць з великою кількістю процесорного часу. Програма повністю векторизована та може також взаємодіяти із середовищами паралельної обробки, завдяки чому досягається висока ефективність роботи на сучасних комп'ютерних архітектурах. Широкий спектр розв'язуваних задач дозволяє застосовувати MSC.DYTRAN в автомобільній, аерокосмічній, оборонній, обробній та інших галузях промисловості.

2.1.7. MSC.ABAQUS

Система MSC.ABAQUS [29] являє собою універсальну скінченно-елементну програму для виконання поглибленого аналізу нелінійного поведіння конструкцій і процесів теплопередачі. Доповнюючи нелінійні функції NASTRAN і DYTRAN, MSC.ABAQUS проводить комплексний аналіз завдань, за умовами яких конструкції піддаються великими переміщенням і поворотам, мають нелінійні властивості матеріалів або властивості, що залежать від історії навантаження, а також аналіз контактної взаємодії конструкцій. Застосування обчислювальних методів забезпечує надійність проектів і скорочує обсяг фізичного макетування.

MSC.ABAQUS має багаті можливості в області розв'язування складних нелінійних задач. Так, для вивчення поведінки гумових ущільнень, будівельних конструкцій і деяких інших спеціальних об'єктів потрібні особливі моделі матеріалу. Контакт зубів шестерень може бути представлений коректно лише в тому випадку, якщо модель містить у собі відповідні алгоритми аналізу контакту. Для розрахунку геотехнічних моделей можуть знадобитися характеристики ущільнення ґрунту і фільтраційного потоку. MSC.ABAQUS дозволяє вирішувати ці та подібні їм завдання. Безліч спеціальних типів аналізу в середовищі ABAQUS підтримується повним набором скінченно-елементних формулювань. Програма передбачає

застосування користувальницьких підпрограм, за допомогою яких полегшується моделювання поведінки виробу в особливих ситуаціях.

2.1.8. MSC.MVISION

Система MSC.MVISION призначена для зберігання і комплексної обробки інформації про матеріали, необхідної в процесі проектування і виробництва виробів. Ця система, що дозволяє інженерам вводити, зберігати та одержувати інформацію про матеріали і їхніх виробників, а також переглядати мікроструктуру матеріалів, зіставляти їх і проробляти альтернативні рішення.

У сімейство продуктів MSC.MVISION входить MVISION Builder, що дозволяє вводити інформацію про матеріали в електронні таблиці. З його допомогою інженери можуть автоматизувати потік інформації про матеріали, що надходить від стендів для іспитів через упорядкування, нагромадження, моделювання безпосередньо до інженерів, зайнятим проектуванням, розрахунками та виробництвом. У підсумку створюється електронний архів властивостей матеріалів, що може бути використаний нарівні із стандартними банками даних.

Іншим компонентом MSC.MVISION є Evaluator, що дозволяє за заданими критеріями підібрати оптимальний для конструкції матеріал. У критерії пошуку можуть включатися як різні властивості матеріалу: щільність, межа міцності та т.і., так і комерційна інформація: ціна та виробник. Забезпечується також доступ користувачів до будь-якого банку даних MSC.MVISION, включаючи графічні функції і функції маніпуляції даними. Банки даних за матеріалами: електронні бібліотеки по металах, кераміці, пластмасам, композитам, використовуваним в аерокосмічній промисловості та Міністерстві оборони США, а також доступ до банку даних інститутів матеріалознавства, науково-дослідних центрів і лабораторій по усьому світі. Наприклад, банк PDL (William Andrews, Inc.) містить дані по 180 маркам

термопластичних матеріалів і гуми, банк Materials Selector (Penton Publishing) зберігає дані по 3200 маркам сталей, металів, пластмас, гуми, керамічних матеріалів, скла, картону, паперу, фетру, вовни. Підсистема MSC.MVISION Pro дає можливість інженерам-конструкторам, що використовують САПР Pro/ENGINEER, одержати прямий доступ до банку даних матеріалів MVISION.

2.1.9. MSC.VISUAL NASTRAN

Для того щоб компетентно вирішувати нові типи завдань, які постійно виникають у зв'язку з технічним розвитком і не відставати від передових технологій, у програмних продуктах компанії MSC.Software і компонентах інших фірм були внесені певні зміни.

Для цього було зроблено структурне впорядкування ряду основних продуктів MSC.Software під загальною назвою Visual Nastran. По класифікації, наведеної на сайті фірми [29], сюди включені наступні сімейства програм:

- **Visual Nastran Professional** - сукупність інтегрованих систем і програмних модулів для професійного інженерного аналізу: MSC.AFEA, MSC.FEA.
- **Visual Nastran Enterprise** - програмне забезпечення для проведення повного комплексу моделювання, дослідження і розрахунків, створення інтегрованого інформаційного середовища в інженерних відділах підприємств, забезпечення зв'язку систем CAE и CAD на високому рівні: MSC.Nastran, MSC.Patran, MSC.ADAMS, MSC.Fatigue, MSC.Dytran, MSC.Marc, MSC.AMS, MSC.SuperModel, MSC.FlightLoads, MSC.Mvision, MSC.Construct, MSC.Akusmod.
- **Visual Nastran Evisual** - пакет, до складу якого входять MSC.Marc, MSC.visualNastran 4D;

- **Visual Nastran Desktop** - "полегшена" система інженерного аналізу, що є зрозумілою і легко засвоюється широким колом користувачів (конструктори, інженери-проектанти, технологи і т.і.). Visual Nastran Desktop - інтегрований пакет кінематичного, динамічного, теплового та аналізу міцності конструкцій на основі продуктів MSC.Working Model, MSC.InCheck і ін., що дозволяє порівняно просто будувати модель і робити зазначені розрахунки безпосередньо із середовища розробки геометричної моделі - Mechanical Desktop, Solid Edge або Solid Works.

2.1.10. FEMAP версії 8.0, 8.1, 8.2

Оновлений пре- та постпроцесор, основні зміни в якому пов'язані з підвищенням продуктивності розрахунків MSC.Nastran, відомий під назвою Femap версії 8.0 і вище (UGS Femap 9.0 та 9.2 в комплектації Nx/MSC.Nastran) має такі основні відмінності від Femap 6.0:

- реалізовано підтримку нових версій ядер геометричного твердотілого моделювання Parasolid 12 і ACIS 6.2;
- введено можливість імпорту безпосередньо з файлів у форматі CAD-програм Unigraphics, SolidEdge, CATIA;
- додано утиліти Vis Server і Vis Client для зв'язку з різними пакетами скінченно-елементного аналізу;
- з'явилися функції процесора;
- додано ряд модулів: Femap Structural - вбудований вирішувач для виконання лінійного статичного аналізу, розрахунку власних коливань, пружної стійкості та задач термоміцності: Femap Thermal і Femap Advanced Thermal - аналізатор різних видів теплового впливу на конструкцію;
- додано можливості завдання опцій і виконання розрахунків за допомогою вбудованого процесора Femap Structural або зовнішнього MSC.Nastran;
- всі результати нелінійного аналізу (пластичні деформації та ін.) тепер можна виводити одночасно з переміщеннями точок конструкції;

- розширено можливості формування і редагування геометричних об'єктів.

Для розробленої або імпортованої з будь-якої САПР-програми моделі Femap 8.0 дозволяє виконувати лінійний і нелінійний аналізи міцності при статичному навантаженні, визначати власні форми коливань, робити динамічний і частотний, тепловий і термоміцністний аналізи конструкції, у тому числі при випадковому характері навантажень, здійснювати розрахунок на загальну та місцеву пружну стійкість, оптимізувати параметри конструкції при заданій системі обмежень.

Зазначений набір можливостей поєднано з порівняно невисокими вимогами до оперативної пам'яті та займаного місця на жорсткому диску, що дозволяє використовувати систему на персональних комп'ютерах і обумовило широке поширення пакета, разом з яким даються досить докладні файли довідок і прикладів різних рівнів складності.

2.1.11. MSC.ADAMS/View

Програмний продукт MSC.ADAMS/View компанії MSC.Software Corporation є могутнім засобом моделювання кінематики будь-якої механічної системи, яка має структурні елементи, що рухаються. Користувачеві надається можливість досліджувати параметричну модель в тих же самих умовах, в яких випробовується реальна конструкція. Розрахункову модель можна порівняти з апіорними даними об'єкта-оригінала і удосконалити її, використовуючи пружні елементи, реалістичну геометрію і засоби управління (умови навантаження, кінематичної взаємодії і т.і). Щоб отримати найкраще проектні розв'язки, важливо визначити такі параметри механічної системи, які впливають на працездатність конструкції і знайти оптимальну комбінацію її елементів.

У MSC.Adams/View для створення і розрахунку довільної моделі механічної системи потрібне виконання семи основних кроків типового алгоритму, який описаний нижче.

1. Побудова моделі механічної системи, яка включає її елементи, що переміщуються, шарніри, податливі зв'язки і прикладені сили;
2. Тестування, моделюючи рух моделі у відповідності з фізичною дією;
3. Підтвердження моделі, порівнюючи експериментальні дані з результатами віртуального моделювання;
4. Ускладнення моделі так, щоб віртуальні розрахункові дані відповідали фізичним експериментальним даним;
5. Аналіз чутливості конструкції до різних змін;
6. Оптимізація конструкції, щоб знайти кращу комбінацію конструктивних параметрів для досягнення максимальних експлуатаційних показників;
7. Автоматизація кроків процесу проектування для швидкого випробування різних варіантів конструкції.

Система ADAMS знайшла широке застосування в таких додатках, як дослідження динаміки польоту літальних апаратів, розробка механізмів випуску та вбирання шасі літака, оптимізація техніки наведення понтонних мостів, функціонування роботів і маніпуляторів, прогнозування ресурсу конструкцій і механізмів, конструювання спортивного взуття.

Сьогодні програмним комплексом ADAMS у комерційних і некомерційних цілях на різних чисельних платформах від ПК до суперкомп'ютерів користуються різноманітні промислові, транспортні, дослідницькі компанії і освітні установи в усьому світі. У їхньому числі провідні автомобілебудівні, аерокосмічні, машинобудівні фірми Америки, Європи і Азії, а також їхні сумісні постачальники, наприклад: Boeing, Lockheed Martin, McDonnell Douglas, Pratt & Whitney, Sikorsky Aviation, NASA, General Motors, Audi, Opel, Volkswagen, Volvo, Ford, BMW, Caterpillar, Benetton Formula 1.

2.2. УНІВЕРСАЛЬНИЙ ПАКЕТ ПРОГРАМ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ - ANSYS

ANSYS - це універсальний скінченно-елементний програмний пакет [3, 4, 8, 23-26, 29] (розроблювачем якого є компанія ANSYS Inc.) для проведення наукового аналізу в широкому колі інженерних дисциплін (міцність, теплофізика, динаміка рідин і газів та електромагнетизм). ANSYS є однією із самих потужних і популярних скінченно-елементних розрахункових систем у світі. В 2003г він нараховував 90 000 комерційних та 130 000 університетських робочих місць у світі.

ANSYS являється розвинутою сучасною CAD системою, яка забезпечує двосторонній зв'язок практично з усіма відомими CAD-системами. Це досягається за рахунок двостороннього обміну геометрією з найбільш популярними пакетами та імпорту безлічі стандартних форматів. Також існують вбудовані в CAD-системи (наприклад, в Autodesk Inventor) розрахункові модулі ANSYS, що дозволяють реалізувати переваги технології "наскрізного проектування". На сьогоднішній день програмний комплекс ANSYS нараховує більше 50 000 комерційних інсталяцій по усьому світі. На території СНД придбали та використовують ліцензії більше 200 організацій. Багато хто з вузів України та Росії використовують програмний комплекс ANSYS у своїй науково-дослідній діяльності та у навчальному процесі. Програмний комплекс ANSYS сертифікований відповідно до серії стандартів ISO 9000, 9001, має в СНД саму широку мережу підтримки та технічного забезпечення і має русифіковану документацію із широким колом прикладів. Останнім часом видається в Росії журнал "ANSYS Solution" з розсиланням електронної версії.

Препроцесор ANSYS дозволяє створювати геометричні моделі власними засобами, а також імпортувати готові. Геометрична модель надалі може бути модифікована будь-яким чином, оскільки при імпорті здійснюється

перетрансляція даних у геометричний формат ANSYS і деталь не підмінюється “недоторканою” скінченно-елементною сіткою. Користувач може видаляти несуттєві дрібні деталі, добудовувати певні деталі, проводити згущення-розрідження сітки дискретної моделі та інші найважливіші операції, без яких, часом, подальший розв’язок задачі буде зовсім некоректний або взагалі не зможе бути досягнутий. Побудова поверхневої, твердотільної і каркасної геометрії та внесення змін здійснюється засобами геометричного препроцесора.

Лінійка програмних продуктів, що представляється компанією ANSYS.Inc включає широко відомі на практиці процесори початково-крайових задач в різноманітних конфігураціях: **ANSYS/ Multiphysics** (лінійна і нелінійна міцність, тепло, електромагнетизм, гідрогазодинаміка); **ANSYS/ Structural** і **ANSYS/ Mechanical** (лінійна і нелінійна міцність); **ANSYS/ Professional** - лінійна міцність (прибрані всі фізичні непружні моделі, всі контакти крім вузол-в-вузол, перехідні динамічні процеси), а також окремі спеціалізовані комплекси програм **EMAG** – вирішувач завдань електродинаміки, **Flotran** – вирішувач задач гідрогазодинаміки, **ANSYS/ LS-DYNA** - повний вирішувач пакету **LS-DYNA** і препостпроцесор **ANSYS/ LS-DYNA PrepPost** – пре- і постпроцесор **ANSYS**, без вирішувачів, орієнтований на підготовку розрахункових моделей для **LS-DYNA**.

Для підготовки моделей і обробки результатів розрахунків пре- і постпроцесор **ANSYS/PrepPost** можна використовувати як окреме робоче місце.

Доповнюють і розширюють можливості системи ANSYS програмні продукти:

–**ANSYS/CFX**- універсальний комплекс термогідрогазодинамічних розрахунків, зокрема течій, що стискаються і нестискуваних, багатокомпонентних, багатофазних, і т.д.;

–**ANSYS\ICEM CFD** - комплекс засобів пре-і-постпроцессинга, створення і модифікації сіток, що має інтерфейси до CAD-систем і всіх розрахункових пакетів;

–**ANSYS\Paramesh** - параметричний редактор сіткових моделей, який дозволяє швидко модифікувати сітку скінченних елементів не маючи геометричної моделі;

–**ANSYS\Design Space** - проектувальні розрахунки на міцність, власні форми коливань, тепло та інші;

–**AI*Solutions** - нове покоління програмних засобів, що настроюються на конкретні розрахункові схеми;

–**AI*Workbench** – пре- і постпроцесорне середовище, що поставляється до комплектацій системи **ANSYS/Professional** і вище;

–**AI*Environment** - універсальний пре- і постпроцесор на основі технології компанії ICEM – технології цифрового виробництва [29];

–**AI*EMAX** - комплекс для високочастотного електромагнітного аналізу;

–**CivilFEM** - як додаток до продуктів ANSYS Professional, Structural, Multiphysics пропонується модуль для проведення розрахунків в будівельній області, розробки іспанської фірми Ingesiber.

2.2.1. АНАЛІТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ANSYS

Лінійна міцність (лінійна пружність, підконструкції (суперелементи) і **нелінійності**: геометрична (великі переміщення, деформації, і ін.) і фізична (гіпер - і полілінійна пружність, пластичність – бі – полі - і нелінійне кінематичне зміцнення, бі – полі - і нелінійне ізотропне зміцнення, анізотропне зміцнення (модель Друкера-Прагера (гранульовані матеріали)); модель Ананда - вязкопружність, повзучість (бібліотеки рівнянь швидкості деформації повзучості для першої та другої стадії повзучості), температурна залежність, фазовий перехід).

Контактні задачі та чисельні алгоритми: 1) поверхня в поверхню для всіх типів елементів першого та другого порядків наближення з реальним поданням кривизни; 2) вузол у поверхню; 3) вузол у вузол; 4) поверхня в абсолютно жорстку поверхню; 5) вузол у жорстку поверхню (є спеціалізовані 2-D і 3-D абсолютно жорсткі елементи); 6) крім процедур розв'язування нелінійних задач загального типу є спеціалізована, яка автоматично ініціалізується при наявності контактних умов в моделі (SOLCON, ON) із збіжністю чисельного розв'язку всього за 2-10 ітерацій); 7) є функція автоматичного закріплення абсолютно твердих елементів у випадку, якщо явно не задані початкові і граничні умови і навантаження.

Динамічний аналіз (частотна зона), що включає: 1) модальний аналіз (застосовується для визначення власних частот і логарифмічних декрементів вільних коливань конструкцій, можливий облік циклічної симетрії і аналіз переднапружених конструкцій); 2) гармонійний аналіз (використовується для визначення відгуку конструкції на навантаження, що гармонічно змінюються в часі); 3) спектральний аналіз (використовується для обчислення власних частот і форм коливань конструкцій); 4) вібраційний аналіз (є розширенням спектрального аналізу та використовується для обчислення деформацій і напруг, що виникають у конструкції під дією коливань або довільних вібрацій).

Динамічний аналіз (часова зона). Еволюційні процеси: 1) лінійні; 2) нелінійні; 3) стійкість (лінійна, нелінійна).

Механіка руйнування. 1) 2-D і 3-D лінійна та нелінійна постановка; 2) температурні завдання; 3) композиційні, армовані матеріали; 4) крихке і пластичне руйнування.

Тепловий аналіз: 1) стаціонарний; 2) нестаціонарний; 3) теплопровідність; 4) радіація; 5) конвекція; 6) фазовий перехід.

Гідрогазодинаміка: 1) стаціонарна і нестаціонарна; 2) нестисливий і

стисливий потоки; 3) ламінарні і турбулентні потоки; 4) природна і змушена конвекція; 5) сполучений теплоперенос; 6) в'язкі плинні (модель Ньютон, неньютоновські плинні); 7) різні моделі в'язкості; 8) багатокомпонентні плинні; 9) фільтрація і розподілені джерела; 10) рідини з вільною поверхнею.

Електромагнітний аналіз: 1) магніто статика; 2) низькочастотний гармонійний; 3) електростатика; 4) електропровідність; 5) високочастотний модальний; 6) високочастотний гармонійний.

Спільний аналіз фізичних процесів: 1) акустика; 2) акустика/міцність; 3) п'єзоелектрика; 5) електромагнітний; 5) тепло/міцність/електро/магніто/гідро-газодинаміка; 6) аеропружність – статика і динаміка.

Аналіз втоми матеріалу: 1) критерій руйнування за максимальними деформаціями; 2) критерій руйнування за максимальними напруженнями; 3) критерії руйнування, що задаються користувачем; 4) введення даних (прямі і за результатами проведеного аналізу).

Спеціальні можливості. 1) оптимізація; 2) "народження" – "смерть" елемента в процесі розв'язку задачі; 3) опція роботи тільки на розтяг\стиск (стержні, мембрани); 4) спеціальна спрощена процедура створення попереднього напруження в елементах SOLID (елемент PRETS179 - Pretension); 5) імпорт величин пружного стану для балок, оболонок, солідів у текстовому вигляді (форматований ASCII - файл) в якості попереднього напруження.

Аналіз високонелінійних динамічних процесів. Для розрахунку даного типу процесів (у тому числі з руйнуванням) в ANSYS застосовується пакет LS-DYNA, що входить до кращих у своєму класі. Програмний комплекс ANSYS/ LS-DYNA 8.0 забезпечує прямий доступ користувачів ANSYS до можливостей пакета LS-DYNA 9.70.

Серед аналогів LS-DYNA можна назвати MSC.DYTRAN, ABAQUS/Explicit, PAM-CRASH і SamCEF. Порівнювати ці системи між собою

по зручності, по документованості, по можливостях, по надійності або по швидкості задача невдячна. До того ж займатися порівнянням повинен незалежний фахівець, що освоїв у досконалості хоча б дві системи, а таких знайдеться небагато. Звичайно, у всіх цих системах є свої плюси і мінуси, але інтеграція з ANSYS забезпечує користувачам LS-DYNA якісно нові можливості.

ANSYS і ANSYS/ LS-DYNA мають однаковий інтерфейс, загальний перелік команд (специфічні команди починаються із префікса ED) і загальний список елементів. Доступні всі команди моделювання ANSYS, можлива оптимізація з урахуванням результатів LS-DYNA, підтримуються основні опції постпроцесінга та макроси анімації. У єдиному командному файлі організується обмін геометричною моделлю та результатами розрахунків між ANSYS (неявна схема розрахунку) і ANSYS/ LS-DYNA (явна схема) для виконання послідовних розрахунків. Існує спеціальна команда перемикання явних елементів у відповідні їм неявні (і навпаки) для застосування алгоритмів явно-неявного розрахунку або неявно-явного. Так, можна спочатку провести нелінійний тепловий розрахунок (ANSYS/Thermal), потім лінійний розрахунок для визначення початкових напружень (ANSYS/Structural) від температурних деформацій (а також, наприклад, від тиску або обертання), а вже потім, перемкнувши типи елементів, завантаживши початкові напруження і задавши динамічні навантаження, застосувати ANSYS/ LS-DYNA.

Наявність досить потужного вбудованого препроцесора, що не уступає спеціалізованим програмам (FEMAP або PATRAN), забезпечує унікальну можливість виконувати параметричне моделювання, побудову дискретних моделей, власне розв'язок крайової задачі, постпроцесінг результатів розв'язку в рамках одного командного файлу.

При роботі з ANSYS/ LS-DYNA підтримується внутрішня мова програмування APDL (ANSYS Parametric Design Language), потужна і разом з

тим доступна навіть починаючому користувачеві. Користувач може оперувати масивами, запитувати найрізноманітнішу інформацію з бази даних, застосовувати цикли, умовні і безумовні переходи, мітки і безліч вбудованих функцій, вводити і виводити дані в текстовому форматі. Потрібні процедури можна досить просто програмувати за допомогою макросів APDL. Користувач ANSYS може навіть викликати модуль LS-DYNA у циклі, наприклад із збільшенням швидкості співударення аж до виявлення в постпроцесорі результатів пробивання конструкції.

Хоча препроцесор ANSYS не підтримує абсолютно всіх вихідних даних LS-DYNA, слід зазначити, що поставляється модуль, що, дозволяє вирішувати всі завдання, не підтримувані поки прямо ANSYS/ LS-DYNA. Користувачам надається повна версія LS-DYNA (з моделями подушок і ременів безпеки, вибухівки, складними моделями матеріалів та т.і.). Нові версії LS-DYNA починають підтримуватися ANSYS, як правило, через півроку, оскільки останнім часом LS-DYNA бурхливо розвивається, так що тестування нових можливостей, що з'являються, не завжди можна провести в короткий термін.

Створений препроцесором ANSYS текстовий вихідний файл <*.K> можна при потребі відредагувати і доповнити спеціальними командами LS-DYNA (при використанні APDL це можна зробити командою *VWRITE). Тексти повного посібника з команд (LS-DYNA Keyword User's Manual) і теоретичного керівництва (LS-DYNA Theoretical Manual) доступні легальним користувачам ANSYS/ LS-DYNA з Customer Portal (клієнтський портал LS-DYNA в мережі Internet [29]). Потім можливий не тільки запуск відредагованого файлу із сесії ANSYS, але й користування постпроцесором ANSYS (хоча й з деякими обмеженнями) для обробки отриманих результатів. Можна також вийти з ANSYS, запустити безпосередньо LS-DYNA і застосувати постпроцесори LS-TAURUS і LS-POST, що входять у стандартну поставку.

Розрахунки в ANSYS/ LS-DYNA можна проводити як у стандартній лагранжевої постановці, так і в комбінованій лагранжево-ейлеровій (Arbitrary Lagrange-Euler) постановці. Лагранжева постановка має на увазі деформовану сітку, а при ейлеровій - сітка нерухлива і повинна створюватися всюди, де можливо часово-просторово тимчасове знаходження моделі конструкції. Для поліпшення форми елементів можуть застосовуватися алгоритми корекції (адаптації) сітки скінченних елементів.

2.2.2. АЛГОРИТМИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ МАТРИЧНИХ РІВНЯНЬ

ANSYS пропонує унікальний набір різних алгоритмів розв'язування (прямих і ітераційних) систем матричних рівнянь до кожного з типів аналізу (статика - 6 типів; модальний аналіз - 6 типів і т.д.) з функцією програмного автовибору типу алгоритма залежно від типу і розмірності розв'язуваної задачі. Така гнучкість і підтримка багатопроцесорного режиму на персональних комп'ютерах відкривають нові обрії в області інженерних розрахунків. Розв'язування динамічних задач проводиться методом Ньюмарка. Використовується також повна і модифікована процедура Ньютона-Рафсона.

ANSYS підтримує багатопроцесорний режим на персональних Windows-Intel комп'ютерах і на всіх типах Unix-Платформ. Спеціалізований модуль Parallel performance (Distributed Domain Solver) дозволяє виконувати розпаралелення розрахунків на мережних кластерних платформах. У даний момент підтримуються до 700 процесорів. Крім мережних кластерів, даний блок працює і на звичайних багатопроцесорних комплексах. Вимоги: MPI (Message Passing Interface - інтерфейс передачі повідомлень), - машина-сервер не менш 256Мб RAM, 10Гб HDD. Модуль поставляється як опція тільки для комерційних версій.

2.2.3. ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМІ ANSYS

Препроцесор ANSYS дозволяє створювати геометричні моделі власними засобами і імпортувати готові. Геометрична модель надалі може бути

модифікована будь-яким чином, оскільки при імпорті здійснюється перетрансляція даних у геометричний формат ANSYS і деталь не підмінюється “недоторканою” скінченно-елементною сіткою. Користувач може видаляти несуттєві дрібні деталі, добудовувати певні деталі, проводити згущення-розрідження сітки та інших найважливіших операцій, без яких, часом, подальший розв'язок задачі буде зовсім некоректний або взагалі не зможе бути досягнутим. Побудова поверхневої, твердотільної і каркасної геометрії і внесення змін здійснюється засобами геометричного препроцесора.

Створення геометричних моделей в ANSYS здійснюється зверху-донизу (операції з геометричними примітивами) і знизу-нагору (точки-лінії-поверхні-об'єми). Побудова твердотільної моделі можливо в ANSYS двома шляхами і їхньою комбінацією: за допомогою набору готових примітивів (як те – паралелепіпед, циліндр і ін.) і булевих операцій над ними, або послідовною ієрархічною побудовою, починаючи з опорних точок, далі лінії, сплани поверхні і т.і. до твердого тіла. Наявність обох варіантів дає гнучкі можливості для найшвидшого створення складних моделей тільки засобами ANSYS: 1) булеві операції (додавання, вирахування, і ін.) над "своїми" і імпортованими моделями; 2) можливість злиття декількох геометричних моделей в одну (як власних, так і імпортованих з різнорідних CAD-систем); 3) параметричне задання геометрії (для подальшої оптимізації конструкції); 4) зв'язок з більшістю CAD-систем (прямий інтерфейс з Unigraphics, Pro/E, CATIA, CADD5) і читання нейтральних геометричних форматів IGES, SAT, Parasolid.

В ANSYS застосовується: 1) перевірка дискретної моделі на наявність малих геометричних об'єктів, сингулярностей, несумістностей з можливістю візуального контролю; 2) відновлення втрачених елементів моделі (наприклад, відновлення поверхні по збереженому її контуру); 3) видалення непотрібних властивостей (так званий “defeaturing”); 4) пряме об'єднання (додавання) поверхонь двоякої кривизни довільного виду; 5) розподіл і об'єднання

поверхонь і ліній, що належать твердому тілу; 6) параметричне “схлопування” ліній і поверхонь твердого тіла; 7) розгорнутий сервіс: запит обсягу, площі поверхні, довжини лінії та інших даних; 8) можливість роботи тільки з обраними групами примітивів ставиться (як до препроцесорним і постпроцесорним операціям, так і до процесу розв’язування) помітно спрощує роботу із складними моделями, а також служить для виключення елементів з аналізу.

Процедура вибору (або активізації) окремих глобальних точок (Keypoint), ліній, поверхонь, об’ємів, вузлів і елементів або груп здійснюється як графічно, так і на основі асоціативного зв’язку між геометричною і скінченно-елементною моделлю, по ознаці матеріалу, властивостей та типу елементів і ін.

2.2.4. СІТКОВИЙ ГЕНЕРАТОР

Алгоритми побудови дискретних моделей [21] у системі ANSYS [26] забезпечують різноманітні функції. 1) Розділення на тетраедри твердих тіл довільної геометрії. Створення регулярних сіток здійснюється з об’ємних регіонів із складними операціями при їх побудові (у т.ч. операція екструзії поверхневої сітки в наявному твердому тілі). Побудова перехідних сіток гексаедр-піраміда-тетраедр для елементів другого порядку наближення. 2) Автоматичне сполучення областей, розбитих елементами першого і другого порядків наближення - програмне видалення середнього вузла по границях. 3) Побудова нерегулярних сіток на довільних поверхнях тільки із чотирикутних елементів (без трикутників). 4) Створення об’ємної тривимірної сітки по наявній поверхневій (при відсутності твердотільної) моделі (заповнення пірамідами і тетраедрами). 5) Використання вже побудованої сітки при наявності сполучених поверхонь і ліній у геометричних моделях (автоматична зшивка сіток). 6) Імпорт скінченно-елементних сіток і двосторонній зв’язок з більшістю CAE і “важких” CAD-систем (Pro/E,

Unigraphics, ABAQUS, NASTRAN, I-DEAS і др.). 7) Виконання операції оптимізації і згладжування вже наявної сітки. 8) Створення сіток при екструзії ліній і поверхонь по довільному шляху. 9) Перевірка якості сітки із засобами візуалізації. 10) Застосування операції згущення сітки (як двох, так і тривимірне) на вже наявній дискретизації розрахункової області. 11) Побудова нерегулярних сіток з розбивкою приповерхневих зон “регулярними шарами” - т.зв. пострічкове (Layered meshing). 12) Зміна атрибутів над масивами елементів (переприсвоєння типу, матеріалу, властивостей і ін.). 13) Автоматизована генерація контактних елементів, сингулярних для задач механіки руйнування і ін. 14) Автоматизовані операції прямого генерування вузлів і елементів за заданим законом при відсутності твердотільної моделі (наприклад, по параболічній траєкторії із заданим згущенням). 15) Перебудова сітки відповідно до отриманих в результаті розрахунку вузлових переміщень. 16) Побудова адаптивних сіток. 17) Можливість злиття декількох скінченно-елементних моделей в одну. 18) Редагування користувачем бібліотеки властивостей матеріалів. 19) Застосування спеціалізованих засобів за спрощеним завданням перетинів балкових елементів на основі стандартних профілів і застосування користувальницької бібліотеки перетинів. 20) Автоматизовані процедури постановки граничних умов - задання рівнянь спільності деформацій - зшивка по ступенях свободи.

Застосовувані в системі ANSYS алгоритми дискретизації мають: 1) найширший набір опцій по керуванню згущенням (до базових точок – keuroint (кутів ліній)), уздовж лінії (у т.ч. до центра або країв), до центра або периметра поверхні, до центра або периметра регіону, різні розміри елементів на різних лініях, поверхнях і ін.); 2) найширший набір опцій до алгоритму розбивки (кількість ітерацій, коефіцієнт приросту довжини сторони елемента, автоматичне згущення сітки скінченних елементів при локальному збільшенні кривизни розв’язку і т.д.).

2.2.5. ЗАДАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ І ГРАНИЧНИХ УМОВ НА ГЕОМЕТРИЧНІЙ МОДЕЛІ

Задання навантажень (рис.4) і граничних умов у системі ANSYS здійснюється за допомогою: 1) додатка до геометричних об'єктів (точки, лінії, поверхні, об'єми) і до скінченно-елементної сітки; 2) табличного і функціонального введення (Function Builder) змінюваних граничних умов і навантажень. Для нестационарних задач інформація про навантаження вводиться масивами за часом і відповідають конкретному одному кроку навантаження.

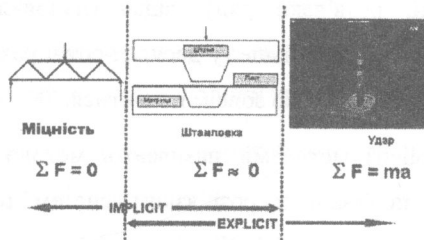


Рис.4. Приклади статичного, квазістатичного та динамічного навантаження конструкцій

2.2.6. ЯВНІ І НЕЯВНІ МЕТОДИ ІНТЕГРУВАННЯ РІВНЯНЬ ДИНАМІКИ

В ANSYS підтримуються неявні (Implicit) методи інтегрування рівняння динаміки, що використовують схему Ньюмарка. Розрахунок зводиться до серії розв'язків квазістатичних задач із навантаженнями, що залежать від часу. Часовий крок інтегрування рівняння динаміки може бути не дуже малим, оскільки при кожному кроці виконується розв'язок системи рівнянь і проводяться ітерації, що врівноважують (мінімізують нев'язку системи рівнянь рівноваги), пов'язані з матричними операціями. При лінійній матриці жорсткості інтегрування є безумовно стійким. Для високошвидкісних процесів

(що протікають менше чим в мілісекундному часовому діапазоні) і при дуже великих деформаціях доводиться формувати кроки достатньо малими, щоб відстежити зміну навантаження і поведження деформованої конструкції. Інерційні навантаження великі і визначаються прискореннями конструкції. Для більш точного їхнього розрахунку ефективно буде вводити прискорення (і швидкості) у вузлових ступенях свободи і обчислювати їх прямо, а не двічі диференціюючи переміщення. У випадку змушених постійних перерахувань матриць формування повної матриці і її багаторазове розв'язування при змінних навантаженнях неефективні. Критерії збіжності, установлені в програмі за замовчуванням, настроєні на досить тривалі завдання, тому їхній підбір на практиці досить трудомісткий (а часом неможливий). Таким чином, при малому кроці, розв'язки ряду задач (наприклад, удару) неявними методами можуть зажадати більше (у десятки-сотні разів) часу ЕОМ, чим при використанні явних методів, або зовсім не зійтись.

Явними (Explicit) методами називають методи розв'язання рівнянь динаміки, які не пов'язані з розв'язком систем рівнянь, але такі, що використовують рекуррентні співвідношення, які виражають переміщення, швидкості та прискорення на даному кроці через їхні значення на попередніх кроках. У випадку використання діагональної матриці мас (замість стандартної –розрідженої) вдається швидко знайти її «обернену», спростивши тим самим розрахунок і багаторазово зменшивши час однієї ітерації (за допомогою заміни триангуляції матриць із розв'язком при змінних навантаженнях, що врівноважують, на матричні множення). Така методика припускає малі кроки і досить дрібну сітку скінченних елементів, щоб правильно описати діагональною матрицею розподіл їх мас. Як компенсація, малий крок дозволяє відстежити всі зміни в характеристиках конструкції і у її поведженні. Усі нелінійності (включаючи контакт) враховуються у векторі внутрішніх сил. Основний час займає не формування та чисельні процедури “обертання”

матриць, а обчислення цього вектора. Через дуже малий розмір кроку (на практиці 10^{-7} - 10^{-6} с) явні методи звичайно застосовуються тільки для розрахунку короткочасних процесів. В ANSYS/ LS-DYNA при явному інтегруванні застосовується метод центральних різниць, коли прискорення покладається постійним у межах кроку. До того ж для трьох послідовних моментів часу приймається квадратична апроксимація вектора переміщень.

Найважливішою проблемою чисельної реалізації є забезпечення стійкого розв'язку, який осцилює в прийнятних межах. Не вдаючись у теоретичні тонкості, відзначимо, що стійкими називають розв'язки, коли мала зміна початкових умов не буде викликати великих змін результатів розв'язу. У цьому випадку помилки (погрішності) округлення - абсолютні або відносні - у вихідних даних і при розрахунку не викликають наростаючого ефекту. Вирішальне значення тут має вибір кроку інтегрування за часом. Практика обчислень дозволила виробити досить надійні критерії.

Таким чином, явні і неявні методи доповнюють один одного. Процесори ANSYS добре працюють зі статичними і квазістатичними задачами. Явні алгоритми LS-DYNA через нагромадження помилок округлення малоефективні в розрахунках для довготривалих або близьких до статичних процесів навантаження. LS-DYNA використовує спеціальні технології, оптимізовані для моделювання високошвидкісних короткочасних процесів. Явний метод розв'язку рівнянь, використовуваний LS-DYNA, забезпечує найбільш ефективний розрахунок скороминучих процесів, високошвидкісних процесів з великими динамічними деформаціями, квазістатичних задач із великими деформаціями та високою нелінійністю, а також складних завдань для контакту сполучених тіл.

2.2.7. МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ В ANSYS

Програма ANSYS має у своєму розпорядженні можливості не тільки для

розрахунку конструкції, але і для відшукування її оптимального конструктивного варіанта (оптимального проекту). Оптимальним є проект, що відповідає всім пропонованим вимогам і має мінімальні значення певних показників, таких як вага, площа поверхні, об'єм, напруження, власні частоти коливань і т.і.

В ANSYS використовуються методи і засоби оптимізації [26]. Варто відразу вказати різницю між ними. **Методи оптимізації (methods)** забезпечують оптимізацію цільової функції шляхом варіювання вхідних параметрів. **Засоби оптимізації (tools)** забезпечують одержання декількох наборів вихідних параметрів (цільова функція, змінні стани) при зміні вхідних параметрів за заданим законом, оптимізацію цільової функції вони не роблять.

Перед описом методики оптимізації проекту в ANSYS, необхідно визначити деякі терміни.

Змінні проекту (design variables) – це параметри, які змінюються з метою знаходження оптимального проекту. Для змінних проекту вказуються обмеження - мінімальне і максимальне значення. Ці значення визначають діапазон зміни відповідних величин. Змінними проекту звичайно є геометричні параметри, такі як довжина, товщина, діаметр або координати точок моделі конструкції. Змінні проекту можуть приймати тільки позитивні значення.

Змінні стану (state variables) – це параметри, які служать обмеженнями для проекту. Вони також називаються залежними змінними. Як правило, вони являють собою параметри відгуку, що є функціями змінних проекту. Змінні стану можуть бути обмежені максимальним і мінімальним значеннями або мати тільки одне із цих обмежень. Прикладами змінних проекту є переміщення, напруження, температури, швидкості теплових потоків, власні частоти, деформації і т.і. Однак змінні стану не обов'язково повинні бути

розрахунковими величинами. Як змінну стану може бути визначено будь-який параметр.

Цільова функція (objective) – це залежна змінна, яку потрібно мінімізувати. Вона повинна бути функцією змінних проекту, тобто зміна значень змінних проекту повинна змінювати значення цільової функції. В оптимізаційній задачі може бути визначена тільки одна цільова функція.

Змінні проекту, змінні стану і цільова функція узагальнено називаються **змінними оптимізаціями (optimization variables)**. Користувач повинен вказати, які параметри в моделі є змінними проекту, змінними стану, і цільовою функцією.

Набір параметрів проекту, або проект (design set, design) – це набір значень параметрів, що представляють яку-небудь конфігурацію моделі. Як правило, набір параметрів проекту характеризується значеннями змінних оптимізації, однак у нього включаються всі параметри моделі, у тому числі і ті, які не є змінними оптимізації.

Можливий проект (feasible design) – це проект, що задовольняє всім зазначеним обмеженням – на змінні стани і змінні проекту. Якщо хоча б одне з обмежень не дотримується, проект називається **неможливим (infeasible design)**.

Найкращий проект (best design) – той, котрий задовольняє всім обмеженням і забезпечує мінімальне значення цільової функції. Якщо всі проекти є неможливими, найкращим є проект, найбільш близький до того, щоб бути можливим, поза залежністю від значення цільової функції.

Методи оптимізації виконують мінімізацію цільової функції. У програмі доступні два методи: **метод апроксимації (subproblem approximation method)** і **метод першого порядку (first order method)**. Метод апроксимації – це метод нульового порядку, що забезпечує ефективний розв'язок більшості конструкторських задач. Метод першого порядку заснований на оцінці

чутливості проекту до зміни певних факторів і більше підходить для розв'язання задач, що вимагають високої точності.

Потрібно зауважити, що користувач може застосувати власний оптимізаційний алгоритм, – у цьому випадку алгоритм ANSYS буде пропущений.

Як при використанні методу апроксимації, так і методу першого порядку, програма виконує серію ітерацій. Протягом кожної ітерації виконується розрахунок початкового проекту, оцінюється відповідність результатів розрахунку певним критеріям якості і, при необхідності, здійснюється зміна проекту. Цей процес триває доти, поки не будуть виконані певні умови.

Змінні стани і обмеження на змінні проекту використовуються, щоб обмежити зміни в проекті та приводять до оптимізаційної задачі з обмеженнями. ANSYS перетворить цю задачу в оптимізаційну задачу без обмежень. При проведенні оптимізації по кожному з методів, програма враховує обмеження, накладені на змінні стани, додаючи до цільової функції штрафні функції.

2.2.8. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ В ANSYS

2.2.8.1. Засоби візуалізації зображень геометричної моделі

Для візуалізації зображень геометричної моделі в системі ANSYS використовуються: 1) формат мови Open GL; 2) алгоритми присвоєння прозорості поверхням, твердим тілам, групам елементів; 3) застосування перспективних зображень; 4) позиціонування джерел світла; 5) натяжка текстур на геометричні і скінченно-елементні моделі; 6) колірна і цифрова індикація елементів і геометричних примітивів відповідно до їхніх атрибутів; 7) тривимірне зображення реальної геометрії перетинів балкових і оболонкових елементів; 8) спеціалізовані засоби візуалізації елементів армованого бетону і композиційних шаруватих матеріалів; 9) символічне подання навантажень, граничних і початкових умов; 10) багатовіконний режим роботи; 11) побудову будь-яких перетинів і розрізів; 12) засоби

створення графічних анотацій (нанесення тексту, символів, і ін. на зображення); 13) вивід графічних зображень у форматах WMF, EMF, BMP, TIFF, JPEG, HPGL, HPGL2, EPS (Encapsulated Postscript), VRML, AVI; 14) графічно повне зображення моделей, підданих симетрії і заданих тільки одним сектором; 15) графічні анотації (геометричні об'єкти, символи, текст), що прикріплюються до базових точок (keypoints), вузлів і обертаються разом з моделлю.

2.2.8.2. Засоби візуалізації результатів розрахунків

Засоби візуалізації зображень результатів розрахунків включають: 1) постпроцесінг історії навантаження; 2) регульований масштаб зображення деформацій (реальний, що задається користувачем і ін.); 3) кольорові контурні і векторні подання, епюри, таблиці, графіки; 4) подання результатів у вигляді ізоповерхні і ізоліній у прозорій моделі тіла; 5) побудова перетинів і розрізів та виведення для них будь-яких результатів розрахунку; 6) обчислення інтеграла будь-якої характеристики в довільному плоскому перетині і по сферичній поверхні; 7) графічний запит будь-яких результатів вказівкою миші; 18) побудова епюр для стрижневих і балкових елементів; 9) можливість перегляду результатів для балкових елементів у перетині під довільним кутом; 10) спеціалізовані засоби візуалізації елементів, що зруйнувалися; 11) вивід результатів для шаруватих елементів у будь-якій зоні моделі, що визначений користувачем; 12) розрахунок коефіцієнтів запасу міцності; 13) можливість селекції скінченних елементів за результатами зазначеної функції в заданих межах зміни; 13) оцінка точності чисельного розрахунку і подання її рівнів у вигляді кольорових контурних зображень.

2.2.8.3. Обчислювальні операції над результатами уздовж шляху, що задається довільно, їхнє графічне подання

У системі ANSYS можливо здійснити будь-які алгебраїчні і матричні операції над результатами розрахунків (скалярні, векторні, знаходження лінійних комбінацій, похідних, інтегрування по контурі, поверхні і інші).

Засоби візуалізації графічних зображень полів результатів розрахунків включають: 1) виведення у вигляді епюр на твердотільній моделі; 2) виведення у вигляді графіків; 3) запит будь-яких результатів уздовж визначеного користувачем шляху; 4) додавання, розподіл, тригонометричні операції і інше над результатами уздовж шляху; 5) збереження і наступне відновлення шляху.

2.2.8.4. Анімація результатів в ANSYS

Анімація результатів у системі ANSYS дозволяє здійснити візуалізацію: 1) історії навантаження; 2) перетину, що рухається, з виводом у ньому даних у контурному або векторному поданні; 3) руху потоків (траєкторії руху часток); 4) вивід у форматах WMF, EMF, BMP, JPEG, TIFF, EPS (PostScript), HPGL, VRML, AVI, а також у вигляді відсортованого текстового лістингу у файл; 5) графіків залежностей змінних як від часу, так і від інших змінних.

2.2.8.5. Зв'язок ANSYS з CAD системами

ANSYS має зв'язок з CAD системами: 1) Pro/Engineer; 2) Unigraphics; 3) CADD5; 4) CATIA; 5) Solid Works; 6) AutoCAD; 7) Solid Edge; 8) Microstation; 9) Parasolid; 10) ACIS SAT.

Зв'язок ANSYS з CAD-системами здійснюється безліччю способів, серед яких прямий доступ до геометрії важких пакетів та імпорт різноманітних стандартних форматів (STEP, а також IGES, що включений за замовчуванням в усі версії ANSYS), а також обмін даними з CAD-системами за допомогою спеціалізованих функцій, що вбудовані в ці системи розрахункові модулі ANSYS (наприклад, ANSYS ProFEA, ANSYS for CADD5, і серії програм

Design Space). Докладніше про зв'язок із структурно спільними з ANSYS продуктах дивися на <http://www.ugsolutions.ru/>.

При інсталяції ANSYS на ту ж платформу, де встановлені названі системи, відбувається зв'язування CAD-пакета і ANSYS таким чином, що при натисканні на відповідну клавішу або наборі команди /ansys у середовищі CAD-пакета автоматично завантажується ANSYS. При цьому та деталь (складання), що була активна в цей момент, автоматично, із збереженням параметризації, переноситься в середовище ANSYS. Після проведення розрахунків в ANSYS і виходу з нього користувач вертається в CAD-пакет (при цьому, якщо проводилася параметрична оптимізація, образ деталі вертається в зміненому виді). Зауважимо, що не потрібно плутати з вбудованими в CAD-пакети модулями. Крім описаного вище, є простий прямий імпорт файлів даних систем.

Зв'язок ANSYS-CATIA здійснюється також і за допомогою TCIGES – прямого інтерфейсу розробки CADFEM GmbH. Зв'язок ANSYS з CAD-пакетами також здійснюється за допомогою Design Space [29]. Всі імпортовані моделі (у т.ч. форматів Parasolid, SAT, IGES) можуть модифікуватися будь-яким чином (див. [4]. Операції над імпортованими моделями).

Пряме виведення геометричних моделей в ANSYS має спеціалізований пакет CADfix, орієнтований на трансляцію, модифікацію, “лікування” геометрії.

2.2.8.6. Зв'язок ANSYS з CAE системами

ANSYS пов'язаний з більшістю відомих розрахункових пакетів програм, що дозволяє успішно ранжувати єдиний інтегрований процес всебічного аналізу конструкції. ANSYS має прямий зв'язок з: 1) системами динамічного аналізу механізмів ADAMS, DADS; 2) системами акустичного аналізу CometAcoustics, SYSNOISE; 3) спеціалізованими CFD-пакетами STAR-CD, CFX; 4) системами аналізу процесів обробки пластмас C-MOLD,

MOLDFLOW; 5) системами моделювання лиття металів ProCAST; 6) скінченно-елементними пакетами і сітковими генераторами ALGOR, I-DEAS, NASTRAN, FEMAP та іншими.

Внаслідок відкритості ANSYS можлива розробка користувачем інтерфейсу до будь-якої іншої програми. З використанням внутрішньої параметричної мови програмування високого рівня (APDL) або звичайного FORTRAN (Compaq/Digital Visual Fortran 6.0) або C++ компілятора користувач одержує можливість вбудовувати в ANSYS будь-які процедури, елементи, модифікувати і доповнювати меню, підключати файли повідомлень на будь-якій мові або переробити наявний. ANSYS може бути підключений як підпрограма до будь-якої програми користувача.

Реальними прикладами відкритості ANSYS є безліч прикладних спеціалізованих розробок сторонніх фірм, що розширюють можливості стандартного пакета ANSYS (див. вище).

Для написання користувальницьких процедур мовою FORTRAN потрібно використовувати компілятор Compaq (Digital) Visual FORTRAN v.6.0 [29].

Для фахівців в області машинобудування найбільш широко використовуються три конфігурації програми ANSYS (**Multiphysics/Professional/Structural**), що розрізняються своїми можливостями та прикладні спеціалізовані розробки сторонніх фірм, що розширюють можливості стандартного пакета ANSYS (див. вище).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1. Які переваги надає просторове моделювання виробів в сучасних конкурентних умовах?*
- 2. Які системи забезпечують повний цикл конструювання та створення конструкторської документації?*

3. Дайте характеристику адаптивної технології проектування.

4. Які системи застосовуються для оцінки показників якості і параметрів оптимізації виробів?

5. Які системи використовуються для експрес-аналізу математичних моделей конструкцій та технологічних процесів?

6. Які системи застосовуються для імітаційного моделювання працездатності конструкцій?

7. Охарактеризуйте функціональні можливості програмних продуктів скінченно-елементного аналізу системи MSC.

8. Охарактеризуйте аналітичні можливості лінійки програмних продуктів системи ANSYS.

9. Наведіть приклади статичного, квазістатичного та динамічного навантаження конструкцій.

10. Які методи і засоби оптимізації конструкцій застосовуються в програмі ANSYS.

11. Які засоби візуалізації результатів скінченно-елементних розрахунків застосовуються в автоматизованих програмних системах?

3. ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ У СИСТЕМІ ANSYS

Багато задач, з якими доводиться в даний час мати справу дослідникам і інженерам, не піддаються аналітичному розв'язку або вимагають величезних витрат на експериментальну реалізацію. Найчастіше єдиною можливістю експрес-аналізу інженерної проблеми є математичне моделювання з використанням проекційно-сіткових методів в формі МСЕ [1-27].

Основними етапами математичного моделювання фізичних процесів є:

- 1) препроцесорна підготовка даних (побудова геометричної моделі, задання фізико-механічних властивостей матеріалу, генерація скінченно-елементної сітки; задання навантажень);
- 2) обчислення результатів розв'язку задач (переміщення, деформації, напруження та інваріантні характеристики);
- 3) постпроцесорна обробка результатів.

3.1. Приклад аналізу плоского напруженого стану кутника при статичному навантаженні

Розглянемо розрахункову схему для аналізу плоского напруженого стану кутника із двома отворами (рис.5). Нижня частина поверхні верхнього отвору кутника кінематично нерухова. Нерівномірний тиск характеризує механічна взаємодія на частині поверхні нижнього отвору.

Матеріал кутника - сталь А36, модуль Юнга $E=30 \cdot 10^6 \text{Па}$, коефіцієнт Пуассона $\nu=0.27$. Допущення: розглядається плоский напружений стан (куточок з товщиною рівною одиниці), напруження $\sigma_z=0$. У даному прикладі демонструються: 1) твердотільне геометричне моделювання із застосуванням примітивів; 2) застосування бульових операцій; 3) задання нерівномірного навантаження; 4) графічне зображення деформованого стану і напруг; 5) лістинг реакцій опор; 6) аналіз погрішності обчислення потенційної енергії.

Етапами підготовки для створення дискретної моделі конструкції є: 1) задання імені задачі; 2) установка фільтрів меню для проведення даного типу аналізу; 3) задання типу скінченних елементів і їхніх параметрів; 4) задання властивостей матеріалу; 5) створення прямокутників;

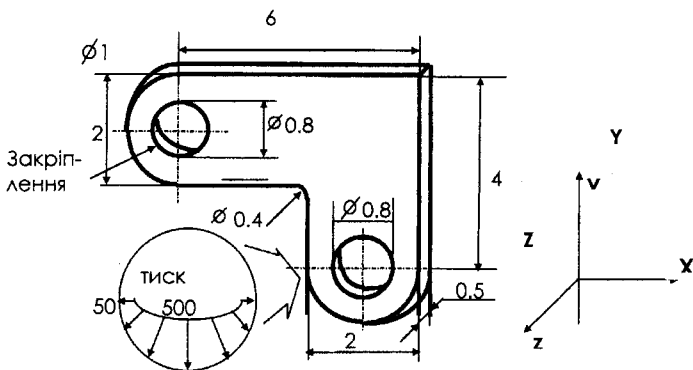


Рис.5. Розрахункова схема для аналізу плоского пружного стану кутника

властивостей матеріалу; 5) створення прямокутників; 6) зміна параметрів зображення; 7) переведення параметрів робочого поля в полярну систему координат, побудова кіл; 8) зміна робочого поля, створення прямокутних областей; 9) побудова галтелі (закруглення); 10) створення областей по лініях; 11) об'єднання областей; 12) генерація отворів; 13) збереження бази даних; 14) дискретизація розрахункової області на скінченні елементи.

Для розв'язку задачі потрібне задання переміщень на границі поверхні першого отвору і тиску на границі другого отвору (рис.5), а також вибір конкретного процесора для прозв'язування системи алгебраїчних рівнянь.

Постпроцесорна обробка даних для аналізу результатів розрахунку включає: 1) виклик головного постпроцесора і читання результатів; 2) перегляд зображення деформованого контуру області; 3) перегляд зображення ізоліній еквівалентних за Мізесом напружень; 4) перегляд списку значень зусиль у граничних вузлах; 5) вихід із програми ANSYS.

Покроковий опис чисельної процедури одержання розв'язування даної задачі в середовищі ANSYS наведено нижче:

Підготовка моделі

(Preprocessing)

1 Введення імені завдання

(Jobname).

Після даної операції всі файли, створені ANSYS у процесі роботи, будуть мати зазначене ім'я.

U_M: File (Change jobname

1.1. Ввести: *Bracket*

1.2. Нажати **OK**

2. Установка фільтрів.

Дана операція дозволяє виключити із всіх меню ANSYS пункти, що не ставляться до типу аналізу розв'язуваної задачі.

M_M: preferences

2.1. Нажати кнопку: **Structural**

2.2. **OK.** (вибрати задачу статичної механіки деформованого твердого тіла)

3. Вибір типу і параметрів елементів.

Тип елемента, крім іншого, визначає кількість ступенів свободи (переміщення і/або кути обертання, температура і ін.), форму елемента (одномірний, чотирикутний, тетраедральний і ін.), і розмірність. Вибирається плоский чотирикутний 8-вузловий елемент другого порядку наближення **PLANE82**.

3.1. Нажати **Add** (додати новий тип елемента)

3.2. Вибрати **Structural solid** у бібліотеці скінченних елементів (ліве вікно)

3.3. Вибрати **Quad 8 mode 82** у вікні **Selection**

3.4. **OK**

3.5. Нажати **Options** (властивості елемента)

3.6. Вибрати для опції 3.3 значення **Plane stress w/thk** (плосконапружений елемент із вказівкою товщини)

3.7. **OK**

3.8. **Close**

4. Задання параметрів елементів. (Real constants).

Задаються для елементів, чий властивості не можна повною мірою описати положенням їхніх вузлів. Типові приклади - товщина плоских елементів і параметри поперечного переріза балкових.

M_M: Preprocessor (Real constants)

4.1. Нажати **Add** (додати до існуючого списку наборів параметрів)

4.2. **OK** (константи - для елемента **PLANE82**)

4.3. Ввести 0.5 для **ТНК** (товщина елемента)

4.4. **OK**

5. Властивості матеріалу.

Як і для **real constants**, можна підготувати кілька наборів властивостей матеріалів, які потім у різних комбінаціях з іншими параметрами елемента використовуються при створенні скінченно - елементної сітки. У прикладі задається ізотропний матеріал з постійними властивостями.

M_M: Preprocessor (Material props (Constant - Isotropic

5.1. **OK** (набір властивостей для матеріалу №1)

5.2 Ввести 30Е6 в **EX** (модуль пружності)

5.3. Ввести 0.27 в **NUXY** (коефіцієнт Пуассона)

5.4. **OK**

Всі введені дані перебувають в оперативній пам'яті комп'ютера, для їхнього збереження у файлі **<Bracket.db>** на інструментальній панелі варто вибрати **T_B: Save_db**

6. Створення прямокутників.

Рисується "кістяк" конструкції - два взаємно перпендикулярних прямокутники (див. рисунок). Існує безліч способів генерації геометричних об'єктів. Запропонований тут варіант - створення двовимірної області (прямокутника) однією командою по його розмірах. Альтернативний спосіб - побудова геометрії «знизу-нагору», починаючи з нуль-мірних примітивів (базових точок keypoints), по них -

одномірних (Lines), далі двовимірних (Areas) і тривимірних (Volumes).

M_M: Preprocessor → -Modeling - Create → -Areas - Rectangle → By Dimensions (прямокутник по розмірах)

6.1. Ввести $X1=0, X2=6, Y1=-1, Y2=1$ (перехід - клавіша **TAB**) - координати протилежних кутів прямокутника

6.2. Нажати **Apply** (застосувати). Після натискання **Apply**, на відміну від **OK**, виконання поточної операції не переривається

6.3. Ввести $X1=4, X2=6, Y1=-1, Y2=-3$ (другий прямокутник)

6.4. **OK**

7. Зміна параметрів зображення.

Для більше наочного відображення геометрії встановлюється опція, що включає виділення кольором і нумерацію двовимірних об'єктів (Areas або, у вільному перекладі, області, поверхні). Подібні функції розташовані в пункті **PlotCtrls** основного меню (**Utility Menu**)

U_M: PlotCtrls → Numbering

7.1. Вибрати **Area numbers**

7.2. **OK**

8. Переклад робочого поля (Work Plane) у полярну систему

координат, зображення кіл.

За замовчуванням робоче поле прив'язується до декартової системи координат. Робоче поле - основний інструмент для побудови об'єктів складної просторової орієнтації. На екрані показується у вигляді регулярної сітки сірого кольору. Функції керування робочим полем розташовані в пункті **Work Plane** основного меню. Спочатку зменшуємо масштаб зображення.

U_M: PlotCtrls (Pan, Zoom, Rotate

8.1. Нажати кнопку (зменшення)

8.2. **Close**

Покажемо робоче поле

U_M: Workplane → Display W P -

з'явилася робоча система координат. Зробимо її полярною.

U_M: Workplane (W P Settings

8.3. Нажати **Polar**

8.4. **Grid & Triad** (показувати сітку і вісь)

8.5. Увести 0.1 в **Swap incr.** (точність установки графічного курсору)

8.6. **OK**

Створюємо коло.

M_M: Preprocessor (Modeling - Create (-Areas- Circle (Solid Circle

8.7. Мишею (лівою клавішею) відзначити центр майбутнього кола на початку координат робочого поля і віджати клавішу

8.8. Так само задати радіус (діаметр кола дорівнює висоті прямокутника)

9. Переміщення робочого поля для побудови другого кола.

U_M: Work Plane (Offset WP to (Keypoints

9.1. Відзначити мишею два нижні кути прямокутника A2

9.2. **OK**

Рисуємо друге коло

M_M: Preprocessor (Modeling - Create (-Areas- Circle (Solid Circle
Далі - за аналогією з першим колом.

10. Злиття областей

Приклад використання однієї з Булевих (Boolean) операцій для перетворення геометричних об'єктів (злиття, поділ, перетинання, виключення і ін.). Розміщуються в пункті **Operate** препроцесора (головне меню).

M_M: Preprocessor (-Modeling- Operate (-Booleans- Add (Areas

10.1. Нажати **Pick All** для злиття всіх площ

11. Закруглення (галтель) між лініями.

Спочатку задається нумерація ліній у графічному вікні.

U_M: Plot Ctrls (Numbering

11.1. Вибрати **Line Numbers**

11.2. **OK**

Вибираємо зображення робочого поля

U_M: Workplane (Display Work Plane

Створення галтели на внутрішньому вигині кутника:

M_M: Preprocessor (-Modeling- Create (-Lines -Line fillet

11.3. Відзначити мишею лінії 17 і 18 (між ними і буде кутник)

11.4. **OK**

11.5. Ввести 0.4 в **Fillet radius** (радіус закруглення)

11.6. **OK**

Показуємо лінії в графічному вікні

U_M: Plot (Lines

12. Створення області по лініях кутника.

Збільшення масштабу зображення

U_M: Plot Ctrls (Pan, Zoom, Rotate

12.1. Вибрати **Zoom** (збільшення) у меню **Pan, Zoom, Rotate**

12.2. Мишею, не відпускаючи лівої клавіші, окреслити рамку навколо кутника і віджати клавішу.

Створення нової області по контури кутника.

M_M: Preprocessor (Create (-Areas- Arbitrary (By Lines

12.3. Відзначити мишею лінії L4, L5, L6

12.4. **OK** (створена нова область)

12.5. У меню **Pan, Zoom, Rotate** вибрати **Fit** (автоматичне масштабування всієї моделі)

12.6. **Close**

Зображення областей у графічному вікні.

U_M: Plot (Areas

13. Об'єднання всіх областей в одну.

Виробляється за допомогою функції **Add** з пункту **Options**.

M_M: Preprocessor - Modeling - Operate (-Booleans- Add (Areas

13.1. **Pick All** (об'єднати всі області в одну)

14. Отвори.

На першому етапі створюються два кола, що відповідають отворах. Потім вони «виключаються» з моделі конструкції операцією **Subtract**.

U_M: Work Plane → Display WP (показати робочу площину)

M_M: Preprocessor - Modeling - Create (-Areas- Circle (Solid Circle

Коло радіуса 0.4 викреслюється мишею по використаній раніше схемі (п.п. 8.7, 8.8)

Переміщення робочої площини (Work Plane) у початок глобальної системи координат (Global Origin):

U_M: Work Plane - Offset W P (Global Origin

Друге коло радіуса 0.4 викреслюються мишею по використаній раніше схемі (п.п. 8.7, 8.8)

Видалення з екрана робочої площини з наступним "просвердлюванням" отвору.

U_M: Workplane (Display Work Plane

M_M (Preprocessor (Modeling - Operate (Booleans - Subtract (Areas

14.1. Відзначаємо мишею регіон (область), з якої виробляється видалення (весь кронштейн)

14.2. **Apply**

14.3. Відзначаємо мишею отвір

14.4. **OK**

15. Збереження геометрії в окремому файлі.

U_M: File (Save as

15.1. Ввести ім'я файлу <Model.db> у нижньому рядку

15.2. **OK**

16. Дискретизація області на елементи (Meshing):

Встановлення розміру елементів, що рекомендується

M_M: Preprocessor (- Meshing - Shape & Size - Manual Size- Global - Size

16.1. Ввести 0.5 в Size

16.2. **OK**

Нанесення скінченно-елементної сітки. Для областей складної геометрії в ANSYS використовується вільна (Free) дискретизація.

M_M: Preprocessor (-Meshing- Areas (Free

16.3. **Pick All** (всі наявні площі)

Збереження поточних даних у файлі з іншим ім'ям

U_M: File (Save as

16.4. У нижньому рядку ввести

Mesh.db

16.5. **OK**

Розв'язок (Solving)

Отримання розв'язку включає конкретизацію методу (алгоритму) і параметрів розрахунку, задання граничних умов.

17. Задання граничних переміщень.

Переміщення (Displacements) на границі першого, затисненого по контуру, отвору.

M_M (Solution(-Loads- (Apply (- Structural - Displacement(On Keypoints

17.1. Відзначити чотири ключових точки на отворі

17.2. **OK**

17.3. Вибрати **All DOF** (всі переміщення)

17.4. Ввести **0** в Value (нульові переміщення)

17.5. Встановити змінну **KEYPND** у положення **ON** (поширити дію команди на вузли, що лежать між ключовими точками)

17.7. **OK**

Показуємо лінії

U_M: Plot (Lines

T_B: Save db (зберегти базу даних у файлі <Mesh.db>)

18. Тиск на границі другого отвору.

M_M (Solution(-Loads- (Apply (- Pressure(On Lines

18.1. Відзначити мишею ліву нижню чверть границі другого отвору

18.2. **Apply**

18.3. Ввести **50** в VALI (тиск на лівому кінці лінії)

18.4. Ввести **500** в VALJ (тиск на правому кінці лінії)

18.5. **Apply**

18.6. Відзначити мишею праву нижню чверть границі другого отвору

18.7. **Apply**

18.8. Ввести **500** в VALI

18.9. Ввести **50** в VALJ

18.10. **OK**

Розрахунок (processing).

19. Розв'язок задачі для поточного кроку навантаження.

M_M (Solution(- Solve-Current LS

19.1. Натиснути **OK** для запуску процесу розрахунку, попередньо проаналізувавши повідомлення в білому інформаційному вікні

19.2. **Close** у жовтому вікні з написом **Solution is done!** (розрахунок закінчено!) після його довгоочікуваної появи

Аналіз результатів (postprocessing)

Результати розв'язку можна представити як у графічній, так і в текстовій формі.

20. Виклик головного процесора і читання результатів

Вибирається перший (first) з декількох (при покроковому розрахунку) наборів вхідних даних. Для даного завдання такий набір тільки один.

M_M: General Postproc (- Read Results-First Set

21. Зображення деформованої форми області.

M_M: General Postproc(- Plot Results-First Set (Deformed Shape

21.1. Вибрати **Def + Undeformed** (показуються початковий і актуальний стани одночасно)

21.2. **OK**

22. Ізолінії еквівалентних замісесом напружень

M_M: General Postproc(- Plot Results-Contour Plot (Nodal Solution

22.1. Вибрати **Stress** (напруження) у лівому **scroll** – меню

22.2. Вибрати **von Mises (SEQV)** у правому **scroll** – меню

22.3. **OK**

Видалення границь із екрана для полегшення перегляду.

U_M: Plot Ctrl (Style(Edge Options

22.4. Вибрати **Edges Only** в **[/EDGE]** (показувати тільки границі областей)

22.5. Вибрати **Dashed / Solid** (суцільними лініями)

22.6. Вибрати **Replot** (оновити картину зображення після виконання команди)

22.7. **OK**

23. Перегляд списку значень зусиль у граничних вузлах

Дана операція дозволяє вивести в текстовій формі значення компонент сил у вузлах, що лежать на границях області

M_M: General Postproc(- List Results (Reaction Solu

23.1. **OK** (перегляд всіх реакцій у вікні, що з'явилося)

23.2. **Close** на обрамленні вікна з лістингом

24. Вихід з ANSYS

При виконанні процедури виходу можна зберегти дані в різному обсязі: геометрія, граничні умови (save Geom + Loads); геометрія, граничні умови, параметри розрахунку (save Geom + Loads + Solution); геометрія, граничні умови, параметри розрахунку, результати (save Everything); нічого (No Save!)

T_B: Quit

24.1. Вибрати останній пункт

24.2. **OK.**

3.2. Приклад застосування методу підконструкцій в розрахунках пружно-деформованного стану консольної балки з особливістю

Методика розв'язку задач методом підконструкцій у системі ANSYS розглядається на прикладі задачі про вигин консольної балки, навантаженої зосередженим моментом на кінцевому перетині (рис.6). В районі стрибка жорсткості є напівкруглий виріз $R = 0.05$ м. Сама модель, її геометричні характеристики і густота сіткової розбивки обрані винятково з міркувань наочності, простоти виконання і демонстрації методики.

Розрахункова схема наведена на рис.6. Довжини балок з кусочно-однорідною жорсткістю $L_1 = 3.5$ м, $L_2 = 4$ м. Висота перетину $H_1 = 1$ м, $H_2 = 2$ м (момент опору перетину $W=BH^2/6$ відповідно дорівнює: $W_1=1/6$, $W_2=2/3$), згинальний момент $M=1000$ Н·м.

Аналітичний розв'язок задачі для напружень дається як: 1) Перетин 1: $H_1 = 1$ м, $\sigma_1 = M/W_1 = 6000$ Па. 2) Перетин 2: ($H_2 = 2$ м): $\sigma_2 = M/W_2 = 1500$ Па.

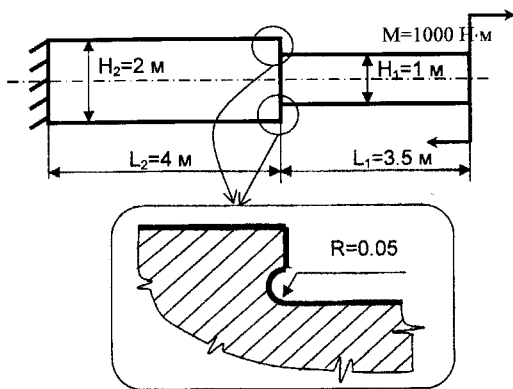


Рис.6. Розрахункова схема задачі про вигин консольної балки методом підконструкцій

Для чисельного розв'язку задачі частина конструкції, що містить зону концентрації напружень в околиці особливості в балці (рис.6), виділяється в

підконструкцію (submodel). Розмір виділеної зони вибирається відповідно до принципу Сен-Венана.

Розв'язок задачі в системі ANSYS проводиться по наступних етапах:

- 1) створення узагальненої моделі конструкції з малою деталізацією; 2) збереження бази даних з узагальненою моделлю; 3) аналіз загальної моделі конструкції; 4) перегляд результатів розв'язку; 5) повне очищення бази даних; 6) створення високодеталізованої моделі регіону дослідження з особливістю (підконструкції); 7) виділення прикордонних вузлів, по яких буде здійснюватися інтерполяція; 8) запис даних про ці вузли у файл <*.node>; 9) збереження бази даних з моделлю під конструкції; 10) повне очищення бази даних; 11) відновлення із збереженої на кроці 2 бази узагальненої моделі; 12) читання в базу даних результатів рішення для узагальненої моделі; 13) читання в базу даних відомостей про вузли з <*.node> файлу та інтерполяція ступенів свободи для цих прикордонних вузлів (CBDOF) із записом <*.cbdo> файлу; 14) читання в базу даних моделі підконструкції, збереженої на кроці 9; 15) читання в базу даних накладених на прикордонні вузли обмежень із файлу <*.cbdo>; 16) розв'язок задачі для під конструкції; 17) перегляд результатів розв'язку задачі для підконструкції.

Покроковий опис процедури розв'язку в системі ANSYS приведено нижче

Підготовка моделі (Preprocessing)

Побудова узагальненої скінченно-елементної моделі з малою деталізацією і грубою розбивкою

1. **Utility Menu > File > Change Jobname**

Ввести нове ім'я файлу: <coarse>

OK

2. **Main Menu>Preprocessor**

Вибір типу елемента, яким буде виконуватись розбивка:

Element Type > Add/Edit/Delete > Add > Solid Quad 4node 42 > OK

3. Закрийте меню **Element Types > Close**

4. Задання властивостей матеріалу:

Material Props > -Constant- Isotropic

У меню **Isotropic Material Properties** програмою буде запропоновано створити матеріал за номером 1, натисніть OK.

Ввести числові значення:

Модуль Юнга **EX = 2.1E11**

Коефіцієнт Пуасона **NUXY= 0.3**

Закрити меню **Isotropic Material Properties > OK**

Створення прямокутної поверхні

5. Modeling- Create > -Areas- Rectangle > By Dimensions

Ввести числові значення координат для другої точки $X2 = 1$ і $Y2 = 1$ > **Apply**

(незаповнені поля для $X1$ і $Y1$ розпізнаються як рівні 0., 0.)

У меню **Create Rectangle by Dimensions** ввести $X2 = -4$ і $Y2 = 1$ > **Apply**

У меню **Create Rectangle by Dimensions** ввести $X1 = 1$ і $Y1 = 0$, $X2 = 1.5$ і $Y2 = 0.5$ > **Apply**

У меню **Create Rectangle by Dimensions** ввести $X1 = 4$ і $Y1 = 0$, $X2 = 1.5$ і $Y2 = 0.5$ > **OK**

Закрити меню **Create**.

Для забезпечення автоматичної генерації сітки по границях створених поверхонь необхідно виконати Булеву операцію склеювання (**Glue**) всіх створених поверхонь. У результаті виконання операції всі лінії і точки сусідніх поверхонь, що мають ті самі координати і частково перекривають один одного, будуть злиті таким чином, щоб по співпадаючих границях поверхонь будуть перебувати єдині примітиви (лінії і точки), що належать одночасно двом прилягаючим поверхням.

6. Main Menu > Preprocessor > - Modeling- Operate > -Booleans- Glue > Areas > Pick All

Далі буде встановлена густина елементів по лініях, для чого спочатку необхідно нарисувати наявні лінії:

7. Utility Menu > Plot > Lines

8. Для задання точного числа розбивок (елементів) по лініях, що обмежує поверхні, перейти у меню завдання установок розміру і густоти елементів на обраних лініях:

Main Menu > Preprocessor > - Meshing- Size Cntrls > -Lines- Picked Lines

Відзначити одним клацанням лівої кнопки миші всі короткі лінії (довжиною 0.5) > **OK**

Ввести кількість елементів уздовж ліній: **NDIV = 2** > **Apply**

Вибрати зазначені лінії:

Ввести кількість елементів уздовж ліній:

NDIV = 4 > **Apply**

Вибрати зазначені лінії:

Ввести кількість елементів уздовж ліній:

NDIV = 10 > **Apply**

Вибрати зазначені лінії:

Ввести кількість елементів уздовж ліній: **NDIV = 8** > **OK**

Для перемальовування зображення ліній з заданими установками (попереднього перегляду густоти сітки) виконати перерисовку:

9. Utility Menu > Plot > Replot

Перейти у меню безпосередньої сіткової генерації. Буде використана процедура побудови сітки по шаблону регулярної сітки.

10. Preprocessor > -Meshing- Mesh > - Areas- Mapped

Натиснути **3 or 4 sided** (розбивка поверхонь, топологічно подібних трьох або чотирибічним).

Відзначити одним клацанням лівої клавіші миші ці три поверхні: натисніть **OK**

11. У меню Preprocessor > -Meshing- Mesh > -Areas- Mapped натиснути **By corners**

і вибрати цю поверхню: **OK**

Послідовно (напрямок обходу не важливо) вказати курсором чотири точки.

12. Після генерації сітки закрити меню **Map Mesh Area by Corners** > **Cancel**

Далі до створеної скінченно-елементної моделі будуть прикладені граничні умови і навантаження.

13. Перейти у меню **Main Menu > Solution > -Loads- Apply > Displacement > On Lines**

Відзначити лівою кнопкою миші цю лінію і натиснути **OK** у меню, що з'явилося.

Переконатися, що підсвічено **All DOF (all degrees of freedom)** і натиснути **OK**.

У графічному вікні закладення по кожному ступеню свободи буде показана символом стрілки по відповідній координаті.

14. Далі в меню **Displacement** натиснути на **-Antisymm B.C.- on Lines**

Відзначити мишею всі лінії, як показано на рис. **OK**

У графічному вікні на лініях з'явиться символ **A** (антисиметрія).

15. Закрити меню **Displacement** і перейти в **Apply > Force/Moment > On Nodes**

Вибрати правий верхній вузол > **OK**

Ввести величину значення сили, що прикладається у напрямку осі **X** глобальної системи координат у полі **VALUE Force/moment value = 1000 > OK**

16. Зберегти базу даних, для чого натиснути в **ANSYS Toolbar > SAVE_DB** (або **Utility Menu > Save as Jobname.db**).

Розрахунок (processing).

17. В меню **Solution**

Натисніть **-Solve- Current LS**

У виниклому вікні **/STAT Command** переглянути статистику, закрити вікно і у вікні **Solve Current Load Step** натиснути **OK**.

18. Після появи інформації про те, що розв'язок отримано, закрити інформаційне вікно **Information > Close**

Перегляд результатів (postprocessing)

19. **Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot- Nodal Solution**

У меню **Item, Comp** вибрати **Stress** і в другому відповідному вікні скролінга

вибрати **X-direction** (напруження по осі **X**) > **OK**

Звернути увагу, що за винятком околиці вузла додатка навантаження і зони стрибка жорсткості в районі уступу, напруження постійні по перетині внаслідок сталості моменту уздовж осі **X**.

Далі для перегляду напруження у вигляді епюри і листингу по перетинах балки будуть використані засоби **Path Operations**.

20. Зображення в графічному вікні лінії моделі: **Utility Menu > Plot > Lines**

Виберіть вертикальні лінії, для чого потрібно викликати

21. **Utility Menu > Select > Entities** У синьому меню **Select Entities** у верхньому списку скролінга вказати тип обраних примітивів і принцип вибору: **Lines By Num/Pick** (за номером або графічно) **Apply**

22. Вибрати мишею в графічному вікні ці лінії > **OK**

У синьому меню **Select Entities** у верхньому списку скролінга вказати тип обраних примітивів - вузли, і принцип вибору приналежним лініям:

Nodes

Attached to (приєднані к...)

Lines, all

OK

Відобразите в графічному вікні обрані вузли:

23. **Utility Menu > Plot > Nodes** і перейти у меню

24. **General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes**

Вибрати верхній і нижній вузли ліворуч > **OK**

Name Define Path Name p1 > OK

25. Закрити інформаційне вікно **PDEF Command**

26. **Define Path > By Nodes**

Вибрати верхній і нижній вузли > **OK**

Name Define Path Name p2 > OK

27. Закрити інформаційне вікно **PDEF Command**

28. **Define Path > By Nodes**

Вибрати верхній і нижній вузли > **OK**

Name Define Path Name p3 >
OK
29. Закрити інформаційне вікно PDEF Command
30. Define Path > By Nodes
 Вибрати верхній і нижній вузли >
OK
Name Define Path Name p4 >
OK
31. Закрити інформаційне вікно PDEF Command
32. Define Path > By Nodes
 Вибрати верхній і нижній вузли >
OK
Name Define Path Name p5 >
OK
33. Закрити інформаційне вікно PDEF Command
 Для візуального контролю правильності задання нарисувати на екрані задані шляхи:
34. Path Operations > Plot Paths
35. Utility Menu > Select > Everything
 На цьому етапі активним є останній із заданих шляхів **p5**, тому запит результатів наступною командою буде саме для **p5**:
36. Path Operations > Map onto Path
 У меню **Map Results Item onto Path** вибрати для **Item, Comp > Stress i X-direction, OK**
37. Path Operations > -Plot Path Items-On Geometry у меню **Plot Path Items On Geometry**
 вибрати **SX**
 і відзначити в **Nopt**
 прапорець **With nodes**
OK
38. Path Operations > List Path Items
 Відзначити **SX**
OK
39. Переглянути величини напружень на перетині. Звернути увагу на концентрацію напружень у районі точного додатка навантаження і закрити вікно PRPATH Command.
40. General Postproc > Path Operations > Recall Path

Відзначити **p4 > OK**
41. Path Operations > Map onto Path > Item, Comp > Stress
X-direction > OK
42. Path Operations > List Path Items > відзначте SX > OK
 Звернути увагу на те, що максимальні напруження на перетині дорівнює 5982,9 (Па) у той час як теоретичне значення 6000 (Па).
43. Переглянути значення напружень по перетину. Закрити вікно PRPATH Command.
 Повторити п.п. 40-42 для **p3, p2, p1, тобто:**
44. Path Operations > Recall Path > p3 > OK
45. Path Operations > Map onto Path > Item, Comp > Stress
X-direction > OK
46. Path Operations > List Path Items > відзначте SX > OK
47. Перегляд величин і закриття вікна PRPATH Command.
48. Path Operations > Recall Path > p2 > OK
49. Path Operations > Map onto Path > Item, Comp > Stress
X-direction > OK
50. Path Operations > List Path Items > відзначте SX > OK
 Звернути увагу на те, що максимальне напруження по перетину дорівнює 1385,6 (Па) у той час як теоретичне значення 1500 (Па).
51. Перегляд величин і закриття вікон PRPATH Command.
52. Path Operations > Recall Path > p1 > OK
53. Path Operations > Map onto Path > Item, Comp > Stress X-direction > OK
54. Path Operations > List Path Items > відзначте SX > OK
55. Перегляд значень і закриття вікон PRPATH Command.
 Далі потрібне створення деталізованої скінченно-елементної

моделі регіону з особливістю, що представляється підконструкцією.

Підготовка деталізованої моделі (Preprocessing)

56. Utility Menu > File > Clear & Start New > OK > Yes

57. Utility Menu > File > Change Jobname > введіть submod > OK

58. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Lines- Arcs > By Cent & Radius

У командному рядку ANSYS Input ввести координати центра окружності:

1,..55

Натиснути Enter. Звернути увагу на те, що в графічному вікні ANSYS Graphics з'явилася прив'язка центра окружності у вигляді маленького круга.

Ввести координати точок, що визначає радіус і початок дуги: 1,..,6 і натиснути Enter.

У меню, що з'явилося Arc by Center & Radius ввести для ARC значення 180.

OK

59. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > Keypoints > In Active CS

Apply

Введіть для X,Y,Z значення:

0,1 Apply

1,1 Apply

1,0 Apply

1.5,0 Apply

1.5,..5 OK

60. Utility Menu > PlotCtrls >

Numbering

Відзначити прапорець KP Keypoint numbers ON

61. Utility Menu > Plot > Keypoints

62. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Lines- Lines > Straight Line

Створити лінії, що з'єднують точки, послідовно вибираючи точки:

4,5

5,6

6,1

3,9

9,8

8,7

7,4

OK

63. Utility Menu > Plot > Lines

64. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Arbitrary > By Lines

У довільному порядку вибрати всі лінії на екрані > OK

65. Вибрати тип елемента, яким буде виконуватись дискретизація: Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete >

Add

>Solid

Quad

4node 42

> OK

66. Закрийте меню Element Types > Close

Задання властивостей матеріалу:

67. Material Props > -Constant- Isotropic

У меню Isotropic Material Properties програмою буде запропоновано створити матеріал за номером 1, натисніть OK.

Уведіть значення:

Модуль Юнга EX

=2.1E11

Коефіцієнт Пуассона NUXY=0.3

Закрийте меню Isotropic Material Properties > OK

68. Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -Global- Size

Введіть для всієї поверхні глобальний розмір довжини сторони елемента: SIZE Element edge length = 0.1 > OK

69. Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -Lines- Picked Lines

відзначте ці лінії (дві дуги окружності):

Для параметра NDIV (кількість елементів по довжині) уведіть 8

Apply

відзначте цю лінію:

Для параметра NDIV (кількість елементів по довжині) уведіть 22

Для параметра SPACE (коефіцієнт згущення) уведіть .33

Apply

відзначте цю лінію:

введіть NDIV 10

введіть SPACE 2.5

Apply

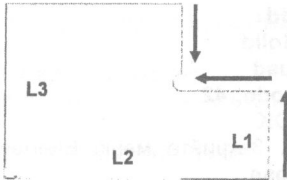
відзначте цю лінію:

введіть **NDIV 10**
введіть **SPACE 4**
OK

70. Utility Menu > Plot > Lines

Відрисував лінії, перевірте візуально правильність напрямку згущення сітки уздовж ліній.

Правильні напрямки показані нижче

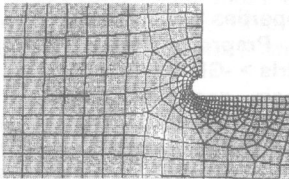


У випадку, якщо на деяких лініях напрямок згущення протилежно бажаному, можна перевернути напрямок згущення шляхом застосування відповідної функції:

Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -Lines- Flip Bias

71. Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Mesh > -Areas- Free > Pick All

Фрагмент дискретної моделі приведено нижче.



**72. Utility Menu > Select > Entities
Lines
By Num/Pick
Apply**

Виберіть лінії по границях (L1,L2,L3), по яких буде проводитись інтерполяція ступенів свободи і зшивка з узагальненою (грубою) моделлю > **OK**

73. Далі в синьому меню **Select Entities** виберіть:

**Nodes
Attached to
Lines, all**

OK

74. Для візуального контролю відображаємо обрані вузли:
Utility Menu > Plot > Nodes

75. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > Nodes > Write Node File > OK

У результаті виконання команди буде записаний файл із привласненим за замовчуванням ім'ям **<jobname.node>**, тобто в нашому випадку **<submod.node>**.

Приклад змісту файлу **<submod.node>**:

```
4
5 0.000000000000
6 1.000000000000
7 1.500000000000
8 0.500000000000
9 1.500000000000
10 1.000000000000
11 0.000000000000
12 0.100000000000
13 0.000000000000
14 0.200000000000
15 0.000000000000
16 0.300000000000
17 0.000000000000
18 0.400000000000
19 0.000000000000
20 0.500000000000
```

76. Utility Menu > Select > Everything

77. ANSYS Toolbar > SAVE_DB або
**Utility Menu > File > Save as
Jobname.db**

**78. Utility Menu > File > Resume from
<coarse.db > OK**

**79. Main Menu > General Postproc >
Data & File Opts INRES All Items
FILE <coarse.rst > OK**

**80. General Postproc > Submodeling >
Interpolate DOF > OK**

(результатом є файл із ім'ям за замовчуванням **<submod.cbdo>**)

**81. Utility Menu > File > Resume from
submod.db > OK**

82. Main Menu > Solution

**83. Utility Menu > File > Read input
from > submod.cbdo > OK**

(або командою /INPUT,submod,cbdo)

84. Utility Menu > Plot > Nodes

Зверніть увагу на те, що до всіх граничних вузлів прикладені граничні умови, тобто виконуються умови інтерполяції.

Розрахунок (processing).

85. Main Menu > Solution > Solve Current LS

Перегляд результатів (postprocessing)

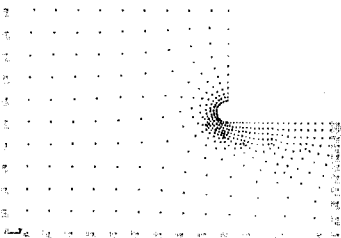
86. Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot- Nodal Solution > Item, Comp > Stress X-direction > OK

Для перевірки точних значень напруг по перетині повторити розглянуту раніше для узагальненої моделі процедуру по запиту і побудові результатів уздовж шляху, що задається.

87. Utility Menu > Plot > Nodes

88. Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes

Вибрати верхній і нижній вузли > OK



Name Define Path Name p2 > OK

89. Закрити інформаційне вікно PDEF Command

90. Define Path > By Nodes

Вибрати верхній і нижній вузли > OK

Name Define Path Name p4 > OK

91. Закрити інформаційне вікно PDEF Command

92. Path Operations > Map onto Path

У меню Map Results Item onto Path вибрати для Item, Comp > Stress і X-direction, OK

93. Path Operations > -Plot Path Items- On Geometry у меню Plot Path Items On Geometry вибрати SX і відзначити в Nopt прапорець With nodes OK

94. Для перегляду значень напружень відзначити SX

OK

Лістинг напружень для p2 уздовж шляхи перейти до Path Operations > List Path Items Відзначити SX

OK

Результат - лістинг напружень для p4

95. Path Operations > Recall Path > p2 > OK

96. Path Operations > Map onto Path у меню Map Results Item onto Path вибрати для Item, Comp > Stress і X-direction

OK

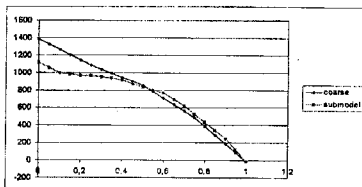
97. Path Operations > -Plot Path Items- On Geometry > SX > With nodes > OK

98. Path Operations > List Path Items

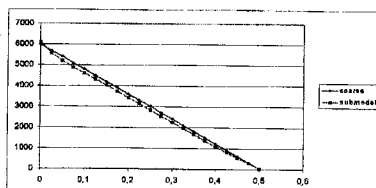
Результати розв'язку задачі (напруження розтягу-стиску SX) для перетину P2 та P4 консольної балки



Перетин Р4



Перетин Р2



Відстань до нейтральної осі перетину (м)	σ_x (Па) загальна модель	σ_x (Па) модель підконстр.	(, %
0.0	1396.6	1118.2	19.30
0.05	1325.9	1057.5	20.24
0.10	1266.2	996.98	21.26
0.15	1208.4	933.32	18.49
0.20	1148.7	869.66	15.44
0.25	1086.9	801.84	11.51
0.30	1040.5	754.01	8.31
0.35	993.98	634.51	5.98
0.40	947.50	615.01	3.43
0.45	901.02	877.25	2.64
0.50	854.55	839.49	1.76
0.55	781.83	806.49	3.15
0.60	709.12	773.49	8.08
0.65	636.40	697.77	9.64
0.70	563.69	622.05	10.35
0.75	490.97	530.25	6.00
0.80	389.87	438.46	12.52
0.85	288.38	342.52	16.77
0.90	187.08	246.56	31.80
0.95	85.780	118.12	37.70
1.0	-15.518	-10.342	33.35

Відстань до нейтральної осі перетину (м)	σ_x (Па) загальна модель	σ_x (Па) модель підконстр.	(, %
0.0	5982.9	6101.9	1.95
0.025	5686.1	5571.2	2.06
0.050	5389.2	5205.2	3.53
0.780	5092.4	4894.4	4.05
0.100	4795.5	4597.1	4.32
0.125	4498.7	4305.2	4.49
0.150	4201.9	4015.8	4.63
0.175	3905.0	3731.0	4.66
0.200	3608.1	3436.9	4.98
0.225	3311.3	3133.2	5.68
0.250	3014.4	2837.4	6.24
0.275	2714.6	2550.1	6.45
0.300	2414.7	2261.4	6.78
0.325	2114.8	1967.9	7.46
0.350	1815.0	1674.5	8.39
0.375	1515.1	1380.7	9.73
0.400	1215.2	1086.9	11.80
0.425	915.37	794.30	15.24
0.450	615.50	538.82	14.23
0.475	315.64	283.35	11.40
0.50	15.773	27.874	43.41

Значення напружень розтягання-стиску по висоті перетину р2 і р4, отримані для узагальненої моделі і деталізованої моделі, зведені в порівняльні таблиці і представлені у вигляді графіків. Для ділянки р4 отримана повна сумісність розв'язків по напруженнях. Розходження значень напружень, що розтягують, по перетині р2 у районі зовнішнього волокна, мабуть, пояснюється тим, що, внаслідок малості відстані від району стрибка жорсткості, більший перетин не встиг повністю включитися в роботу і при виділенні району з вирізом у підконструкцію необхідне віднесення границі сполучення з основною моделлю ближче до закладення.

3.3. Приклад застосування Р-методу для уточнення розрахунків плоского пружно-деформованого стану пластинки з отвором

Методика застосування р-методу демонструється для уточнення чисельних розрахунків плоского пружно-деформованого стану пластинки з отвором. Лінійний аналіз пружно-деформованого стану пластинки в

програмному комплексі ANSYS може бути проведено із застосуванням довільного із процесорів розв'язку крайових задач механіки деформованого твердого тіла: 1) ANSYS/Multiphysics, 2) ANSYS/Mechanical, 3) ANSYS/Structural, 4) ANSYS/LinearPlus, 5) ANSYS/ED.

Розрахункова схема задачі для розрахунку пружно-деформованого стану сталевій пластинки із круглим отвором, яка піддається однобічному розтяганню (рис.7), симетрична. Розміри конструкції пластинки показані на рисунку. Матеріал – сталь AISI C1020 з модулем Юнга $30,023\text{МПа}$ та коефіцієнтом Пуассона $0,29$. Тому розглядається одну четвертину конструкції. На відповідних границях задаються симетричні крайові умови в переміщеннях, встановлюються відповідні умови симетричного сполучення (конвергенції).

Етапами розрахунку даної задачі в середовищі програми ANSYS є створення розрахункової моделі (preprocessing), безпосередньо розрахунок (processing) та аналіз результатів (postprocessing), які включають: 1) введення заголовку задачі; 2) ініціалізація параметрів для побудови геометрії моделі; 3) установка фільтрів; 4) вибір типу і параметрів елементів; 5) визначення властивостей елементів; 6) задання властивостей матеріалу; 7) побудова

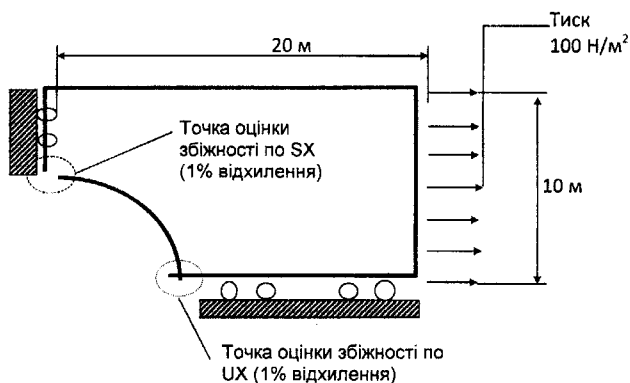


Рис.7. Розрахункова схема задачі для плоскої прямокутної пластинки з отвором із застосуванням р-методу

прямокутної області; 8) побудова кола; 9) побудова геометрії за допомогою вирізання отвору у пластинці (операція Subtract); 10) розбивка області на елементи стандартного розміру; 11) задання граничних умов в переміщеннях;

12) прикладання розподіленого навантаження, що розтягує, на частині зовнішньої границі; 13) додавання базових точок для контролю збіжності результатів розрахунку (конвергенції); 14) розв'язок задачі; 15) завантаження постпроцесора і читання з файлу результатів розрахунку; 16) відтворення зображення деформованої пластинки; 17) приведення результатів до вузлів локальної сітки; 18) відтворення зображення напружень S_x ; 19) одержання образу графічного вікна (Capture Image); 20) аналіз еквівалентних за Мізесом напруг; 21) згущення локальної сітки усередині р-елементів до 4 відрізків на сторону; 22) відображення поля напружень S_x та порівняння з отриманим раніше образом (captured image); 23) вихід з ANSYS-програми.

Покроковий опис чисельної процедури отримання розв'язку даної задачі в середовищі ANSYS наведено нижче:

Підготовка моделі (Preprocessing).

1. Введення заголовку завдання

U M: File (Change Title)

1.1. Набрати заголовок «*p-Method Plate with a hole*».

1.2. OK.

2. Ініціалізація параметрів для побудови геометрії моделі. U M: Parameters(Scalar Parameters

2.1. У вікні, що з'явилося, ввести імена і значення змінних (після набору однієї змінної - Enter). *height=10; width=20; radius=5*.

2.2. Close.

3. Установка фільтрів.

Вибір Р-методу обмежує склад всіх меню середовища тими пунктами, які ставляться до даного типу розрахунку.

M_M: Preferences

3.1. Вибрати клас завдань **Structural**.

3.2. Вибрати **P-Method** у нижній частині вікна.

3.3. OK

4. Вибір типу і параметрів елементів (елемент високого порядку Plane 145)

M M: Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete

4.1. Add (додати новий тип елемента).

4.2. Вибрати **2D Quad (PLANE 145)**.

4.3. OK.

4.4. Options (параметри елемента).

4.5. Змінити тип аналізу з **Plane stress** на **Plane stress w/TK** (плоскопружний стан з урахуванням товщини елемента).

4.6. OK.

4.7. Close.

5. Визначення властивостей елементів.

Товщина даного типу елемента (див. попередній пункт) задається в пункті **Real Constants** головного меню.

M_M: Preprocessor(Real Constants

5.1. Add (додаємо нову множину даних до списку реальних констант, які поки відсутні)

5.2. OK (відповідає елементу PLANE145)

5.3. Ввести 0.25 (товщина в метрах)

5.4. OK.

5.5. Close

6. Властивості матеріалу

M_M: Preprocessor(Material Props(-Constant-Isotropic

6.1. OK (матеріал з номером 1)

6.2. Ввести 30.023e6 для EX (модуль Юнга)

6.3. У полі NUXY (коєф. Пуассона) задати 0.29

6.4. OK

7. Побудова прямокутної області

M_M: Preprocessor(Modeling(-Create(-Areas-Rectangle(By 2 Corners

7.1. Задати координати лівого нижнього кута й розміри прямокутника: $WPX=0$, $WPY=0$, $WIDTH=width$, $HEIGHT=height$ (width і height – ініціалізовані раніше змінні)

7.2. OK

Включити нумерацію областей у графічному вікні:

U_M: PlotCtrls(Numbering

7.3. Перевести перемикач AREA у положення ON

7.4. OK

8. Побудова кола

M_M: Preprocessor (Modeling (-Create - (Areas-Circle(Solid Circle

8.1. Ввести координати центра і радіус: $WPX=0$, $WPY=0$, $RAD =radius$

8.2. OK

9. Вирізання отвору в пластинці (операція Subtract – виключення)

M_M: Preprocessor (Modeling (-Operate(- Booleans-Subtract (Areas

9.1. Показчиком миші відзначити прямокутник A1

9.2. OK

9.3. Відзначити коло A2

9.4. OK

10. Розбивка області на елементи стандартного розміру

M_M: Preprocessor (Meshing-Mesh - (Areas-Free

10.1. Нажати Pick All (виділити все)

11. Граничні умови в переміщеннях

У даному прикладі переміщення на осях симетрії задаються традиційним способом. Альтернативний варіант –

використання пункту **Symmetry B.C.** меню **Loading**.

U_M: PlotCtrls (Numbering

11.1. **Line Numbers** – у положення ON (вкл. нумерацію ліній)

11.2. **Area Numbers** – Off (відкл. нумерацію областей)

11.3. OK

M_M:Preprocessor→Loads→- Loads-Apply→- Structural-Displacement→On Keypoints (задати переміщення по базовим точках)

11.4. Відзначити кінці лінії L9

11.5. OK

11.6. Вибрати UY для Lab2 (задається переміщення Uy)

11.7. Ввести 0 в VALUE (його значення)

11.8. **Yes** в KEXPND (для всіх вузлів даної лінії)

11.9. **Apply**

Те ж - на вертикальній границі

11.10. Відзначити кінці лінії L10

11.11. OK

11.12. Вибрати UX для Lab2 (задається переміщення Ux)

11.13. Ввести 0 в VALUE (його значення)

11.14. OK

12. Задання розподіленого навантаження, що розтягує, на частині зовнішньої границі

M_M: Preprocessor(Loads(- Loads-Apply(- Structural-Pressure(On Lines

12.1. Відзначити лінію L2

12.2. OK

12.3. Ввести -100 в VALI (напруження розтягу)

12.4. OK

Розрахунок (processing).

На етапі розрахунку вводяться дві базові точки конвергенції, після чого ініціалізується скінченно-елементний алгоритм.

13. Додавання базових точок для контролю збіжності результатів (конвергенції)

M_M: Solution(-Load Step Opts-p-Method(Convergence Crit

13.1. Вибрати Replace (замінити)

13.2. Вибрати **Local for Solids** для **p-Convergence criteria**

13.3. **OK**

13.4. Відзначити вузол на перетинанні ліній 5 і 9

13.5. **OK**

13.6. Змінити погрішність збіжності **TOLER** на 1

13.7. Вибрати **DOF solution** (збіжність по переміщеннях)

13.8. Вибрати **Translation UX**

13.9. **OK**

13.10. **Add**

13.11. **OK**

13.12. Виділити перетинання ліній 5 і 10

13.13. **OK**

13.14. Змінити погрішність конвергенції у відсотках **TOLER** на 1

13.15. Вибрати **stress** (збіжність по напруженням)

13.16. Вибрати **X-direction SX**

13.17. **OK**

13.18. **Close**

Розрахунок (processing).

14. Розв'язок системи рівнянь

M_M: Solution(- Solve-Current LS

14.1. Прочитавши повідомлення у вікні статусу, закрити його (**Close**)

14.2. **OK**

14.3. По закінченні рахунку закрити вікно **Solution is done!**

Аналіз результатів (postprocessing)

На даному етапі будуються ізолінії напружень і переміщень, а також досліджуються напружень в точках «підсітки» **p**-елемента.

15.Завантаження

постпроцесора і читання з файлу результатів рахунку

M_M: General Postproc (-Read Results-Last Set

16. Зображення моделі

деформованої пластинки

M_M: General Postproc(-Plot Results (Deformed Shape

16.1. Відзначити **Def+Undef edge** (відобразити початкову й кінцеву форму області)

16.2. **OK**

17. Перегляд результатів у вузлах локальної сітки

Для **P**-елементів високого порядку вихідні дані обчислюються у вузлах локальної на елементі сітки. Сітка задається кількістю відрізків, на які розбивається кожна зі сторін елементів (за замовчуванням - 2 відрізки на стороні).

U_M: PlotCtrls (Device Options

17.1. Перевести в положення **ON** прапорець **Vector mode**.

17.2. **OK**.

M_M: General Postproc (Query Results (Subgrid Solu.

17.3. Вибрати **Stress** у лівому вікні (у вузлах локальної сітки, побудованої усередині **P**-елемента, будуть обчислені напруження).

17.4. Вибрати **X-direction SX** (нормальні, у напрямку **X**).

17.5. **OK**.

17.6. Відзначити в графічному вікні вузлові точки локальної сітки для перегляду напруження **SX**.

17.7. **OK**.

U_M: PlotCtrls (Device Options.

17.8. Прапор **Vector Mode** – у положення **Off** (результати рахунку в графічному вікні відображатимуться у вигляді ізообластей)

17.9. **OK**.

18. Зображення полів напружень Sx

M_M: General Postproc→Plot Results→ Contour Plot→ Nodal Solution (побудова ізоліній за вузловими значеннями).

18.1. Вибрати **Stress** у лівому вікні.

18.2. Вибрати **X-direction** у правому вікні.

18.3. **OK** (у графічному вікні – картина ізоліній напруження **Sx**, рівні виділені різним кольором; легенда – праворуч).

19. Одержання образу графічного вікна (Capture Image)

Дана операція застосовується, коли необхідно зберегти одне або кілька отриманих зображень у файлі формату **BMP** для наступного або

негайного виведення до друку і зіставлення результатів.

U_M: PlotCtrls(Capture Image

19.1. Вибрати **File**→**Save as** у вікні **Image1**

19.2. Набрати ім'я файлу **<Plate.bmp>** у рядку **Write image to**

19.3. **OK**

19.4. **File**→**Close** у вікні **Image1**.

20. Аналіз еквівалентних по

Мізеку напруг

M_M: General Postproc (Plot Results (Contour Plot (Nodal Solu.

20.1. Вибрати **Stress** у лівому вікні.

20.2. Скролінгом знайти **von Mises SEQV** у правому вікні.

20.3. **OK** (переглядаємо картину еквівалентних напруг у графічному вікні).

21. Згущення локальної сітки усередині р-елементів до 4 відрізків на сторону

Здрібнювання сітки скінченних елементів для відображення результатів у графічній формі підвищує деталізацію виведеної картини.

M_M: General Postproc(Options for Outp

21.1. Вибрати **4 faset/edge** для опції **[EFACET]**

23.2. **OK.**

U_M: Plot→ **Replot** (перерисовування картини поля з новими параметрами).

22. Відображення контурів розподілу напруження Sx і порівняння з отриманим раніше образом (captured image)

У п. 19 збережений образ ізоліній напруг **SX** з дозволом 2 відрізки на сторону. Зрівняти його із зображенням, що має більшу деталізацію (п. 21)

M_M: General Postproc(Plot Results(Contour Plot(Nodal Solu

22.1. Скролінгом знайти і вибрати **SX** у правому віконці.

22.2. **OK** (переглядаємо картину еквівалентних напруження)

U_M: PlotCtrls→ **Restore Image** (завантажити образ).

22.3. Вибрати в правому вікні файл **<plate.bmp>**.

22.4. **OK.**

22.5. Після перегляду і аналізу закрити вікно образа, вибравши **File**→**Close**.

23. Вихід з ANSYS-Програми

T_B: Quit

23.1. Вибрати **Save Everything** (зберегти все)

23.2. **OK.**

3.4. Приклад оптимізації спрощеної конструкції шатуна за допомогою розрахунків пружно-деформованого стану в ANSYS

Мета розрахунку - підбір оптимального співвідношення розмірів спрощеної моделі шатуна (рис.8), що забезпечують зниження еквівалентних напружень при мінімальній вазі конструкції.

Внаслідок симетрії розглядається тільки половина конструкції. З погляду геометрії модель включає нижню і верхню головку у вигляді півкілець, з'єднаних ребром товщиною $T3$ і стінкою товщиною $T4$. Крім параметрів товщин $T3$ і $T4$ модель шатуна (рис.8) включає ще 6 конструкторських параметрів ($DS1$, $DS2$, $AL11$, $DAL1$, $AL21$, $DAL2$), які в процесі оптимізації варіюються в межах заданих обмежень.

Моделюється навантаження від дії на шатун тиску газу. Для спрощення приймається, що на нижню і верхню головку діє рівномірний тиск у межах дуги 60 градусів. Тиски підбрані так, щоб сумарне навантаження, що діє на верхню головку, було рівним сумарній силі, що діє на нижню головку. Закріплення вузлів у напрямку осі X забезпечує умова симетрії. Один з вузлів закріплюється в напрямку осі Y для заборони переміщення тіла у цьому напрямку як абсолютно твердого тіла.

Скінченно-елементна модель будується для розрахунку плосконапруженого стану моделі шатуна. Вона складається з 280 елементів типу PLANE42. Використовується регулярна схема розбивки. Матеріал в моделі шатуна - сталь із коефіцієнтом Юнга 200 000МПа і коефіцієнтом Пуасона - 0,28. Нижче всі розміри визначені в мм. Тиск у МПа.

Основним питанням оптимізації є орієнтація ребер жорсткості і товщина перемички між ребрами. Не всі методи оптимізації дають однаково добрі результати. У цьому випадку найкращі результати дав метод першого порядку FIRST. У тексті пакетного файлу задані обмеження на параметри конструкції і зміню стану. Як змінну стану використовували еквівалентне напруження, що відповідає критерію Мізеса. Об'єктною змінною, яка вибрана для мінімізації, є вага конструкції.

Етапами розрахунку даної задачі в середовищі програми ANSYS є створення розрахункової моделі (preprocessing), безпосередньо розрахунок (processing) та аналіз результатів (postprocessing), які включають: 1) заголовок завдання; 2) ініціалізація параметрів для побудови геометрії моделі; 3) вибір типу розрахунку; 4) вибір типу і параметрів елементів; 5) визначення властивостей матеріалу; 6) задання констант; 7) побудова верхньої головки шатуна; 8) побудова нижньої головки; 9) побудова ребра; 10) формування областей; 11) визначення параметрів розбивки; 12) дискретизація моделі;

- 13) закріплення вузлів; 14) задання тиску на поверхні нижньої головки;
15) задання тиску на поверхні верхньої головки;

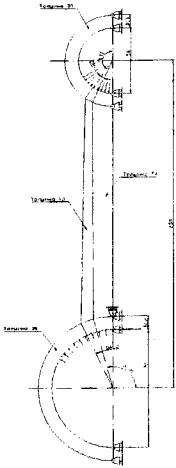


Рис.8.Розрахункова схема задачі для плоскої моделі шатуна

- 16) розрахунок пружно-деформованого стану для моделі шатуна із заданими граничними умовами;
17) постпроцесорна обробка результатів розрахунку (визначення сумарного об'єму моделі та визначення максимального еквівалентного напруження).

Для оптимізації параметрів моделі необхідно виконати: 1) задання геометричних параметрів моделі, 2) задання змінної стану, 3) задання цільової функції, 4) задання методу оптимізації, 5) призначення робочого файлу, 6) запуск процесу оптимізації, 5) аналіз отриманих результатів.

Покроковий опис чисельної процедури розв'язку даної задачі в середовищі ANSYS

наведено нижче:

Підготовка моделі (Preprocessing).

1. Заголовок завдання. U_M: File (Change Title

1.1. Ввести заголовок «Piston rod optimization.»

1.2. OK

2. Ініціалізація параметрів для побудови геометрії моделі.

U_M: Parameters ⇒ Scalar Parameters
2.1. У вікні, що з'явилося, ввести імена і значення змінних (після набору однієї змінної - Enter).

$DS1=10$; $DS2=10$; $T3=30$;
 $T4=7$; $AL11=23$; $DAL1=10$;

$AL21=105$; $DAL2=10$

Для спрощення наступного запису далі вводяться співвідношення.

$AL12=AL11+DAL1$

$AL22=AL21+DAL2$

2.2. Close

3. Вибір типу розрахунку: M_M: Preprocessor ⇒ Loads ⇒ New Analysis. Включаємо кнопку Static і потім OK.

4. Вибір типу і параметрів елементів:

M_M: Preprocessor (Element Type (Add/Edit/Delete).

4.1. Add (додати новий тип елемента)

4.2. Виберіть **Quad 4 node 42 (PLANE 42)**

4.3. **OK**

4.4. **Options** (параметри елемента)

4.5. У списку K3 змінити тип аналізу **Plane stress** на **Plane stress withk** (плоскопружний стан з урахуванням товщини елемента)

4.6. **OK**

4.7. Натисніть **Close** у попередньому вікні.

5. Визначення властивостей матеріалу:

M_M: Preprocessor ⇒ **Material Props** ⇒ **Isotropic**.

5.1. Ввести номер набору властивостей матеріалу **1** і натиснути **OK**

5.2. Задати модуль Юнга в поле **EX 20 000**

5.3. Задати коефіцієнт Пуассона в поле **NUXY 0.28**. Натисніть **OK**

6. Задання констант:

M_M: Preprocessor (**Real Constant** (**Add/Edit/Delete**).

6.1. **Add** (додати набір констант)

6.2. **OK** (у вікні вибору типу елемента). Виберіть **PLANE 42**

6.3. Ввести номер набору властивостей **1** і товщину елементів **30** для даного набору

6.4. **Apply**

6.5. Відповідно вводимо номер набору **2** і товщину **30**

6.6. **Apply**

6.7. Вводимо номер набору **3** і товщину **73**

6.8. **Apply**

6.9. Вводимо номер набору **4** і товщину **74**

6.10. **OK**

6.11. **Close**

7. Побудова геометрії верхньої головки шатуна:

7.1. Створення точки в центрі головки:
M_M: Preprocessor ⇒ **Create** ⇒ **Keypoints** ⇒ **In Active CS**

7.2. Ввести в поле **NPT** номер точки **1**, у поле **X, Y, Z** координати **0,0,0**.

7.3. **OK**

7.4. Перейти до циліндричної системи координат із центром у точці **0,0,0**:

U_M: Work Plane (**Change Active CS to** (**Global Cylindrical**

7.5. Введення координат опорних точок:

M_M: Preprocessor ⇒ **Create** ⇒ **Keypoints** ⇒ **In Active CS**. Послідовно ввести в діалоговому вікні номер точки і її координат у поточній циліндричній системі координат. Перша координата – радіус точки, друга – кут. Після кожного введення натисніть **Apply**, після останнього **OK**.

2 25,90; **Apply**

3 25,180; **Apply**

4 25,270; **Apply**

5 25+DS1,90; **Apply**

6 25+DS1,180; **Apply**

7 25+DS1,AL11; **Apply**

8 25+DS1,AL12; **Apply**

9 25+DS1,270. **OK**

7.6. Формування дуг: **M_M:**

Preprocessor ⇒ **Create** ⇒ **Arcs** ⇒ **By End KPs & Rad** Вказати курсором кінцеві точки дуги і натиснути **OK**, потім точку дуги і **OK**, в останньому вікні ввести радіус дуги і **Apply**. Послідовно для кожної дуги вказати:

3,2 (кон. т.) 1 (т. центра) 25 (радіус)

3,4 1 25

6,5 1 25+DS1

6,7 1 25+DS1

7,8 1 25+DS1

8,9 1 25+DS1

OK

7.7. Формування прямих ліній: **M_M:**

Preprocessor ⇒ **Create** ⇒ **Lines** ⇒ **Straight Line**. Послідовно для кожної лінії вказати курсором початкову і кінцеву точки.

2 (нач. т.), 5 (кон. т.)

4, 9 **OK**

8. Побудова геометрії нижньої головки шатуна:

8.1 Перейти до нової циліндричної системи координат з початком у центрі нижньої головки: **U_M: Work Plane** ⇒ **Local Coordinate Systems** ⇒ **Create Local CS.** ⇒ **At Specified Loc.** У вікні **ANSYS Input** ввести координати початку нової системи в глобальній системі **0,-250,0.** OK. У наступному діалоговому вікні ввести в поле **KCN** (номер системи) - **11,** а в поле **KCS** (тип системи) вибрати **Cylindrical.** OK.

8.2. Встановити нову поточну систему координат: **U_M: Work Plane** ⇒ **Change Active CS to** ⇒ **Specified Coord Sys.** У поле **KCN** вводимо **11.** OK.

8.3. Введення координат опорних точок: **M_M: Preprocessor** ⇒ **Create** ⇒ **Keypoints** ⇒ **In Active CS.** Послідовно ввести в діалоговому вікні номер точки і її координат у поточній циліндричній системі координат.

Перша координата – радіус точки, друга – кут. Після кожного введення натисніть **Apply,** після останнього **OK.**

10	0, 0;	Apply
11	45,90;	Apply
12	45,180;	Apply
13	45,270;	Apply
14	45+DS2,90;	Apply
15	45+DS2,AL21;	Apply
16	45+DS2,AL22;	Apply
17	45+DS2,180;	Apply
18	45+DS2,270	OK

8.4 Формування дуг: **M_M: Preprocessor** ⇒ **Create** ⇒ **Arcs** ⇒ **By End KPs & Rad**

Вказати курсором кінцеві точки дуги і натиснути **OK,** потім точку центра дуги і **OK,** в останньому вікні ввести радіус дуги і **Apply.** Послідовно для кожної дуги вказати:

11,12	10(т.ц.)	45 (радіус)	Apply
12,13	10	45	Apply
14,15	10	45+DS2	Apply
15,16	10	45+DS2	Apply
16,17	10	45+DS2	Apply
17,18	10	45+DS2	OK

8.5 Формування прямих ліній: **M_M: Preprocessor** ⇒ **Create** ⇒ **Lines** ⇒ **Straight Line.** Послідовно для кожної лінії вказати курсором початкову і кінцеву точки.

11	(п.т.),	14 (к.т.)
13,		18
		OK

9. Побудова ребра:

M_M: Preprocessor ⇒ **Create** ⇒ **Lines** ⇒ **Straight Line.** Послідовно для кожної лінії вказати курсором початкову і кінцеву точки.

7	(п.т.),	16 (к.т.)
8,		15
9,		14
		OK

10. Формування областей:

M_M: Preprocessor ⇒ **Create** ⇒ **Arbitrary** ⇒ **By Lines.** Послідовно вказати курсором для кожної області утворюючі її лінії.

L1, L2, L8, L6, L5, L4, L3, L7
Apply
L9, L10, L16, L14, L13, L12, L11, L15
Apply
L5, L17, L12, L18
Apply
L11, L18, L6, L19
OK.

11. Визначення параметрів дискретизації.

M_M: Preprocessor ⇒ **Size Cntrls** ⇒ **Picked Lines.** Послідовно вказати на екрані по одній лінії і потім **OK.** У наступному діалоговому вікні задати параметри **NDIV** (кількість розподілів) і **SPACE** (згущення). Знак мінус для **SPACE** вказує на згущення до кінця лінії, плюс – до початку.

L5	NDIV = 3	SPACE = 1	Apply
L6	NDIV = 3	SPACE = 1	Apply
L15	NDIV = 4	SPACE = 1	Apply
L8	NDIV = 4	SPACE = 1	Apply
L18	NDIV = 12	SPACE = 1	Apply
L4	NDIV = 8,	SPACE = -2	Apply
L3	NDIV = 8,	SPACE = 2	Apply
L13	NDIV = 12,	SPACE = 2	Apply
L14	NDIV = 12,	SPACE = 2	Apply

L9 **NDIV** = 18, **SPACE** = 2 **Apply**

L10 **NDIV** = 12, **SPACE** = 2 **OK**

12. Дискретизація моделі.

12.1 Для генерації регулярної скінченно - елементної сітки дискретизації підлягають області, що, повинні включати не більше 4 ліній. Оскільки (див. п. 10) перша і друга область включає більше 4 ліній необхідно провести їхнє злиття (конкатенацію).

M_M: Preprocessor ⇒ **Concatenate** ⇒ **Lines**. Послідовно вказати курсором поєднувані лінії і натиснути клавішу **Apply**, для останньої лінії **OK**.

L3, L4, L5, L6 **Apply**

L1, L2 **Apply**

L11, L12, L13, L14 **Apply**

L9, L10 **OK**.

12.2. Задання параметрів регулярної розбивки. **M_M: Preprocessor** ⇒ **Mesh** **Opt**. У діалоговому вікні включити перемикач **Mapped** і натисніть **OK**. у наступному діалоговому вікні вибрати із списку **2D Shape** рядок **Quad** (чотирикутний елемент) і натиснути **OK**.

12.3. Задання набору констант для першої області.

M_M: Preprocessor (**Create** (**Elements** (**Elem Atributes**

У діалоговому вікні зі списку **REAL** вибрати 1 і натиснути **OK**.

12.4. Дискретизація першої області.

M_M: Preprocessor ⇒ **Mesh** ⇒ **Mapped** ⇒ **3 or 4 sided**. Відмити курсором першу область і натиснути **OK**.

12.5. Задання набору констант для другої області. Аналогічно п.12.3 із вказівкою параметра **REAL** = 2.

12.6. Дискретизація другої області. Аналогічно п. 12.4 з вказівкою другої області.

12.7. Задання набору констант для третьої області. Аналогічно п.12.3 із вказівкою параметра **REAL** = 3.

12.8. Дискретизація третьої області.

Аналогічно п.12.4 з вказівкою третьої області.

12.9. Задання набору констант для четвертої області. Аналогічно п.12.3 із вказівкою параметра **REAL** = 4.

12.10. Дискретизація четвертої області. Аналогічно п.12.4 з вказівкою четвертої області.

13. Задання умов відсутності переміщень для вузлів.

13.1 Вибір ліній для закріплення вузлів у напрямку осі X. **U_M: Select** ⇒ **Entities** У верхньому списку діалогового вікна вибрати тип примітива **Lines**, у нижньому списку вкажіть спосіб вибору **By Num/Pick** і натиснути **OK**. Укажіть курсором L7, L8, L15, L16, L19 і натисніть **OK**.

13.2 Прив'язка вузлів до обраних ліній. **U_M: Select** ⇒ **Entities**. У верхньому списку діалогового вікна вибрати тип примітива **Nodes**, у нижньому – **Attached to** і включити перемикач **Lines, all**. Натисніть **OK**.

13.3. Задання напрямку закріплення для обраних вузлів. **M_M: Preprocessor** ⇒ **Loads** ⇒ **Apply** ⇒ **Displacement** ⇒ **On Nodes**. Натиснути **Pick All**, у наступному вікні вибрати напрямку закріплення **UX** і натиснути **OK**

13.4. Повернення в набір всіх ліній моделі. **U_M: Select** ⇒ **Entities**. У верхньому списку вибрати тип примітива **Lines**, у нижньому спосіб вибору **By Num/Pick**, кнопка **Full** повинна бути включена і потім **OK**. У наступному вікні натиснути **Pick All**.

13.5. Повернення в набір всіх вузлів моделі. **U_M: Select** ⇒ **Entities**. У верхньому списку вибрати тип примітива **Nodes**, у нижньому спосіб вибору **By Num/Pick**, кнопка **Full** повинна бути включена і потім **OK**. У наступному вікні натисніть **Pick All**.

13.6. Закріплення одного з вузлів у напрямку осі Y. **M_M: Preprocessor** ⇒ **Loads** ⇒ **Apply** ⇒ **Displacement** ⇒ **On Nodes**. Вибрати курсором один з вузлів

на стрижні шатуна і потім **OK**. У наступному вікні задати напрямок закріплення вузлів **UY** і натисніть **OK**.

14. Додаток тиску до нижньої головки.

14.1 Вибір вузлів, лежачих на дузі радіуса 45 мм у межах зміни кута від 90 град до 150 град. **U_M: Select** ⇒ **Entities**. У верхньому списку вибрати тип примітива **Nodes**, у нижньому спосіб вибору **By Location**. Включити кнопку **From Full X**. В поле введення **MIN, MAX** ввести радіус розміщення вузлів 45 і натиснути **Apply**. Включити кнопку **Reselect** і **Y**. У поле **MIN, MAX** уведіть 90, 150 і натиснути **OK**.

14.2. Задання величини тиску.

M_M: Preprocessor ⇒ **Loads** ⇒ **Apply** ⇒ **Pressure** ⇒ **On Nodes**. Натисніть **Pick All** і в наступному вікні ввести в поле **Value** 4.95 і натиснути **OK**.

14.3. Повернення в набір всіх вузлів моделі. **U_M: Select** ⇒ **Entities**. У верхньому списку вибрати тип примітива **Nodes**, у нижньому **By Num/Pick**, кнопка **Full** повинна бути включена, і натиснути **OK**. У наступному вікні натиснути **Pick All**.

15. Задання тиску до верхньої головки

15.1. Активізація глобальної циліндричної системи координат. (початок координат у центрі верхньої головки). **U_M: Work Plane (Change Active CS to (Global Cylindrical**

15.2 Вибір вузлів, лежачих на дузі радіуса 25 у межах зміни кута від 210 градусів до 270 градусів. **U_M: Select** ⇒ **Entities**. У верхньому списку вибрати тип примітива **Nodes**, у нижньому спосіб вибору **By Location**. Включити кнопку **From Full X**. У поле введення **MIN, MAX** ввести радіус розміщення вузлів 25 і натиснути **Apply**. Включити кнопку **Reselect** і **Y**. У поле **MIN, MAX** ввести 210, 270 і натиснути **OK**.

15.3. Задання величин тиску. **M_M: Preprocessor** ⇒ **Loads** ⇒ **Apply** ⇒ **Pressure** ⇒ **On Nodes**. Натиснути **Pick**

All і в наступному вікні ввести в поле **Value** 8.90 і натиснути **OK**.

15.4. Повернення в набір всіх вузлів моделі. **U_M: Select** ⇒ **Entities**. У верхньому списку вибрати тип примітива **Nodes**, кнопка **Full** повинна бути включена і потім **OK**. У наступному вікні натиснути **Pick All**.

Розрахунок (processing).

16. Розрахунок моделі із заданими граничними умовами.
M_M: Solution (Current LS

Аналіз результатів (postprocessing)

17. Визначення сумарного обсягу об'єму моделі.

17.1. Формування таблиці обсягів об'єму елементів. **M_M: General Postproc** ⇒ **Element Table** ⇒ **Define Table**. Натиснути **Add**. У наступному діалоговому вікні верхнього поля ввести ім'я таблиці **VOLU**, нижче з лівого списку вибрати рядок **Geometry**, із правого – **Elem volume VOLU** і натиснути **OK**. Закрити попереднє вікно натисканням на **Close**.

17.2 Підсумування обсягів об'єму. **M_M: General Postproc** ⇒ **Element Table** ⇒ **Sum of Each Item**. Натиснути **OK**.

17.3 Присвоєння змінної сумарного обсягу. **U_M: Parameters** ⇒ **Get Scalar Data**. У лівому списку діалогового вікна вибрати рядок **Results data**, у правому – **Elem table sums** і натиснути **OK**. У наступному діалоговому вікні ввести ім'я параметра сумарного обсягу **TVOL** і **OK**.

18. Визначення максимального еквівалентного напруження.

18.1. Формування таблиці еквівалентних напружень за Мізесом. **M_M: General Postproc** ⇒ **Element**

Table ⇒ **Define Table**. Натиснути **Add**. У наступному діалоговому вікні у верхньому полі ввести ім'я таблиці **S_EQV**, нижче з лівого списку вибрати рядок **Stress**, із правого – **von Mises SEQV** і натиснути **OK**. Закрити попереднє вікно натисканням на **Close**.

18.2. Сортуння величин напружень. **M_M: General Postproc** ⇒ **List Results** ⇒ **Sort Elems**. Ввести ім'я таблиці для сортування **S_EQV** і натиснути **OK**.

18.3. Присвоєння змінної **S_EQVMAX** максимального значення еквівалентних напружень. **U_M: Parameters** ⇒ **Get Scalar Data**. У лівому списку діалогового вікна вибрати рядок **Results data**, у правому – **Other operations** і натиснути **OK**. У наступному діалоговому вікні ввести ім'я параметра максимальної еквівалентного напруження **S_EQVMAX**, у лівому списку вибрати рядок **From sort oper**, у правому – **Maximum value** і **OK**.

Оптимізація моделі

19. Задання геометричних параметрів.

M_M: Design Opt ⇒ **Design Variables**. У діалоговому вікні натиснути клавішу **Add**. У наступному вікні послідовно вибрати із списку **Name** імена змінних, у поле **MIN** ввести ліву границю діапазону змінної, у поле **MAX** – праву границю. Після кожного введення натиснути **Apply**. Нижче в дужках зазначені параметри для яких вводиться ліва і права границя діапазону.

8	20	Apply (DS1)
8	20	Apply (DS2)
15	30	Apply (T3)
5	30	Apply (T4)
225	250	Apply (AL11)
2	20	Apply (DAL1)
100	120	Apply (AL21)
2	20	OK (DAL2)

Закрити попереднє вікно натисканням **Close**.

20. **Задання змінної стану. M_M: Design Opt** ⇒ **State Variables**. У діалоговому вікні натиснути клавішу **Add**. У наступному вікні вибрати параметр **S_EQVMAX** і ввести у **MAX** його максимальне значення. Натиснути **OK**. Закрити попереднє вікно натисканням **Close**.

21. Задання цільової функції.

M_M: Design Opt ⇒ **Objective**. Вибрати параметр **TVOL**. Натиснути **OK**.

22. Задання методу оптимізації.

M_M: Design Opt ⇒ **Method/Tool**. Включити кнопку **First -Order** і натиснути **OK**. (**First-Order** ставиться до методів оптимізації першого порядку). У наступному вікні в поле **NITR** ввести число ітерацій 10, інші параметри за замовчуванням. і натиснути **OK**.

23. Призначення робочого файлу.

M_M: Design Opt ⇒ **Assign**. Проведення оптимізації в інтерактивному режимі вимагає робочого файлу. Таким може бути протокол сеансу роботи (файл із розширенням **log**). Можливо буде потрібно його виправлення. При виправленні видаляються зайві команди (наприклад, команди перегляду, видачі допоміжного друку і т.д.). Вибрати із списку файл із розширенням **log** і натиснути **OK**.

24. Запуск процесу оптимізації.

M_M: Design Opt (**Run**).

25. Перегляд отриманих результатів.

U_M: Parameters ⇒ **Scalar Parameters**. Ansys виводить інформаційне вікно з номером найкращого набору параметрів. В описаному прикладі збіжність була досягнута на 6 ітерації. При цьому еквівалентні напруження знизилися від максимального значення **475,51 x 10E06 Н/кв. м** до

278,36 x 10E06 Н/кв. м, обсяг збільшився до 134202 x 10E-09 куб. м. Інші параметри прийняли наступні значення (DS1=9.4, DS2=11.9, T3=29.6,

T4=5.0, AL11=234.7, DAL1=9.8, AL21=108.3, DAL2=11.4).

3.5. Приклад моделювання теплового стану твердіння злитку металу : фазовим переходом

Мета розрахунку – демонстрація твердотільного геометричного моделювання, розв'язок нелінійної задачі теплопровідності для заданих умов конвекційного теплообміну та фазового переходу середовища, автоматичний вибір кроку за часом для інтегрування рівнянь теплового балансу, нестационарна постпроцесорна обробка результатів розрахунку.

Постановка задачі. Довгий злиток, поперечний переріз якого показано на рис.9, після виливки рідкого металу в піщану форму застигає разом з нею на повітрі. Виконується розв'язок задачі нестационарної теплопровідності із умовами 3 роду на границі пісок-повітря та фазового переходу середовища. Процес охолодження відслідковується протягом 3 годин.

Початкові температурні умови: Сталь $T=1580^{\circ}\text{C}$; пісок $T=27^{\circ}\text{C}$. Умови теплообміну: коефіцієнт тепловіддачі на границі пісок - повітря - 0.014; температура навколишнього середовища – 27°C .

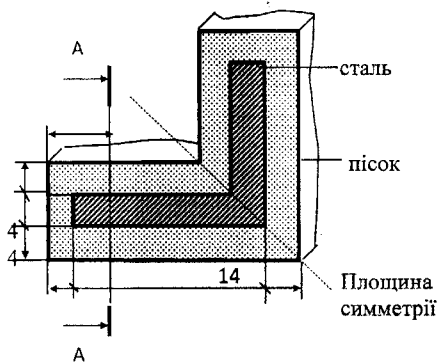


Рис.9.Розрахункова схема нелінійної задачі теплопровідності для плоского перетину злитка металу в піщаній формі

Гіпотези: Внаслідок великої довжини злитка в одному напрямку розв'язок задачі проводиться для плоского перетину. У силу симетрії поперечного перерізу (рис.9) розглядається тільки половина області. Властивості піску – постійні (не змінюються від температури злитка), теплопровідність і ентальпія матеріалу злитка (сталь) залежні від температури і задаються у вигляді таблиці. Зміна ентальпії відображає поглинання тепла під час затвердіння матеріалу.

Таблиця 2.1. Нелінійні теплофізичні характеристики сталі

T, °C	0	1451	1510	1580
KXX	1.44	1.54	1.22	1.22
ENTH	0	128.1	163.1	174.2

Покроковий опис чисельної процедури розв'язку даної задачі в середовищі ANSYS наведено нижче:

Підготовка моделі (Preprocessing).

1. Заголовок (не плутати з ім'ям завдання) U_M: File (Change title

1.1. Casting

1.2. OK

2. Фільтри

M_M: Preferences

2.1. Thermal (обраний термічний аналіз; у головному меню будуть доступні тільки пункти, що ставляться до даного типу розрахунку)

2.2. OK

3. Вибір типу елемента

M_M: Preprocessor(Element Type (Add/Edit/ Delete

3.1 Add

3.2. Solid - в Library of...

3.3. 8 node 77

3.4. OK

3.5. Close - обрано плоский восьмиузловий чотирибічний елемент.

4. Властивості матеріалів

для піску:

M_M: Prop (Mater props (- Constant - Isotropic

4.1. OK - (матеріал №1)

4.2. Введення 0.054 в Dens

4.3. Введення 0.025 в KXX

4.4. Введення 0.28 в CP

4.5. OK

Встановлення табличної залежності властивостей від температури для сталі:

Таблиця температур:

M_M: Prop (Material props(- Temp dependent - Temp table

4.6. Введення 0 у T1

4.7. Введення 1451 у T2

4.8. Введення 1510 у T3

4.9. Введення 1580 у T4

4.10. OK

Таблиці значень параметрів.

Теплопровідність:

M_M: Prop (Material props (- Temp dependent - Prop table

4.11. Вибрати Th conductivity в Lab -

4.12. Вибрати KXX

4.13. Ввести в Mat (номер матеріалу) 2

4.14. Введення 1.44 в 31

4.15. Введення 1.54 в 32

4.16. Введення 1.22 в 33

4.17. Введення 1.22 в 34

4.18. Apply

Ентальпія:

4.19. Вибрати Enthalpy в Lab

4.20. Ввести в **Mat** (номер матеріалу) 2
4.21. Введення 0 в 31
4.22. Введення 128.1 в 32
4.23. Введення 163.8 в 33
4.24. Введення 174.2 в 34
4.25. **OK**
5. **Відображення властивостей матеріалів у вигляді графіка.**
M_M: Prep (Material props (- Temp dependent - Graph
Теплопровідність:
5.1. Вибрати **Th conductivity** в **Lab**
5.2. Вибрати **KXX** у правому вікні
5.3. Ввести в **Mat** (номер матеріалу) 2
5.4. **OK** (оглядаємо графік)
далі - назад в **Graph**
Ентальпія:
5.5. Вибрати **Enthalpy** в **Lab**
5.6. Ввести в **Mat** (номер матеріалу) 2
5.7. **OK**
T_B: Save_db
6. **Початок створення досліджуваної області методом «знизу-нагору».**
Генерація базових точок (keypoints) у кутах області:
M_M: Prep (- Modeling - Create (Keypoints (In active CS
6.1. Ввести в **NPT** (номер точки) 1
6.2. Ввести відповідно X, Y, Z
(координати точки) 0, 0, 0
6.3. **Apply**
6.4. Ввести в **NPT** (номер крапки) 2
6.5. Ввести відповідно X, Y, Z
(координати точки) 22, 0, 0
6.6. **Apply**
6.7. Ввести в **NPT** (номер точки) 3
6.8. Ввести відповідно X, Y, Z
(координати точки) 10, 12, 0
6.9. **Apply**
6.10. Ввести в **NPT** (номер точки) 4
6.11. Ввести відповідно X, Y, Z
(координати точки) 0, 12, 0
6.12. **OK**
Перегляд заданих точок з відображенням номерів
U_M: Plot controls (Numbering
6.13. Нажати **KP** (включити нумерацію точок)
6.14. Нажати **Area** (включити нумерацію областей)
6.15. **OK**

Переміщення символу початку координат у лівий верхній кут графічного вікна:
U_M: Plot ctrls (Window controls (Window options
6.16. Вибрати [/Triad] (унизу) - **At for left**
6.17. **OK**
7. **Створення частини області по базовим точкам:**
M_M: Prep (Modeling (Create (- Areas - Arbitrary (Through KPs
7.1. Відзначити покажчиком миші **KT** із першої по четверту.
7.2. **OK**
T_B: Save_db
Область для сталі:
M_M: Prep (- Modeling - Create (- Areas - Rectangle (By dimensions
7.3. Ввести $X1=4, X2=22$
7.4. Ввести $Y1=4, Y2=8$
7.5. **OK**
«Перекриття» областей (overlap). Дана операція розділяє пересічні частини існуючих областей.
M_M: Prep (- Modeling - Operate (- Booleans - overlap (Areas
7.6. Вибрати **All** (всі області)
Видалення «апендикса».
M_M: Prep (- Modeling - Delete (Areas&Below
7.7. Відзначити площа **A3**
7.8. **OK**
8. **Розбивка конструкції на елементи:**
Вибір середнього розміру сторони скінченного елемента (KE):
M_M: Prep (Meshing - Shape & Size (- Manual size - Global - Size
8.1. Ввести 1.5 в **Size**
8.2. **OK**
Дискретизація на елементи області, яка зайнята піском:
M_M: Prep (Meshing - Mesh (-Areas - free
8.2. Відзначити **A5**
8.3. **OK**
Вибір інших властивостей матеріалу (сталь) для наступної дискретизації на KE:
M_M: Prep (Meshing - Attributes (Default attributes

15.1. **Node numbers** → On (включити нумерацію вузлів на екрані)
15.2. **[NUM]** → **Colors & Numbers**
15.3. **OK**
U_M: Plot (Elements
Виділимо вузол, що приблизно відповідає центру площини симетрії (див. рис.9). Координати центра (16,16,0)
U_M: Parameters (Scalar parameters
15.4. В Selection набираємо *cnt_pt=node* (16,16,0)
15.5. **Accept**
15.6. **Close**

M_M: Time/History Postproc (Define variables
15.7. **Add**
15.8. **OK** (додаємо нову змінну)
15.9. Вводимо *cnt_pt* → *node*
15.10. **Center** → **Name**
15.11. **OK**
15.12. **Close**
16. Побудова діаграми температура - час для обраної точки моделі
M_M: Time history Postprocessor (Plot
16.1. 2 → **NVAR1**
16.2. **OK**

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1. Охарактеризуйте геометричні характеристики та схеми навантаження моделі конструкції для розрахункових схем плоского напруженого стану.*
- 2. Охарактеризуйте мету застосування методу підконструкцій в розрахунках пружно-деформованого стану конструкцій методом скінченних елементів.*
- 3. В чому суть R-оптимізації моделі для скінченно-елементних розрахунків пружно-деформованого стану конструкцій?*
- 4. Охарактеризуйте змінні стану в задачах оптимізації конструкції шатуна.*
- 5. Які параметри чисельного розв'язку контролюються в чисельних розв'язках початково-крайових задач теплопереносу з фазовими перетвореннями матеріалів?*

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Алямовский А.А. Solid Works / Cosmos Works. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК, 2004 – 432с.
2. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ ред. Д.Г.Красковского. – М.: Компьютер Прес, 2002. – 224с.
3. Басов К.А. Совместная работа в системах CAD и ANSYS / Под общ ред. Д.Г.Красковского. – М.: Компьютер Прес, 2002 – 350с.
4. Басов К.А. ANSYS Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640с.

5. Введение в конструкционный анализ. Методические указания по курсу "Компьютерная диагностика" / О.М.Огородникова. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 47с.
6. Гулятьев А. Имитационное моделирование в среде Windows.–С-Пб: КОРОНАПринт, 1999.–288с.
7. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.:Мир, 1986.– 318с.
8. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. // Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.– М.: УРСС, 2004.– 272с.
9. Кудрявцев Е.М. Mechanical Desktop Power Pack: Основы работы в системе – М.: ДМК Пресс, 2001. – 416с.
10. Метод конечных элементов в механике твердых тел // Под общ. ред. А.С.Сахарова и И.Альтенбаха.– К.: Вища школа, Головное узд-во, 1982.– 480с.
11. Норенков И.П. Разработка систем автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1994. – 207с.
12. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / В.И.Мяченков, В.П.Мальцев, В.П.Майборода и др. Под общ ред. В.И.Мяченкова – М.: Машиностроение, 1989. – 520с.
13. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник.– К.: НТУУ "КПІ".– 2007.– 379с.
14. Руководство по оформлению текстовых документов в соответствии с ГОСТ 2.105-79.
15. «САПР и графика» 3'2004
16. Самарский В.П. Математическое моделирование – интеллектуальное ядро математики. – М.: Наука.–1988.–244с.
17. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Підручник. – Житомир: ЖІТІ, 2001.– 612с.

18. Автоматизированное проектирование сельскохозяйственной техники в среде AUTODESK INVENTOR. // Тимчук С.А., Науменко А.А., Тихонов А.В., Мартыненко А.Д. – Харьков.–ХНТУ сельского хозяйства, 2005, – 368с.

19.Федоренков А.П., Басов К.А. AutoCAD 2000. Практический курс – М.: ДЕССКОМ, 2000, – 432с.

20.Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.visualNastran for Windows.– М.: ДМК Пресс, 2005.–704с.

21.Автоматизированная программная система обслуживания конечно-элементных расчетов. // Цыбенко А.С., Ващенко Н.Г., Кришук Н.Г., Лавендел Ю.О. – Киев: Выща школа.–1986.–340с.

22.Пакет прикладных программ “Термоупругопластичность” для моделирования нестационарного теплового и неизотермического термоупругопластического напряженно-деформированного состояния плоских и осесимметричных тел. // Цыбенко А.С., Кришук Н.Г., Вачев А., Тодоров В. –Габрово, НРБ: ВМЭИ.–1985.–350с.

23.ANSYS User’s Manual for revision 5.6-11.0. Volume I. Procedure.

24.ANSYS User’s Manual for revision 5.6-11.0. Volume II. Command.

25.ANSYS User’s Manual for revision 5.6-11.0. Volume III. Elements.

26.ANSYS User’s Manual for revision 5.6-11.0. Volume VI. Theory.

27. Solid Works 2007/2008. “Компьютерное моделирование в инженерной практике” // Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. – БХВ-Петербург. 2007

28.<http://www.cals.ru>

29.Лінки на сайти університетів та організацій, які мають учбові приклади, поради та інші корисні матеріали по CAD/CAM/CAE системам:

<http://www.arcada.com.ua>

<http://www.cad.dp.ua>

<http://www.cad.ru>
<http://www.knigka.org.ua/category/ansys/>
<http://www.zapbp.com.ua/megacad/>
<http://www.mashportal.ru>
[http://www.knigka.org.ua/\(2007/01/20/\(zhurnal_ansys_solutions_1...6\)\)](http://www.knigka.org.ua/(2007/01/20/(zhurnal_ansys_solutions_1...6)))
<http://www.arcada.com.ua>
<http://itua.info/news/business/1441.html>
<http://www.nenastran.ru>
<http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/files.html>
<http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/tutorial.html>
<http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/ansconf.html>
http://www.coe.uncc.edu/project_mosaic/mosaic_help/cad/ansys/ansys.html
<http://www.itl.nist.gov/div895/sasg/tutorial/>
<http://www.itl.nist.gov/div895/sasg/tutorial/ansys/bldmodel/index.html>
http://www.me.cmu.edu/tutorials/ansys_54/
<http://hcg11.eng.ohio-state.edu/labinfo/sgi/ansys.html>
<http://macro.stanford.edu/~roche/matiere>
http://mae.uta.edu/~lawrence/ansys/ansys_examples.htm
<http://dmtwww.epfl.ch/ims/micsys/ANSYS/examples/index.html>
<http://www.infotech.tu-chemnitz.de/~messtech/ansys/ansys.html>
http://www.eos.ncsu.edu/software/software_index/ansys.html
http://training.web.cern.ch/Training/ENSTEC/P2000/Mecanique/avansys_e.htm
http://www.isr.umd.edu/~zhang/414_98f/team/p5/tsld001.htm
<http://tsmac.csa.ru/CSA/CADS/docs/ansys/tut1/>
http://mechanika.fsid.cvut.cz/pme/ANSYS/intro/obsah_e.htm
<http://www.me.cmu.edu/tutorials/courses/pedal.html>
<http://homepages.strath.ac.uk/~clas16/~fyfe/ansys/joints/catapult.html>
<http://www.ececs.uc.edu/~dgibson/e121/node12.html>
<http://www.tu-bs.de/rz/software/fem/ansys/ansys.html>
<http://www.tu-bs.de/rz/software/fem/ansys/an55-fem.htm>
<http://www.cae.wisc.edu/~ema405/>
<http://www.engmeth.com/prodserv/customize/heatsinkdemo.gif>
<http://www.engmeth.com/prodserv/customize/hyperdemo.gif>
<http://www.engmeth.com/prodserv/customize/exhaustdemo1.gif>
<http://www.engmeth.com/prodserv/customize/exhaustdemo2.gif>
<http://www.engmeth.com/prodserv>

<http://www.tpolis.com/products/other.htm>
http://www.solver.ru/products/cadprod/engineer_analiz.asp
<http://www.Gartner.com>
<http://www.digital.com/fortran/dvf>

ДОДАТКОВА ЛІТЕРАТУРА

1. // Вісник ЖІТІ, 1998.–№7.–с.219–229. Колодницький М.М., Чайковський С.С. Огляд інтегрованих систем автоматизованого проектування для машинобудування. Частина 1
2. // Вісник ЖІТІ, 1998.–№8.–с. 181–190. Колодницький М.М., Чайковський С.С. Огляд інтегрованих систем автоматизованого проектування для машинобудування. Частина 2
3. Павленко П.М. Методи і системи автоматизації технологічної підготовки промислового виробництва. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.–К.: 2007.–34с.
4. Д.Н.Шипов Начальные шаги работы с MSC.ADAMS/View. Обучающее руководство. – М.: Московское представительство MSC.Software Corporation.–2003.–с.59
5. Рудаков К.М. FEMAP. Геометричне та скінченно-елементне моделювання конструкцій для розрахунків у MSC.Nastran. Посібник.–К.: НТУУ "КПІ".–2005.–210с.
6. Рудаков К.М. FEMAP. Геометричне та скінченно-елементне моделювання конструкцій для розрахунків у MSC.visualNastran for Windows. Посібник – К.: НТУУ "КПІ".–2005.–218с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1.ІНФОРМАЦІЙНІ КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	5
1.1.Сучасні CALS-технології.....	5
1.2.CAD/CAM/CAE/PDM системи.....	10
Контрольні запитання.....	16
2.УНІВЕРСАЛЬНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ.....	17
2.1.Універсальні та спеціалізовані пакети програм скінченно- елементного аналізу системи MSC.....	24
2.1.1.MSC.NASTRAN.....	27
2.1.2. MSC.PATRAN.....	29
2.1.3. MSC.FATIGUE.....	30
2.1.4. MSC.ARIES.....	30
2.1.5. MSC.NASTRAN for Windows.....	33
2.1.6. MSC.DYTRAN.....	33
2.1.7. MSC.ABAQUS.....	34
2.1.8. MSC.MVISION.....	35
2.1.9. MSC.VISUAL NASTRAN.....	36
2.1.10. FEMAP (версії 8.0).....	37
2.1.11.MSC.ADAMS/VIEW.....	38
2.2.Універсальний пакет програм скінченно-елементного аналізу – ANSYS.....	40
2.2.1.Аналітичні можливості ANSYS.....	42
2.2.2.Алгоритми розв'язування матричних рівнянь в ANSYS.....	47
2.2.3.Геометричне моделювання в системі ANSYS.....	47
2.2.4.Сітковий генератор.....	49
2.2.5.Задання навантажень і граничних умов на геометричній моделі.....	51
2.2.6.Явні і неявні методи інтегрування рівнянь динаміки.....	51
2.2.7.Методи параметричної оптимізації конструкцій в ANSYS.....	53
2.2.8.Візуалізація результатів розрахунків в ANSYS.....	56
2.2.8.1.Засоби візуалізації зображень геометричної моделі.....	56
2.2.8.2.Засоби візуалізації результатів розрахунків.....	57
2.2.8.3.Обчислювальні операції над результатами уздовж шляху, що задається довільно, і їхнє графічне подання.....	58
2.2.8.4.Анімація результатів в ANSYS.....	58
2.2.8.5.Зв'язок ANSYS з CAD системами.....	58
2.2.8.6.Зв'язок ANSYS з CAE системами.....	59
Контрольні запитання.....	60

3.ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ У СИСТЕМІ ANSYS.....	61
3.1.Приклад аналізу плоского напруженого стану кутника при статичному навантаженні.....	62
3.2.Приклад застосування методу підконструкцій в розрахунках пружно - деформованного стану консольної балки з особливістю.....	68
3.3.Приклад застосування Р-методу для уточнення розрахунків плоского пружно-деформованного стану пластинки з отвором.....	76
3.4.Приклад оптимізації спрощеної конструкції шатуна за допомогою розрахунків пружно-деформованого стану в ANSYS.....	81
3.5.Приклад моделювання теплового стану твердіння злитку металу з фазовим переходом.....	89
Контрольні запитання.....	93
Рекомендована література.....	93

Навчальне видання

Цибенко Олександр Сергійович
Крищук Микола Георгійович

**Системи автоматизованого
проектування та інженерного
аналізу в машинобудуванні**

Навчальний посібник

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Темплан 2008 р., поз. 1-2-024

Підп. до друку 19.12.2008. Формат 60×84¹/₁₆. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 5,81. Обл.-вид. арк. 9,6. Наклад 100 пр. Зам. № 8-320.

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15
тел./факс (044) 241-68-78