

Є.І. Калінін

**ОСНОВИ РОБОТИ
В СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОМУ
ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ
ANSYS**

**Конспект лекцій
Частина 2**

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Є.І. Калінін

**ОСНОВИ РОБОТИ В СКІНЧЕННО-
ЕЛЕМЕНТНОМУ ПРОГРАМНОМУ
КОМПЛЕКСІ ANSYS**

Конспект лекцій
Частина 2

Харків ХНАДУ 2013

УДК 004.4
ББК 32.973.26-018.2
К74

К74 Калінін Є.І.

Основи роботи в скінченно-елементному програмному комплексі ANSYS. Конспект лекцій. Частина 2 – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2013. – 135 с.

В конспекті лекцій наведені загальні принципи роботи в програмному комплексі ANSYS, враховуючи теоретичні засади скінченно-елементного методу розрахунку об'єктів.

Конспект лекцій для самостійної роботи студентів механічного факультету очної та заочної форм навчання.

Іл. 78.

УДК 004.4
ББК 32.973.26-018.2

© Калінін Є.І., 2013 р.

© Харківський національний
автомобільно-дорожній
університет, 2013 р.

П Е Р Е Д М О В А

Даний конспект лекцій призначений для самостійної роботи студентів механічного факультету очної та заочної форм навчання.

Він може бути корисним і для фахівців, які займаються проектуванням та експлуатацією елементів машин та механізмів.

В даному конспекті лекцій наведені загальні принципи роботи в програмному комплексі ANSYS, враховуючи теоретичні засади скінченно-елементного методу розрахунку об'єктів.

Передбачається, що для закріплення матеріалу, який наведений в даному конспекті лекцій, студент самостійно буде відтворювати зазначені в ньому етапи та самостійно вирішить певну кількість практичних завдань.

ЛЕКЦІЯ 1

МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

- 1.1. Загальна інформація.*
- 1.2. Основні поняття МСЕ.*
- 1.3. Інтерполяції шуканої функції за допомогою функції форми.*
- 1.4. Рівняння жорсткості скінченних елементів.*
- 1.5. Розв'язуючі рівняння МСЕ. граничні та початкові умови.*
- 1.6. Розв'язання рівнянь МСЕ.*
- 1.7. Аналіз результатів розв'язання.*
- 1.8. Реалізація МСЕ в пакеті ANSYS.*

1.1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ

Метод скінченних елементів (МСЕ) дозволяє наближено чисельно вирішувати широкий спектр фізичних проблем, які математично формулюються у вигляді системи диференціальних рівнянь або в варіаційній постановці. Цей метод можна використовувати для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, для термічного аналізу, для вирішення гідрогазодинамічних завдань і задач електродинаміки. Можуть вирішуватися і комплекси означених вище завдань.

Історичними попередниками МСЕ були різні методи будівельної механіки та механіки деформованого твердого тіла, що використовують дискретизацію, зокрема, метод сил і метод переміщень. Основні ідеї та процедури МСЕ вперше були використані Курантом в 1943 р, але тільки з 50-х років почалося активне практичне застосування МСЕ, спочатку в галузі авіації та космонавтики, а потім і в інших напрямках. Термін «скінченні елементи» (СЕ) ввів в 1960 році Клаф. Розвитку цього методу сприяло вдосконалення цифрових електронних обчислювальних машин.

Область застосування МСЕ значно розширилася, коли для його обґрунтування стали застосовуватися методи зважених нев'язок – Гальоркіна і найменших квадратів. МСЕ перетворився на універсальний спосіб вирішення диференціальних рівнянь.

1.2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ МСЕ

Вихідним об'єктом для застосування МСЕ є матеріальне тіло (у загальному випадку – область, займана суцільний середовищем або полем), яке розбивається на частини – скінченні елементи (СЕ) (рис. 1.1).

В результаті розбивки створюється сітка з границь елементів. Точки перетину цих границь утворюють вузли. На границях і всередині елементів можуть бути створені додаткові вузлові точки. Ансамбль з усіх скінченних елементів і вузлів є основною скінченно-елементною моделлю тіла, що деформується. Необхідно відмітити, що дискретна модель повинна максимально повно покривати область досліджуваного об'єкта.

Вибір типу, форми і розміру скінченного елемента залежить від форми тіла і виду напружено-деформованого стану.

Стрижньовий СЕ застосовується для моделювання одновісного напруженого стану при розтягуванні (стиску), а також в задачах про кручення або вигини.

Плоский двовимірний СЕ у вигляді, наприклад, трикутної або чотирикутної пластини використовується для моделювання плоского напруженого або плоского деформованого стану.

Об'ємний тривимірний КЕ у вигляді, наприклад, тетраедра, шестикутника або призми служить для аналізу об'ємного напруженого стану.

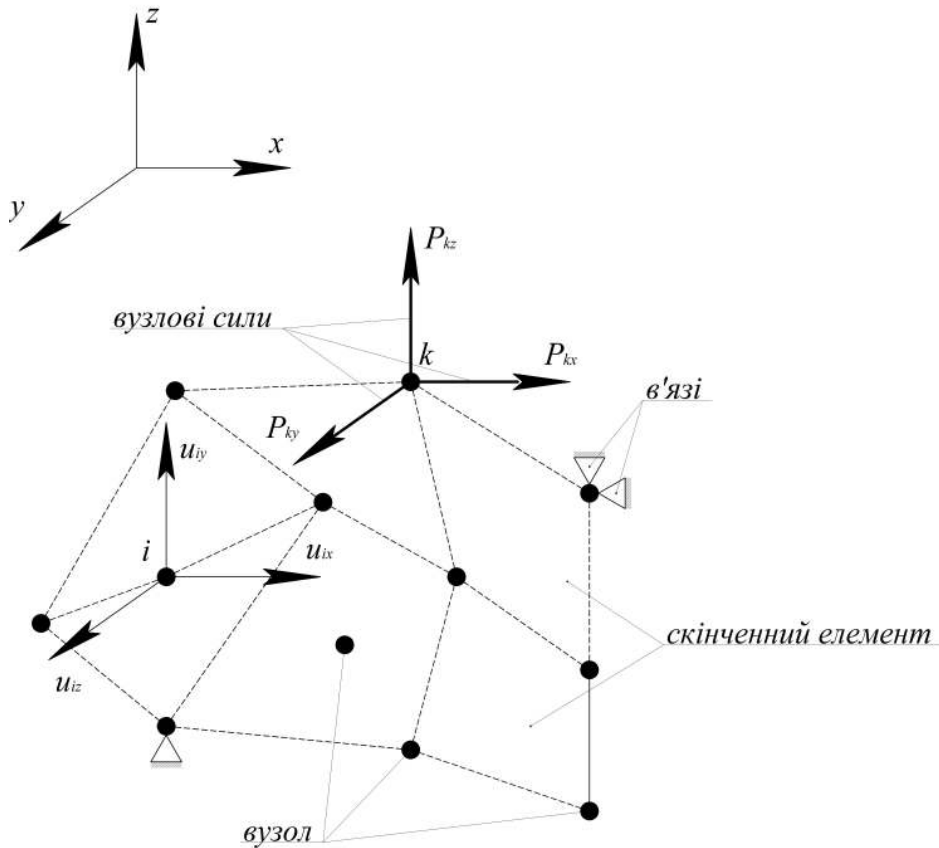


Рис. 1.1. Сітка скінченних елементів та її основні компоненти

СЕ у формі кільця застосовується у разі вісесиметричного напруженого стану.

Для розрахунку вигину пластини береться відповідний плоский СЕ, а для розрахунку оболонки використовується оболончатий СЕ або також плоский елемент, що згинається.

У тих зонах тіла, що деформується, де очікуються великі градієнти напружень, потрібно застосовувати більш дрібні СЕ або елементи більшого порядку.

Скінченні елементи наділяються різними властивостями, які задаються за допомогою констант і опцій. Наприклад, для стрижневого фермового СЕ вказується площа поперечного перерізу, а якщо моделюється трос, що працює тільки на розтяг, то призначається відповідна опція. Для плоских СЕ, що не піддаються згинанню, може вказуватися товщина і задаватися вид напруженого

стану: плоский напружений, плоский деформований або вісесиметричний. Для плоских СЕ, що піддаються згинанню, та оболонкових СЕ повинна задаватися товщина.

Всі елементи і вузли нумеруються. Нумерація вузлів буває загальною (глобальною) для всієї скінченно-елементної моделі та місцевою (локальною) всередині елементів. Нумерацію елементів і загальну нумерацію вузлів бажано проводити так, щоб трудомісткість обчислень була найменшою. Існують алгоритми оптимізації цієї нумерації. Повинні бути визначені масиви в'язів між номерами елементів і загальними номерами вузлів, а також між місцевими і загальними номерами вузлів.

Для розрахунку полів різних фізичних величин за допомогою МСЕ в розглянутій області необхідно визначити матеріали елементів і задати їх властивості. В задачах деформування, перш за все, потрібно вказати пружні властивості – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона. Якщо передбачається пластична текучість матеріалу, то необхідно задати істинні діаграми деформування, які апроксимуються білінійними або мультилінійними кривими. Коли тіло має нерівномірну температуру, зазначені вище механічні властивості потрібно задати для ряду температур і, крім того, потрібно ввести коефіцієнт теплового розширення. Для динамічних задач необхідно визначити густину матеріалу і, можливо, коефіцієнт в'язкого демпфування.

В стаціонарних завданнях теплопровідності для обраного матеріалу тіла повинен бути заданий коефіцієнт теплопровідності. При нестационарній теплопровідності потрібно додатково знати густину матеріалу і його теплоємність. Якщо розглядається нелінійна задача теплопровідності, то зазначені фізичні властивості потрібно визначати як функції температури.

Стан тіла характеризується кінцевим числом незалежних параметрів, визначених у вузлах скінченно-елементної сітки. Такі параметри називаються ступенями свободи. У розглянутих нижче деформаційних завданнях в якості ступенів свободи застосовуються переміщення вузлів, серед компонентів яких можуть бути і кутові переміщення. У завданнях теплопровідності ступенями свободи є температури вузлів.

Координати вузлів, переміщення вузлів і довільних точок елементів, сили та інші об'єкти можуть визначатися в різних системах відліку (системах координат). В алгоритмі МСЕ використовуються загальна (глобальна) система координат, що прив'язана до всієї скінченно-елементної моделі (див. рис. 1.1), і місцева (локальна) система координат, що пов'язана з конкретними скінченними елементами, в силу чого їх називають елементними системами відліку. Перехід від однієї системи відліку до іншої проводиться за допомогою матриць перетворення.

В деформаційній задачі число ступенів свободи одного вузла залежить від типу задачі і від системи відліку. На рис. 1.1 показаний вузол i , що має в загальній системі координат x , y , z три ступені свободи, що складають вузловий вектор ступенів свободи (переміщень). В загальній системі координат цей вектор може бути записаний у вигляді:

$$U_i = \{U_i\} = \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ u_{iz} \end{Bmatrix}. \quad (1.1)$$

Якщо вузол i має n_i ступенів свободи, а скінченний елемент включає n_e вузлів, то число ступенів свободи одного елемента дорівнює $n_e \times n_i$. Число ступенів свободи всієї моделі, що має n однотипних вузлів буде дорівнювати $N = n \times n_i$. Набір всіх ступенів свободи моделі складає загальний (глобальний) вектор ступенів свободи (тобто вузлових переміщень моделі), в якому нумерація ступенів свободи може бути загальною (глобальною) або за номерами вузлів з додаванням індексу вузлового ступеня свободи:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_q \\ \vdots \\ u_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix}, \quad (1.2)$$

де $\{U_i\}$ – підматриця, що складена з усіх n_i , компонентів переміщення вузла i . Зокрема, для тривимірної задачі при використанні загальної декартової системи координат x, y, z ця підматриця є вектором переміщень вузла (1).

Перехід від вузлової нумерації до загальної очевидний. Наприклад, для розглянутого вище випадку трьох ступенів свободи у вузлі формули перетворення мають наступний вигляд: $u_{ix} = u_{3i-2}$, $u_{iy} = u_{3i-1}$, $u_{iz} = u_{3i}$.

Для теплової задачі один вузол з глобальним номером i має одну ступінь свободи – температуру T_i . Загальний (глобальний) вектор ступенів свободи в цьому випадку має вигляд:

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}. \quad (1.3)$$

1.3. ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ШУКАНОЇ ФУНКЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ФУНКЦІЇ ФОРМИ

Розглянемо процедуру інтерполяції поля переміщень на прикладі одновимірної задачі деформування стрижня AB , показаного на рис. 1.2.

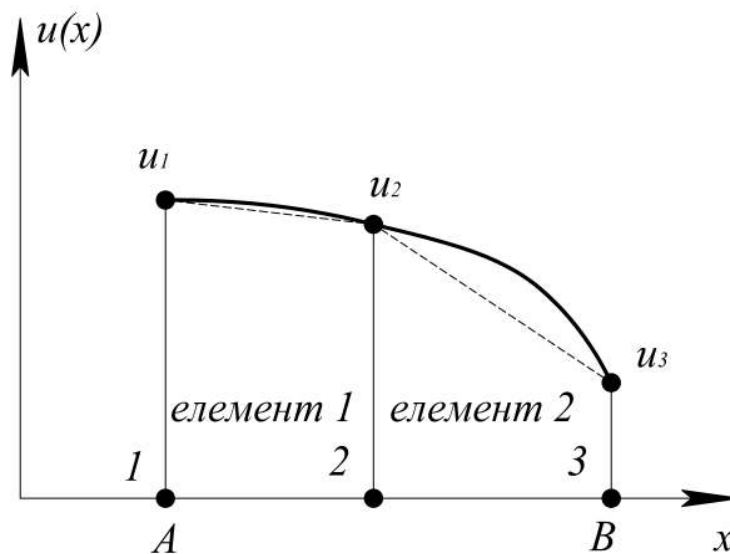


Рис. 1.2. Інтерполяція поля переміщень

Інтерполювання може виконуватися за допомогою безлічі кусочнобезперервних функцій, які називаються функціями форми. Кожна функція форми відмінна від нуля тільки в області одного «свого» скінченного елемента і дорівнює одиниці в одному вузлі цього елемента та дорівнює нулю у всіх інших вузлах. Такий вибір функцій інтерполяції дозволяє розраховувати вектор переміщення довільної точки елемента $u_e(x)$ через вектор вузлових переміщень елемента $\{U\}_e$ у вигляді сум:

$$u_e(x) = [N(x)]_e \{U\}_e, \quad (1.4)$$

де x – координата, що визначає положення точки в елементі;
 $[N(x)]_e$ – матриця функцій форми елемента.

Розіб'ємо стрижень AB на два елементи з вузлами 1-2 і 2-3. Вузлові значення функції $u(x)$ утворюють загальний вектор-стовпець $\{U\} = \{u_1 \ u_2 \ u_3\}^T$. Для першого елемента функцію інтерполяції приймемо у вигляді полінома першого ступеня, тобто у вигляді лінійної залежності

$$u_1(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x. \quad (1.5)$$

У вузлах першого елемента залежність (1.5) дасть дві рівності:

$$u_1 = \alpha_1 + \alpha_2 x_1, \quad u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 x_2. \quad (1.6)$$

З рівностей (1.6) знайдемо коефіцієнти α_1, α_2 і підставимо їх у (1.5).

Отримаємо:

$$u_1(x) = [N]_1 \{u\}_1, \quad (1.7)$$

де $[N]_1 = [N_1^1 \ N_2^1]_1$ – матриця функцій форми для першого елемента. Функції форми першого елемента:

$$N_1^1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, \quad N_2^1 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}. \quad (1.8)$$

Зауважимо, що для функцій форми у вузлах справедливі співвідношення виду:

$$N_1^1(x_1) = 1, \quad N_2^1(x_1) = 0, \quad N_1^1(x_2) = 0, \quad N_2^1(x_2) = 1, \quad N_1^1 + N_2^1 = 1. \quad (1.9)$$

Аналогічно виражаються переміщення другого елемента:

$$u_2(x) = [N]_2 \{u\}_2, \quad (1.10)$$

де $\{u\}_2 = \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$, $[N]_2 = [N_2^2 \quad N_3^2]_2$ – матриця функцій форми другого елемента.

Функції форми другого елемента:

$$N_2^2 = \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, \quad N_3^2 = \frac{x - x_2}{x_3 - x_2}. \quad (1.11)$$

На спільній границі елементів у вузлі 2 апроксимуюча функція залишається безперервною завдяки рівності $u_1(x_2) = u_2(x_2) = u_2$.

Таким чином, для одновимірних скінченних елементів побудовані лінійні функції форми. Скінченні елементи з лінійною апроксимацією називаються елементами першого порядку або симплекс-елементами.

Уявімо весь стрижень AB як один одновимірний скінченний елемент із трьома вузлами. Тоді для апроксимації функції $u(x)$ можна використовувати поліном другого порядку:

$$u(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2. \quad (1.12)$$

Перетворення, аналогічні вищевказаному, дають вираз

$$u(x) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \{u\}, \quad (1.13)$$

де

$$N_1 = \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)}, \quad N_2 = \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)}, \quad N_3 = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} -$$

квадратичні функції форми.

Елемент, для якого використовується функція форми у вигляді многочлену другого порядку, називається одновимірним квадратичним, або одномірним елементом другого порядку. Узагальнюючи розглянуті приклади, бачимо, що порядок поліномів, використовуваних як функцій форми, визначає порядок скінченного елемента. Вибір порядку апроксимації накладає певні умови на кількість вузлів елемента.

Для багатьох типів скінченних елементів функції форми й інші співвідношення МСЕ ефективно визначаються в місцевих (елементних) природних системах координат. Зв'язок між такими

місцевими координатами і загальними декартовими координатами здійснюється за допомогою деяких функцій.

В завданнях теплопровідності апроксимація шуканого температурного поля за допомогою функцій форми проводиться аналогічно.

1.4. РІВНЯННЯ ЖОРСТКОСТІ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Розглянемо спочатку лінійно-пружне завдання деформування твердого тіла при малих деформаціях і малих переміщеннях.

Приймається, що скінченні елементи взаємодіють тільки через загальні вузли. Внутрішні розподілені сили, що діють по межах елемента e , замінюються статично еквівалентними вузловими силами, що складають вектор вузлових сил елемента $\{F\}_e$. Зовнішні розподілені масові і поверхневі сили, що діють на скінченний елемент, приводяться до статично або енергетично еквівалентним вузловим силам, що утворюють відповідно вектори $\{P\}_e^g$ і $\{P\}_e^q$. До еквівалентних вузловим силам приводяться також сили інерції (як масові сили), початкові деформації, в тому числі температурні деформації (вектор $\{P\}_e^{\varepsilon_0}$), початкові напруження (вектор $\{P\}_e^{\sigma_0}$).

Матричне рівняння жорсткості елемента має вигляд:

$$[K]_e \{U\}_e = \{F\}_e + \{P\}_e^q + \{P\}_e^g + \{P\}_e^{\varepsilon_0} + \{P\}_e^{\sigma_0}, \quad (1.14)$$

де $[K]_e$ – матриця жорсткості елемента, що складається з коефіцієнтів жорсткості, $\{U\}_e$ – вектор вузлових переміщень елемента.

Обґрунтування рівняння (1.14) може бути виконано за допомогою теорії пружності або опору матеріалів, але такий підхід має ряд недоліків. Більш ефективними і в багатьох випадках більш коректними способами обґрунтування рівнянь жорсткості елементів є варіаційні методи і методи нев'язок.

Зауважимо, що варіаційні методи дозволяють отримувати загальну систему рівнянь рівноваги всієї моделі без введення вузлових сил $\{F\}_e$, тобто без припущення про взаємодію елементів тільки через вузли і без складання співвідношень (1.14) для жорсткості елементів. Однак в обчислювальному процесі МСЕ

зручно спочатку визначати матриці елементів $[K]_e$, $\{P\}_e^g$, $\{P\}_e^q$, $\{P\}_e^{\varepsilon_0}$, $\{P\}_e^{\sigma_0}$ а потім з них збирати загальні матриці системи рівнянь рівноваги моделі за стандартними правилами підсумовування компонентів матриць з однаковими індексами.

Якщо завдання деформування динамічне, то, на підставі принципу Д'Аламбера, в рівняння (1.14) додаються вузлові сили, еквівалентні масовим силам інерції, що залежать від прискорення. Демпфування враховується еквівалентними об'ємними силами в'язкого опору, що пропорційні швидкості. В результаті виходить диференціальне матричне рівняння виду:

$$[m]_e \frac{d^2}{dt^2} \{U\}_e + [C]_e \frac{d}{dt} \{U\}_e + [K]_e \{U\}_e = \{F\}_e, \quad (1.15)$$

де $[C]_e$ – матриця демпфування елемента, що залежить від коефіцієнта в'язкого демпфування μ ; $[m]_e$ – матриця мас елемента, що залежить від густини матеріалу елемента ρ .

Обґрунтування МСЕ для теплових завдань зазвичай проводиться або шляхом мінімізації відповідного функціоналу, або способом Гальоркіна. Для скінченного елемента в разі стаціонарної теплопровідності виходить співвідношення, що подібне (1.14):

$$[K]_e \{T\}_e = \{Q\}_e + \{Q\}_e^q + \{Q\}_e^g + \{Q\}_e^h, \quad (1.16)$$

де $[K]_e$ – матриця теплопровідності елемента; $\{T\}_e$ – вектор вузлових температур елемента; $\{Q\}_e$ – умовні вузлові теплові навантаження елемента від інших елементів; $\{Q\}_e^q$, $\{Q\}_e^g$, $\{Q\}_e^h$ – вектори вузлових теплових навантажень елемента, еквівалентних відповідно поверхневому тепловому потоку, тепловим потокам від внутрішніх теплогерел і від конвективної теплопередачі.

При нестационарній теплопровідності необхідно додати доданок, що враховує накопичення тепла в матеріалі. В результаті виходить диференціальне матричне рівняння виду:

$$[C]_e \frac{\partial}{\partial t} \{T\}_e + [K]_e \{T\}_e = \{Q\}_e + \{Q\}_e^q + \{Q\}_e^g + \{Q\}_e^h, \quad (1.17)$$

де $[C]_e$ – матриця теплоємності елемента.

1.5. РОЗВ'ЯЗУЮЧІ РІВНЯННЯ МСЕ. ГРАНИЧНІ ТА ПОЧАТКОВІ УМОВИ

З умов рівноваги вузлів або за допомогою варіаційних принципів, а також методів нев'язок, застосовуваних до всієї скінченно-елементної моделі, складається загальна система рівнянь рівноваги всієї скінченно-елементної моделі досліджуваного тіла.

Для статичних завдань вона має вигляд:

$$[K]\{U\} = \{P\} + \{P\}^q + \{P\}^g + \{P\}^{\varepsilon_0} + \{P\}^{\sigma_0}, \quad (1.18)$$

де $[K]$ – загальна (глобальна) матриця жорсткості скінченно-елементної моделі; $\{P\}$ – загальний вектор заданих зовнішніх вузлових сил; $\{P\}^q$, $\{P\}^g$, $\{P\}^{\varepsilon_0}$, $\{P\}^{\sigma_0}$ – загальні (глобальні) вектори вузлових сил, що еквівалентні розподіленним поверхневим і масовим силам, початковим деформаціям та початковим напруженням.

Компоненти матриці $[K]$ є коефіцієнтами жорсткості моделі. Вони обчислюються шляхом підсумовування відповідних коефіцієнтів жорсткості скінченних елементів. Матриця жорсткості $[K]$ для скінченно-елементної моделі має симетрію та стрічкову структуру.

Загальний вектор заданих зовнішніх вузлових сил $\{P\}$ можна представити у вигляді:

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_s \\ \vdots \\ P_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P'_1 \\ \dots \\ P'_s \\ \dots \\ P'_N \end{Bmatrix}, \quad (1.19)$$

де $P'_i = \{P_i\}$ – підматриця з n компонентів сили, що прикладена у вузлі i . Для тривимірної задачі матимемо $\{P_i\} = \{P_{ix} \quad P_{iy} \quad P_{iz}\}^T$. Як видно з виразу (1.19), індексація компонентів може бути або загальними номерами ступенів свободи моделі або загальними

номерама вузлів з додаванням індексу вузлового ступеня свободи, як у загального вектора вузлових переміщень (1.2).

Загальні (глобальні) вектори вузлових сил $\{P\}^q$, $\{P\}^g$, $\{P\}^{\varepsilon_0}$, $\{P\}^{\sigma_0}$ збираються з компонентів відповідних елементних векторів. Їх структура така ж, як у вектора $\{P\}$.

В динамічних задачах на підставі принципу Д'Аламбера в рівняння (1.18) додаються сили інерції. Так як сили інерції виражаються через прискорення, які є другими похідними від переміщень, то рівняння рівноваги (1.18) перетворюються на загальні (глобальні) диференціальні рівняння руху, в яких зовнішні сили можуть бути змінними:

$$[m] \frac{d^2}{dt^2} \{U\} + [C] \frac{d}{dt} \{U\} + [K] \{U\} = \{P(t)\} + \{P^q(t)\} + \{P^g\}, \quad (1.20)$$

де $[m]$ і $[C]$ – загальні (глобальні) матриці мас і демпфування моделі, які збираються з компонентів відповідних елементних матриць.

За допомогою рівнянь (1.20) виконуються різні види динамічного аналізу: модальний аналіз, де визначаються власні частоти і форми конструкцій; гармонійний аналіз, де визначається відгук системи на зовнішню періодичну силу з різною частотою; повний аналіз динамічного процесу, де проводиться інтегрування диференціальних рівнянь руху.

Розв'язуючі рівняння стаціонарної задачі теплопровідності для всієї моделі можна отримати або з умов балансу теплових потоків у вузлах з урахуванням рівнянь (1.16), або шляхом мінімізації функціоналу, визначеного для всієї моделі, або методом Гальоркіна, застосованого до всієї моделі:

$$[K] \{T\} = \{Q\} + \{Q\}^q + \{Q\}^g + \{Q\}^h. \quad (1.21)$$

Розв'язуючі диференціальні рівняння нестационарної задачі теплопровідності для всієї моделі виходять аналогічно:

$$[C] \frac{\partial}{\partial t} \{T\} + [K] \{T\} = \{Q\} + \{Q\}^q + \{Q\}^g + \{Q\}^h. \quad (1.22)$$

Рівняння (1.21) і (1.22) є рівняннями балансу теплових потоків. Всі теплові навантаження можуть бути нестационарними.

Компоненти всіх загальних матриць визначаються шляхом підсумовування відповідних компонентів з однаковими індексами всіх елементних матриць.

Силові граничні умови враховуються глобальними векторами вузлових сил $\{P\}$, $\{P\}^q$, що складають праву частину матричних рівнянь (1.18) і (1.20). Граничні умови в переміщеннях (в'язі) можуть враховуватися як при формуванні матриць елементів, так і після складання загальних матриць моделі. Розглянемо другий випадок, який частіше використовується в практиці МСЕ.

Завдання переміщень реалізується через завдання вузлових переміщень. Це рівносильне зниженню числа ступенів свободи моделі й може враховуватися шляхом видалення з загальної системи рівнянь рівноваги рівнянь, відповідних зв'язаним ступеням свободи. В результаті змінюється розмірність матриць розв'язуючої системи рівнянь. Для статичних завдань частіше застосовується інший підхід, при якому розмірність матриць не змінюється. Задані переміщення i , зокрема, закріплення (нульові переміщення) враховуються шляхом перетворення матриць $[K]$ і $\{P\}$. Припустимо, що задано вузлове переміщення $u_q = u$ (зокрема $u_q = 0$) для q -того ступеня свободи. Перетворення матриць може виконуватися двома способами:

1. Всі компоненти q -того стовпця і q -того рядка матриці жорсткості $[K]$, крім діагонального, прирівнюються нулю, тобто $K_{sq} = K_{qs} = 0$, $s \neq q$, $s, q = 1 \dots N$. Сума компонентів P_q , P_q^q , P_q^s векторів $\{P\}$, $\{P\}^q$, $\{P\}^s$ замінюється добутком $K_{qq}u$, всі інші компоненти вектора $\{P\}$ замінюються на різниці $P_s - K_{sq}u$;

2. Діагональний компонент K_{qq} матриці жорсткості $[K]$ множиться на велике число, наприклад $10^8 K_{qq}$. Відповідна сума компонентів $P_q + P_q^q + P_q^s$ векторів $\{P\}$, $\{P\}^q$, $\{P\}^s$ замінюється на величину $10^8 K_{qq}u$.

В статичних завданнях переміщення (в'язі), що задаються, повинні виключати можливість переміщення навантаженої конструкції як абсолютно твердого тіла. Тільки в цьому випадку

розв'язуюча система рівнянь (1.18), після врахування граничних умов, матиме єдине рішення. До врахування в'язів вихідна система (1.18) має лінійно залежні рівняння, визначник її матриці жорсткості дорівнює нулю, отже, матриця жорсткості вільного тіла є сингулярною (особливою), і не можна знайти однозначного рішення для вузлових переміщень. Ця математична особливість відображає фізичний факт, що врівноважені сили, які діють на вільне тіло в статичних завданнях не визначають однозначно переміщення через невизначеність зміщення його як твердого тіла. *Динамічні задачі*, що описуються рівняннями (1.20), можуть вирішуватися без накладення в'язів-переміщень.

В *завданнях теплопровідності* граничні умови першого роду – задані вузлові температури (в'язи) враховуються так само, як задані переміщення в деформаційній задачі. Граничні умови другого роду – задані теплові потоки і граничні умови третього роду – конвективні потоки враховуються в рівняннях балансу теплових потоків (1.21), (1.22) в правих частинах.

Для *нестационарних задач* повинні бути визначені початкові умови. В динамічних задачах деформування потрібно знати для деякого початкового моменту часу початкові положення та початкові швидкості всіх точок тіла. В нестационарній задачі теплопровідності потрібно знати для деякого початкового моменту часу початкове поле температур.

1.6. РОЗВ'ЯЗАННЯ РІВНЯНЬ МСЕ

Загальна система рівнянь рівноваги (1.18), отримана методом скінченних елементів для статичної лінійно-пружної моделі тіла, є, з математичної точки зору, системою лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Після врахування правильно накладених в'язів, що не допускають руху моделі як абсолютно твердого тіла, визначник матриці жорсткості $[K]$ не дорівнює нулю і, отже, існує єдине рішення – загальний вектор вузлових переміщень $\{U\}$. Загальна система лінійних рівнянь стаціонарної теплопровідності (1.21) також є СЛАР, що має, після врахування в'язів, єдине рішення. Вирішення цієї системи дає вектор вузлових температур $\{T\}$.

Точність і ефективність різних способів вирішення СЛАР (1.18) і (1.21) багато в чому залежить від структури і властивостей матриці $[K]$: розміру, обумовленості, симетричності, заповненості та ін. Відомі алгоритми розв'язання СЛАР можна розділити в основному на дві групи: прямі методи та ітераційні методи.

Прямі («точні») методи дозволяють отримувати за допомогою кінцевого числа операцій точні значення невідомих, якщо коефіцієнти і праві частини рівнянь задані точно і немає округлень при обчисленнях. Серед безлічі прямих методів найбільше застосування мають: метод виключення невідомих Гауса, метод квадратного кореня, а також їх різновиди, зокрема, фронтальний метод і схема розкладання Холецкого.

Ітераційні методи характеризуються тим, що спочатку задаються деякими наближеними значеннями невідомих. Потім за допомогою яких-небудь алгоритмів їх послідовно уточнюють, наближаючись до точного рішення. Найбільш часто використовуються метод прямої ітерації, метод Гауса-Зейделя, метод послідовної верхньої релаксації, градієнтні методи найшвидшого спуску і зв'язаних градієнтів.

Диференціальні рівняння руху (1.20) і диференціальні рівняння нестационарної теплопровідності (1.22) інтегруються різними чисельними методами. В результаті знаходяться вузлові переміщення або вузлові температури як функції часу. Через них визначаються всі інші шукані величини так само, як функції часу.

Скінченно-елементні моделі можуть бути нелінійними. Модель деформування фізично нелінійна, якщо в ній враховується нелінійна поведінка матеріалу – нелінійна пружність, текучість, повзучість та ін. Геометрична нелінійність при деформації обумовлена великими деформаціями і великими переміщеннями. В нелінійних скінченно-елементних моделях теплопровідності фізичні властивості (теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт тепловіддачі та ін.) залежать від температури.

Нелінійні завдання вирішуються ітераційними методами, при цьому на кожній ітерації розглядаються квазілінійні рівняння. В практичних обчисленнях часто застосовується метод Ньютона-Рафсона і його модифікації. Для нелінійних задач деформування

іноді ефективні методи змінних параметрів пружності, початкових деформацій і початкових напружень.

1.7. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ

У задачі деформування після визначення глобального вектора ступенів свободи $\{U\}$ знаходять елементні вектори вузлових переміщень $\{U\}_e$. Через них шляхом інтерполяції за допомогою функцій форми обчислюються переміщення будь-яких точок елементів. Для стрижневих елементів по відомим векторам $\{U\}_e$ з рівнянь (1.14) знаходять вектори $\{F\}_e$, а потім методами опору матеріалів обчислюють внутрішні сили, моменти і напруження. Для плоских і об'ємних елементів, диференціюючи апроксимуючі функції переміщень всередині елементів, знаходять деформації і за законом Гука обчислюють напруження.

Для скінченних елементів першого порядку з лінійною інтерполяцією переміщень величини деформацій і напруг всередині елементів виходять постійними, отже, на міжелементних границях ці величини будуть мати розриви. Для квадратичних елементів і елементів більш високого порядку з нелінійною інтерполяцією переміщень величини деформацій і напруг всередині елементів змінюються і обчислюються зазвичай наближено. На границях елементів при такому підході поля деформацій і напруг мають кінцеві розриви. З метою уточнення результатів обчислень застосовують різні способи усереднення. Наприклад, у вибраному вузлі беруть середню величину вузлових значень напружень, знайдених для всіх елементів, що примикають до цього вузла. Більш точні результати виходять за допомогою теорії сполученої апроксимації.

Реакції опор обчислюють з відповідних рівнянь загальної системи (1.18), взятої до її модифікації, що враховує в'язи. Використовуючи глобальну нумерацію компонентів векторів вузлових сил, можна записати наступну формулу для реакцій в опорних вузлах:

$$P_s = \sum_{q=1}^N K_{sq} u_q - P_s^g - P_s^q. \quad (1.23)$$

В динамічній задачі загальний вектор вузлових переміщень і всі інші зазначені вище величини (деформації, напруження, реакції) знаходяться як функції часу.

В задачі теплопровідності через знайдені вузлові температури, використовуючи апроксимуючі функції форми, можна визначити температуру будь-якої точки, градієнти температур і потоки тепла. В нестационарній задачі теплопровідності всі зазначені вище величини визначаються як функції часу.

1.8. РЕАЛІЗАЦІЯ МСЕ В ПАКЕТІ ANSYS

Програмний комплекс ANSYS вирішує методом скінченних елементів стаціонарні і нестационарні, лінійні і нелінійні задачі з таких областей фізики, як механіка твердого тіла, що деформується, механіка рідини і газу, теплопередача, електродинаміка. Можливо вирішення зв'язаних завдань. Для вирішення завдань деформування конструкцій МСЕ застосовується у варіанті методу переміщень.

Розрахунки можуть проводитися в пакетному **Batch** або інтерактивному **Interactive** режимах.

Для пакетного режиму попередньо повинна бути написана програма користувача за допомогою вбудованої мови APDL (ANSYS Parametric Design Language) і команд ANSYS. Текстовий командний файл, що містить цю програму, зчитується засобами пакету ANSYS і виконується. Пакетний режим зручний при вирішенні складних завдань, алгоритм яких містить цикли, переходи, структури «якщо – то» та ін.

Інтерактивний режим роботи реалізується або за допомогою графічного інтерфейсу користувача (GUI) класичного ANSYS, або на платформі продукту Workbench. Ці оболонки складаються з командних меню і вікон. Кожна команда, що вводиться через меню при інтерактивному моделюванні відразу ж виконується, а результат або повідомлення про нього виводяться у відповідні вікна.

Інтерактивний режим – основний режим моделювання, бо навіть командні файли для пакетного режиму створюються зазвичай з використанням інструментів інтерактивного режиму.

Розв'язання МСЕ поставленої крайової задачі здійснюється програмою ANSYS в три етапи відповідно логіці методу.

На першому етапі (препроцесінг) створюється основа скінченно-елементної моделі досліджуваного об'єкта. Цей етап включає в себе нижченаведені процедури:

1. Встановлюється фізичний тип завдання (механіка деформованого твердого тіла, теплопередача, гідродинаміка і т.д.), проводиться відповідна настройка програми.

2. Вибирається тип скінченного елемента в залежності від розмірності об'єкта та інших його властивостей. Можуть бути задані деякі характеристики елемента.

3. Вибирається матеріал об'єкта і вказуються всі його необхідні властивості. Властивості можуть бути задані з клавіатури або імпортовані з бібліотеки матеріалів ANSYS. Завдання властивостей визначає модель матеріалу (лінійно-пружний, пружно-пластичний, білінійний і т.д.), що впливає на вибір визначальних рівнянь МСЕ.

4. Будується геометрична твердотільна модель об'єкта. В класичному ANSYS для цього використовується програмний модуль PREP7. В Workbench використовується модуль Design Modeler. Геометрична модель може бути експортована з якого-небудь CAD-пакету.

5. Геометрична модель розбивається на скінченні елементи. При розбивці можуть бути задані різні параметри сітки.

6. В разі контактної задачі встановлюються контактні пари, визначається модель контакту та її характеристика.

Другий етап – накладання на модель необхідних фізичних умов і вирішення завдання – складається з трьох основних кроків:

1. Задаються граничні умови – сили, переміщення (в'язи) і т.п.

2. Вибирається тип аналізу (статичний, динамічний, модальний і т.д.). Можливий вибір методу розв'язання системи рівнянь МСЕ і завдання параметрів обчислювальних процедур (числа кроків навантаження, числа ітерацій та ін.)

3. Здійснюється розв'язання системи рівнянь, яка отримана методом МСЕ. В результаті розв'язання формується файл результатів, який містить вектор знайдених ступенів свободи (вузлових переміщень, вузлових температур і т.д.).

Третій етап (постпроцесінг) – аналіз результатів розрахунку. Розраховані МСЕ фізичні величини (переміщення, деформації, напруження, температури та ін.) представляються в графічному вікні ANSYS у вигляді картинок, таблиць, графіків, анімацій. Всі ці результати можна записати у відповідні файли.

При виконанні розглянутих вище етапів вирішення задачі програма ANSYS створює в пам'яті комп'ютера базу даних, що містить повну інформацію про модель. Цю базу даних можна зберегти в бінарному файлі і використовувати для продовження аналізу.

ЛЕКЦІЯ 2

ОСНОВИ РОБОТИ В ANSYS WORKBENCH

2.1. Графічний інтерфейс Workbench.

2.2. Робота з проектом в Workbench.

Центральним об'єктом при роботі в ANSYS Workbench є проект, під яким розуміється сукупність геометричних, фізичних і скінченно-елементних моделей тіл розглянутої задачі, а також результатів чисельного розв'язання.

Проект може складатися з одного або декількох блоків, що реалізують окремі види інженерного аналізу. У свою чергу, блок складається з елементів – структурних частин блоку, що відповідають за певний етап аналізу. Можна виділити наступні етапи проведення інженерного аналізу:

1. Розробка моделі (препроцесінг). На даному етапі здійснюється підготовка геометричної моделі, завдання матеріалу і його властивостей, генерація скінченно-елементної сітки, визначення фізичних умов моделювання.

Кінцевим результатом етапу є модель, яка підготовлена для чисельного розв'язання;

2. Настройка вирішувача і розв'язання. На даному етапі задаються необхідні настройки вирішувача, параметри, що

забезпечують збіжність ітераційного процесу, і запускається вирішувач. Кінцевим результатом етапу є чисельне розв'язання, отримане із заданою точністю;

3. Обробка результатів (постпроцесінг). На даному етапі отримане чисельне розв'язання задачі використовується для візуалізації розподілу необхідних фізичних величин (напружень, деформацій, температур та ін.).

Кінцевим результатом етапу є набір графіків, анімацій, масивів значень, що представляють необхідні результати вирішення завдання.

Процедура інженерного аналізу рідко буває лінійною. При вирішенні практичної задачі, як правило, доводиться часто повертатися до попередніх етапів, вносити зміни в моделі, перебудовувати SE-сітку, коректувати налаштування вирішувача.

Наявність зручних інструментів для цього грає дуже важливу роль, оскільки дозволяє суттєво пришвидшити процес отримання чисельного розв'язання.

Платформа Workbench забезпечує інженера великою кількістю інструментів, необхідних на всіх етапах аналізу, дозволяє швидко отримувати чисельне розв'язання різними вирішувачами, ефективно організовує взаємозв'язок між окремими видами інженерних розрахунків.

2.1. ГРАФІЧНИЙ ІНТЕРФЕЙС WORKBENCH

Запуск ANSYS Workbench виконується з основного меню **Пуск**. Після завантаження буде виведено основне вікно програми, яке складається в свою чергу з кількох вікон. Імена вікон відображаються в заголовках (рис. 2.1).

Кожне з вікон може бути змінено в розмірах, згорнуто або закрито звичайними засобами Windows. Нижче представлено опис і функціональні особливості вікон.

Вікно **Project Schematic** – головне вікно проекту, що розташоване в центрі основного вікна Workbench. Воно містить структурні компоненти проекту (блоки) і зв'язки між ними. Такий підхід дозволяє наочно представляти частини проекту і керувати зв'язками між його окремими блоками.

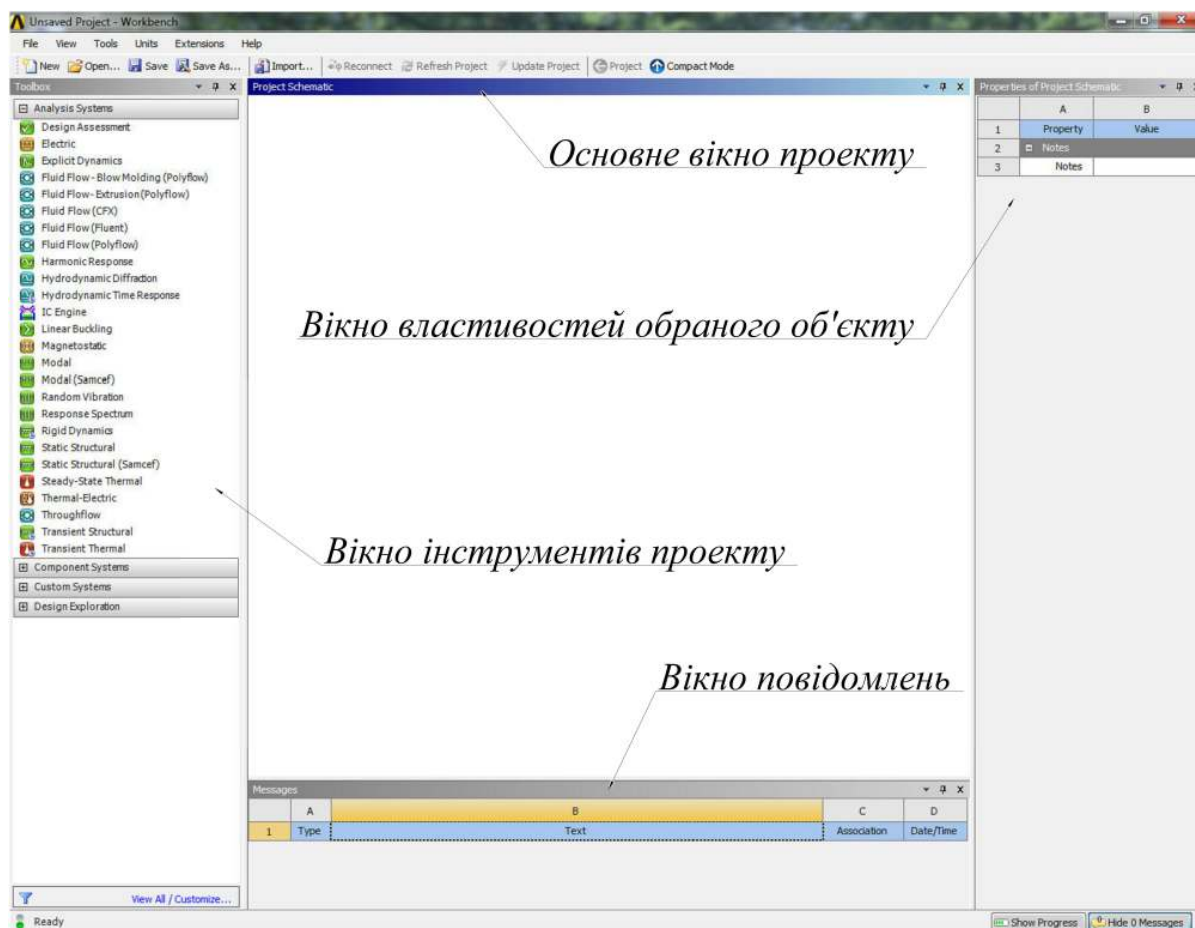


Рис. 2.1. Вікно платформи Workbench

Вікно **Toolbox** – вікно інструментів проекту, що розташоване ліворуч від вікна **Project Schematic**. Воно містить кілька розділів, відображених у вигляді списків, що розкриваються:

- **Analysis Systems** – розділ, що містить всі види інженерних аналізів, виконуваних в ANSYS.
- **Component Systems** – розділ, що містить окремі компоненти інженерного аналізу, такі як: геометрична модель, скінченно-елементна сітка та ін.
- **Custom Systems** – розділ, що містить шаблони для пов'язаних інженерних розрахунків, тобто коли результати вирішення однієї задачі є вихідними даними для іншої. Типовим прикладом пов'язаного аналізу може служити термоміцносне завдання, в якому для визначення міцносних характеристик використовуються попередньо отримані результати вирішення теплової задачі.

- **Design Exploration** – містить інструменти для оптимізації моделей по набору геометричних або фізичних параметрів та побудови їх кореляційних матриць..

Вікно **Properties** – вікно, в якому відображаються властивості обраного в **Project Schematic** об'єкта. Всі властивості об'єкта в даному вікні відображаються у вигляді таблиці, в першому стовпці якої записано найменування властивості або параметра, а в другому відображено його значення, або прапорець активації властивості.

В нижній частині екрана розташоване вікно **Messages**, яке служить для відображення службових повідомлень, попереджень або повідомлень про помилки.

Місця розташування перерахованих вище вікон всередині основного вікна Workbench можуть бути змінені користувачем за своїм розсудом. Перетягнути вікно на нове місце можна, утримуючи ліву кнопку миші на заголовку вікна. Для відновлення прийнятих положень всіх вікон потрібно вибрати пункт **Reset Window Layout** в меню **View**.

В верхній частині основного вікна розташовані кнопки для стандартних операцій з проектом (рис. 2.2).

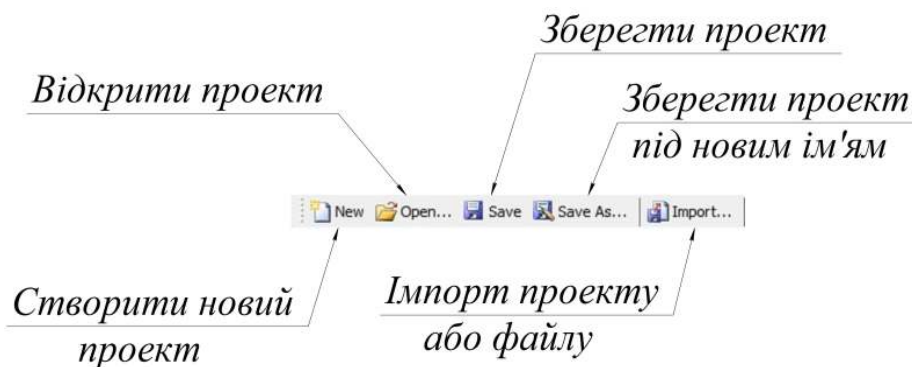


Рис. 2.2. Кнопки стандартних операцій з проектом

Крім операцій створення, відкриття і збереження є можливість імпортувати проект (або його окремі файли) формату попередніх версій Workbench або імпортувати файли інших CAD/CAE-систем.

Кнопка **Refresh Project** запускає оновлення вхідних даних проекту, а кнопка **Update Project** зчитує оновлені вхідні дані і запускає перерахунок проекту для отримання нових результатів аналізу.

Основні налаштування середовища Workbench можна змінити в меню *Tools/Options*. Для повернення до налаштувань потрібно натиснути кнопку *Restore Defaults* в нижній частині вікна налаштувань.

Меню *Units* дозволяє задавати систему одиниць вимірювань, яка приймається для всіх розрахунків в проекті (рис. 2.3).

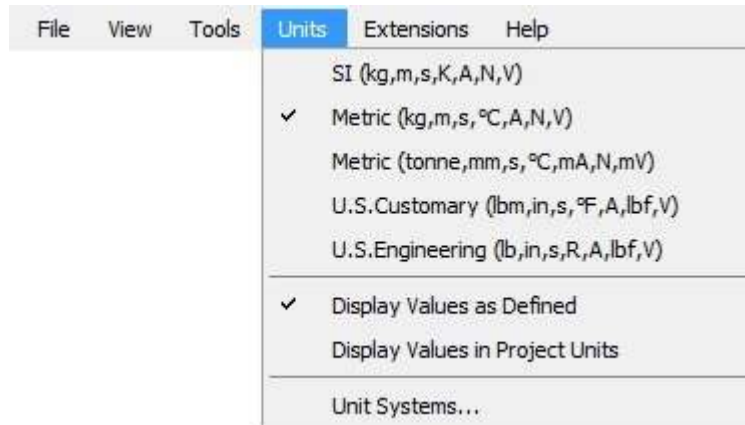


Рис. 2.3. Меню Units

Поточна система одиниць відмічена ліворуч галочкою і в будь-який момент може бути змінена. Слід зазначити, що геометричний модуль, модуль симуляції та інші також дозволяють в процесі роботи змінювати систему одиниць вимірювань.

Довідкова система ANSYS Workbench доступна через меню *Help* і містить всі необхідні відомості по роботі з програмою і її командам.

2.2. РОБОТА З ПРОЕКТОМ У WORKBENCH

Як було зазначено вище, ANSYS дозволяє проводити інженерний аналіз різного виду; всі вони представлені у вікні інструментів *Toolbox*, (рис. 2.4). Деякі види аналізу представлені в наступному переліку:

- *Static Structural* – статичний міцнісний аналіз;
- *Transient Structural* – нестационарний міцнісний аналіз;
- *Steady-State Thermal* – стаціонарний тепловий аналіз;
- *Transient Thermal* – нестационарний тепловий аналіз;
- *Modal* – модальний аналіз;
- *Harmonic Response* – гармонійний аналіз;

- *Linear Buckling* – аналіз стійкості;
- *Explicit Dynamics* – твердотільний динамічний аналіз.



Рис. 2.4. Вікно інструментів Toolbox

В дужках після найменування інженерного аналізу вказаний вирішувач, тобто програмний код, що виконує чисельне розв'язання задачі. Як видно з рис. 2.4, для інженерного аналізу одного виду можуть застосовуватися різні вирішувачі: ANSYS, Samcef, MBD та інші.

Структура інженерного аналізу для статичного міцнісного аналізу схематично представлена на рис. 2.5. В Workbench користувач відразу вибирає вид інженерного аналізу, після чого

програма вставляє в схему проекту відповідний блок, який містить всі необхідні етапи виконання аналізу.




Рис. 2.5. Структура інженерного аналізу *Static Structural*

Проект може містити кілька таких блоків для різних типів інженерних розрахунків, між якими при необхідності можуть встановлюватися зв'язки.

Створити новий блок інженерного аналізу в проекті можна двома способами:

1. якщо, утримуючи ліву кнопку миші, перетягнути його найменування з вікна **Toolbox** у вікно **Project Schematic**. При цьому можливе місце вставки блоку аналізу обмежена штриховий лінією. Таким способом зручно вставляти незалежні нові блоки. Порядок вставки залежних (пов'язаних) блоків буде розглянуто нижче;




2. подвійним натисканням лівої кнопки миші на найменуванні інженерного аналізу у вікні **Toolbox**. Таким способом можна вставити тільки незалежний (незв'язаний) блок.

Меню керування створеним блоком інженерного аналізу в **Project Schematic** викликається натисненням кнопки  в лівому верхньому кутку блоку і дозволяє виконати наступні дії:

- оновити – **Update**;
- зробити дублікат блоку – **Duplicate**;
- змінити вид інженерного аналізу в блоці – **Replace With**;
- видалити всю інформацію блоку – **Clear Generated Data**;
- видалити блок – **Delete**;
- перейменувати блок – **Rename**;

- перейти до вікна властивостей блоку – **Properties**.

Схоже меню має кожен елемент блоку, для його виклику потрібно натиснути праву кнопку миші на елементі. В ньому відображені операції, що можна виконати з даним елементом, такі як редагування елемента **Edit**, оновлення **Update**, передача даних з нового блоку **Transfer Data From New** та інші.

Кожен елемент блоку інженерного аналізу має статус, який відображається праворуч від його найменування. Якщо блок щойно вставлений, то в ньому за замовчуванням задаються лише властивості матеріалу в елементі **Engineering Data**, який при цьому позначається галочкою. При роботі з проектом змінюється статус і інших елементів блоку. Якщо для елемента блоку не визначені властивості, то його статус відображується знаком питання . Якщо для елемента потрібне проведення розрахунків, то його статус позначається знаком блискавки , а якщо потрібно лише оновити зв'язки або властивості елемента, то його статус відображається знаком .

При проведенні інженерного аналізу в Workbench часто виникає необхідність у встановленні зв'язків між окремими блоками. Наприклад, для порівняння результатів чисельних розрахунків двох різних вирішувачів потрібно створити два блоки з однаковою геометричною моделлю, сіткою і початковими параметрами симуляції. Також необхідність зв'язування блоків може бути обумовлена особливістю аналізу, наприклад розрахунок температурних напружень, модальний аналіз з урахуванням попередніх напружень і т.д. У всіх зазначених випадках блоки, що зв'язуються повинні обмінюватися інформацією і мати можливість оновлювати вміст при змінах в залежних елементах.

Workbench підтримує два типи зв'язку, який встановлюється між блоками інженерного аналізу:

1. простий зв'язок для передачі даних – **Transfer Data**;
2. спільно використовуваний зв'язок – **Share**.

За наявності простого зв'язку дані з одного блоку передаються як вхідні в інший блок. За наявності спільно використовуваного зв'язку встановлюється відповідність між пов'язаними елементами, що накладає обмеження на редагування та записування даних в залежних елементах. У цьому випадку всі операції з даними можуть

бути виконані тільки в батьківських елементах, а залежні елементи затіняються сірим кольором.

На рис. 2.6 відображена схема пов'язаного статичного термоміцносного аналізу.

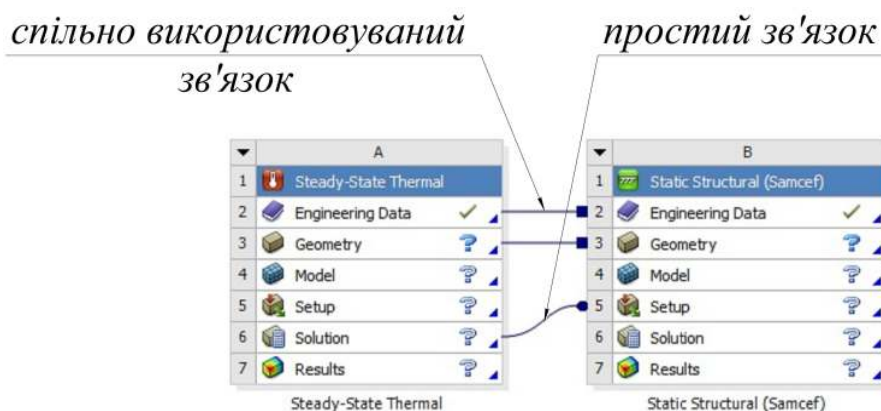


Рис. 2.6. Схема пов'язаного аналізу

В цьому завданні властивості матеріалів **Engineering Data** та геометрична модель **Geometry** використовуються спільно, тому зв'язок даних елементів має тип **Share**.

Результати вирішення теплової задачі повинні передаватися на вхід вирішення міцнісного завдання, тому зв'язок елементів **Solution** в **Steady-State Thermal** - аналізі та **Setup** в **Static Structural** - аналізі – простий для передачі даних.

Найпростіший спосіб вставки пов'язаного блоку інженерного аналізу полягає в наступному. Натиснувши та утримуючи ліву кнопку миші на необхідному блоці у вікні **Toolbox**, потрібно перемістити покажчик на елемент існуючого блоку, з яким потрібно встановити зв'язок.

Якщо, показавши на елемент **Geometry**, відпустити ліву клавішу миші, то буде встановлено зв'язок між елементами **Engineering Data** і **Geometry**.

Якщо, вказавши на елемент **Model**, відпустити ліву клавішу миші, то буде встановлено зв'язок між елементами **Engineering Data** та **Geometry**.

Елементи блоку, які можуть брати участь у встановленні зв'язків, виділені прямокутником, а типи зв'язків між ними показані праворуч (рис. 2.7).

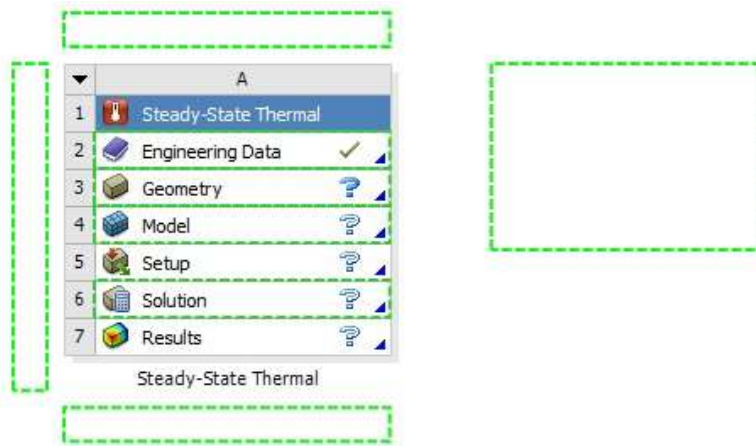


Рис. 2.7. Етап формування пов'язаного аналізу найпростішим способом (шляхом переміщення)

Можна організувати зв'язок між блоками по-іншому. В контекстному меню блоку (рис. 2.8) пункти **Transfer Data To New** і **Transfer Data From New** дозволяють вставити новий пов'язаний блок як додатковий або як кореневий відповідно.

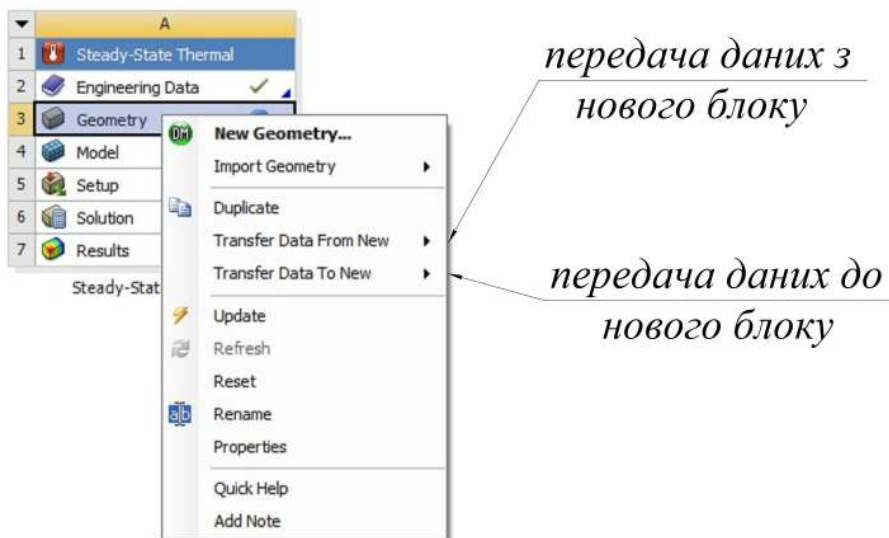


Рис. 2.8. Етап формування пов'язаного аналізу шляхом використання контекстного меню

Зазначені пункти доступні лише у випадках, коли оновлення зв'язку можливо. В списку для зв'язку будуть запропоновані тільки допустимі блоки. Необхідні зв'язки між окремими елементами блоків будуть створені автоматично.

На закінчення лекції розглянемо файлову структуру проекту в Workbench.

Основний файл проекту має розширення *.wbpj* і зберігає тільки посилання на модельні файли і зв'язки між ними. Разом з основним файлом проекту на диску створюється однойменна папка. Робочі файли проекту поміщаються в папку *dp0*. При вирішенні завдань оптимізації, коли потрібно варіювати параметрами моделі, на кожен варіант розрахунку автоматично створюється папка *dpN*, де *N* – порядковий номер варіанту.

Модельні файли проекту мають наступні розширення:

- файли геометричної моделі *.agdb* і SE-сітки *.mechdb*;
- файл SE-сітки *.mechdb*;
- файл з результатами вирішення задачі *file.rst*;
- командний файл ANSYS, автоматично генерований Workbench *ds.dat*;
- файл з повідомленнями про помилки *file.err*;
- файл з вихідною інформацією вирішувача *solve.out*.

Вхідні файли користувача, файли з графіками, діаграмами, отриманими за результатами чисельного розв'язання, зберігаються в підкаталозі *user_files*.

ЛЕКЦІЯ 3

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Графічний інтерфейс модулю Design Modeler.

3.2. Створення ескізу геометричної моделі.

3.3. Інструменти малювання.

3.4. Інструменти редагування ескізу.

3.5. Завдання обмежень та зв'язків між об'єктами.

3.6. Завдання розмірних параметрів моделі.

Етап побудови геометричної моделі реалізується елементом **Geometry**. Геометрична модель створюється в модулі Design Modeler, який реалізує сучасні методи моделювання плоскої і тривимірної геометрії.

Крім стандартних інструментів геометричного моделювання Design Modeler має ряд спеціальних функцій, що дозволяють підготувати модель до інженерного аналізу в ANSYS. Перед побудовою або імпортом геометричної моделі можна, клікнувши правою кнопкою миші на елементі **Geometry**, змінити його налаштування, які відображаються у вікні властивостей **Properties** – рис. 3.1.

Properties of Schematic A3: Geome		
	A	B
1	Property	Value
2	[-] General	
3	Component ID	Geometry
4	Directory Name	SYS
5	[-] Notes	
6	Notes	
7	[-] Used Licenses	
8	Last Update Used Licenses	
9	[-] Geometry Source	
10	Geometry File Name	
11	CAD Plug-In	DesignModeler[?]
12	[-] Basic Geometry Options	
13	Parameters	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Parameter Key	DS
15	Attributes	<input type="checkbox"/>
16	Material Properties	<input type="checkbox"/>
17	[-] Advanced Geometry Options	
18	Analysis Type	3D <input type="button" value="v"/>
19	Use Associativity	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Import Coordinate Systems	<input type="checkbox"/>
21	Import Work Points	<input type="checkbox"/>
22	Reader Mode Saves Updated File	<input type="checkbox"/>
23	Import Using Instances	<input checked="" type="checkbox"/>
24	Smart CAD Update	<input type="checkbox"/>
25	Enclosure and Symmetry Processing	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Decompose Disjoint Geometry	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 3.1. Вікно налаштування елементу *Geometry*

В групі ***Basic Geometry Options*** можна вибрати типи геометричних об'єктів, атрибути, параметри, іменовані групи виділення, властивості матеріалів, які будуть передаватися при імпорті моделі, в групі ***Advanced Geometry Options*** можна задати спеціальні настройки: вказати тип моделювання (за замовчуванням вибрано 3D – тривимірне моделювання), взаємозв'язок з наявною САД-системою, можливість імпорту координатних систем разом з геометричною моделлю та інші.

Ці опції задаються, як правило, на початку роботи з проектом.

3.1. ГРАФІЧНИЙ ІНТЕРФЕЙС МОДУЛЮ *DESIGN MODELER*

Після того як новий інженерний аналіз створений, можна приступати до побудови геометричної моделі.

Для цього, клікнувши правою кнопкою миші на рядку *Geometry*, викликаємо контекстне меню, в якому потрібно вибрати пункт – *New Geometry*. Workbench запускає геометричний модуль Design Modeler.

Якщо геометрична модель вже створена раніше за допомогою Design Modeler або в якій-небудь CAD-системі, то її можна імпортувати, вибравши пункт меню *Import Geometry*.

Файл геометричної моделі, створений в Design Modeler, має розширення *.agdb*.

Якщо надалі потрібно видалити імпортовану геометрію з проекту, потрібно в контекстному меню вибрати пункт *Reset*.

Основне вікно Design Modeler включає такі основні елементи (рис. 3.2):

- головне меню і панелі інструментів. Дозволяють керувати роботою модуля і містять команди для роботи з геометричною моделлю. Панелі інструментів надають швидкий доступ до найбільш важливих або часто використовуваних команд;
- дерево побудови *Tree Outline*. Містить ієрархічну послідовність команд побудови геометричної моделі;
- вікно властивостей виділеного елемента *Details View*. Відображає різні настройки виділених об'єктів або команд моделювання;
- вікно моделі *Graphics*. Відображає поточний результат моделювання.

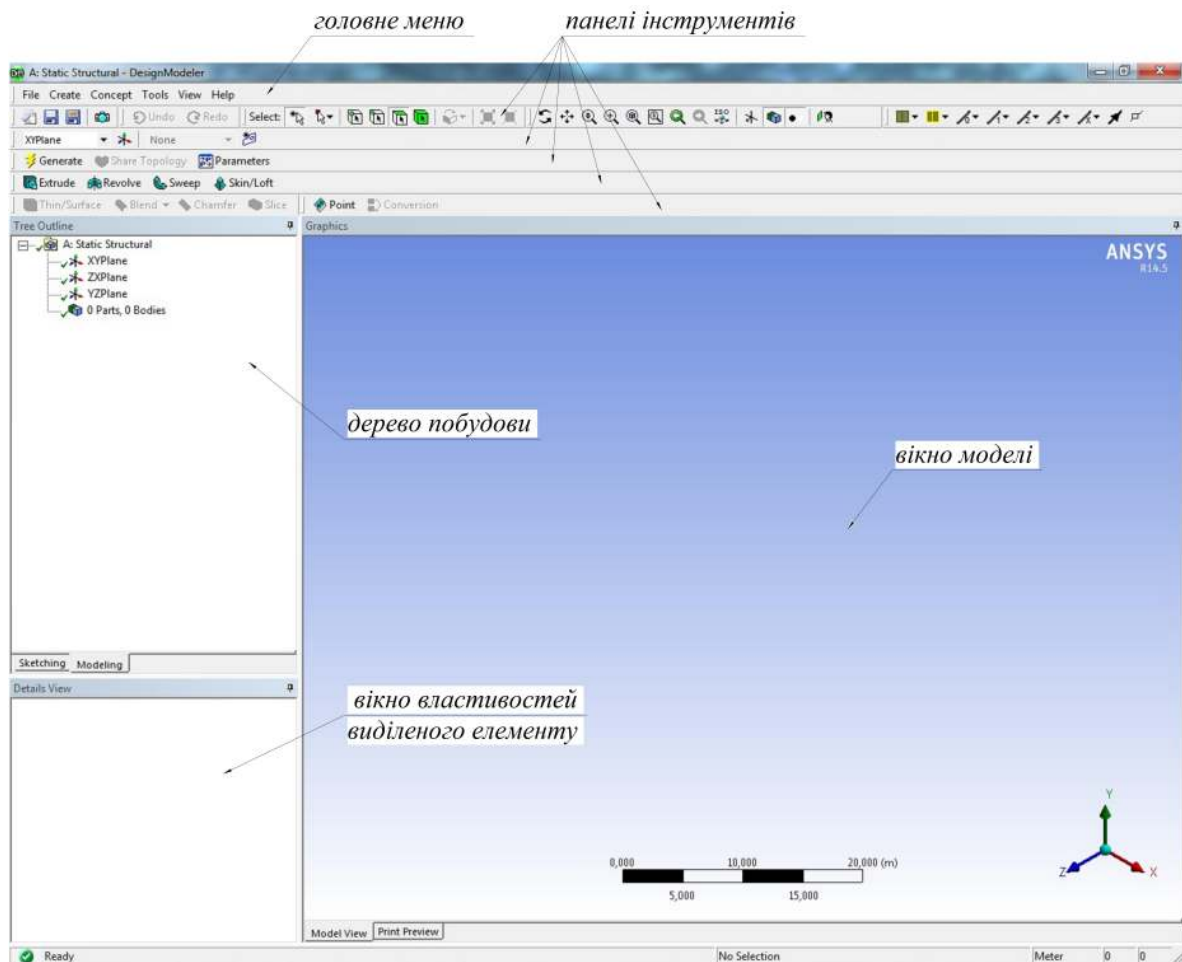


Рис. 3.2. Головне вікно модулю Design Modeler

Головне меню містить наступні пункти (рис. 3.3):

1. **File** – дозволяє виконувати основні операції з файлами геометрії;
2. **Create** – дозволяє створювати і модифікувати тривимірні об'єкти;
3. **Concept** – містить інструменти для створення ліній і поверхонь;
4. **Tools** – містить набір інструментів для постобробки тривимірних моделей, а також дозволяє задавати налаштування модуля і керувати параметризацією моделей;
5. **View** – дозволяє задавати налаштування відображення геометричної моделі;
6. **Help** – дає доступ до довідкової системи по модулю Design Modeler.

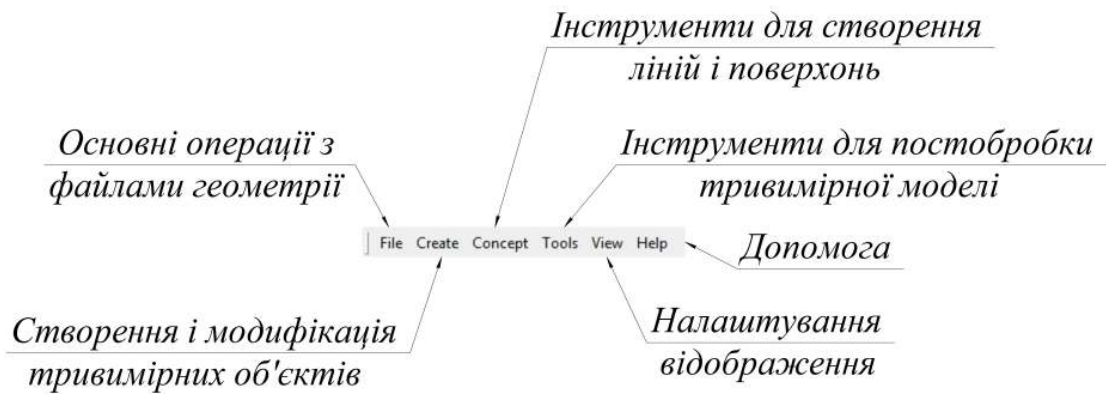


Рис. 3.3. Головне меню модулю *Design Modeler*

Дерево побудови ***Tree Outline*** є найважливішим інструментом моделювання і дозволяє представляти в зручному вигляді послідовність створення геометричної моделі (рис. 3.4).

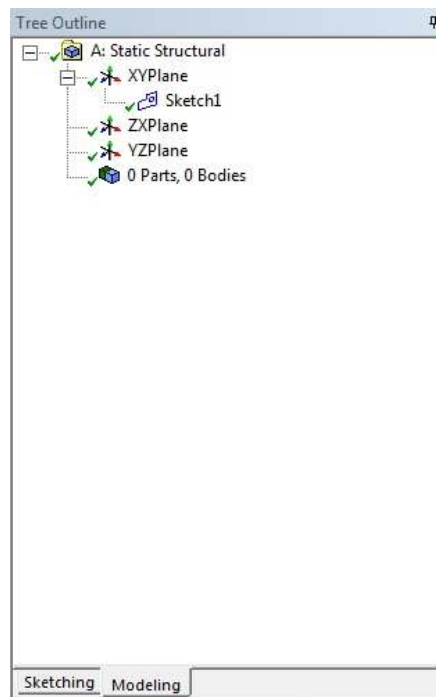


Рис. 3.4. Дерево побудови модулю *Design Modeler*

В дереві побудови відображені всі операції в тому порядку, в якому вони застосовувалися для створення геометрії. Деякі команди можуть бути супідрядними, тобто результати виконання однієї є вихідними для іншої.

Зазвичай нові команди додаються в кінець дерева побудови, проте користувач може вставляти їх між вже існуючими.

Це досягається шляхом вставки команди за допомогою контекстного меню, що викликається на необхідному місці вставки правою кнопкою миші.

Вікно властивостей виділеного елемента *Details View* відображає властивості поточного об'єкта, обраного в дереві побудови (рис. 3.5).

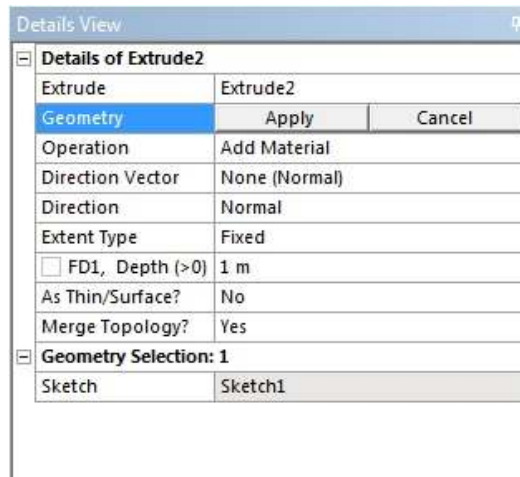


Рис. 3.5. Вікно властивостей виділеного об'єкту Design Modeler

Це можуть бути параметри команд побудови геометричних об'єктів, значення розмірів, перелік структурних елементів об'єкту та інші параметри.

В даному вікні можна змінювати властивості об'єктів, вибираючи необхідні пункти з випадаючого меню або просто задаючи чисельні значення параметрів.

Вікно моделі *Graphics* відображає поточний результат моделювання, дозволяє змінювати вигляд, повертати і масштабувати модель.

Керувати відображенням можна кнопками на панелі керування відображенням або за допомогою клавіатури і миші.

Призначення кнопок панелі керування відображенням представлено на рис. 3.6.

Перейшовши в потрібний режим, керування видом здійснюється переміщенням покажчика при натиснутій лівій кнопці миші.



Рис. 3.6. Панель керування відображенням Design Modeler

Однак найбільш зручним є керування за допомогою клавіатури і миші. При цьому кнопки миші реалізують такі функції:

- ліва кнопка миші – виділення об'єктів. Для виділення одного геометричного об'єкта потрібно просто клікнути на ньому лівою кнопкою миші. Якщо при виділенні об'єкта додатково натиснута клавіша **Ctrl**, то він додається в групу виділення. Для видалення об'єкту з групи потрібно ще раз клікнути на ньому лівою кнопкою миші, утримуючи клавішу **Ctrl**. Для безперервного виділення потрібно утримуючи ліву клавішу миші проводити курсор по необхідних об'єктах. Виділені об'єкти зафарбовуються зеленим кольором;

- середня кнопка миші – вільне обертання моделі. Для цього потрібно утримувати натиснутою середню кнопку миші і переміщати курсор. Якщо разом із середньою кнопкою натиснута клавіша **Ctrl**, то відбувається лінійний зсув моделі, а якщо натиснута клавіша **Shift**, то відбувається масштабування поточного виду моделі. Зазначимо, що при цьому не відбувається переходу у відповідний режим вільного обертання, зсуву або масштабування – це можна зробити, тільки натиснувши відповідну кнопку на панелі.

- права кнопка миші – масштабування рамкою. Утримуючи праву кнопку миші потрібно перетягнути курсор в інше місце екрану і відпустити кнопку. Початкове і кінцеве положення курсору задають діагональ прямокутної рамки, вміст якої масштабується на

екрані. Крім цього, права кнопка миші відкриває контекстне меню об'єкта.

Геометрична модель, як правило, складається з об'єктів різних типів: точки, лінії, поверхні і об'єму. Design Modeler надає можливість вибору типу об'єктів, які будуть виділятися за допомогою лівої кнопки миші. Доступні два режими виділення: звичайний і за допомогою рамки. При виділенні рамкою за допомогою миші задаються межі рамки і всі об'єкти обраного типу, які потрапляють всередину заданої рамки, вважаються виділеними. Для вибору типу об'єктів, що виділяються на панелі виділення передбачені відповідні кнопки (рис. 3.7).

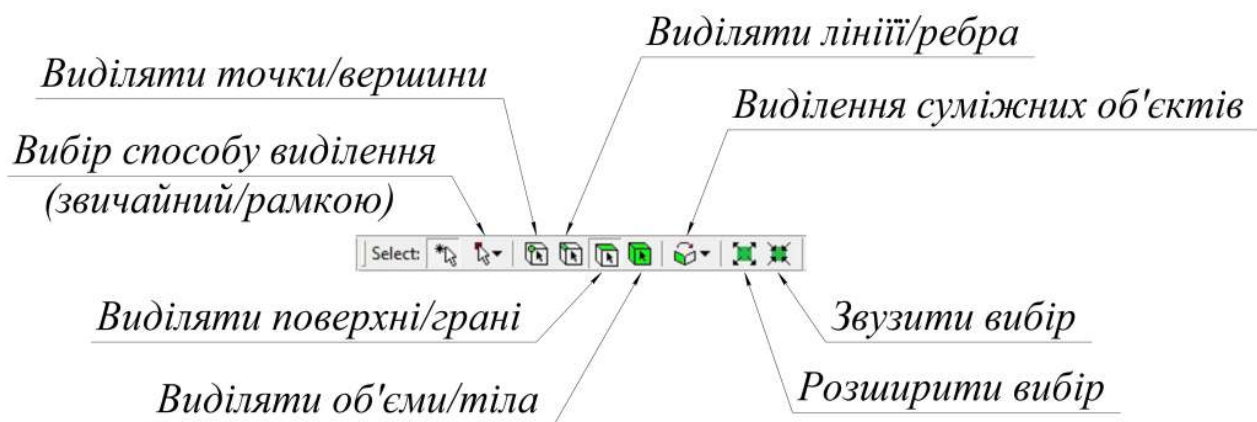



Рис. 3.7. Панель керування виділенням Design Modeler

Кнопка виділення суміжних об'єктів на панелі виділення розкриває меню, яке надає розширені можливості виділення суміжних об'єктів.

Якщо кут між нормаллями до двох об'єктів не перевищує деякої заданої величини («рівень гладкості сполучення»), то при виборі пункту *Extend to Adjacent* разом з виділенням одного об'єкта виділяється і суміжний з ним. Команда *Extend to Limits* аналогічна попередній команді, застосованої кілька разів; виділення суміжних об'єктів виконується до тих пір, поки це можливо. Для спільного виділення суміжних заокруглень застосовується команда *Flood Blends*. Для виділення всіх поверхонь, суміжних з виділеною і обмежених заданими ребрами, використовується команда *Flood Area*.


При виділенні поверхонь в об'ємних тілах може виникнути ситуація, коли потрібна поверхня прихована іншими, і клікнути на

ній мишею стає досить складно. Design Modeler автоматично розпізнає це і пропонує автоматично виділяти поверхні, які приховані поточним виділенням, за допомогою вибору умовних поверхонь , що з'являються в лівому нижньому кутку вікна моделі.

Для цього потрібно послідовно перебирати умовні поверхні і відслідковувати зміну в поточному виділенні. Поточне виділення завжди підсвічується зеленим кольором, а у виділених прихованих поверхонь легко бачити зелений контур.

3.2. СТВОРЕННЯ ЕСКІЗУ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ

Створення будь-якої геометричної моделі починається з вибору координатної площини для первинних побудов. Після цього на обраній площині створюється ескіз, що складається з точок і ліній, що представляють собою прообраз моделі або будь-якої її частини. Надалі до ескізу можна застосовувати різні операції та отримувати на його основі тривимірні об'єкти. Відповідно до цього модуль Design Modeler працює в двох режимах: режимі ескізування **Sketching** – коли створюється або редагується ескіз, і режимі моделювання **Modeling** – коли виконуються різні операції з ескізом для отримання об'ємних тіл. Переключення між зазначеними режимами виконується вибором однойменних закладок в нижній частині вікна дерева побудови.

В Design Modeler використовується звичайна прямокутна система декартових координат, при цьому кожна вісь має власний колір: вісь x – червоний, вісь y – зелений, вісь z – синій. Створюючи нову площину для моделювання, можна змінювати початкову орієнтацію пов'язаних з нею координатних вісей, але їх колір залишиться при цьому незмінним. Вибрати площину можна, натиснувши лівою кнопкою миші на її піктограму в дереві побудови. Будувати ескіз можна в будь-якій з координатних площин: Oxy – **XYPlane**, Oxz – **ZXPlane**, Oyz – **YZPlane**. Створити власну площину можна, вибравши пункт меню **Create / New Plane** або натиснувши кнопку  на панелі інструментів. Необхідні параметри створення нової площини задаються у вікні **Details View**.

Можна задати ім'я площині (параметр *Plane*) і створити її такими способами (рис. 3.8):

- *From Plane* – на основі існуючої площині;
- *From Face* – на основі існуючої поверхні тіла;
- *From Point and Edge* – по точці і ребру;
- *From Point and Normal* – по точці і лінії, яка буде перпендикулярна створюваній площині;
- *From Three Points* – за трьома існуючим точкам;
- *From Coordinates* – за координатами трьох точок, що задаються безпосередньо користувачем.



Рис. 3.8. Способи створення площини в Design Modeler


Для усіх способів створення площини, крім координатного, необхідно вказати базовий об'єкт або об'єкти – площину *Base Plane*, поверхню *Base Face*, точку *Base Point* та ребро *Base Edge* і т.д. Після вибору базових об'єктів до площини можна застосовувати різні перетворення, які можна розділити на такі групи:

- перетворення координатних вісей *Axes* – зміна напрямів, відображення вісей, вирівнювання по глобальних вісях;
- зміщення *Offset* – лінійне переміщення площини вздовж координатної вісі;
- поворот *Rotate* – поворот площини навколо вибраної координатної вісі.

Вибрати потрібне перетворення можна в списку для пункту *Transform* або в контекстному меню, якщо клацнути лівою кнопкою миші на цьому пункті. Можна поставити кілька таких перетворень і керувати послідовністю їх застосування: за допомогою команд *Move Transform Up* – зробити виділене перетворення попереднім і *Move Transform Down* – зробити виділене перетворення

подальшим. Видалити перетворення можна за допомогою команди ***Remove Transform***.

Після того як необхідні параметри створення площині задані, потрібно завершити команду, натиснувши кнопку ***Generate*** на панелі інструментів. По натисканні цієї кнопки Design Modeler виконує побудова площини і відображає її у вікні моделі. Взагалі, натискання кнопки ***Generate*** є завершальним етапом будь-яких побудов; вона також дозволяє перебудувати всю геометричну модель, якщо в неї внесені які-небудь зміни.

Кожна площина може містити один або кілька ескізів, але працювати в режимі ескізування можна тільки з одним ескізом. Для створення ескізу потрібно виділити потрібну площину в дереві побудови і натиснути кнопку  на панелі інструментів. Буде створений новий ескіз з ім'ям ***Sketch1***, який включається в дерево побудови як об'єкт, асоційований з обраною площиною. Викликаючи контекстне меню на ескізі в дереві побудови, можна керувати глобальними параметрами ескізу: приховати ескіз ***Hide Sketch***, перейти до виду з боку нормалі до ескізу ***Look at***, вивести взаємозв'язки ескізу з іншими об'єктами ***Show Dependencies***, перейменувати ***Rename*** і видалити ***Delete*** ескіз. Для початку роботи з ескізом рекомендується встановити вид по нормалі до нього ***Look at*** і перейти в режим ескізування, вибравши закладку ***Sketching***.

В режимі ескізування вікно дерева побудови ***Tree Outline*** змінюється на вікно інструментів ескізування ***Sketching Toolboxes***, яке містить такі групи (рис. 3.9):

- ***Draw*** – інструменти малювання ескізу;
- ***Modify*** – інструменти редагування ескізу;
- ***Dimensions*** – інструменти для завдання розмірів ескізу;
- ***Constraints*** – інструменти для завдання обмежень і геометричних умов між елементами ескізу;
- ***Settings*** – параметри сітки вікна побудови ескізу.

Рекомендується наступний загальний порядок побудови ескізу: за допомогою інструментів малювання зобразити ескіз, не враховуючи розміри його окремих елементів. При цьому можуть знадобитися інструменти з групи ***Modify*** для редагування геометричних об'єктів або ***Constraints*** – для завдання обмежень. Після того як загальний контур ескізу створений, потрібно задати

йому необхідні розміри і завершити побудову ескізу натисканням кнопки *Generate*.

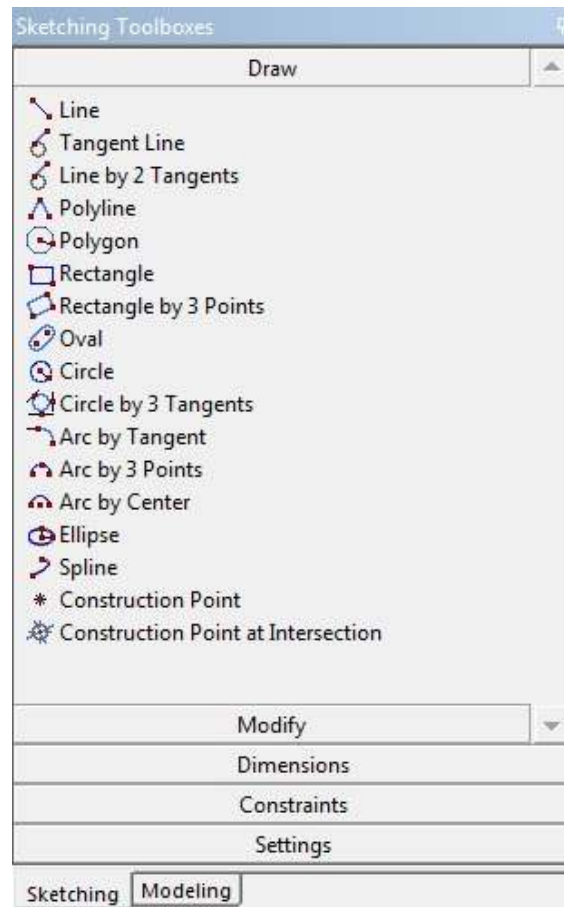


Рис. 3.9. Групи інструментів ескізування в *Sketching Toolboxes*

Перш ніж малювати ескіз, можна задати сітку із заданими параметрами, що відображається у вікні побудови. З її допомогою легко створювати геометричні об'єкти необхідних розмірів, орієнтуючись по елементам сітки. При побудові геометричних об'єктів буде активна прив'язка курсору до вузлів сітки, також можна налаштувати додаткові позиції прив'язки всередині елемента сітки.

Всі необхідні параметри сітки задаються у групі *Settings* вікна *Sketching Toolboxes*. Характеристики параметрів сітки:

- відображення сітки *Grid*. Параметр містить дві опції: *Show in 2D* – відображати сітку у вікні побудови і *Snap* – активувати прив'язку покажчика до вузлів сітки;

- розмір основного елемента сітки *Major Grid Spacing*. Параметр визначає відстань між вузлами основних елементів сітки. Основні елементи сітки зображуються суцільними лініями;

- число розбиття основного елемента *Minor-Steps per Major*. Параметр визначає кількість поділок всередині основних елементів. Додаткові елементи, що отримані внутрішнім розбиттям, зображуються штриховими лініями; значення, яке дорівнює одиниці, означає відсутність внутрішнього розбиття;

- прив'язка всередині додаткових елементів *Snaps per Minor*. Параметр задає число рівновіддалених точок прив'язки усередині додаткових елементів, отриманих розбиттям основних елементів. Точки прив'язки на екрані не відображаються, їх наявність призводить до того, що при переміщенні покажчика всередині додаткового елемента він буде прив'язуватися до точок, рівновіддалених одна від одної і від граничних точок елемента. Значення, яке дорівнює одиниці, означає прив'язку тільки до граничних точок додаткових елементів.

Для створення ескізу використовуються різні інструменти з груп *Draw*, *Modify*, *Dimensions*, *Constraints*.

3.3. ІНСТРУМЕНТИ МАЛЮВАННЯ

Design Modeler реалізує стандартні команди для малювання найпростіших елементів ескізу. Коротка характеристика команд групи *Draw* представлена в наступному переліку:

- Простий відрізок *Line*. Дозволяє побудувати відрізок шляхом зазначення початкової та кінцевої точки;

- Відрізок, дотичний до об'єкта *Tangent Line*. Дозволяє побудувати відрізок по дотичній до заданого об'єкта в обраній точці. Натиснувши та утримуючи ліву кнопку миші на вибраній точці об'єкта, потрібно перетягнути покажчик до кінцевої точки відрізка;

- Відрізок, дотичний до двох об'єктах *Line by 2 Tangents*. Аналогічно попередній команді будується відрізок по дотичній до двох вибраних об'єктів;

- Полілінія *Polyline*. Дозволяє побудувати ламану лінію. Після побудови останньої ланки ламаної потрібно завершити команду,

викликавши натисненням правої кнопки миші контекстне меню і вибравши пункт ***Open End***. Якщо потрібно замкнути ламану, то потрібно вибрати пункт ***Closed End***;

- Багатокутник ***Polygon***. Дозволяє побудувати правильний багатокутник з заданим числом кутів. Для побудови потрібно вказати лише його центр і задати число кутів в параметрі n ;

- Прямокутник ***Rectangle***. Дозволяє побудувати прямокутник, вказавши дві крайні точки його діагоналі. Для побудови прямокутника по трьох точках потрібно вибрати команду ***Rectangle by 3 Points***;

- Овал ***Oval***. Дозволяє побудувати фігуру, обмежену двома паралельними відрізками і дотичними до них дугами кіл. Для побудови необхідно вказати центри дуг кіл і їх радіус;

- Коло ***Circle***. Дозволяє побудувати коло, вказавши його центр і радіус. Для побудови кола, дотичного до трьох об'єктів, необхідно скористатися командою ***Circle by 3 Tangents***;

- Дуга ***Arc by Tangent***. Дозволяє побудувати дугу, дотичну до заданого відрізка в початковій і кінцевій точках. Для побудови необхідно задати початкову і кінцеву точки відрізка, при цьому має значення послідовність їх завдання. Також дугу можна побудувати за трьома її точках ***Arc by 3 Points*** або вказавши центр дуги і дві її точки ***Arc by Center***;

- Еліпс ***Ellipse***. Дозволяє побудувати еліпс, вказавши його центр і дві точки;

- Гладка крива ***Spline***. Дозволяє побудувати криву, вказуючи її характерні точки перегину або скруглення. Порядок побудови аналогічний команді ***Polyline***. Для завершення команди потрібно викликати контекстне меню і вибрати один з наступних пунктів: незамкнута крива ***Open End***, незамкнута крива з характерними точками ***Open End with Points***, замкнута крива ***Closed End***, замкнута крива з характерними точками ***Closed End with Points***;

- Геометрична точка ***Construction Point***. Дозволяє задати точку для геометричних побудов. Якщо потрібно задати точку, яка є перетином двох кривих, то потрібно вибрати команду ***Construction Point at Intersection***, після чого вказати на об'єкти, що перетинаються.

Вибір команди побудови здійснюється натисканням на неї лівою кнопкою миші у вікні інструментів ескізування **Sketching Tool Boxes**. Для скасування вибору потрібно натиснути клавішу **Esc**. Будь-яку побудову можна скасувати, повернувшись до попереднього стану, для цього потрібно натиснути кнопку **Undo** на панелі інструментів. Повторення скасованого кроку виконується натисканням кнопки **Redo**.

Стан команди геометричної побудови відображається в нижньому рядку вікна побудови. В ній даються інструкції з поточного кроку команди, тобто описуються дії, яких команда очікує від користувача. В процесі виконання команди геометричної побудови можливий відкат на один крок назад. Для цього потрібно викликати контекстне меню, натиснувши правою кнопкою миші в будь-якому місці вікна побудови, і вибрати пункт **Back**.

Кожен побудований геометричний об'єкт має ряд властивостей, які відображаються при його виділенні у вікні **Details View**.

3.4. ІНСТРУМЕНТИ РЕДАГУВАННЯ ЕСКІЗУ

Інструменти редагування ескізу дозволяють змінювати створені геометричні об'єкти. Команди групи **Modify** та їх характеристика представлені в наступному переліку:

- **Скруглення кута *Fillet***. Виконує скруглення кута, утвореного двома відрізками. Для цього потрібно виділити відрізки, що утворюють кут і задати радіус скруглення в параметрі **Radius**. Скруглення може бути виконано і між відрізками, що не перетинаються. Вибравши команду і викликаючи потім контекстне меню правою кнопкою миші, можна керувати параметрами побудови скруглення: усікати обидва відрізка **Trim Both**, усікати один і них **Trim 1st**, **Trim 2nd**, нічого не усікати **Trim None**, побудувати повне коло **Full Circle**;

- **Фаска *Chamfer***. Створює фаску виділеного кута. Довжина фаски задається параметром **Length**. Для виконання команди потрібно послідовно виділити два відрізки, що утворюють кут. Параметри побудови фаски задаються через контекстне меню і аналогічні команді скруглення;

- Кут **Corner**. Утворює кут по двох відрізках шляхом добудовування або усічення їх до точки перетину. Для виконання команди потрібно послідовно виділити два відрізки, після утворення кута частина відрізка, що виступає, автоматично буде скорочуватися;

- Усічення **Trim**. Усікає відрізок або криву до найближчої точки перетину з іншим відрізком або кривою; якщо такого перетину немає, то об'єкт видаляється повністю. Для виконання команди потрібно клікнути на частину, що потрібно усікти. Якщо при усіканні відрізка потрібно не враховувати координатні вісі, то потрібно відзначити галочкою пункт **Ignore Axis**;

- Продовження **Extend**. Добудовує виділений відрізок до перетину з найближчим відрізком або віссю. Для виключення координатних вісей використовується аналогічний параметр **Ignore Axis**;

- Поділ **Split**. Розділяє відрізок або криву на частини. Вибравши команду, необхідно викликати контекстне меню і вказати спосіб поділу: **Split at Select** – розділити, клікнувши мишею на місці розділення на необхідному об'єкті, **Split Edges at Point** – розділити на частини, вказавши існуючу точку на об'єкті; **Split Edges at All Points** – розділити на частини за існуючими точкам на об'єкті; **Split Edge Into n Equal Segments** – розділити об'єкт на *n* частин однакової довжини;

- Зміна **Drag**. Змінює положення і розміри виділених об'єктів. Для виконання команди потрібно, натиснувши та утримуючи ліву клавішу миші на будь-якій точці об'єкта, переміщати покажчик. Зміна об'єкта залежить від накладених на нього обмежень. За допомогою цієї команди можна переміщати відрізки, змінювати їх довжину, напрямок, змінювати розміри геометричних фігур;

- Вирізання **Cut**. Видаляє виділені об'єкти в буфер для подальшої вставки їх в інше місце ескізу. При цьому використовується поняття «точка прив'язки» **Paste Handle** – позиція, з якою зіставляються виділені об'єкти. Виконання команди відбувається в кілька етапів. Спочатку необхідно запустити команду, клікнувши на ній, і виділити об'єкти для видалення. Наступний крок полягає у виклику контекстного меню (правою кнопкою миші) і вказівці точки прив'язки: **End/Set Paste Handle** –

завершити виділення і вказати точку прив'язки для нього, **End/Use Plane Origin as Handle** – завершити виділення і задати в якості точки прив'язки початок координат поточної площині, **End/Use Default Paste Handle** – завершити виділення і задати в якості точки прив'язки початкову точку першого виділеного об'єкта. Пункт **Clear Selection** дозволяє очистити поточне виділення. Після вибору точки прив'язки виділені об'єкти видаляються в буфер, потім кліком миші потрібно вказати їх нове місце розташування. При цьому буде запущена команда вставки **Paste**, яка дозволяє задати два параметри: кут повороту (r) і масштабний множник (f) для попереднього перетворення об'єктів, що вставляються. Вибрати команду перетворення можна в контекстному меню (рис. 3.10), що викликається натисканням правої кнопки миші у вікні побудови.

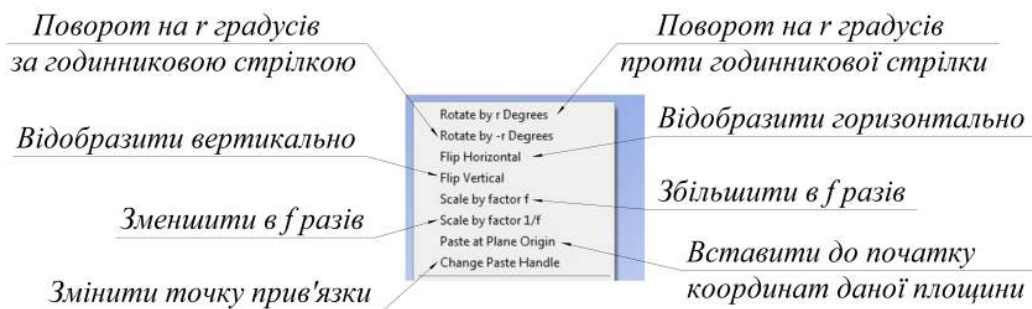


Рис. 3.10. Контекстне меню команди **Paste**

Після вибору команди потрібно клікнути лівою кнопкою миші на місце вставки і перетворені об'єкти будуть вставлені з буфера. Процедуру перетворення і вставки можна, при необхідності, повторити кілька разів. Для завершення команди потрібно знову викликати контекстне меню і вибрати пункт **End**. Для скасування команди на будь-якому етапі виконання потрібно натиснути клавішу **Esc**. Якщо спочатку вибрати об'єкти, а потім запустити команду, то виділення буде вважатися завершеним і далі потрібно буде вказувати точку прив'язки;

- Копіювання **Copy**. Виконує копіювання виділених об'єктів. Дана команда копіює виділені об'єкти в буфер, на відміну від команди **Cut**, яка виконує видалення в буфер; в іншому вони повністю аналогічні.

- Переміщення **Move**. Виконує переміщення об'єктів. Виконання команди аналогічно копіюванню, тільки виконується весь час з виділеними об'єктами і повторне застосування не створює нових об'єктів;
- Розмноження **Replicate**. Розмножує виділені об'єкти. Виконання команди аналогічно команді переміщення, а повторне застосування призводить до створення нових об'єктів;
- Дублювання **Duplicate**. Виконує копіювання виділених об'єктів в новий ескіз поточної площини. Перед виконанням команди потрібно створити новий ескіз в поточній площині (рис. 3.11), після цього виділити точки або криві у старому ескізі і активувати команду, клікнувши на ній правою кнопкою миші. Всі виділені об'єкти будуть скопійовані в новий ескіз;

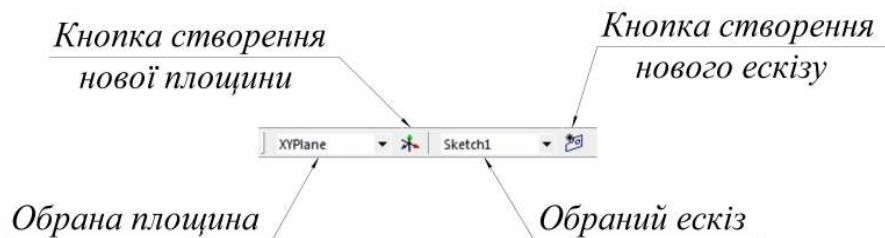


Рис. 3.11. Кнопки та списки керування ескізами

- Зсув **Offset**. Створює новий об'єкт, зміщений відносно виділеного. Спочатку потрібно активувати команду і виділити потрібні об'єкти. Для завершення виділення викликається контекстне меню правою кнопкою миші, в якому потрібно вибрати пункт **End Selection/Place Offset**. Потім за допомогою покажчика задати величину зсуву і, при кліку лівою кнопкою миші, створити зміщені об'єкти. Якщо спочатку виділити об'єкти, а потім активувати команду, то виділення буде вважатися завершеним;
- Редагування кривої **Spline Edit**. Дана команда призначена для редагування кривої, створеної командою **Spline**. Спочатку необхідно активувати команду і виділити криву. Після цього, натиснувши та утримуючи ліву кнопку миші на точці кривої, переміщати покажчик, змінюючи вигляд кривої. Додаткові опції команди доступні в контекстному меню і включають можливості додавання нових точок перегину або скруглення кривої, зміни керуючих точок і перебудови кривої.

3.5. ЗАВДАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ТА ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ

Після того, як створений основний контур ескізу, може знадобитися доробка його складових за допомогою введення обмежень і зв'язків, що встановлюються на взаємне розташування геометричних об'єктів. Це дозволяє виключити можливі помилки при сполученнях об'єктів, точно задати їх положення в просторі і по відношенню один до одного. Після накладення обмежень переміщення об'єкта може відбуватися тільки в напрямках, що допускаються в'язами. Команди групи **Constraints**, які задають можливі обмеження та їх характеристики, представлені в наступному переліку:

- Незмінюваність об'єкта **Fixed**. Накладення даного зв'язку забороняє об'єкту будь-які переміщення і зміни розмірів. Для завдання зв'язку потрібно виділити об'єкт і активувати команду (зазначені дії можна виконати і в зворотній послідовності). Для відрізків можна залишити незафіксованими кінцеві точки – цим управляє параметр **Fixed Endpoints** – в цьому випадку можна змінювати довжину відрізка. Контур незмінного об'єкта зображується чорним кольором;
- Горизонтальність **Horizontal**. Накладення даного зв'язку встановлює горизонтальне положення виділеним відрізкам (паралельно вісі x). Якщо вибрано еліпс, то по осі x вирівнюється його велика піввісь;
- Вертикальність **Vertical**. Накладення даного зв'язку встановлює вертикальне положення виділеним відрізкам (паралельно вісі y). Якщо вибрано еліпс, то по осі y вирівнюється його велика піввісь;
- Перпендикулярність **Perpendicular**. Накладення даного зв'язку на два відрізка, що перетинаються, робить їх взаємно перпендикулярними. Якщо обрані дві криві, що перетинаються, то вони вирівнюються по перпендикулярності дотичних до них в точці перетину. Якщо спочатку виділити об'єкти, а потім активувати команду, то другий і всі наступні об'єкти будуть вирівняні перпендикулярно першому;

- Дотик ***Tangent***. Накладення даного зв'язку на два об'єкти встановлює їх у дотик один з одним. Якщо спочатку виділити об'єкти, а потім активувати команду, то другий і всі наступні об'єкти будуть вирівняні в дотик до першого;

- Збіг ***Coincident***. Накладення даного зв'язку на дві точки, два відрізки або точку і криву об'єкта встановлює їх збіг. Дві гладкі криві не можна зробити співпадаючими;

- Середина ***Midpoint***. Накладення даного зв'язку на відрізок і будь-яку його точку переміщує останню в середину відрізка. Можна виділити кілька пар відрізок-точка перед активацією цієї команди;

- Симетрія ***Symmetry***. Накладення даного зв'язку на дві точки або два відрізки робить їх симетричними щодо обраної вісі. Для завдання зв'язку потрібно активувати команду, вибрати вісь симетрії, потім вказати два однорідних об'єкта (точки, відрізки). Для двох кривих можна задавати симетрію між їх кінцевими точками. Змінити вісь симетрії можна в контекстному меню команди (параметр ***Select new Symmetry axis***);

- Паралельність ***Parallel***. Накладення даного зв'язку на два відрізки робить їх паралельними один одному. Якщо в якості другого об'єкта обраний еліпс, то паралельними стають його велика піввісь і виділений відрізок. Контекстне меню команди, що викликається натисканням правої кнопки миші, дозволяє задавати опцію для множинного вибору (параметр ***Select Multiple***). При цьому виділений другий об'єкт стає першим для наступної пари і т.д.;

- Концентричність ***Concentric***. Накладення даного зв'язку на дуги, кола або еліпси робить їх центри співпадаючими. Контекстне меню, аналогічно попередній команді, дозволяє задавати опцію для множинного вибору;

- Однакові радіуси ***Equal Radius***. Накладення даного зв'язку на дуги або кола робить їх радіуси однаковими. Контекстне меню, аналогічно попередній команді, дозволяє задавати опцію для множинного вибору;

- Однакова довжина ***Equal Length***. Накладення даного зв'язку на два відрізки робить їх довжини однаковими. Контекстне меню, аналогічно попередній команді, дозволяє задавати опцію для множинного вибору;

- Однакова відстань *Equal Distance*. Накладення даного зв'язку на чотири виділені точки або відрізка попарно вирівнює відстань між ними. За допомогою цієї команди також можна вирівнювати відстані між точками і відрізками. Множинний вибір за допомогою опції в контекстному меню дає можливість вирівнювати відстані в послідовних парах об'єктів (1-2 і 2-3, 2-3 і 3-4 і т.д.).

При побудові ескізу Design Modeler намагається автоматично визначати деякі обмеження, такі як: вертикальне чи горизонтальне положення, дотик об'єктів, збіг точок, концентричність кіл та ін.

Команда *AutoConstraints* керує автовизначенням обмежень. Вона має два режими: *Cursors* та *Global*. У режимі *Cursors* автоматично визначаються збіг, торкання і перпендикулярність для нових об'єктів і тих, на які вказує у поточний момент покажчик миші. У режимі *Global* визначаються всі обмеження для всіх об'єктів поточної площини.

В процесі роботи з ескізом Design Modeler відстежує всі задані обмеження. Якщо ескіз містить безліч геометричних об'єктів і зв'язків між ними, або площина містить багато ескізів, то час операцій редагування, переміщення може відчутно збільшуватися. Для прискорення роботи в цьому випадку рекомендується тимчасово відключати автовизначення обмежень. Іноді буває необхідно побудувати об'єкти дуже близько один до одного, що може бути неможливим, оскільки Design Modeler автоматично розпізнає будь-який зв'язок між ними. Для цього також можна тимчасово змінити параметр *AutoConstraints*.

3.6. ЗАВДАННЯ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕСКІЗУ

Завершальним етапом у створенні ескізу є завдання розмірних параметрів для геометричних розмірів, таких як довжини відрізків, величини кутів, радіуси або діаметри кіл, відстані до координатних вісей та ін. Створений геометричний об'єкт, наприклад відрізок, звичайно, має деяку довжину, але Design Modeler вважає його таким, що не має розмірних параметрів. Строго кажучи, даний етап не є обов'язковим, але, тим не менш, він необхідний для подальшого керування геометричною моделлю.

Для того щоб вільний відрізок був повністю визначений, необхідно задати йому наступні параметри: довжину, відстані від будь-якої його точки до координатних вісей, кут між відрізком і координатною віссю. Контур повністю визначених об'єктів стає синім. За наявності обмежень число необхідних розмірних параметрів зменшується. Design Modeler самостійно відстежує кількість заданих розмірних параметрів, і якщо їх введено більше ніж потрібно, об'єкт стає перевизначеним *over-constrained* і його контур виділяється червоним кольором.

Завдання розмірних параметрів виконується за допомогою команд групи *Dimensions*. Найпростішим способом є використання команди *Semi-Automatic*. Після активізації команди модуль Design Modeler сам пропонує призначити необхідні параметри для геометричних об'єктів; команда завершується після того, як всі параметри будуть задані. Потім, попередньо виділяючи розмірний параметр, задається його ім'я і значення у вікні *Details View*. Контекстне меню команди містить опції: *Skip* – пропуск пропонованого розмірного параметра і перехід до наступного; *Exit* – завершення команди без вставки поточного розмірного параметра; *Continue* – продовження роботи команди.

Для завдання розмірного параметра потрібно спочатку активувати відповідну команду групи *Dimension*; опис команд представлено далі у переліку. Потім послідовно виділяються два об'єкти, після чого потрібно клікнути лівою кнопкою миші на бажане місце розташування імені параметра. Design Modeler створить розмірний параметр, відобразить на екрані розмірні лінії, присвоїть йому ім'я, в якості значення параметра буде встановлено поточну відстань або кут. Деякі команди мають опції, що задаються через контекстне меню.

- Горизонтальний розмір *Horizontal*. Дозволяє задавати розмірний параметр довжини по горизонталі (паралельно вісі x). Якщо в якості об'єктів вибираються точка та відрізок, то, залежно від послідовності вибору, буде створений параметр відстані по горизонталі між точкою і однією з точок відрізка;

- Вертикальний розмір *Vertical*. Дозволяє задавати розмірний параметр довжини по вертикалі (паралельно вісі y). В іншому команда аналогічна попередній;

- Довжина ***Length/Distance***. Дозволяє задавати розмірний параметр довжини відрізка або відстані між двома точками. За допомогою цієї команди можна задати довжину кривої, але можна задавати відстань між її початковою і кінцевою точками;
- Радіус ***Radius***. Дозволяє задавати розмірний параметр радіусу кола, еліпса або їх дуг. Для еліпса можна вказати радіус великої півосі ***RMX*** і малої півосі ***RMN***, клікнувши на відповідні точки кривої;
- Діаметр ***Diameter***. Дозволяє задавати розмірний параметр діаметра кола або дуги. Дана команда незастосовна для еліпса;
- Кут ***Angle***. Дозволяє задавати розмірний параметр кута між двома відрізками або відрізком і віссю. Послідовність вибору об'єктів визначає вид кута між ними: гострий або тупий. Змінити вигляд кута можна в контекстному меню команди (параметр ***Alternate Angle***);
- Загальний розмір ***General***. Дозволяє задавати розмірні параметри всіх типів. Необхідно послідовно вказати на два об'єкти, наприклад, дві точки, точку і відрізок, два відрізки і т.п. При необхідності тип розмірного параметра можна вибрати самому. Для цього потрібно викликати контекстне меню команди, натиснувши правою кнопкою миші в будь-якому місці вікна побудови і вибрати необхідний тип.

Розмірні параметри в будь-який момент можуть бути відредаговані. Для цього потрібно виділити розмірний параметр у вікні побудови і всі його опції відобразяться у вікні ***Details View*** (рис. 3.12). У цьому вікні можна перейменувати розмірний параметр та змінити його значення ***Value***.

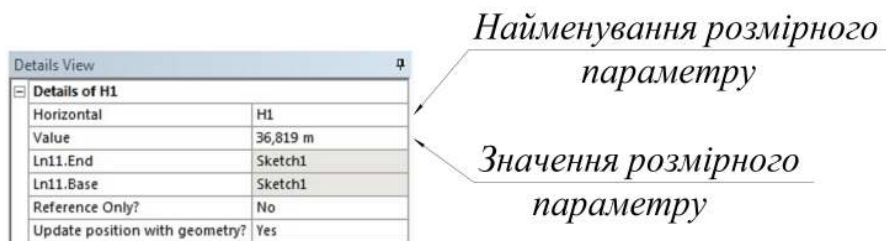


Рис. 3.12. Характеристики розмірного параметру у вікні ***Details View***

Якщо розмірний параметр є інформаційним, то можна вказати це, задавши опцію ***Reference Only*** ; в цьому випадку його значення

стає незмінним. Редагувати розмірний параметр можна і за допомогою команди *Edit*.

Змінити розмірні лінії на ескізі можна за допомогою команди *Move*. Активувавши команду потрібно виділити розмірний параметр і, утримуючи на ньому ліву кнопку миші, перемістити покажчик в нове положення розмірної лінії.

Для більшої візуалізації розмірного параметра у вікні побудови передбачена команда *Animate*, яка циклічно змінює значення параметра і відображає зміни на екрані. Активувавши команду, потрібно виділити необхідний розмірний параметр. Кількість циклів (тривалість анімації) можна встановити параметром *Cycles*.

Типово на лінії розмірного параметра у вікні побудови відображається тільки його ім'я. Разом з ім'ям можна виводити також і значення параметра. Керування відображенням здійснюється командою *Display Values*. Опція *Values* дозволяє виводити значення розмірного параметра, опція *Names* – ім'я параметра. Можна вибрати або одну з цих опцій, або обидві відразу.

Всі створені ескізи відображаються в дереві побудови в своїх площинах як підлеглі об'єкти. Design Modeler дозволяє виконувати копіювання ескізу з однієї площини в іншу. Для цього використовується команда *Sketch Instance*, яка знаходиться в контекстному меню, що викликається кліком правої кнопки миші на цільовій площині. Параметри команди завантажуються у вікно *Details View* і розглядаються нижче:

- *Base Sketch* – ескіз, який буде скопійований (базовий ескіз). Для вибору ескізу в якості базового потрібно клікнути по ньому в дереві побудови. Площина, в яку буде скопійований ескіз, повинна розташовуватися після базового ескізу;

- *Base X*, *Base Y* – координати точки прив'язки в копійованому ескізі. Значення вводяться вручну;

- *Instance X*, *Instance Y* – координати точки прив'язки для вставки в новому ескізі;

- *Rotate Angle* – кут повороту навколо точки прив'язки в новому ескізі *Instance X*, *Instance Y*;

- *Scale* – масштабний коефіцієнт для нового ескізу.

Після завдання всіх необхідних параметрів потрібно натиснути кнопку ***Generate***. Design Modeler скопіює обраний ескіз в нову площину. Один ескіз може бути скопійований в кілька площин, але його неможливо видалити, поки не видалені всі його копії. Побудова ескізів є важливим етапом розробки геометричної моделі. Ескізи виступають як необхідні параметри в командах створення об'ємних поверхонь і тіл.

ЛЕКЦІЯ 4

СТВОРЕННЯ ОБ'ЄМНИХ МОДЕЛЕЙ

4.1. Найпростіші операції моделювання.

4.2. Керування елементами в дереві побудови.

Після розробки ескізу до нього можуть бути застосовані операції, що дозволяють отримати об'ємні тіла. Для цього необхідно вийти з режиму ескізування і перейти в режим моделювання, вибравши вкладку **Modelling** в нижній частині дерева побудови. Кнопки для найбільш часто використовуваних при моделюванні операцій винесені на панель інструментів. Відповідні команди мають ряд параметрів, які необхідно вказувати у вікні **Details View**, а для завершення команди потрібно натиснути кнопку **Generate**.

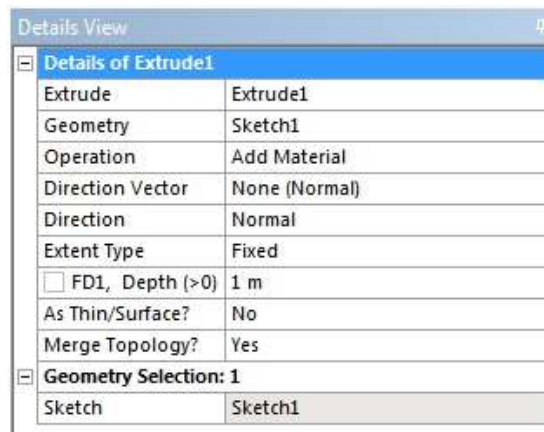
Команди моделювання можна розділити на три групи:

1. найпростіші команди, що створюють об'ємні тіла на основі ескізів;
2. команди перетворення, що виконують різні операції з об'ємними моделями;
3. спеціальні команди моделювання.

4.1. НАЙПРОСТІШІ ОПЕРАЦІЇ МОДЕЛЮВАННЯ

Далі будуть розглянуті найпростіші операції моделювання: лінійне видавлювання, обертання, протяжка уздовж контуру, протяжка по перетинах, створення пустотілих моделей.

Лінійне видавлювання **Extrude** дозволяє отримати об'єм за рахунок прямолінійного зміщення обраного ескізу на деяку відстань в заданому напрямку. Основні опції команди показані на рис. 4.1 і розглянуті в наступному переліку:



Details of Extrude1	
Extrude	Extrude1
Geometry	Sketch1
Operation	Add Material
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	1 m
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes
Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch1

Рис. 4.1. Характеристики лінійного видавлювання *Extrude*

- **Base Object** – ім'я ескізу, використовуваного для побудови об'єму. Потрібний ескіз вибирається з дерева побудови кліком лівої кнопки миші;
- **Operation** – вид операції видавлювання, який вказує особливості побудови об'єму. За умовчанням вибрано **Add Material**, що означає заповнення одержуваного об'єму. Якщо у вікні побудови вже є інші тіла, то цей параметр може мати значення **Cut Material** – видалення матеріалу в одержуваному об'ємі, або **Imprint Faces** – отримувана поверхня «карбується» в об'ємні тіла, через які вона проходить. Значення **Add Frozen** дозволяє створити зафіксоване тіло;
- **Direction Vector** – лінія, що задає напрямок видавлювання. Для завдання цього параметра необхідно вибрати у вікні моделі відрізок, ребро або координатну вісь. За замовчуванням задане **None Normal**, що означає видавлювання по нормалі до площини ескізу;

- **Direction** – напрямок вздовж лінії видавлювання. Даний параметр може приймати такі значення: **Normal** – у напрямку від початкової точки до кінцевої для лінії видавлювання, **Reversed** – протилежний напрямок, **Both Symmetric** – видавлювання в обох напрямках на однакову відстань, **Both Asymmetric** – видавлювання в обох напрямках на різні відстані.

- **Extent Type** – тип видавлювання. За замовчуванням задане **Fixed** – видавлювання на фіксовану відстань, але також може бути **Through All** – видавлювання через всі поверхні, **To Next** – видавлювання до найближчої поверхні, **To Face** – видавлювання до вказаної межі тіла без зміни поверхні контакту, **To Surface** – видавлювання до вказаної межі тіла з відповідною зміною поверхні контакту (рис. 4.2);

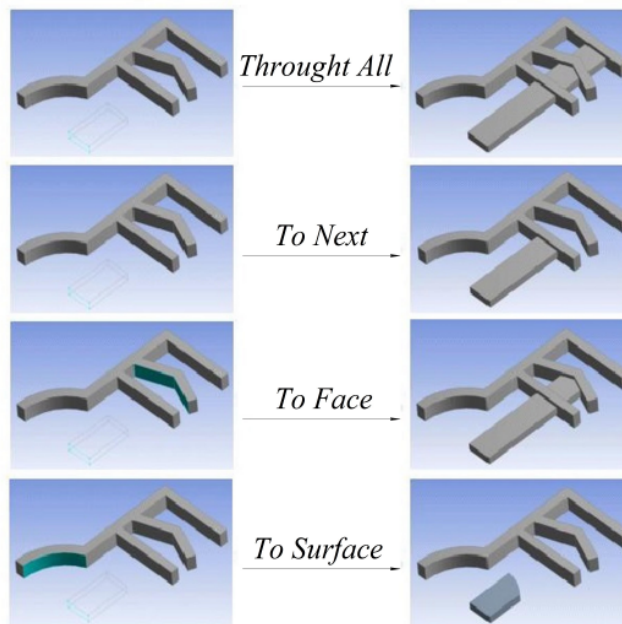


Рис. 4.2. Типи видавлювання, які налаштовуються пунктом *Extent Type*

- **Depth** – довжина, на яку буде здійснюватися видавлювання. Значення вводиться вручну і має бути невід’ємним. Якщо базовий ескіз для операції видавлювання містить одну точку, то результатом буде одномірне тіло **Line Body**, якщо відрізок або незамкнений контур – то оболонка **Surface Body**.

- Обертання **Revolve** дозволяє отримати тіло обертання шляхом повороту базового ескізу навколо заданої вісі (рис. 4.3). Опції **Base Object**, **Operation** та **Direction** аналогічні команді **Extrude**. Опція

Axis задає вісь обертання – це може бути відрізок, ребро або координатна вісь.

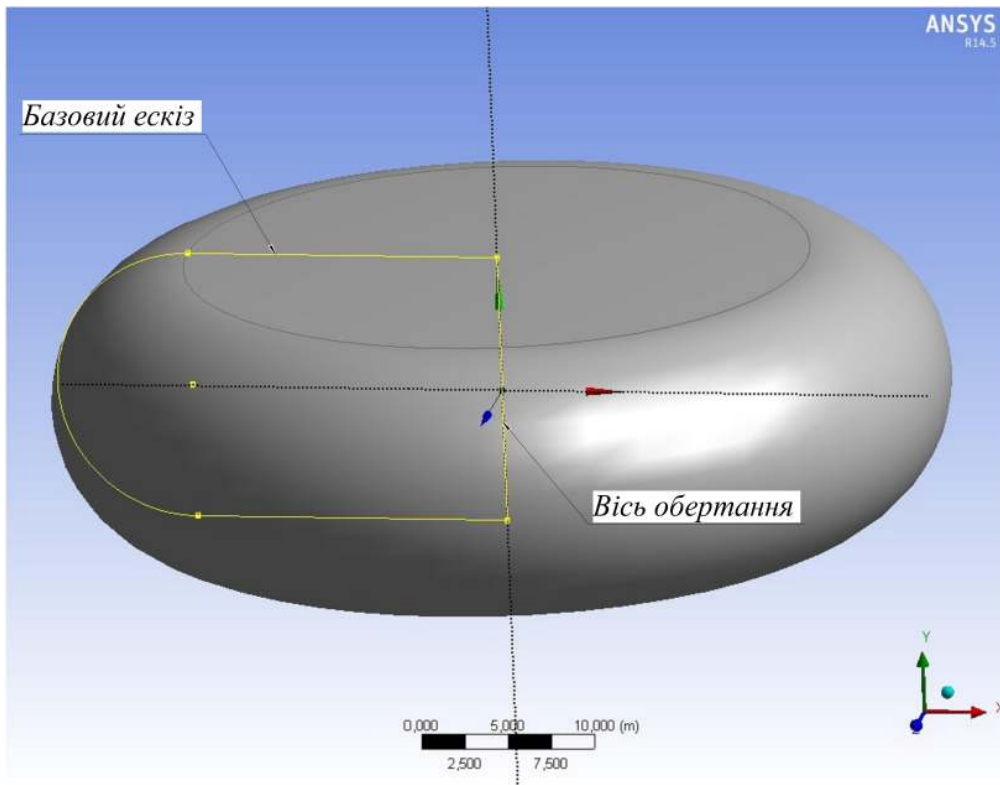


Рис. 4.3. Результат застосування команди *Revolve*

Параметр *Angle* задає кут повороту. Для коректного виконання команди вісь обертання не повинна перетинати базовий ескіз. У разі якщо контур в базовому ескізі незамкнутий, то буде побудована оболонка. Базовий ескіз може мати скільки завгодно контурів, але вони не повинні перетинатися. Задаючи опції *As Thin/Surface?* значення *Yes*, можна отримувати поверхню обертання.

Протяжка уздовж контуру *Sweep* дозволяє отримати об'єм шляхом переміщення базового ескізу уздовж напрямної кривої. Основні параметри команди:

- *Profile* – базовий ескіз для створення об'єму;
- *Path* – ескіз з направляючою кривою;
- *Alignment* – спосіб вирівнювання контуру базового ескізу по відношенню до напрямної кривої. За замовчуванням задається як *Path Tangent* – контур зберігає первісну орієнтацію по відношенню до напрямної кривої. Значення *Global Axis* зберігає орієнтацію контуру щодо вісей координат;

- **Scale** – масштабний коефіцієнт. Дозволяє масштабувати контур базового ескізу в кінці направляючої кривої;
- **Twist Specification** – параметр, що дозволяє задавати опції при повороті контуру базового ескізу навколо направляючої кривої. За замовчуванням даний параметр відключений (**No Twist**) і може приймати значення **Turns** – в цьому випадку задається число обертів навколо направляючої кривої і **Pitch** – задається довжина шляху, пройденого контуром при повороті. Значення для **Turns** та **Pitch** можуть бути негативними – це означає поворот за годинниковою стрілкою.

Приклади до команди **Sweep** показані на рис. 4.4, 4.5.

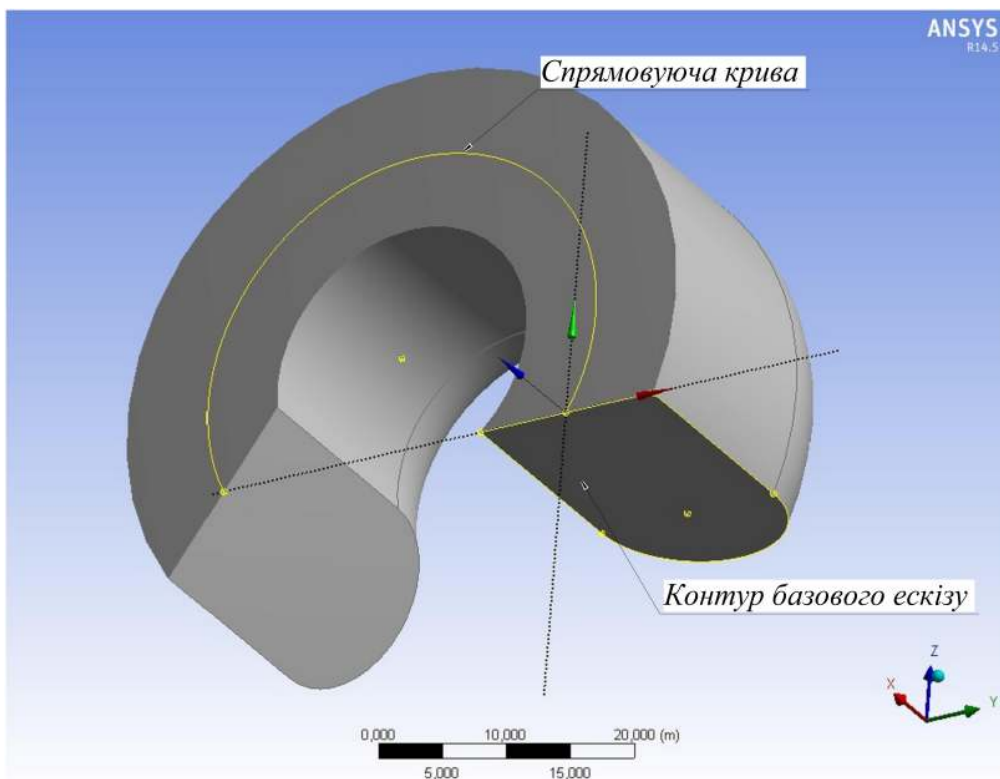


Рис. 4.4. Результат застосування команди **Sweep**

Необхідно відзначити, що контур і спрямовуюча крива повинні перебувати в різних ескізах. Базовий ескіз може містити скільки завгодно як контурів (у тому числі і незамкнутих), так і окремі точки. Напрямна крива може бути замкнутою, але вона обов'язково має бути єдиним контуром в ескізі.

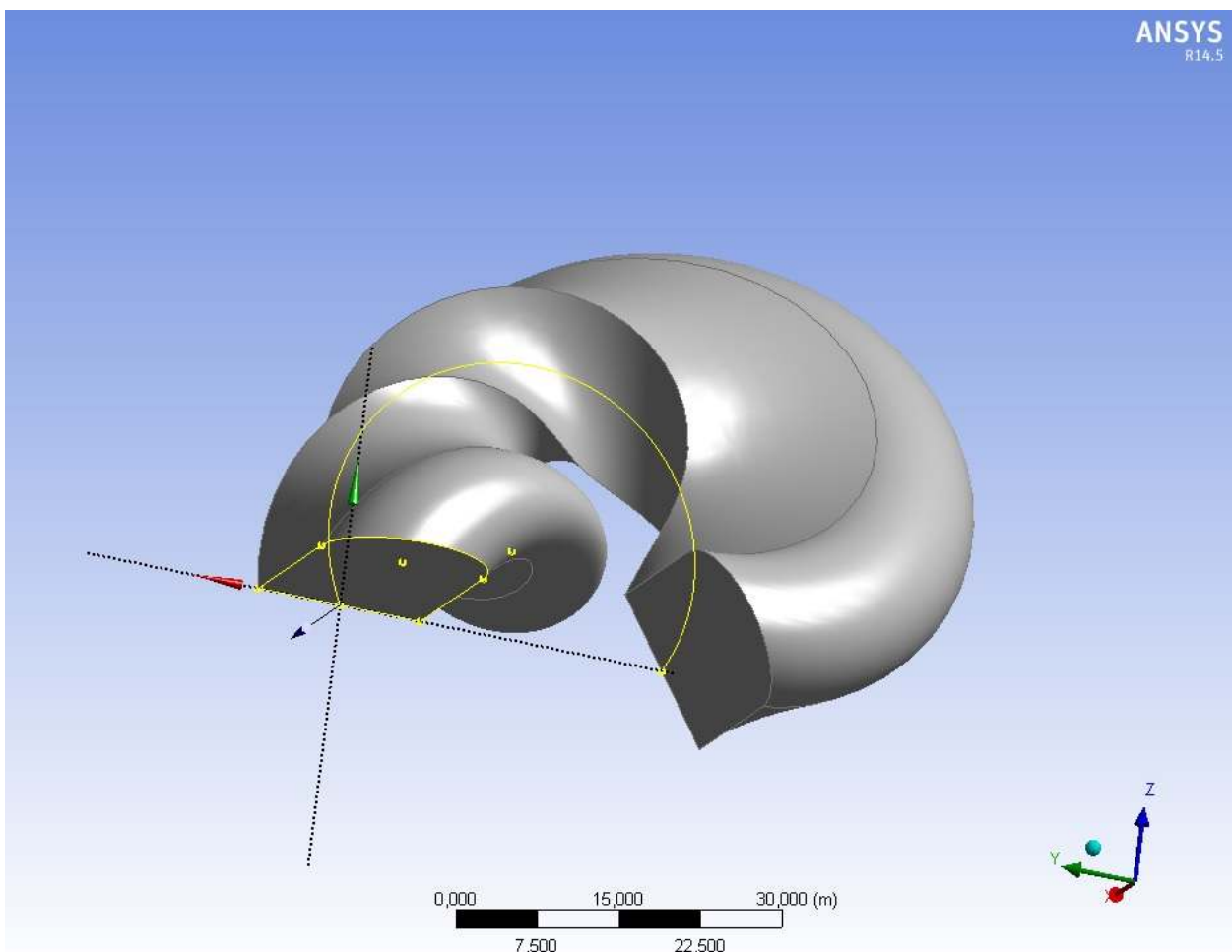


Рис. 4.5. Результат застосування команди Sweep з параметром Twist Specification

Протяжка по перетинах Skin/Loft. Створює об'єм, отриманий шляхом протягування по заданих перетинах вздовж направляючої ламаної, що проходить через кутові точки контурів. Параметр **Profiles** задає ескізи, які містять необхідні перетини. В операції можуть брати участь кілька ескізів, що виділяються в дереві побудови кліком лівої кнопки миші, утримуючи клавішу **Ctrl**. Приклад використання команди зображений на рис. 4.6.

Після вибору ескізів для побудови Design Modeler автоматично формує ламану лінію, вздовж якої буде відбуватися протяжка – **guide line**. При необхідності її можна змінити, викликавши контекстне меню команди і вибравши пункт **Fix Guide Line**. Для зміни потрібно виділити точку ламаної і вказати їй нове місце розташування. Пункт **Continue Sketch Selection** дозволяє повернутися до вибору ескізів.

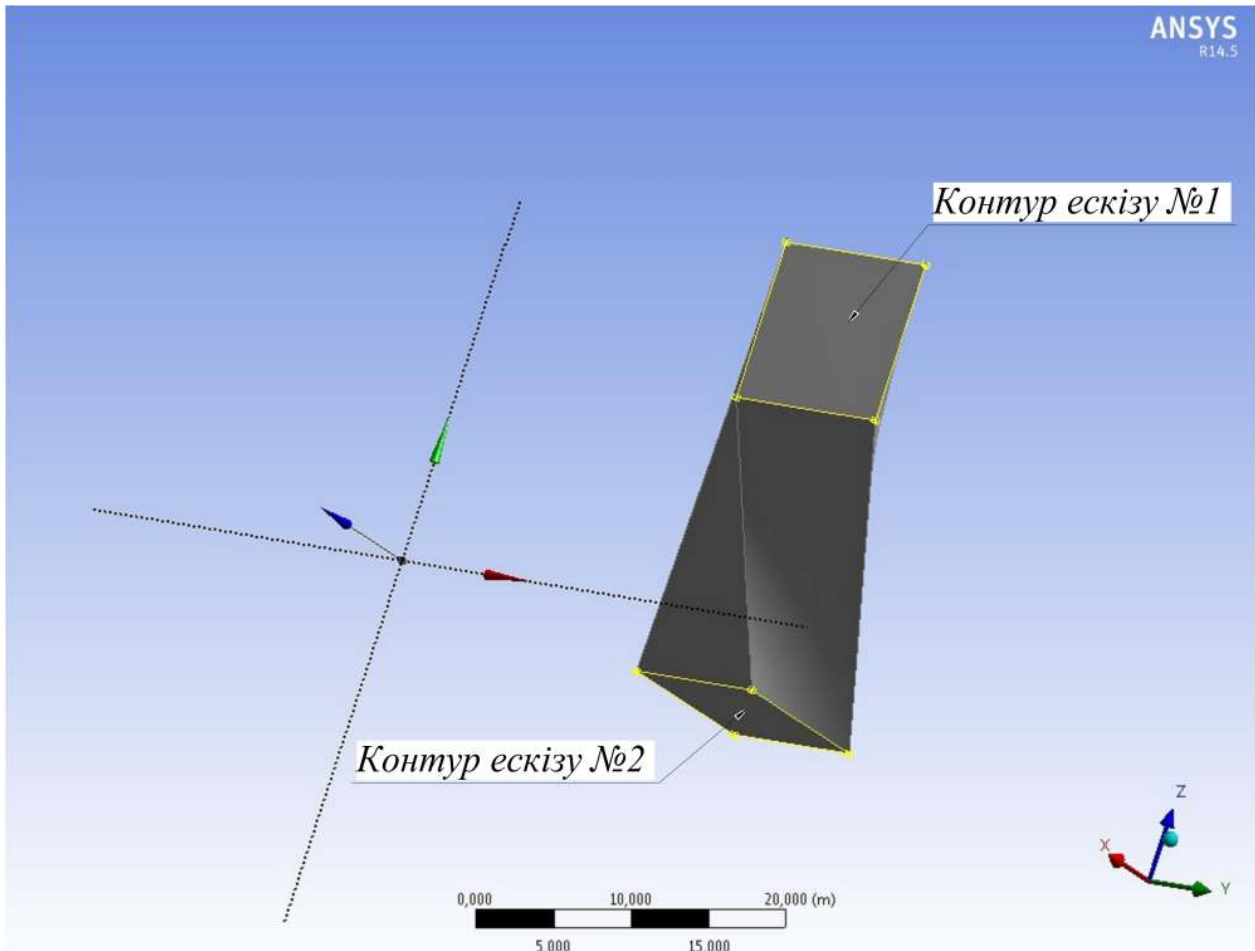


Рис. 4.6. Результат застосування команди *Skin/Loft*

Для коректного виконання команди ескізи, які беруть участь у побудові, повинні мати однакову кількість відрізків. Один з ескізів може містити тільки точку. Не можна використовувати незамкнуті контури разом із замкнутими.

Порядок проходження ескізів після вибору може бути змінений у вікні *Details View*. Для цього в процесі виконання команди необхідно викликати контекстне меню, натиснувши праву кнопку миші на потрібному ескізі в групі *Profiles* і вибрати один з наступних варіантів:

- *Move to Top* – перемістити ескіз в початок списку;
- *Move Up* – перемістити ескіз на позицію вгору;
- *Move Down* – перемістити ескіз на позицію вниз;
- *Move to Bottom* – перемістити ескіз в кінець списку.

Також можна видалити ескіз з побудови, вибравши пункт *Delete*.

Всі об'єкти, одержувані в режимі моделювання, відображаються в кінці дерева побудови. Вони бувають трьох типів:

1. **Line Body** – одновимірний об'єкт, відрізок або крива (ламана). Може бути створений за допомогою операції видавлювання, застосованої до точки, або командами **Lines From Points**, **Lines From Edges**, **Lines From Sketches**;

2. **Surface Body** – двовимірний об'єкт, оболонка. Типово має товщину, що дорівнює нулю, яка при необхідності може бути змінена вручну (параметр **Thickness**). Створюється шляхом видавлювання, обертання, протягування незамкнених контурів або за допомогою команд **Surface From Edges**, **Surface From Sketches**, **Surfaces From Faces**;

3. **Solid** – тривимірний об'єкт, тіло. Створюється операціями видавлювання, обертання, протягування, а також командами групи **Primitives**.

Зазначені об'єкти можуть об'єднуватися в групи **Parts** за допомогою команди **Form New Part** з контекстного меню. Даний прийом використовується для зручності генерації кінцево-елементної сітки і завдання початкових і граничних умов елементам групи.

Розглянуті операції є найбільш вживаними для побудови об'ємних моделей. У ряді випадків за допомогою цих операцій буває необхідно створити порожнисту всередині моделі. Для цього в командах **Extrude**, **Rotate**, **Sweep**, **Skin/Loft** передбачена опція **As Thin/Surface?**, яка дозволяє це зробити. За умовчанням вона відключена (значення **No**). Якщо включити цю опцію (значення **Yes**), то з'являються додаткові параметри: **Inward Thickness** – товщина стінки, відлічувана всередину контуру, **Outward Thickness** – товщина стінки, відлічувана назовні контуру. Задавши одну з них або обидві відразу можна отримати порожнисту модель із заданою товщиною стінок. Необхідно відзначити, що тип моделі – **Solid** в даному випадку не змінюється.

Для створення скруглення постійного радіуса використовується команда **Fixed Radius Blend**. У параметрі **Geometry** команди указують ребра, що підлягають скругленню, параметр **Radius** задає радіус скруглення. Якщо потрібно створити скруглення змінного радіуса, то для цього потрібно

використовувати команду **Variable Radius Blend**. Параметр **Transitions** цієї команди задає вид переходу від одного радіуса скруглення до іншого: **Smooth** – згладжений перехід, **Linear** – лінійний перехід. Значення **Start Radius**, **End Radius** визначають величини початкового і кінцевого радіусу скруглення. При виборі декількох ребер початкові і кінцеві скруглення можна задавати окремо для кожного ребра. Приклади заокруглень показані на рис. 4.7. Дана команда незастосовна до кіл.

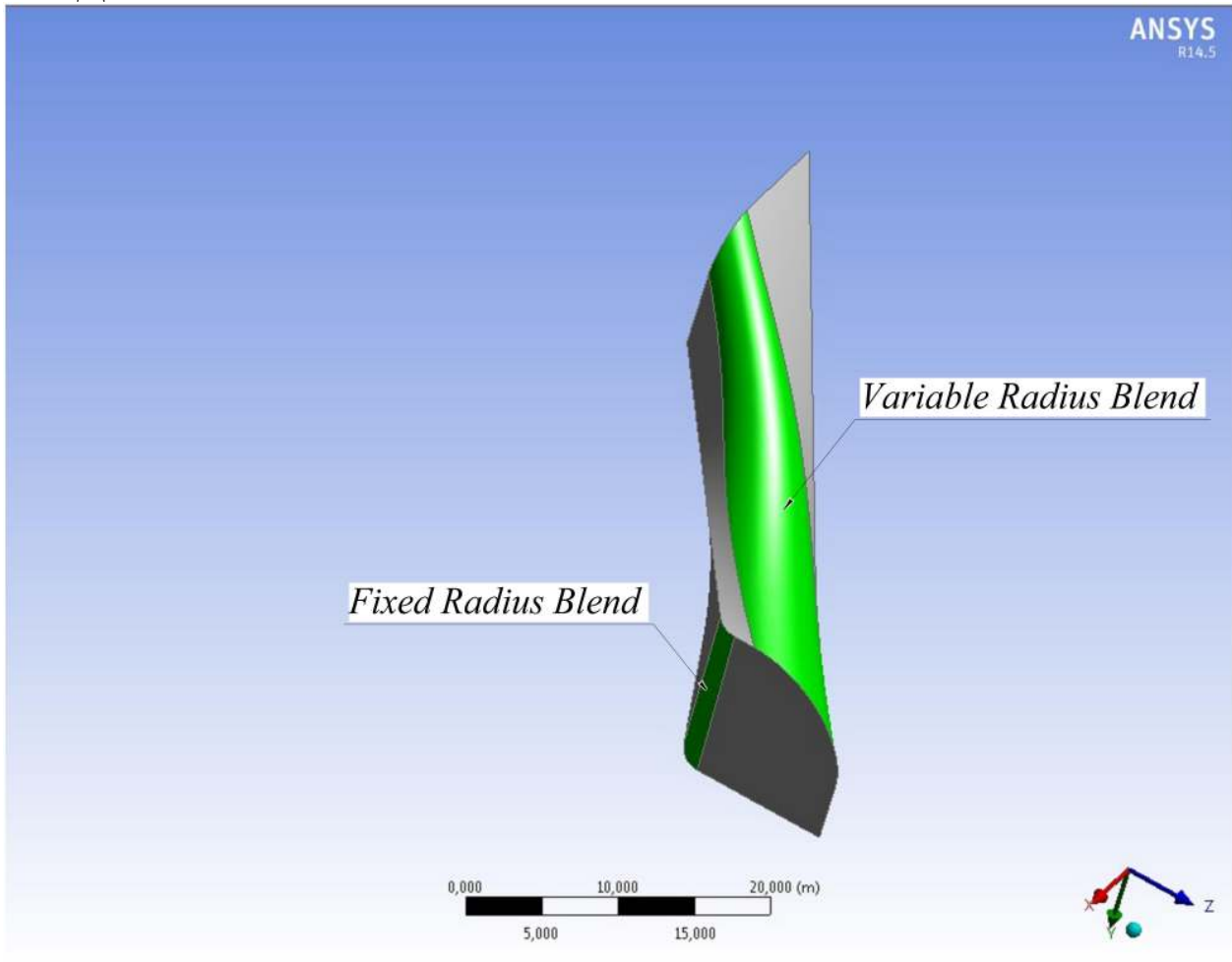


Рис. 4.7. Результат застосування команди Blend

Для створення фасок на ребрах об'ємних моделей (рис. 4.8) використовується команда **Chamfer**. Параметр **Geometry** цієї команди вказує ребра і/або грані. Якщо вказана грань, то команда буде застосована до кожного ребра грані.

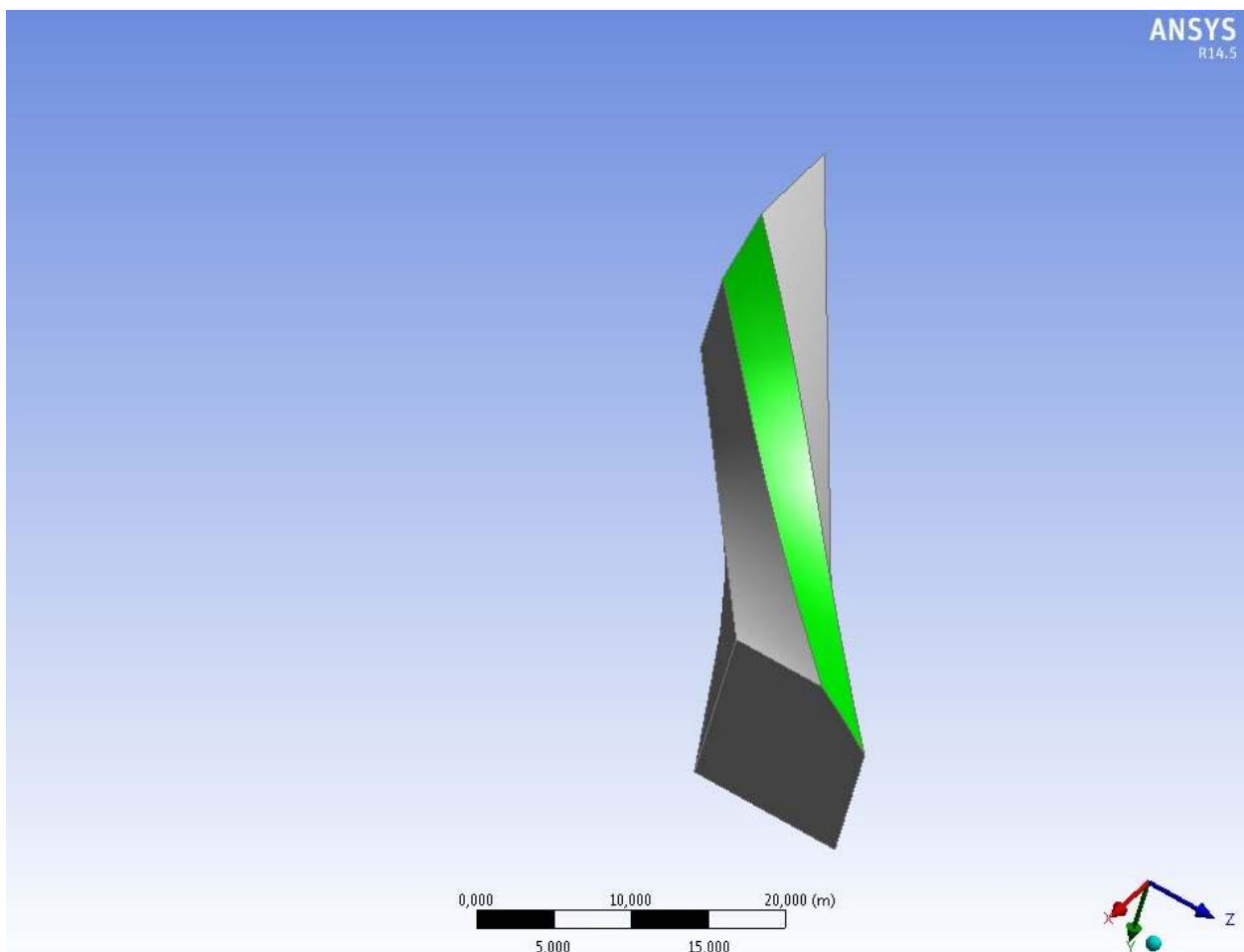


Рис. 4.8. Результат застосування команди *Chamfer*

Опція **Type** задає особливості побудови фаски: **Left-Right** – фаска будується за заданим значенням, відсікаються довжини на обох гранях, що утворюють ребро, **Left-Angle/Right-Angle** – фаска будується за заданим значенням, відсікаються довжини по одній з граней та кутом нахилу січної площини.

Для створення скруглення у вершинах одновимірних тіл **Line Body** і оболонок **Surface Body** використовується команда **Vertex Blend**. Потрібно вказати одну або декілька вершин (параметр **Vertices**) і задати радіус скруглення. Для коректної роботи команди слід вказувати вершини, утворені двома відрізками або кривими, що лежать в одній площині.

Також Design Modeler дозволяє досить швидко створювати так звані об'ємні примітиви: куля, паралелепіпед, призма, піраміда, циліндр, конус, тор. Команди створення об'ємних примітивів розташовуються в меню **Create/Primitives** (рис. 4.9).

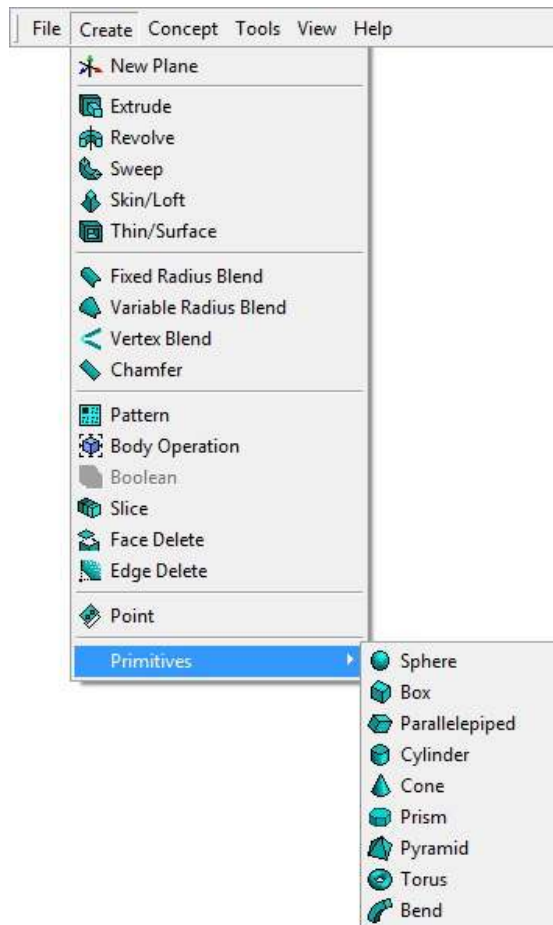


Рис. 4.9. Команди створення об'ємних примітивів в меню Create

Всі примітиви мають схожі параметри і опції, такі як базова площина **Base Plane**, спосіб визначення точки відліку для побудови **Origin Definitions**, геометричні параметри, необхідні для побудови та ін. При створенні об'ємних примітивів для опції **Operation** можуть використовуватися значення **Add Material**, **Cut Material** і інші, описані раніше для найпростіших команд моделювання.

Аналогічно можуть бути створені пустоти всередині моделі за допомогою опції **As Thin/Surface?**, що задається всередині команди побудови примітиву.

4.2. КЕРУВАННЯ ЕЛЕМЕНТАМИ В ДЕРЕВІ ПОБУДОВИ

Всі результати моделювання відображаються в дереві побудови, яке має ієрархічну структуру. Робочі площини, ескізи і команди моделювання розташовуються в дереві зверху вниз у порядку їх створення. Контекстне меню, яке викликається

натисканням правої кнопки миші на елементі дерева побудови, крім можливості вставки команд, дозволяє керувати командами, виводити додаткову інформацію про взаємозалежність об'єктів, повідомлення про помилки і т.п. Вміст контекстного меню залежить від елемента, на якому воно викликане. Команди контекстного меню і їх коротка характеристика:

- **Edit Selection** – редагувати виділений елемент. Дана команда робить параметри виділеної команди дерева побудови доступними для редагування, завантажуючи їх у вікно **Details View**;

- **Insert** – вставити команду вище виділеної;

- **Rename** – перейменувати елемент. Дана команда дозволяє змінити ім'я елемента дерева побудови. Незважаючи на те, що російські літери допускаються в іменах елементів, рекомендується користуватися латиницею, так як згодом неможливо буде створити параметр-змінні об'єкту, що містить в імені російські літери;

- **Delete** – видалити виділений елемент з дерева;

- **Generate** – запустити виділену команду моделювання. Дана команда використовується для перерахунку тільки виділеної команди; для всієї моделі доцільно використовувати кнопку **Generate** на панелі інструментів;

- **Always Show Sketch** – виділений ескіз буде відображатися завжди, а не тільки після переходу в його площину. Для відміни цього потрібно викликати контекстне меню на ескізі і виконати команду **Show Sketch**;

- **Hide Sketch** – виділений ескіз буде відображатися тільки після кліка на ньому. Розмірні лінії ескізу не відображаються. Для переходу в звичайний режим відображення ескізу потрібно виконати команду **Show Sketch**;

- **Look At** – поточний вигляд буде змінений на вигляд з боку нормалі до виділеного ескізу або площини. Дана команда аналогічна однойменній кнопці на панелі інструментів;

- **Suppress** – виключити з побудови. Дана команда дозволяє виключити з побудови моделі обраний елемент, але залишити його в дереві. Аналогічно працює команда **Suppress & All Below**, яка виключає з побудови виділену і всі наступні команди;

- **Unsuppress** – скасувати дію команди **Suppress**. Виділений елемент знову включається в побудову. Аналогічно працює команда

Unsuppress & All Below, яка включає в побудову виділену і всі наступні команди;

- ***Show Dependencies*** – відобразити взаємозв'язки об'єкту. Дана команда виводить на екран вікно, в якому в двох колонках відображаються елементи, пов'язані з поточним. Колонка ***Parents*** містить кореневі (батьківські) елементи, колонка ***Children*** – підлеглі об'єкти. Ця інформація корисна при операції видалення, так як кореневі елементи не можуть бути видалені, поки у них є підлеглі елементи, і команда видалення не виконується;

- ***Suppress Body*** – виключити з моделювання виділений результат. Дана команда доступна в контекстному меню, що викликається на змодельованому об'єкті (***Line Body, Surface Body, Solid***), і дозволяє не передавати його в модуль симуляції Mechanical. Зворотну операцію виконує команда ***Unsuppress Body***;

Поточний статус команди моделювання відображається в дереві побудови поруч з її значком.

ЛЕКЦІЯ 5

КЕРУВАННЯ МАТЕРІАЛАМИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЯМИ

5.1. Графічний інтерфейс модуля керування матеріалами.

5.2. Робота з матеріалами та їх властивостями.

5.3. Використання пластичних матеріалів.

Важливим етапом моделювання є вибір матеріалів для створених тіл та зазначення їх властивостей. Для цих цілей у Workbench існує окремий модуль керування матеріалами, пов'язаний з блоком аналізу і представлений елементом ***Engineering Data***. Вибирати матеріали і задавати їх властивості за допомогою цього модуля можна як до побудови геометричної моделі, так і після. Модуль керування матеріалами може бути використаний як сховище бібліотек властивостей матеріалів.

Після вставки в проект нового блоку інженерного аналізу елемент ***Engineering Data*** вже відмічено як визначений, так як в ньому за умовчужанням заданий певний матеріал. Змінити матеріал або його властивості можна на будь-якому етапі моделювання.

5.1. ГРАФІЧНИЙ ІНТЕРФЕЙС МОДУЛЯ КЕРУВАННЯ МАТЕРІАЛАМИ

Робоча область модуля керування матеріалами розроблена таким чином, щоб забезпечити створення, збереження і використання моделей матеріалів, а також створення бібліотек даних, які можуть бути збережені і використані в подальших проектах іншими користувачами. Модуль представлений елементом *Engineering Data*, що входить в структуру блоку інженерного аналізу (рис. 5.1).

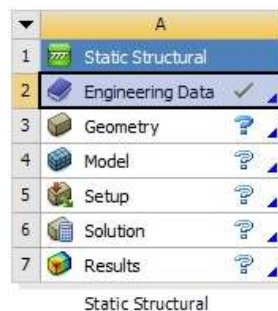


Рис. 5.1. Блок аналізу *Static Structural* з обраним елементом *Engineering Data*

Щоб запустити модуль, потрібно викликати контекстне меню натисненням правої кнопки миші на рядку елемента *Engineering Data* і вибрати пункт *Edit*. Після завантаження з'явиться робоча область модуля, з якої можна керувати матеріалами, отримувати доступ до зовнішніх джерел даних про матеріали, а також зберігати дані для подальшого використання.

Якщо елемент *Engineering Data* пов'язаний з аналогічним елементом іншого блоку інженерного аналізу, то зміна даних в одному елементі відображається і в іншому. Всі введені в модуль дані зберігаються автоматично при збереженні проекту.

Вид робочої області модуля може змінюватися. За допомогою опцій меню *View* можна керувати відображенням вікон робочої області. На рис. 5.2 представлена одна з можливих конфігурацій робочої області:

- Вікно властивостей матеріалів *Toolbox* – включає в себе властивості, які можуть бути використанні при завданні матеріалу;
- Панель структури даних *Outline Pane* – відображує структуру обраного джерела даних з вікна *Outline Filter*;

- Панель властивостей **Properties Pane** – відображує властивості обраного елемента на панелі структури даних **Outline Pane**;
- Панель таблиць **Table Pane** – відображує табличні дані для обраного елемента на панелі властивостей **Properties Pane**;
- Панель діаграм **Chart Pane** – відображує діаграму елемента, обраного на панелі властивостей **Properties Pane**.

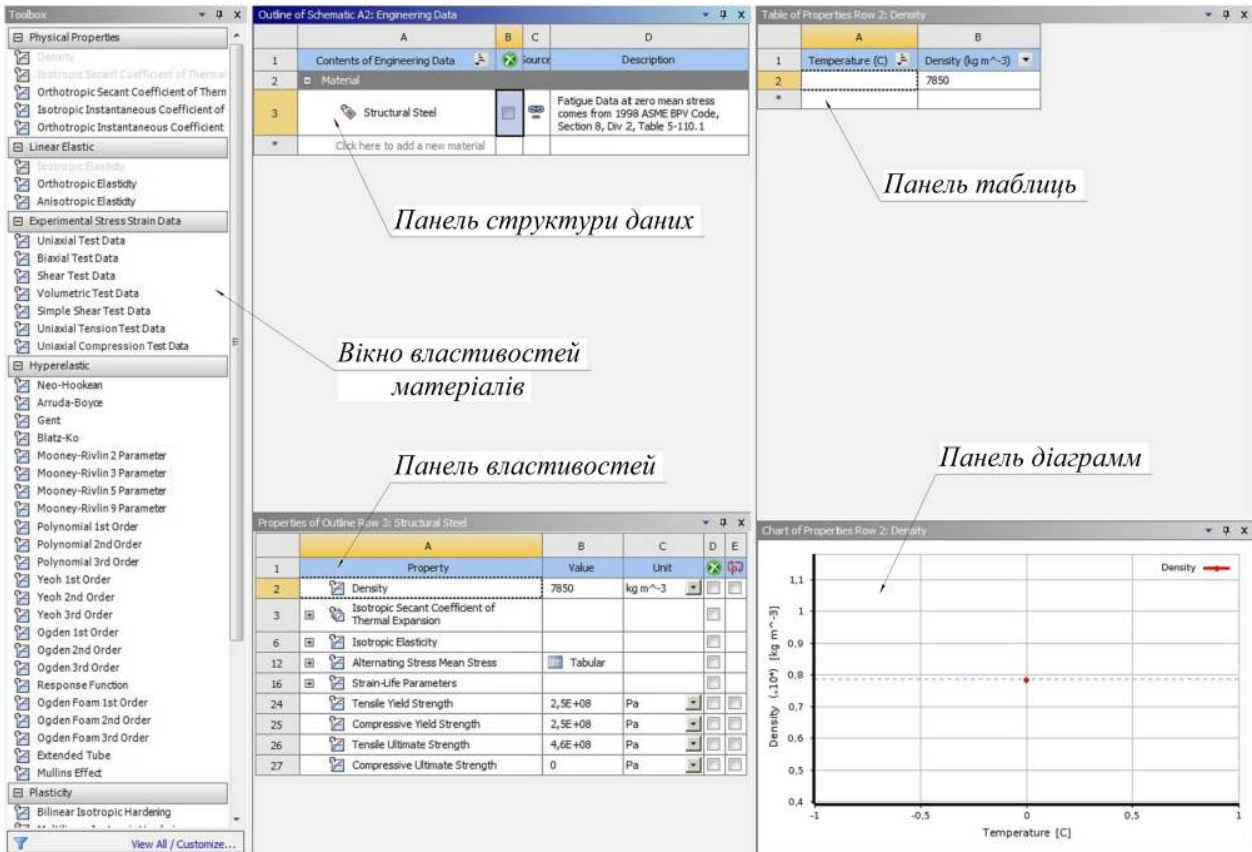




Рис. 5.2. Робоча область модулю Engineering Data

Головне меню і панель інструментів, яка відображається при роботі в модулі керування матеріалами, містять команди, які були розглянуті раніше. На панелі інструментів додатково розташована кнопка фільтрації , яка дозволяє відобразити тільки такі рядки, які можуть бути використані для поточного вибору. За замовчуванням ця кнопка натиснута (фільтрація активна).

Вікно властивостей матеріалів **Toolbox** містить властивості і фізичні моделі матеріалів. При натиснутій кнопці , модуль керування матеріалами фільтрує вміст вікна таким чином, що видно тільки елементи, які застосовні для поточного вибору.

Вікно **Toolbox** показує елементи в наступних категоріях:

- моделі і властивості матеріалу;
- додаткові табличні дані, які можуть бути додані до властивості або моделі;
- апроксимуюча крива даних.

Вікно джерел даних **OutlineFilter** використовується для керування джерелами даних про матеріали, до яких можна звертатися. У цьому вікні завжди відображається поточний набір (рядок **Engineering Data**), тобто матеріали, вибрані для поточного аналізу, а також бібліотеки матеріалів. Крім цього є група **Favorites**, в яку можна додати часто використовувані матеріали.

У вікні **Outline Filter** можна виконувати наступні дії:

- створити нову бібліотеку;
- додати існуюче джерело даних;
- видалити джерело даних зі списку;
- включити редагування джерела даних;
- зберегти джерело даних.

Панель структури даних **Outline Pane** показує структуру вмісту вибраного у вікні **Outline Filter** джерела даних. Тема панелі змінюється залежно від того, яке джерело даних вибрано.

Панель властивостей **Properties Pane** відображає властивості елемента, вибраного в панелі структури даних. У цьому вікні можна виконувати наступні дії:

- додати додаткові властивості, табличні дані або апроксимуючу криву (з панелі інструментів);
- видалити властивість;
- змінити константи;
- виключити властивість;
- параметризувати властивість.

Стовпець властивостей **Property** містить властивості для елемента, обраного в панелі структури даних. Вибір властивості буде змінювати вміст панелі таблиць і панелі діаграм. Тип і стан елемента позначається піктограмою ліворуч від імені.

Панель таблиць **Table Pane** відображає табличні дані для елемента, вибраного в панелі властивостей. Якщо є незалежні змінні (наприклад, температура) для обраного елемента і елемент є константою, то можна змінити тип його визначення на табличний,

просто вводючи значення. Якщо останній рядок відображається з індексом *, то можна додати додаткові рядки даних. Дані можуть бути відсортовані за допомогою фільтра в заголовку стовпця.



Панель діаграм *Chart Pane* відображує діаграму обраного в панелі властивостей елемента. Шкали вісей діаграми можна змінити, клацнувши по обраній вісі правою кнопкою миші і вибравши з контекстного меню пункт *Edit Properties* і проставивши потрібні значення в панелі, що з'явилася *Properties of Chart*. Цей діапазон буде використаний при створенні діаграми, таким чином, можна проаналізувати дані за межами діапазону, який використовується за умовчанням.


5.2. РОБОТА З МАТЕРІАЛАМИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Матеріали з поточного набору або бібліотеки відображаються в панелі структури даних *Outline Pane*. В цій панелі можна виконувати наступні дії:



- створити новий матеріал;
- видалити матеріал;
- перейменувати матеріал;
- виключити матеріал з поточного набору *Suppress*;
- додати опис матеріалу;
- додати матеріал в систему із зовнішнього джерела даних;
- вибрати матеріал за замовчуванням для твердих та/або рідких частин моделі.


Стовпець змісту показує ім'я матеріалу, що міститься у вибраному джерелі даних. Тип і стан матеріалу позначається піктограмою ліворуч від імені. Стан матеріалу вказуються наступним чином:

1.  – дані, що містяться в цьому матеріалі, допустимі;
2.  – деякі дані, що містяться в цьому матеріалі, некоректно визначені.




Стовпець винятку *Suppression* відзначений знаком  і показує статус елемента. Клікнувши в цьому стовпці навпроти обраного матеріалу, можна виключити його з розгляду, але залишити його в

джерелі. Цей стовпець відображається тільки в тому випадку, якщо обрано поточний набір матеріалів.

Стовпець додавання **Add** служить для додавання елемента із зовнішнього джерела даних в поточний набір матеріалів, а також показує, чи включений цей елемент у поточний набір. Цей стовпець відображається лише тоді, коли джерелом даних є бібліотека матеріалів або група **Favorites**. Щоб додати матеріал до поточного набору, потрібно натиснути на кнопку додавання . Якщо елемент включений в поточний набір, то це зазначається піктограмою . Альтернативний спосіб додавання елемента в поточний набір – перетягнути елемент з панелі структури даних в рядок **Engineering Data**.

Стовпець, відзначений знаком , дозволяє визначати матеріали, які будуть включені за замовчуванням в поточний набір матеріалів при створенні нового блоку аналізу. Цей стовпець відображається тільки в тому випадку, якщо у вікні **Outline Filters** вибрано джерело даних **Favorites**.

Стовпець **Source** показує зв'язок матеріалу зі своїм джерелом даних. Утримуючи курсор миші на піктограмі, можна вивести шлях до файлу, що зберігає інформацію про матеріал. Стан даних про матеріали по відношенню до джерела показується таким чином:

1.  – дані збігаються з джерелом;
2.  – дані не збігаються з джерелом;
3.  – дані не можуть бути знайдені в джерелі або джерело відсутнє.

За допомогою контекстного меню, що викликається на рядку матеріалу, можна подивитися файл-джерело (команда **View Linked Source**), оновити дані з джерела (команда **Refresh From Linked Source**) або розірвати зв'язок з джерелом (команда **Break Link To Source**).

Стовпець опису **Description** показує опис для елемента, що міститься в джерелі даних. Утримуючи курсор миші над описом, можна відобразити підказку з повним описом. Таким чином, якщо стовпець занадто малий, можна побачити вміст без зміни його розмірів.

Для зміни матеріалу, прийнятого за замовчуванням для нового аналізу, необхідно вибрати в **Outline Filter** джерело даних, потім у


панелі **Outline Pane** вибрати матеріал і за допомогою контекстного меню додати його в **Favorites** (команда **Add to Favorites**). Далі в **Outline Filter** потрібно, клікнувши на **Favorites**, відобразити вміст цієї групи і, викликаючи на потрібному матеріалі контекстне меню, вказати його як або **Default Solid Material** (матеріал за замовчуванням для моделювання твердих тіл), або **Default Fluid/Field Material** (матеріал за замовчуванням для моделювання рідини або поля). У новому проекті матеріалом за замовчуванням для твердих частин моделі є конструкційна сталь (Structural Steel), а для рідких – повітря (Air).

Також можна заборонити використовувати матеріал за замовчуванням, прибравши відповідну відмітку в контекстному меню. Установка матеріалу, що використовується за умовчанням для моделі (або заборона такої установки) буде впливати на всі блоки аналізу, що створені у цьому проекті.

Властивості матеріалів можуть задаватися як фізичними константами, так і набором табличних даних. Для матеріалів з модулю керування матеріалами вже задані всі необхідні властивості. Для нових матеріалів потрібно самостійно визначати набір властивостей, перетягуючи їх з вікна **Toolbox** в панель властивостей **Properties**.


Редагувати властивості раніше створених матеріалів можна, тільки якщо відповідне джерело даних переведено в режим редагування. Модифікацію констант можна робити шляхом зміни значень (стовпець **Value**) та/або одиниць вимірювання цих даних (стовпець **Unit**) в панелі властивостей **Properties Pane**.

При переході до нової одиниці виміру поточне значення буде автоматично перетворено. Якщо введене значення неприпустиме, поле буде зафарбовано жовтим кольором.

Якщо дані, що характеризують властивість матеріалу, представлені в табличній формі, то це вказується в стовпці значень знаком  **Tabular**. Клікнувши на дану кнопку, можна відобразити відповідну таблицю в панелі таблиць **Table Pane**. У цій же панелі табличні значення можуть бути змінені. Введення нових елементів виконується в останньому рядку, що позначений *.

Одиниці виміру величини вказані в заголовку стовпця, який має вигляд списку, що розкривається. Розкривши список можна

вибрати потрібну одиницю виміру, при цьому поточне значення буде перетворено до нової одиниці виміру. Якщо в яку-небудь клітинку таблиці введено неприпустиме значення, то вона зафарбовується жовтим кольором.

Для матеріалів з поточного набору можна виключати деякі їх властивості з аналізу. Для цього потрібно поставити прапорець у стовпці *Suppression*, зазначеному знаком .

Виключена властивість відображається закресленою. Для скасування виключення властивості потрібно прибрати прапорець з цього стовпця.

Останній стовпець *Parametrize* служить для параметризації властивості. Параметризація доступна тільки для властивостей матеріалів з поточного набору. Прапорець у цьому стовпці навпроти властивості означає, що воно включено до переліку параметр-змінних поточного аналізу.

Як вже було зазначено, всі доступні властивості матеріалів відображаються у вікні *Toolbox*.

Так як за замовчуванням включений фільтр, то будуть відображатися тільки властивості, застосовні в поточному блоці аналізу. Вимкнувши фільтр, можна вивести всі властивості, що надаються пакетом ANSYS.

Деякі властивості є взаємовиключними, тобто, необхідно, щоб тільки одна з цих властивостей не була виключена. Виключення однієї з цих властивостей (прапорцем у стовпці *Suppression*) автоматично активізує взаємовиключні властивості і навпаки.

Результати експериментального дослідження матеріалу вводяться у відповідну властивість в табличному вигляді. Потім ANSYS будує за цими даними апроксимуючу криву, на основі якої розраховуються коефіцієнти моделей матеріалу.

Можуть бути внесені результати наступних випробувань матеріалу:

- одновісне випробування (деформація - напруження);
- двовісне випробування (деформація - напруження);
- випробування на зсув (деформація - напруження);
- об'ємне випробування.

Апроксимуючу криву експериментальних даних підтримують такі моделі матеріалів:

- модель Муні-Рівлін (*Mooney - Rivlin*);

- модель Нео-Хукена (*Neo - Hookean*);
- поліноміальна модель (*Polynomial*);
- модель Їео (*Yeoh*);
- модель Огдена (*Ogden*).

Для того щоб вибрати криву, що найбільш точно відповідає отриманим експериментальним даним, необхідно виконати побудову апроксимуючих кривих у відповідності з різними моделями матеріалу.

5.3. ВИКОРИСТАННЯ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Пластичність – здатність матеріалу отримувати залишкові деформації без руйнування і зберігати їх після зняття навантаження. Коли пластичний матеріал випробовує напруження вище межі пружності, він потрапляє в зону текучості, що відповідає появі великих залишкових деформацій (рис. 5.3).

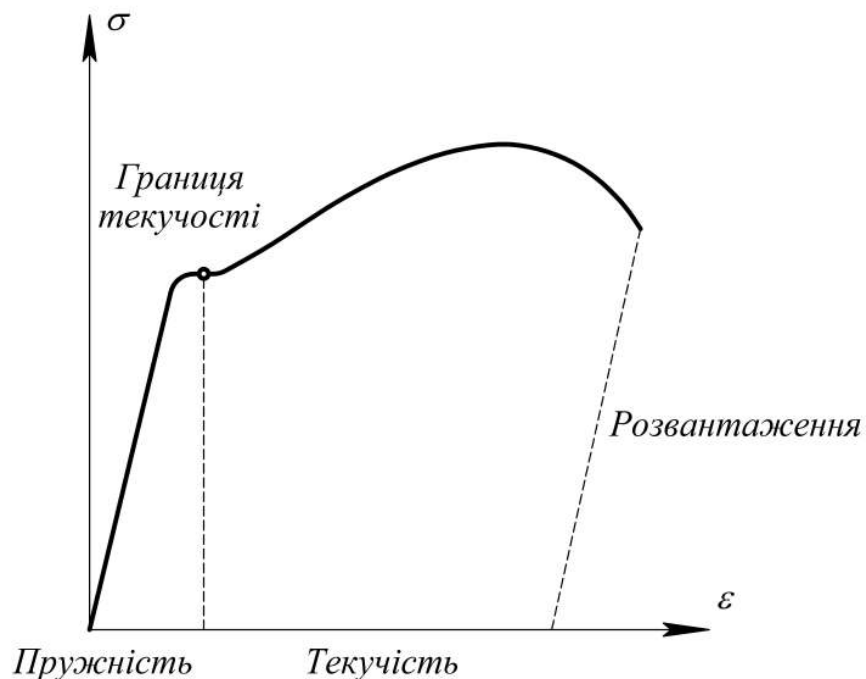


Рис. 5.3. Діаграма напруження-деформації пластичного матеріалу

Для опису пластичності повинні використовуватися істинні напруження і деформації, тому що вони більш точно характеризують стан матеріалу. Справжні напруження σ

отримують віднесенням нормальних сил в перерізі до площі цього перерізу.

Для розрахунку істинних напружень має бути виміряне миттєве значення площі перерізу.

При побудові діаграми розтягування, отриманої на підставі випробування на розтягування (стиснення) зразка, використовуються умовні напруження $\sigma_{ум}$, які визначаються відношенням нормальних сил до початкової площі перерізу.

Якщо відомі умовні напруги $\sigma_{ум}$, то їх можна перетворити в істинні у відповідності з наступною апроксимацією. Поки деформація незначна, умовні напруження відповідають справжнім:

$$\sigma = \sigma_{ум}. \quad (5.1)$$

При розвинених пластичних деформаціях аж до моменту утворення шийки для розрахунку істинних напружень використовується наступна залежність:

$$\sigma = \sigma_{ум}(1 + \varepsilon_{зм}), \quad (5.2)$$

де $\varepsilon_{зм}$ – виміряна деформація зразка.

Необхідно відмітити, що для перетворення напружень використовуються такі припущення:

1. матеріал нестискуваний (прийнятне допущення для великих деформацій);
2. розподіл напружень по перерізу зразка вважається рівномірним.

За даними випробувань зразка на розтяг і будується крива «напруження-деформація».

Реальна конструкція найчастіше отримує складний напружений стан. Критерій текучості містить деякий скалярний інваріант, що дозволяє поставити у відповідність складному напруженому стану еквівалентний йому за деякою величиною простий напружений стан.

У цілому, напружений стан може бути розділений на два складових стану:

1. гідростатичне напруження – створює зміна об'єму;
2. девіатор напружень – створює зміна форми.

Критерій текучості фон Мізесу говорить про те, що текучість виникає в тому випадку, коли енергія формозміни в одиниці об'єму дорівнює енергії формозміни в тому ж об'ємі при досягненні межі текучості в разі одновісного напруженого стану.

Відповідно до цієї теорії скалярний інваріант (еквівалентне напруження фон Мізесу) визначається наступним виразом:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (5.3)$$

де σ_1 , σ_2 , σ_3 – головні напруження.

У просторі головних напружень поверхня текучості фон Мізесу є циліндром.

Твірною циліндра є вісь $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Зауважимо, що якщо напружений стан потрапляє всередину цього циліндра, то текучості не спостерігається. Зокрема це означає, що якщо матеріал знаходиться під дією гідростатичного тиску ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), то це не призводить до виникнення текучості.

На границі циліндру з'являються пластичні деформації. При ідеальній пружно-пластичній моделі матеріалу ніякого напруженого стану не може існувати за межами циліндру.

Реальні матеріали зміцнюються, при їх деформуванні за межами текучості поверхня текучості змінюється. Зміна поверхні текучості в процесі навантаження описується законами зміцнення.

В ANSYS використовуються два закони зміцнення, що описують зміну поверхні текучості:

1. кінематичне зміцнення. Поверхня текучості залишається постійного розміру і переміщується в напрямку пластичної деформації;

2. ізотропне зміцнення. Поверхня текучості рівномірно розширюється в напрямках пластичної деформації.

Поведінка більшості металів відповідає кінематичному зміцнення при відносно малих деформаціях, зокрема, при циклічному навантаженні.

При пружних деформаціях зміна знака зовнішнього зусилля викликає тільки зміну знаку деформації, без зміни її абсолютної величини. Якщо ж під впливом зовнішніх зусиль в металі наступає

режим пластичної деформації, то властивості металу змінюються і починає позначатися вплив знаку первісної деформації.

Якщо метал піддати пластичній деформації одного знаку, то при зміні знаку деформації виявляється зниження межі текучості. Різниця між межами текучості при розтягуванні і стисненні, що дорівнює $2\sigma_y$, залишається постійною. Ця властивість відома як ефект Баушингера.

Всі спочатку ізотропні матеріали перестають бути такими в процесі кінематичного зміцнення.

При моделюванні великих деформацій модель кінематичного зміцнення може стати неадекватною для опису властивостей матеріалу.

Ізотропне зміцнення враховує, що поверхня текучості рівномірно розширюється у всіх напрямках внаслідок пластичної деформації.

В ANSYS застосовуються два типи кривих «напруження-деформація»: білінійна і полілінійна.

Білінійна діаграма задається модулем пружності, межею текучості, дотичним модулем і доповнюється коефіцієнтом Пуассона.

Полілінійна діаграма задається за допомогою таблиці значень деформацій і відповідних їм істинних напружень.

Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона задаються окремо. Перша ненульова точка діаграми повинна з високою точністю відповідати модулю пружності.

Для визначення лінійних пружних властивостей матеріалу повинні бути задані модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона.

Пластичність металів враховується через нелінійну модель матеріалу. Нижче представлений приклад завдання пластичних властивостей матеріалу.

Передбачається, що модуль управління матеріалами вже активізований.

У вікні **Toolbox** відкрийте групу **Plasticity** і виділіть одну з моделей пластичності. Наприклад, на рис. 5.4 показаний вибір білінійної ізотропної моделі матеріалу.

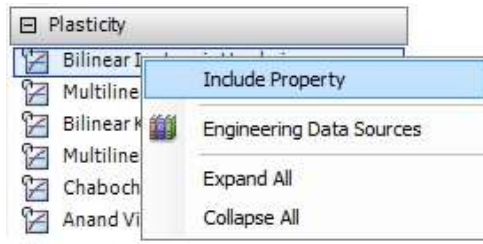


Рис. 5.4. Вибір білінійної ізотропної моделі матеріалу

У контекстному меню цієї моделі виберіть пункт **Include Property**, і модель білінійного ізотропного зміцнення **Bilinear Isotropic Hardening** з'явиться у вікні властивостей **Properties Panel**. Жовті порожні клітинки будуть доступні для введення значень величин межі текучості **Yield Strength** і дотичного модуля **Tangent Modulus** (рис. 5.5).

A	B	C	D	E
Property	Value	Unit		
Density	7850	kg m ⁻³		
Bilinear Isotropic Hardening				
Yield Strength		Pa		
Tangent Modulus		Pa		

Рис. 5.5. Запит на введення межі текучості **Yield Strength** і дотичного модуля **Tangent Modulus** у вигляді жовтих клітинок

За заданим значенням межі текучості і дотичного модуля в панелі діаграм **Chart** буде автоматично побудована діаграма (рис. 5.6).

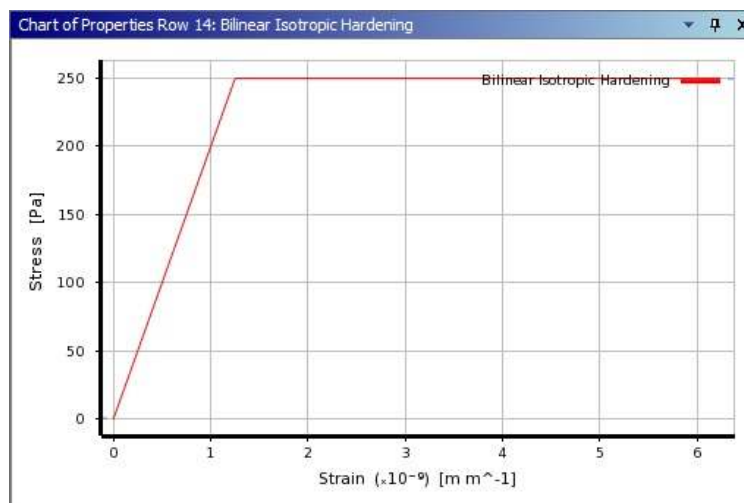


Рис. 5.6. Діаграма, що побудована за даними межі текучості **Yield Strength** і дотичного модуля **Tangent Modulus**

Аналогічно можуть бути встановлені властивості матеріалу, визначені на основі полілінійної ізотропної моделі *Multilinear Isotropic Hardening* чи моделі кінематичного зміцнення *Multilinear Kinematic Hardening* (рис. 5.7).

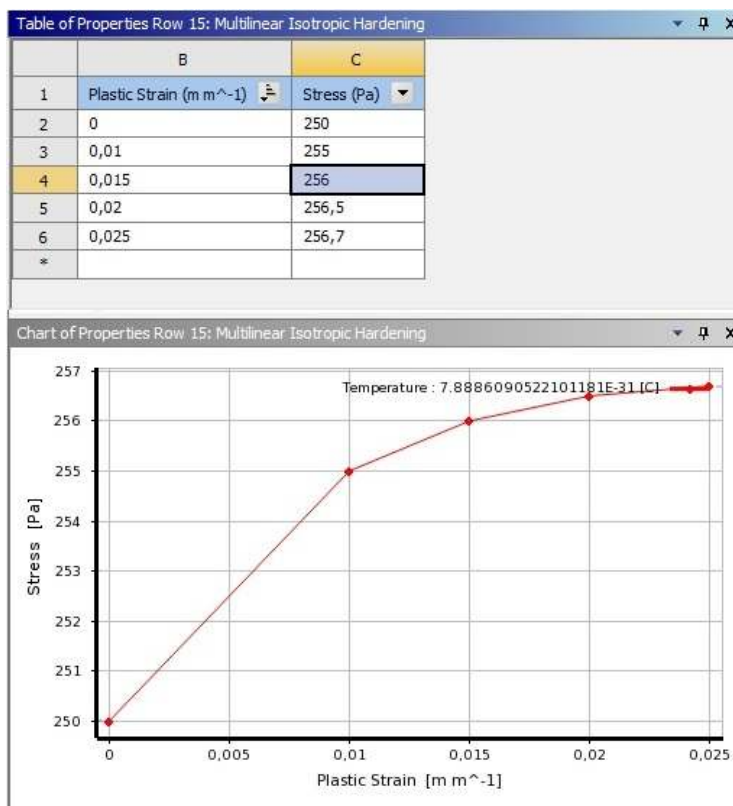


Рис. 5.7. Властивості матеріалу, які встановлені на основі полі лінійної ізотропної моделі *Multilinear Isotropic Hardening*

Модель полілінійної ізотропії і модель кінематичного зміцнення включають властивості, що залежать від температури.

ЛЕКЦІЯ 6

ГЕНЕРАЦІЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ СІТКИ

- 6.1. Порядок розбиття.*
- 6.2. Загальні налаштування генератора сіток.*
- 6.3. Робота з меню Mesh Control.*
- 6.4. Локальна зміна сітки.*
- 6.5. Перегляд сітки скінченних елементів.*
- 6.6. Помилки при генерації сітки.*

Для отримання чисельного розв'язання необхідно виконати розбиття геометричних моделей скінченно-елементною сіткою. Дана процедура виконується в модулі симуляції Mechanical. Дана лекція містить опис основних команд, що застосовуються для створення сітки та керування її параметрами.

6.1. ПОРЯДОК РОЗБИТТЯ

Сітка генерується на геометричній моделі і є основою для складання і вирішення системи рівнянь в матричному вигляді. Існує два способи генерації сітки:

1. автоматична генерація сітки з установками за умовчанням при запуску на розрахунок. При цьому є можливість попередньо

переглянути сітку (команда **Preview**) до запуску на розрахунок, щоб оцінити її відповідність поставленому завданню;

2. генерація сітки з установками, що задаються користувачем. У цьому випадку користувач самостійно визначає особливості створюваної сітки і задає значення необхідних параметрів.

При створенні скінченно-елементної сітки слід дотримуватися наступного порядку дій:

1. Визначити тип аналізу (міцнісний, тепловий і т.д.). Тип аналізу буде встановлено автоматично, якщо сітка генерується в деякій фізичній системі, наприклад FLUENT, CFX і т.д.

2. Встановити метод створення сітки і задати установки скінченно-елементної сітки (щільність, форму елементів, розміри і т.д.). Для зручності можна створити іменовану групу об'єктів.

3. Попередньо переглянути сітку і, при необхідності, скорегувати установки. Попередній перегляд ініціює генерацію сітки. Подальший запуск на розв'язання не вимагає повторення цієї процедури.

4. Згенерувати сітку. При запуску на розв'язання цей пункт може виконуватися автоматично.

5. Перевірити якість сітки і при необхідності повторити дії в пунктах 2 і 3.

Сітка на об'ємних тілах створюється за допомогою тетраедричних або гексаедричних твердотільних елементів з лінійною або квадратичною функцією форми. Сітка на двовимірних об'єктах створюється за допомогою трикутних або прямокутних твердотільних елементів з лінійною або квадратичною функцією форми. Сітка в тонких шарах чи оболонках **Surface Bodies** створюється за допомогою лінійних оболонкових елементів. Сітка на одновимірних об'єктах **Line Bodies** створюється за допомогою лінійних балкових елементів **Beam**. Лінійні елементи використовуються для розрахунку стрижневих конструкцій.

Модуль геометричного моделювання DesignModeler дозволяє з'єднати в одній деталі кілька різнорідних геометричних об'єктів – твердотільних і оболонкових, і отримати складову деталь **Multibody Part**. Для складової деталі генерується єдина сітка. Це дозволяє моделювати, наприклад, оболонки разом з жорсткими стрижнями. Створення складової деталі в модулі DesignModeler припускає, що

на границі різних геометричних об'єктів при генерації сітки вузли об'єднуються. При об'єднанні граничних вузлів не потрібно визначення контактних умов на границі. Властивості матеріалів для тіл можуть різнитися.

В ANSYS Workbench можливе моделювання контактної взаємодії без завдання точного збігу на границі вузлів сітки контактуючих деталей. Спеціальні контактні елементи утворюють особливий поверхневий шар в області контакту і дозволяють задавати параметри взаємодії деталей. Сітки на контактуючих поверхнях різних деталей можуть бути неідентичними. Допускається контакт сіток, утворених довільно гексаедричними і тетраедричними елементами. Такий підхід до моделювання контакту допускає завдання різної щільності сітки в контактуючих деталях.

На рис. 6.1 представлена робоча область модуля симуляції.

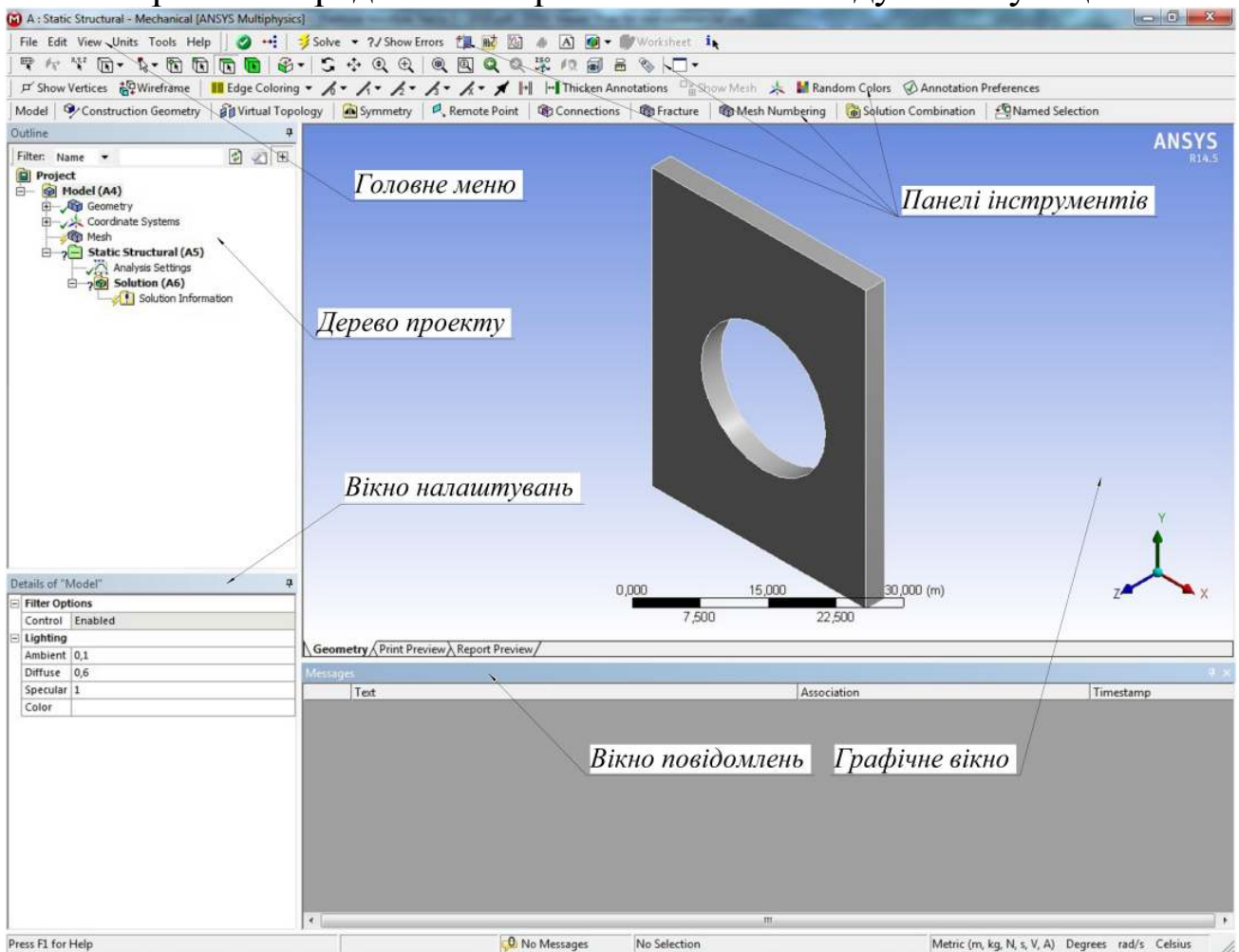


Рис. 6.1. Робоча область модуля симуляції

Розділ сітки елементів *Mesh* розташовується в дереві проекту і дозволяє керувати налаштуваннями сітки.

При натисненні лівої кнопки миші на розділі *Mesh* змінюється вигляд панелі інструментів, в яку виводяться основні команди роботи з сіткою.

Усі доступні команди також можна викликати через контекстне меню, яке викликається натисканням правої кнопки миші на розділ *Mesh*.

Для попереднього перегляду поверхневої сітки перед запуском на розрахунок потрібно виконати команду *Preview/Surface Mesh* з контекстного меню групи *Mesh* (рис. 6.2).

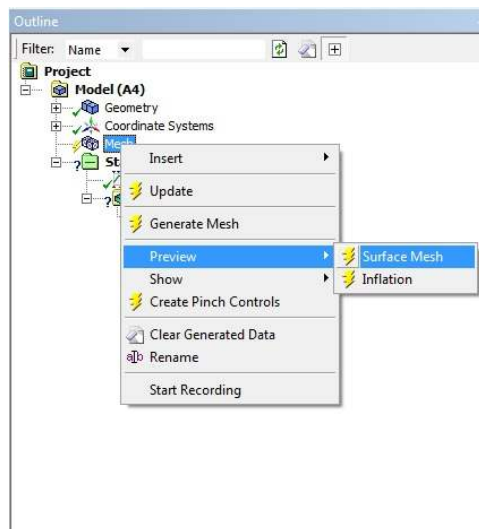


Рис. 6.2. Виконання команди *Preview/Surface Mesh* з контекстного меню групи *Mesh*

Ця команда також доступна на панелі інструментів у випадаючому меню *Mesh*.

Результат побудови поверхневої сітки з параметрами за замовчуванням зображений на рис. 6.3.

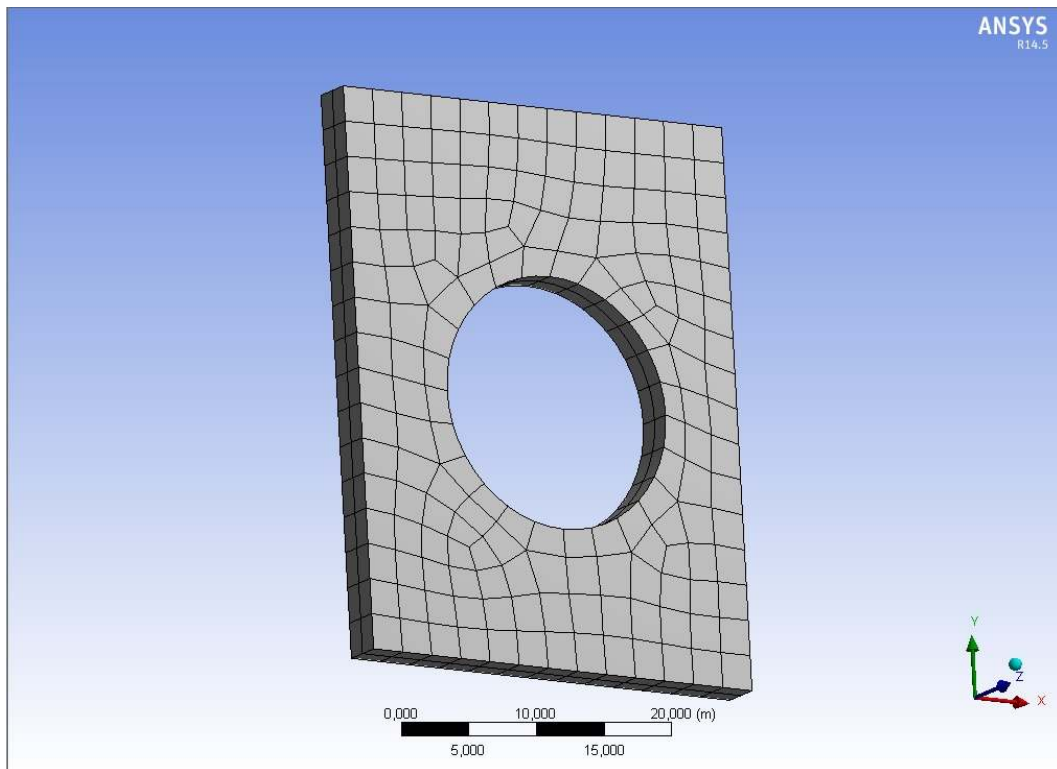


Рис. 6.3. Результат побудови скінченно-елементної сітки з параметрами за замовчуванням

6.2. ЗАГАЛЬНІ НАЛАШТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА СІТОК

Розділ *Defaults* вікна налаштувань *Details of Mesh* містить два види установок (рис. 6.4):

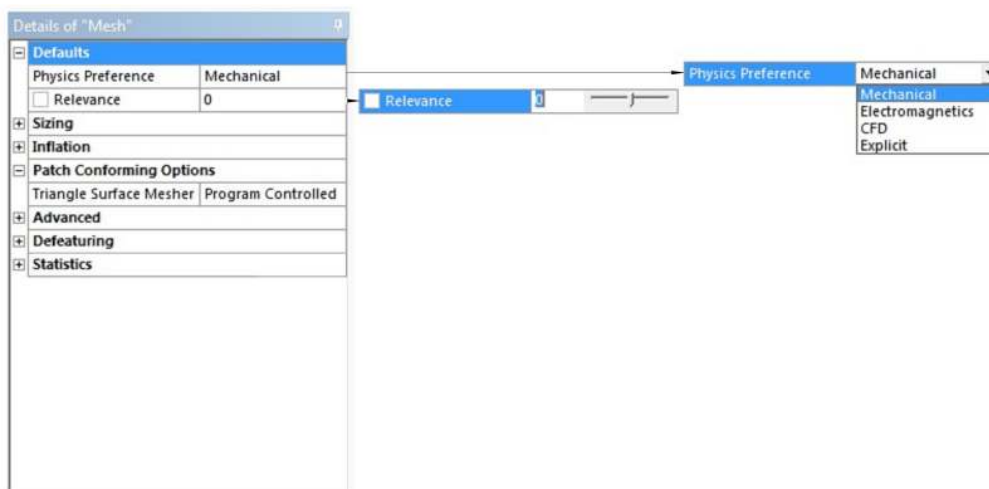


Рис. 6.4. Розділ *Default* вікна налаштувань *Details of Mesh*

- установки, що рекомендовані для розглянутого виду фізичної задачі *Physics Preference*;
- фактор щільності сітки *Relevance*.

Для кожного виду фізичного завдання існують певні правила. Зокрема, для завдань на міцність – *Structural* – чим вище порядок елемента, тим грубіше допускається сітка.

Щільність сітки, створеної за замовчуванням, можна змінювати. Для цього слід вибрати фактор щільності сітки *Relevance*, який можна задавати в межах від -100 до +100 (рис. 6.4). За замовчуванням задається значення, яке дорівнює нулю. Для перегляду зміненої сітки можна використовувати команду *Preview/Surface Mesh*. Деталь з різною щільністю сітки в якості прикладу представлена на рис. 6.5.

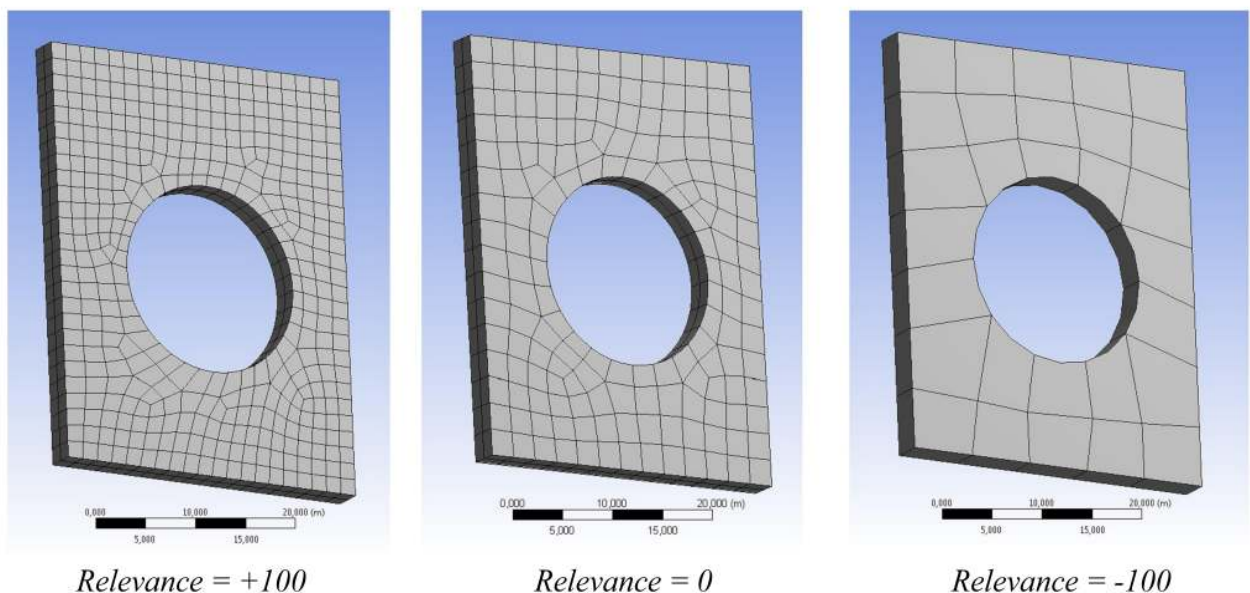


Рис. 6.5. Окремі випадки формування скінченно-елементної сітки при різних значеннях параметру *Relevance*

У вікні налаштувань в розділі *Statistics* знаходиться інформація про кількість вузлів та елементів.

Існує кілька способів контролю за щільністю сітки. При побудові моделі необхідно шукати оптимальну дискретність сітки, враховувати при цьому задіяні ресурси обчислювальної системи (пам'ять, час і т.д.) і точність обчислень. Сітка з великою кількістю вузлів дозволяє знаходити більш точне рішення, але збільшує

розрахунковий час і обсяг пам'яті. В ідеалі розв'язання не повинно залежати від щільності сітки. Подрібнення сітки не компенсує допущення фізичної моделі і помилки вхідних даних.

Крім установки параметра **Relevance** є можливість встановити його середнє значення **Relevance Center** у розділі завдання розміру елемента **Sizing**. Можливі налаштування представлені на рис. 6.6.

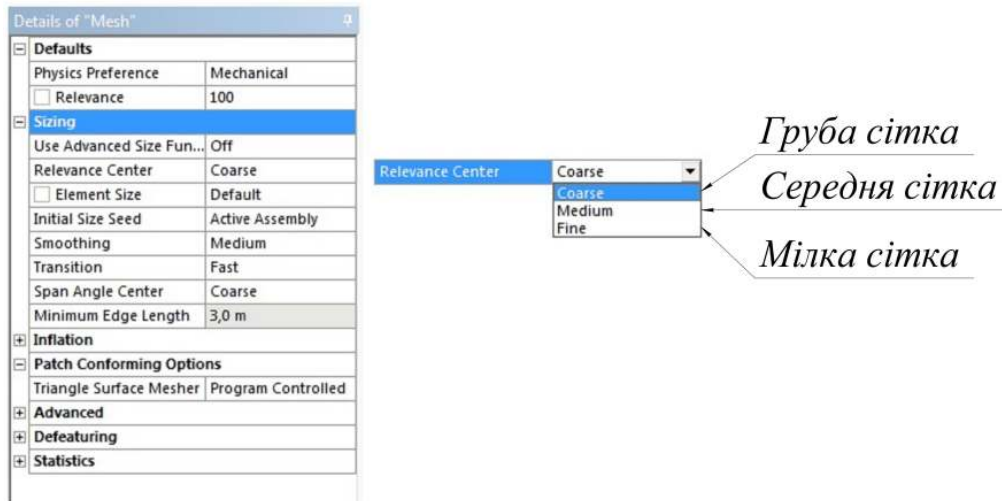


Рис. 6.6. Можливі значення параметру **Relevance Center**

Установка розміру елемента **Element Size** задає розмір елемента по всій моделі. Цей розмір буде використаний для створення сітки на всіх ребрах, поверхнях і об'ємах. Дана опція буде недоступна при активованій функції додаткових можливостей завдання розміру елемента **Use Advanced Size Function**:

- за замовчуванням генерується сітка, відповідна фактору щільності сітки **Relevance** і початкового розміру **Initial Size Seed**.
- може бути введено чисельне значення розміру елемента.

Налаштування вікна вихідного розміру сітки **Initial Size Seed** дозволяють керувати початковим розміром, який програма використовує при розбитті.

Налаштування вікна згладжування **Smoothing** доступні при виключеній функції додаткових можливостей завдання розміру елемента **Use Advanced Size Function**. Згладжування сітки виконується для поліпшення якості елементів. При цьому здійснюється зсув вузлів. Доступні в цьому випадку опції керують числом ітерацій процесу згладжування (рис. 6.7).

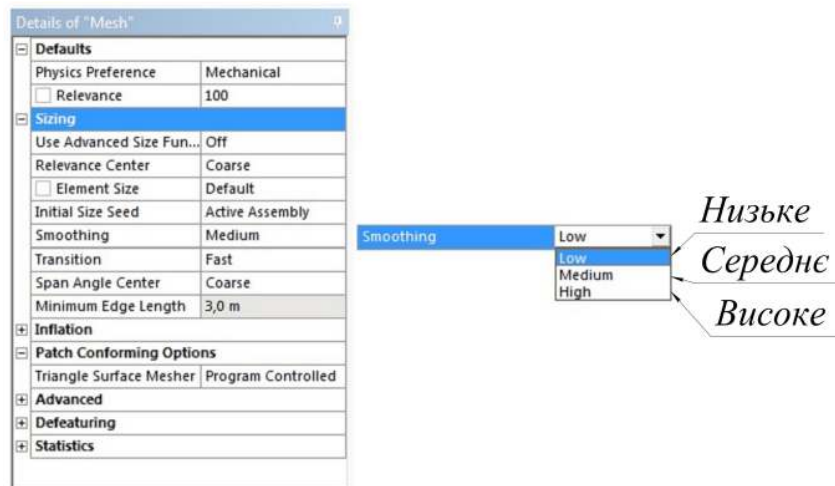


Рис. 6.7. Можливі значення параметру *Smoothing*

Опція перетворення сітки *Transition* керує швидкістю зміни регульованих елементів.

Налаштування вікна *Transition* доступні при виключеній функції додаткових можливостей завдання розміру елемента *Use Advanced Size Function*. Для задач механіки рекомендується установка *Fast*.

Налаштування вікна *Span Angle Center* (центр діапазону кутів) регулюють розміри елементів на ребрах з урахуванням кривизни останніх. Сітка буде генеруватися на областях з різною кривизною до тих пір, поки окремі елементи не вкладуться у відповідний діапазон. Можливі такі варіанти:

- *Coarse* – груба сітка – від 91° до 60° ;
- *Medium* – середня сітка – від 75° до 24° ;
- *Fine* – дрібна сітка – від 36° до 12° .

Приклади побудови сітки з різним значенням параметра *Span Angle Center* показані на рис. 6.8 і 6.9.

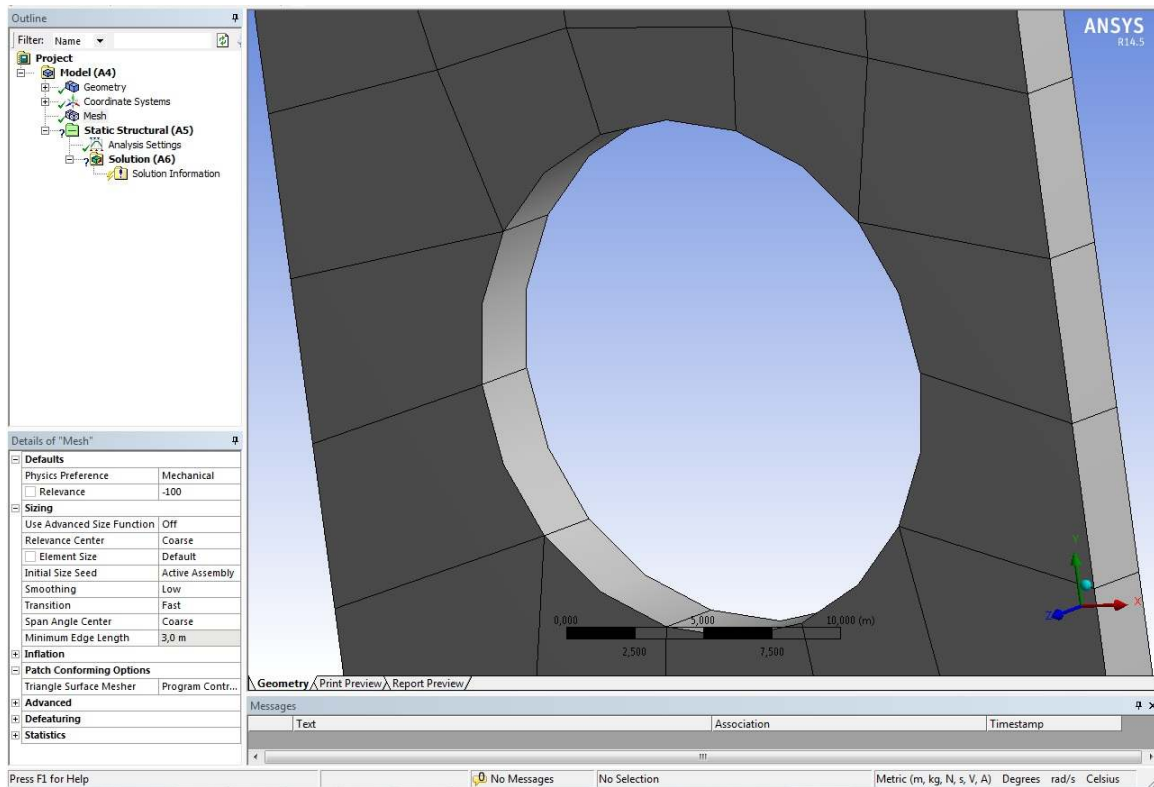


Рис. 6.8. Скінченно-елементна сітка при значенні Coarse параметру Span Angle Center

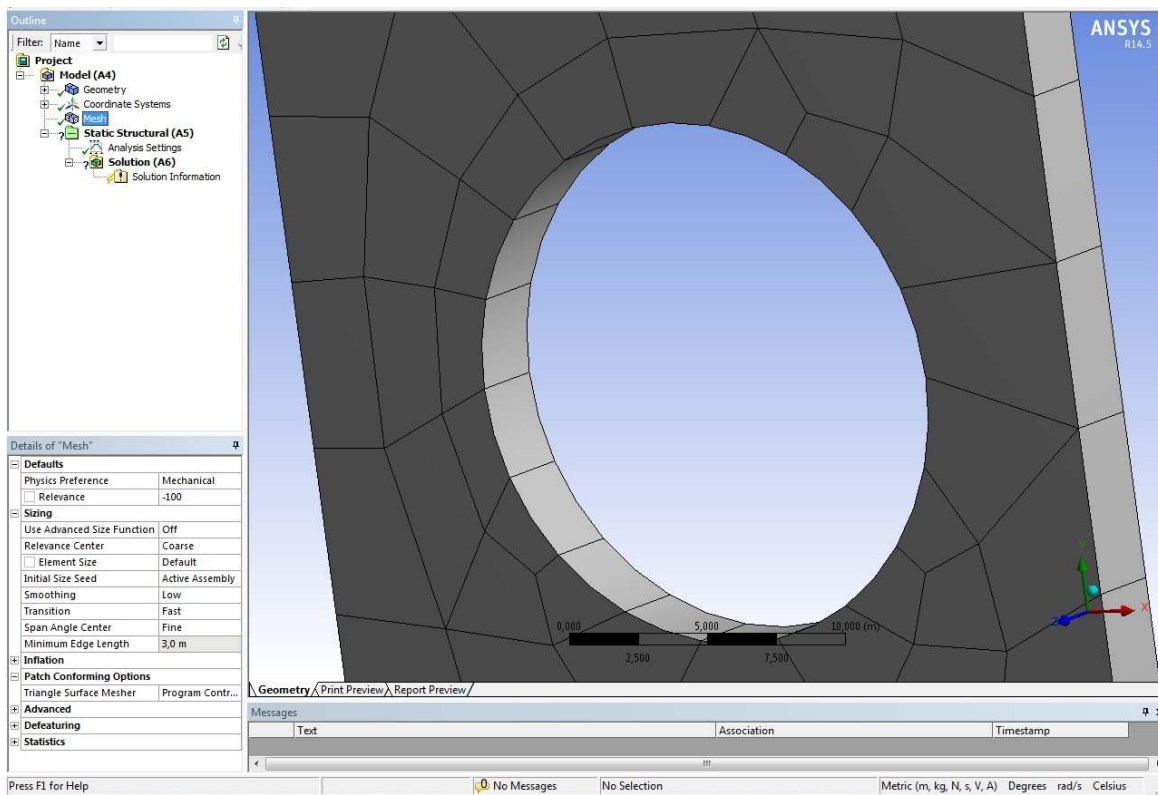


Рис. 6.9. Скінченно-елементна сітка при значенні Fine параметру Span Angle Center

В ANSYS Workbench скінченно-елементну сітку можна змінювати двома способами:

- Задавати розширені опції зміни щільності сітки *Use Advanced Size Function* у вікні налаштувань.

- Змінювати сітку глобально по всьому об'єму через зміну наступних опцій:

1. Розмір елементів *Element Size* задає середню довжину ребра елемента. Використовується фільтр вибору сторін елементів і вибирається репрезентативне ребро елемента (наприклад, по жорсткості). Для зміни розміру елемента за замовчуванням потрібно в рядок *Element Size* ввести бажане значення розміру елемента (рис. 6.10).

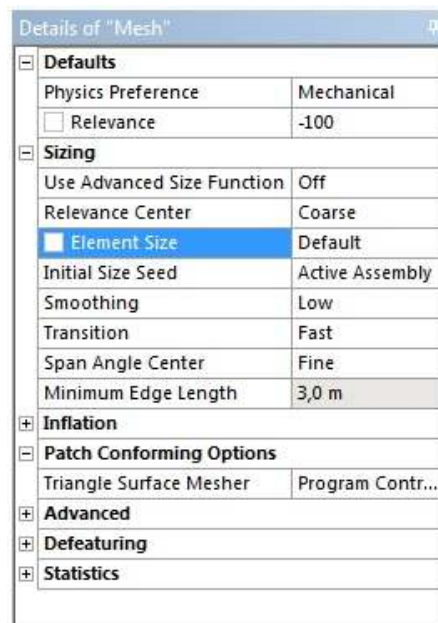


Рис. 6.10. Параметр *Element Size* у вікні *Details of Mesh*

2. Подоба і кривизна *Proximity and Curvature* задає подрібнення сітки в області сильного викривлення ребер для подібних ребер (рис. 6.11). Бігунком встановлюється значення в межах від -100 до +100. Якщо опція розміру елемента *Element Size* задана за замовчуванням (*Default*), опція *Proximity and Curvature* виконує ту ж функцію, що *Relevance* (фактор щільності сітки) в основних опціях зміни сітки. Подоба (*Proximity*) ліній враховується при включеній функції подібності деталей.

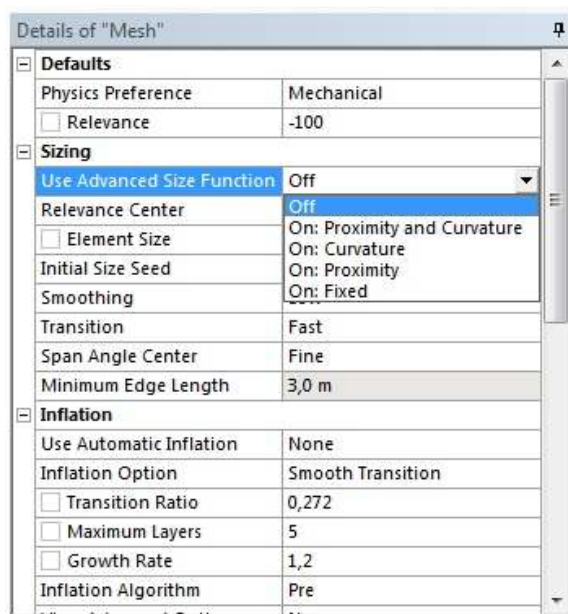


Рис. 6.11. Параметр *Use Advanced Size Function* у вікні *Details of Mesh*

3. Перевірка форми ***Shape Checking*** задає перевірку форми елементів (рис. 6.12). Для лінійного аналізу використовується стандартний спосіб ***Standard Mechanical***, для нелінійного і гідродинамічного аналізу задаються більш жорсткі вимоги до форми елементів ***Aggressive Mechanical***.

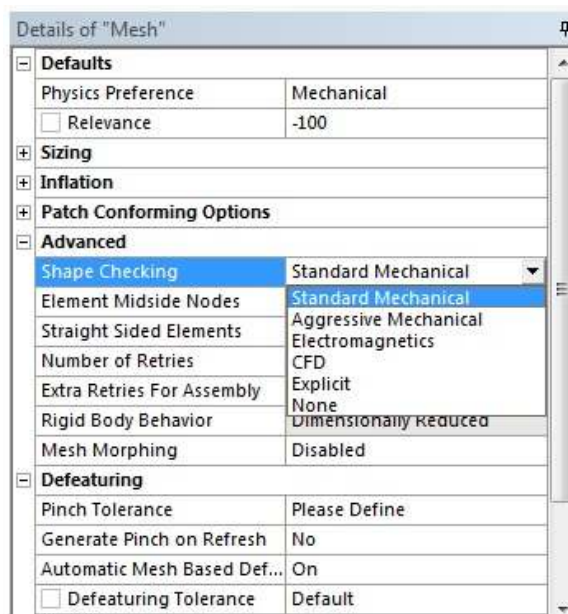


Рис. 6.12. Параметр *Shape Checking* у вікні *Details of Mesh*

4. Джерело вихідного розміру *Initial Size Seed* вказує компонент геометрії, для якого визначається початковий розмір елементів всієї збірки чи її частини (рис. 6.13).

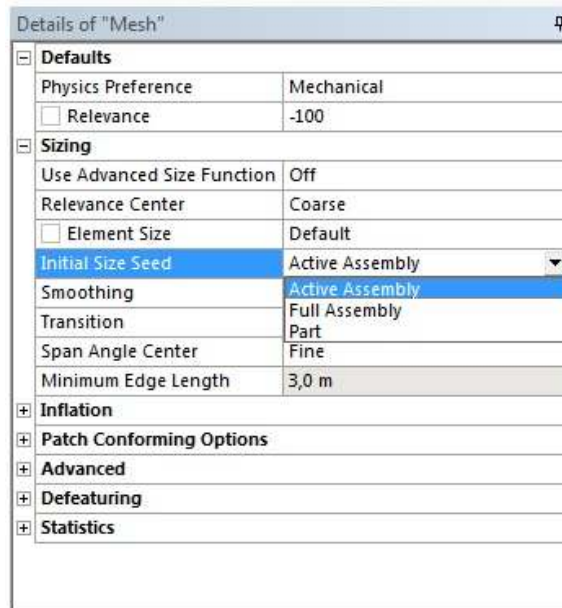


Рис. 6.13. Параметр *Initial Size Seed* у вікні *Details of Mesh*

6.3 РОБОТА З МЕНЮ *MESH CONTROL*

Меню *Mesh Control* дозволяє вибрати геометричну форму елементів, містить команди для керування розмірами елементів створюваної сітки та інструменти її локального подрібнення.

Вибір опції *Method* випадаючого меню *Mesh Control* панелі інструментів (рис. 6.14) дозволяє контролювати форму елементів при автоматичній генерації сітки, при цьому в розділі *Scope* (область визначення) у рядку *Geometry* необхідно підтвердити вибраний об'єкт натисканням клавіші *Apply*.

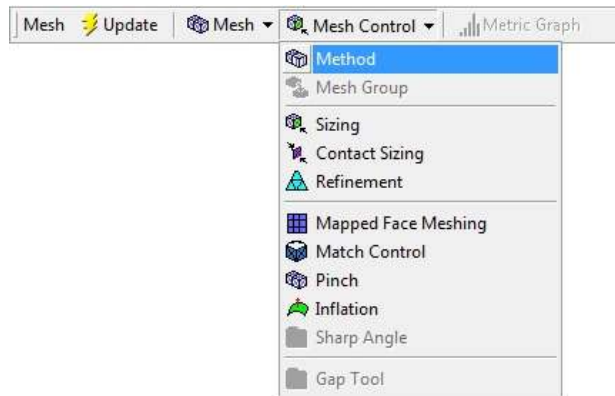


Рис. 6.14. Опція Method з випадючого меню Mesh Control

Після цього у вікні налаштувань стають доступними наступні умови створення елементів (рис. 6.15):

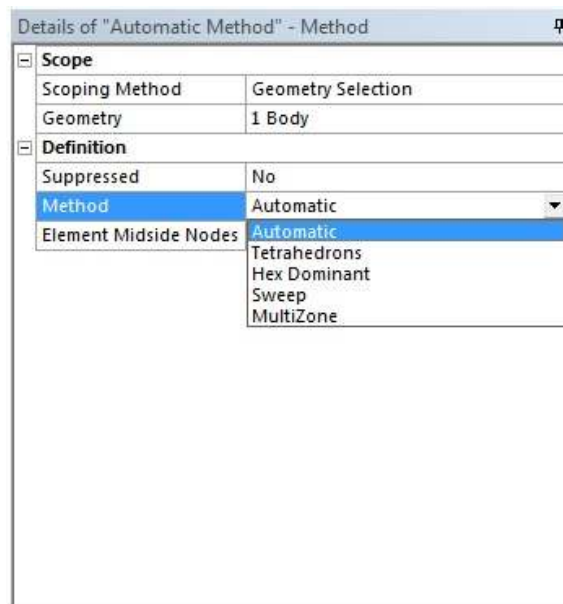


Рис. 6.15. Вікно налаштувань Details of Automatic Method

- **Automatic** (автоматично) – заповнити об’єм генерацією паралелепіпедів, а де це неможливо, використовувати тригранні призми;
- **Tetrahedrons** (тетраедри) – створювати елементи тетраедричної форми;
- **Hex Dominant** (переважно гексаedr) – створювати, по можливості, паралелепіпеди, а де це неможливо, використовувати піраміди і тетраедри;
- **Sweep** (протягування) – створювати елементи простяганням.

Генерація гексагональної сітки задається опцією **Hex Dominant**. Алгоритм генерації гексагональної сітки передбачає створення сітки на поверхні переважно з чотирикутних елементів, а потім протягування цієї сітки всередину. В останню чергу створюються елементи у формі тетраедрів і пірамід. Підсумкова сітка складається з гексаедричних елементів на поверхні і тетраедрів всередині. Якщо створення такої сітки неможливо, з'являється попередження про погане співвідношенні поверхонь вибраного об'єкту. У сітці вміст гексаедрів буде невеликим, або з'являться елементи з поганою формою. Виконайте такі зміни:

- Зменшити розмір елемента.
- В модулі Design Modeler розітніть геометричну модель так, щоб стала можлива трансляція.
- Змініть опцію контролю за формою елементів на створення тетраедрів.

У деяких випадках для гексагональних сіток необхідно виявити вироджені елементи. У вироджених елементах кількість граней менше, ніж у гексаедрів.

Порівняння сіток, отриманих автоматично, за допомогою тетраедрів і гексаедрів представлено на рис. 6.16.

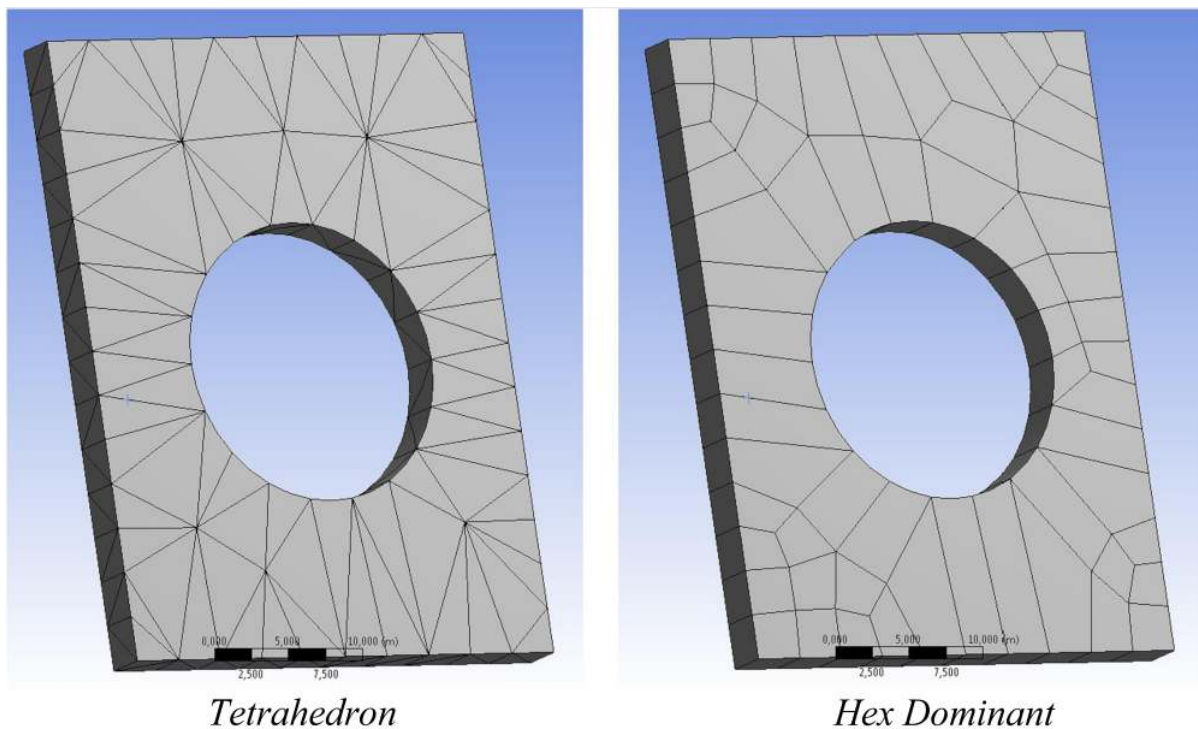


Рис. 6.16. Скінченно-елементні сітки, що отримані автоматично на базі тетраедрів та гексаедрів

Трансляція елементів *Sweep Method* дозволяє створювати регулярні сітки і домагатися кращої збіжності розрахункових результатів. За замовчуванням цей спосіб є пріоритетним для створення елементів. Автоматична генерація сітки трансляцією елементів можлива, коли об'ємна геометрична модель має однакову топологію хоча б в одному напрямку, тобто подібні перерізи вздовж деякого напрямку в просторі. У цьому випадку модель буде розбиватися на елементи у формі гексаєдрів. При розбитті можуть з'являтися елементи у формі тригранних призм (елементи клиноподібної форми), що є допустимим.

6.4. ЛОКАЛЬНА ЗМІНА СІТКИ

В Workbench є можливість локальної зміни сітки. Вибравши позицію *Sizing* (розмір елементів) випадаючого меню *Mesh Control* панелі інструментів, можна змінити щільність сітки локально. У вікні налаштувань у рядку *Type* доступні наступні опції:

- *Element Size* (розмір елементів) задає середню довжину сторін елементів для обраних геометричних об'єктів;
- *Number of Divisions* (число розбиття) задає кількість елементів на ребрі для обраних геометричних об'єктів;
- *Sphere of Influence* (зона змін у формі сфери) задає радіус сфери, всередині якої елементи генеруються за заданим розміром.

Параметри *Sizing* дозволяють змінити щільність сітки окремої деталі, збільшити або зменшити розмір елементів щодо параметрів, заданих глобально. Для ліній, поверхонь і об'ємів центр сфери за замовчуванням задається щодо глобальної системи координат.

Якщо локальна система координат вже створювалася, то в списку вікна налаштувань вона присутня, коли ж не створювалася, то центр зони зміни може бути заданий тільки за допомогою глобальної системи координат.

6.5. ПЕРЕГЛЯД СІТКИ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Після створення сітки для її візуалізації за об'ємом моделі можна задавати площину перерізу, за допомогою якої користувач

розсікає модель в області, що його цікавить. Площина перерізу для перегляду внутрішньої сітки створюється за допомогою кнопки **New Section Plane** (нова площина перерізу), розташованої на панелі інструментів. Площина перерізу **Section Plane** може показувати на екрані внутрішню сітку. Є можливість використання декількох перерізів. Можна відобразити на екрані наступне:

- елементи з будь-якої сторони вибраного перерізу;
- розсічені або цілі елементи;
- елементи в перерізі.

6.6. ПОМИЛКИ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ СІТКИ

Якщо генератор не може створити елементи правильної форми, з'являється повідомлення про помилку. Проблемні геометричні об'єкти будуть виділені, буде створена група обраних об'єктів **Problematic Geometry** – проблемна геометрія – , що дозволить виправити модель.

Помилка при генерації сітки може відбутися з ряду причин:

- для поверхонь задані несумісні розмірні параметри, що може призвести до створення кінцевих елементів некоректної форми;
- складна для автоматичного генератора сітки геометрична модель CAD, в якій присутні вузькі смуги або гвинтові поверхні;
- встановлено жорсткий контроль за формою елементів (опція **Aggressive**).

Є декілька способів уникнути відмов при генерації сітки:

- задати обґрунтовані розмірні параметри кінцевих елементів (опція **Sizing**);
- задати менші значення розмірних параметрів, що дозволить створити елементи коректної форми;
- в CAD-системі слід використовувати функції перегляду прихованих ліній, щоб виявити і видалити тонкі смуги та інші проблемні для генератора сітки геометричні об'єкти.

ЛЕКЦІЯ 7

НАВАНТАЖЕННЯ

7.1. Налаштування вирішувача.

7.2. Види навантажень і особливості їх завдання.

7.3. Конструкційні навантаження.

7.1. НАЛАШТУВАННЯ ВИРІШУВАЧА

Одним з важливих етапів підготовки до проведення розрахунку та отримання задовільних результатів є визначення зовнішніх впливів (механічних, теплових і т.д.) на конструкцію.

Зазвичай зовнішній вплив визначається на границі створеної моделі. Під термінами «обмеження» і «навантаження» розуміються всі різноманітні процеси, які відбуваються як на поверхнях твердого тіла, так і в окремих точках всередині нього. Під «обмеженням» в Workbench розуміється: закріплення, тобто обмеження переміщень і обертань у структурному аналізі, або визначення температури при вирішенні завдань теплообміну; а під «навантаженням» – додавання зосереджених або розподілених сил (структурний аналіз) або теплових потоків (задачі теплообміну) і т.д.

Завдання навантажень і додавання обмежень виконується у Workbench в модулі симуляції, основне вікно якого показано на рис. 7.1.

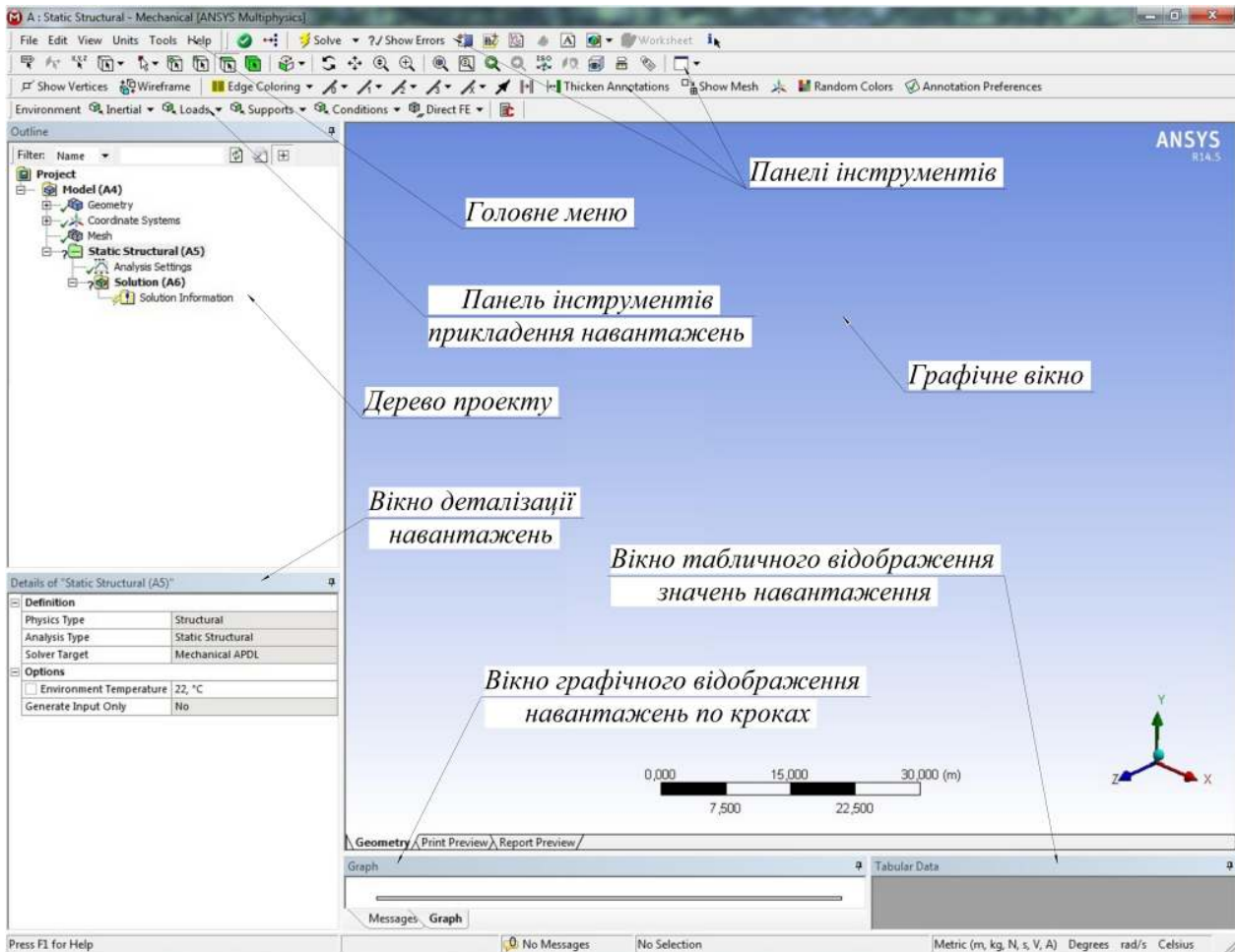



Рис. 7.1. Основне вікно модулю симуляції

Основне вікно модуля симуляції включає такі елементи:

- головне меню і панелі інструментів. Дозволяють керувати роботою модуля і містять всі команди для завдання навантажень і обмежень. Панелі інструментів надають швидкий доступ до найбільш важливих або часто використовуваних команд;
- дерево проекту **Outline**. Складається з послідовності команд завдання навантажень і обмежень;
- вікно деталізації (**Details of "..."**). Містить різні налаштування та параметри команд завдання навантажень і обмежень. При виділенні того чи іншого елемента в дереві проекту заголовок вікна деталізації відповідно змінюється (наприклад, при виділенні групи **Mesh** вікно деталізації отримає заголовок **Details Of "Mesh"**);
- графічне вікно **Geometry**. Відображає навантаження і обмеження, прикладені до моделі;

- вікно графічного відображення навантажень по кроках **Graph**. Відображає графік зміни величини навантаження при заданій кількості кроків навантаження;

- вікно табличного завдання навантажень **Tabular Data**. Тут в табличній формі представляються навантаження і обмеження, накладені на модель.

Графічне вікно модуля симуляції в процесі роботи відображає інформацію про характер навантажень, їх величині, в тому числі і по компонентах щодо вісей координат, напрямку дії, одиницях вимірювання величини, точки їх застосування або області дії. Напрямок навантажень позначається об'ємними кольоровими стрілками зі спеціальними позначками . Буква латинського алфавіту в значку дає можливість визначити за текстом в лівому верхньому кутку графічного вікна, яке навантаження або обмеження позначене даною стрілкою. Крім того, кольором виділені поверхні до яких прикладені різні навантаження.

Налаштування на відображення текстових пояснень в графічному вікні автоматичне. При необхідності відображення текстової інформації по заданих навантаженнях і обмеженнях може бути відключене. Для цього у вікні деталізації відповідного навантаження необхідно вибрати розділ **Definition** і в пункті **Suppressed** увімкнути налаштування (опція **Yes**).

7.2. ВИДИ НАВАНТАЖЕНЬ І ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ЗАВДАННЯ

Вибір типу навантажень в модулі симуляції відбувається в панелі **Environment** (рис. 7.2), що розташована у верхній частині екрана.

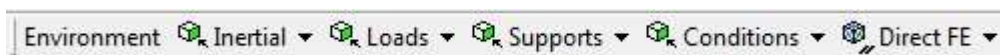


Рис. 7.2. Панель навантажень *Environment*

Ця панель стає доступна при виділенні клацанням миші розділу **Static Structural** в дереві проекту. В меню **Environment** можливий вибір наступних видів навантажень, відповідних конструкційному аналізу:

- **Inertial** – інерційні навантаження, що діють на всю конструкцію;
- **Loads** – конструкційні навантаження – сили і моменти, що діють на деталі конструкції;
- **Supports** – закріплення, тобто обмеження ступенів свободи, яке виключає рух заданих об'єктів;
- **Condition** – умови, при яких буде виконане розв'язання;
- **Direct FE** – умови прикладення навантажень.

При виборі будь-якої позиції в меню панелі **Environment** відповідне навантаження буде додане в дерево проекту в розділ **Static Structural**.

Напрямок навантажень і обмежень може співпадати або не співпадати з напрямом вісей глобальної системи координат моделі. У більшості випадків їх спрямованість можна задавати в глобальній **Global Coordinate System** або новоствореній системі координат. Для коригування напрямів навантажень і обмежень у дереві проекту необхідно вибрати позицію **Coordinate Systems**. За умовчанням пропонується глобальна координатна система, яка не може бути змінена (рис. 7.3).

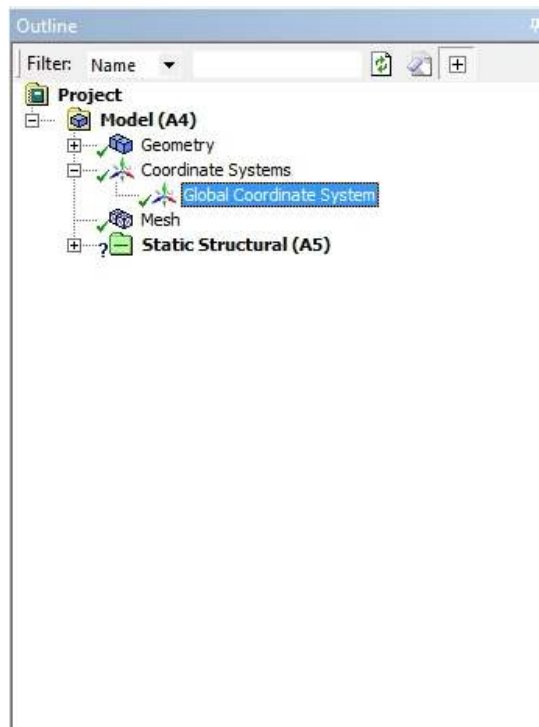


Рис. 7.3. Глобальна система координат *Global Coordinate System*

Для того, щоб створити власну координатну систему, необхідно вибрати позицію *Coordinate Systems* в дереві проекту і клікнути правою кнопкою миші. З випадаючого меню вибрати *Insert/Coordinate System*.

Щоб перейменувати власну координатну систему, необхідно натиснути правою кнопкою миші на позицію *Coordinate Systems* в дереві проекту, вибрати команду *Rename* і задати ім'я нової координатної системи.

Параметри створеної системи координат задаються у вікні деталізації (рис. 7.4), яке розташоване в лівій нижній частині екрана.

Details of "Coordinate System"	
[-] Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System	Program Controlled
[-] Origin	
Define By	Geometry Selection
Geometry	Click to Change
Origin X	0, m
Origin Y	0, m
Origin Z	0, m
[-] Principal Axis	
Axis	X
Define By	Global X Axis
[-] Orientation About Principal Axis	
Axis	Y
Define By	Default
[-] Directional Vectors	
[-] Transformations	
Base Configuration	Absolute
Transformed Configuration	[0, 0, 0,]


Рис. 7.4. Вікно деталізації новоствореної координатної системи

При цьому можливі два варіанти орієнтації нової системи (опція *Define By*):

- *Geometry Selection* – відносно будь-якого геометричного об'єкта, який вказується в параметрі *Geometry* ;
- *Global Coordinates* – відносно глобальної системи координат; в цьому випадку явно вказуються координати точки відліку *Origin* нової системи.

При орієнтації нової координатної системи по геометричному об'єкту необхідно вибрати за допомогою миші точку, лінію, поверхню або об'єм, щодо яких вона буде орієнтована, і на параметрі *Geometry*, підтвердити свій вибір, натиснувши кнопку *Apply*.

Напрямок координатних вісей системи координат користувача може бути змінено в розділах *Principal Axis* та *Orientation About Principal Axis* вікна деталізації. Для цього необхідно спочатку вибрати змінну вісь у розділі *Axis*, а потім у розділі *Define By* визначити напрям, якому ця вісь буде відповідати.

Напрямок вісі змінюється на протилежне при виборі однієї з двох стрілок  в лівому нижньому кутку графічного вікна. Обраний напрям визначає стрілка червоного кольору. Спрямованість нової вісі також буде позначена об'ємною стрілкою червоного кольору, спрямованою уздовж відповідного геометричного об'єкта моделі в її додатну сторону.

Практично у всіх навантажень є параметр *Geometry*, який вказує на об'єкт докладання: точку, ребро, грань, тіло, яких може бути кілька. Для завдання цього параметра потрібно виділити необхідний об'єкт і, клікнувши на його полі у вікні деталізації, підтвердити свій вибір натисканням кнопки *Apply*. Можлива і зворотна послідовність: спочатку виконується клік мишею в полі параметра *Geometry*, а потім – виділення об'єктів і підтвердження вибору натисненням кнопки *Apply*.

Для більшості типів навантажень значення може задаватися трьома способами:

- у вигляді фіксованого значення *Constant*;
- у табличній формі *Tabular*;
- у вигляді функціональної залежності *Function*.

За замовчуванням задається фіксоване значення величини. Вибір способу завдання навантаження здійснюється кліком миші на стрілці в правій частині вікна введення чисельного значення і подальшим вибором одного з варіантів (рис. 7.5).

Крім того, в цьому ж випадаючому меню присутні команди *Import...* та *Export...*, що дозволяють відповідно імпортувати з файлу і експортувати у файл значення.

У разі вибору способу завдання навантаження у вигляді таблиці в параметрі *Magnitude* з'являється напис *Tabular Data*.

Значення навантажень можуть змінюватися на кожному кроці чисельного розв'язання.

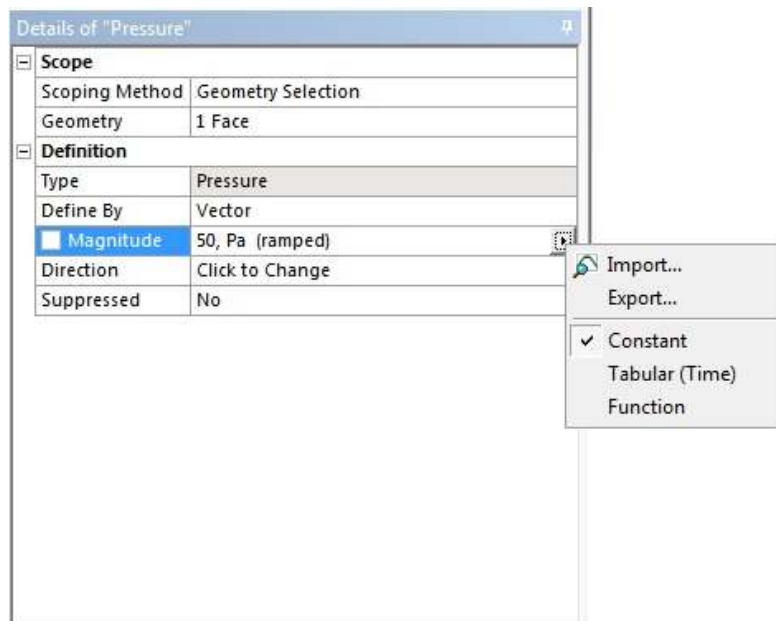


Рис. 7.5. Вибір способу завдання навантаження

Кількість кроків задається параметром *Number of Steps* елемента *Analysis Settings*, що містить налаштування поточного аналізу (рис. 7.6 і 7.7).

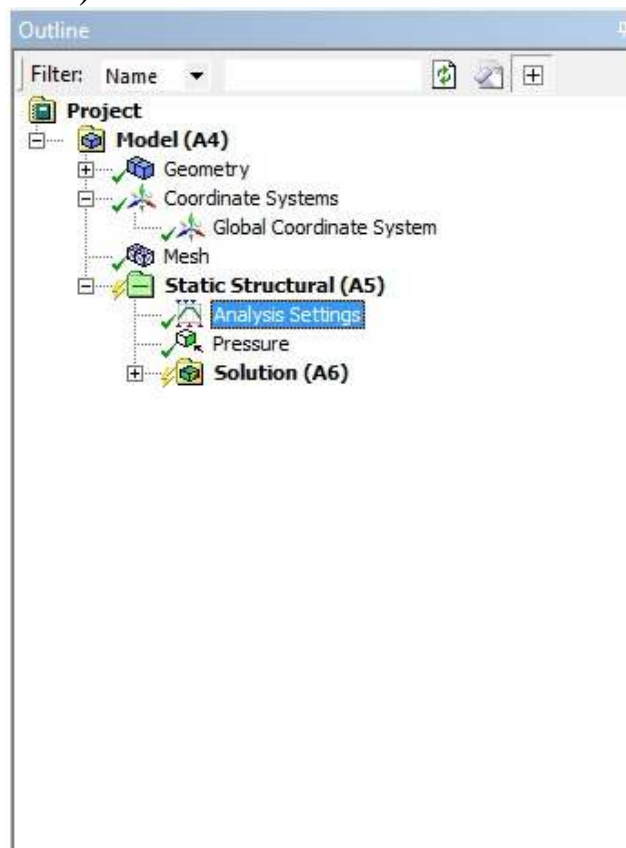


Рис. 7.6. Елемент *Analisis Settings* в дереві процесу

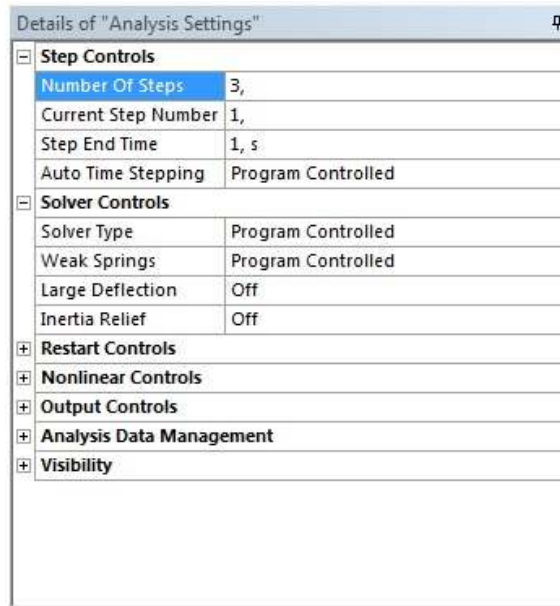


Рис. 7.7. Параметр Numbers Of Steps в елементі Analysis Settings

Задане число кроків формує кількість рядків у таблиці значень у вікні **Tabular Data**, розташованого в правому нижньому кутку екрану.

Таблиця складається з декількох колонок:

- порядковий номер рядка;
- номер кроку;
- час на кроці;
- чисельне значення величини.

По мірі заповнення чисельними значеннями рядків таблиці у вікні **Graph** формується графік зміни величини навантаження по кроках (рис. 7.8).

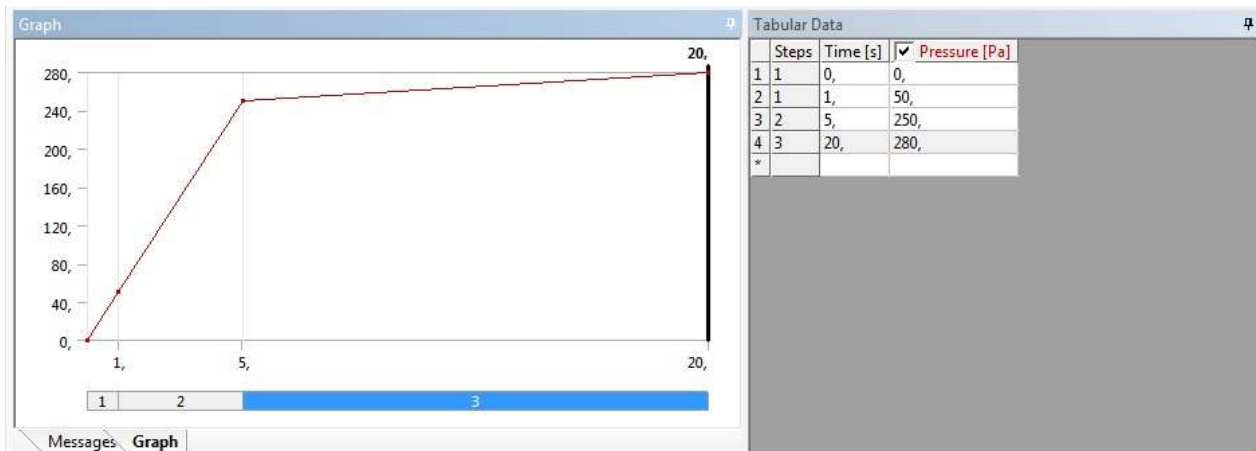


Рис. 7.8. Побудований графік зміни величини навантаження по кроках

Покрокове додавання навантаження дозволяє поступово збільшувати його величину і позитивно позначається на збіжності розв'язання.

Інерційні навантаження, які можуть бути задані в конструкційному аналізі Workbench, діляться на три типи:

- **Acceleration** – прискорення;
- **Standard Earth Gravity** – звичайна гравітація;
- **Rotational Velocity** – швидкість обертання.

На рис. 7.9 зображено випадаюче меню **Inertial**, що містить перераховані команди.



Рис. 7.9. Випадаюче меню *Inertial*

Для програми навантажень цього виду повинна бути задана густина матеріалу моделі для обчислення маси. Також можливе завдання навантаження, що діє на точкову масу.

Прискорення **Acceleration** прикладається до всієї моделі і можуть бути задані наступними способами (опція **Define By**):

- вектором **Vector**. У цьому випадку потрібно задати модуль вектора (параметр **Magnitude**) і його напрямок (параметр **Direction**). Напрямок дії вектора визначається стрілками в лівому нижньому кутку графічного вікна;

- за допомогою компонент (**Components**) по вісях координат x , y та z . При використанні цього способу вводяться чисельні значення складових прискорення по вісях координат.

Компоненти вектора прискорення можуть бути задані відносно глобальної **Global Coordinate System** або системи координат користувача (параметр **Coordinate System**).

Після завдання прискорення його величина і напрямок (об'ємна стрілка жовтого кольору) відображаються в графічному вікні (рис. 7.10).

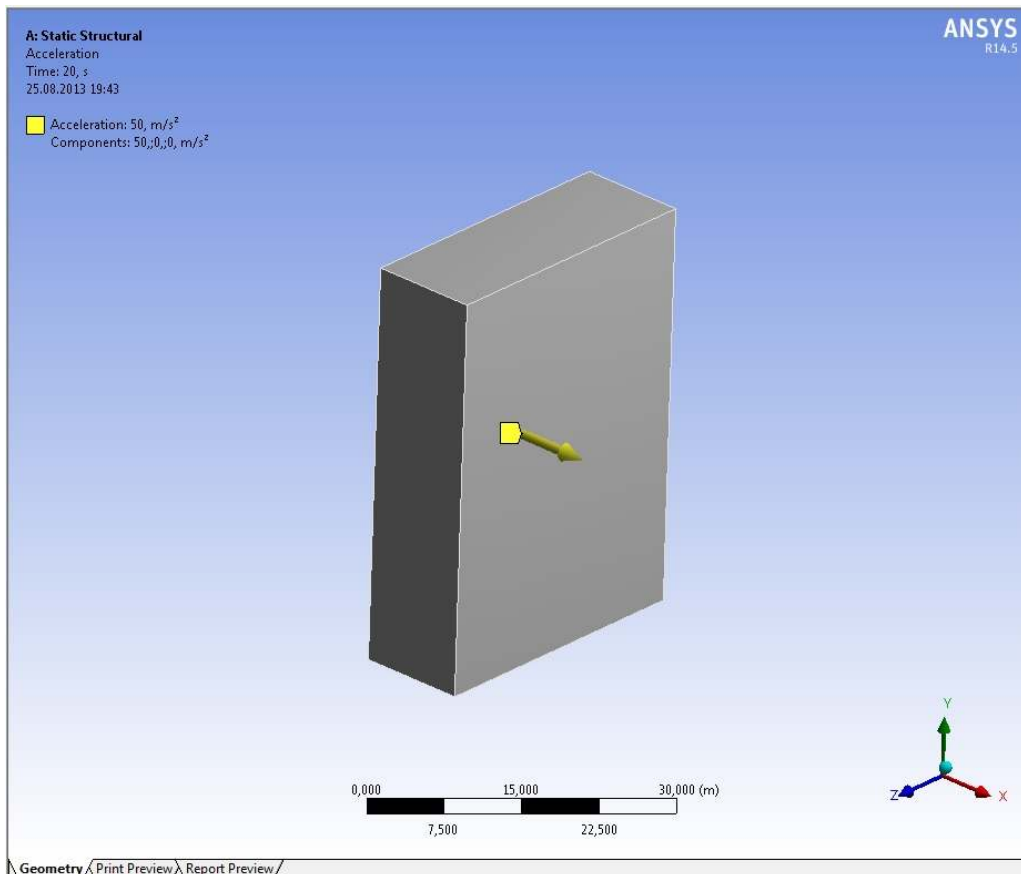


Рис. 7.10. Відображення прискорення та його значення в графічному вікні

Можливість завдання гравітаційного прискорення *Standard Earth Gravity* в Workbench має велике практичне значення зокрема при вирішенні завдань, в яких необхідно врахувати вагу моделі.

Напрямок гравітації задається уздовж однієї з вісей глобальної системи координат або системи координат користувача. На першому етапі вибирається координатна система, на другому в параметрі *Direction* задається напрямок гравітації щодо однієї з координатних вісей.

При використанні команди *Rotational Velocity* задається обертання всієї моделі щодо вісі із заданою кутовою швидкістю. Кутова швидкість прикладається до твердих тіл, оболонок і одномірних тіл. Ця команда може застосовуватися до всього тіла або до окремих його частин, проте до одного тіла може бути додана тільки один раз.

Кутова швидкість може бути визначена як вектор *Define By/Vector*, при цьому потрібно вказати вісь обертання (параметр *Axis*). Задати вісь обертання можна двома способами:

- виділити кліком миші лінію, навколо якої відбуватиметься обертання;
- виділити поверхню, нормаль до якої буде віссю обертання.

Параметр *Magnitude* задає величину кутової швидкості (у рад/с). Також кутова швидкість може бути визначена компонентами вектора (*Define By/Components*) в глобальній або локальній системі координат.

Після завдання всіх параметрів команди *Rotational Velocity* в графічному вікні відображається дугова стрілка прикладеної кутової швидкості, а інформаційні рядки в лівому верхньому кутку графічного вікна відображають визначені параметри (рис. 7.11).

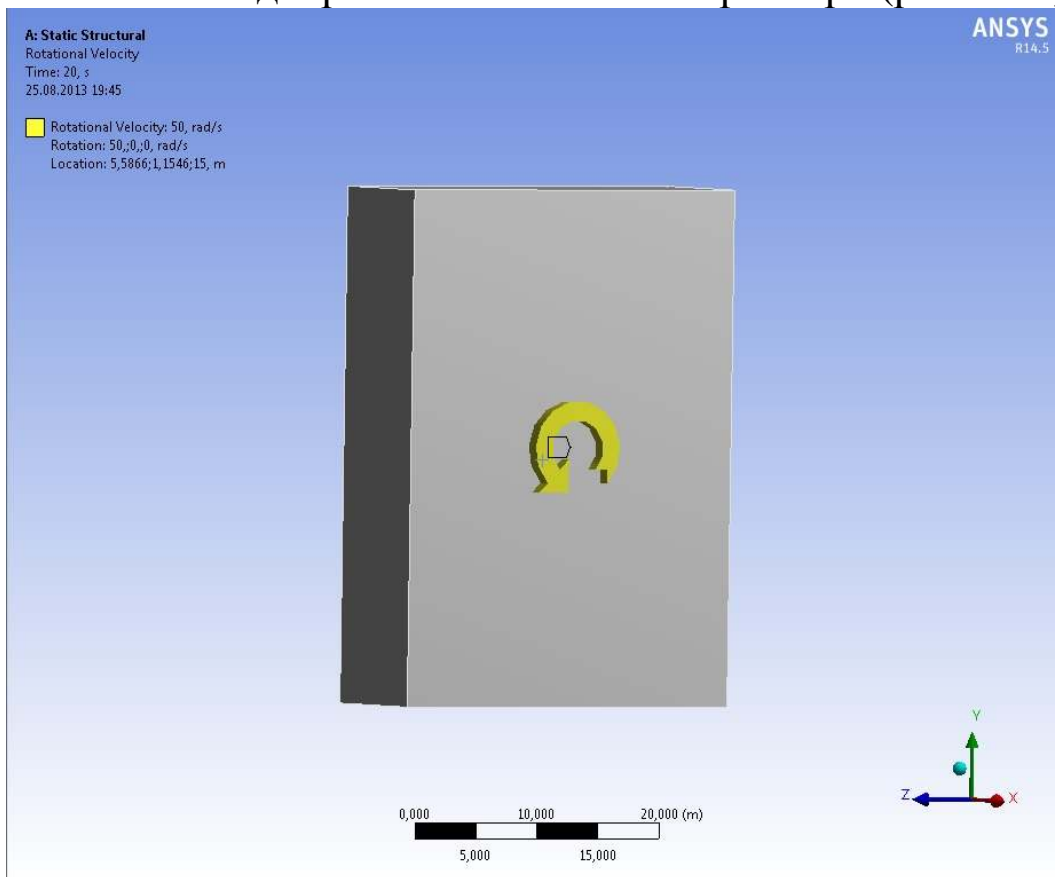


Рис. 7.11. Відображення обертання моделі та значення її кутової швидкості в графічному вікні

7.3. КОНСТРУКЦІЙНІ НАВАНТАЖЕННЯ

Конструкційні навантаження в Workbench задаються в розділі *Loads* панелі інструментів *Environment* (рис. 7.12).

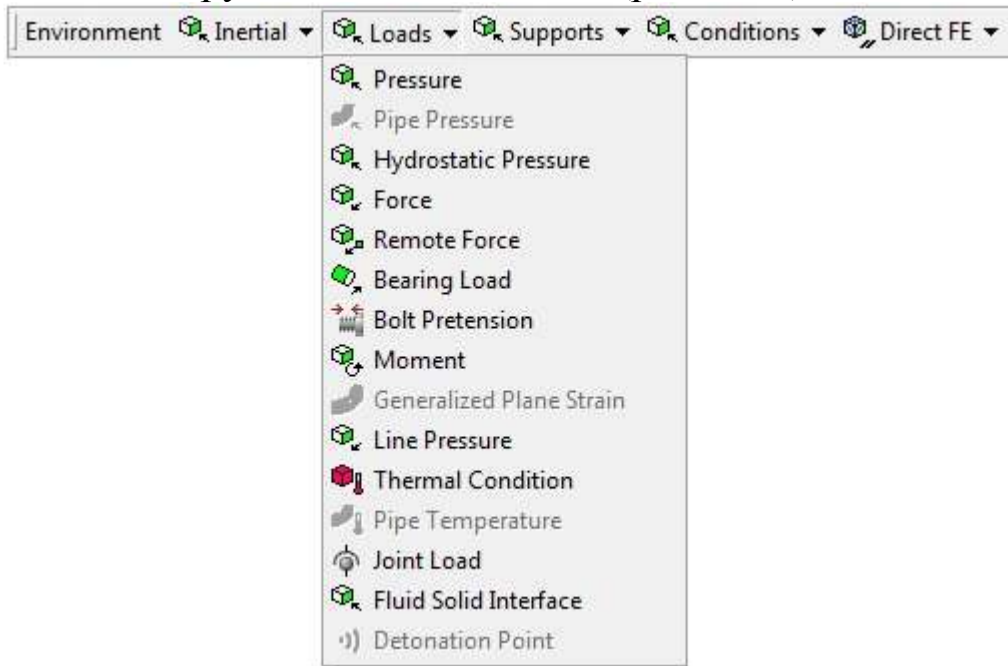


Рис. 7.12. Випадаюче меню *Loads*

Можливе завдання наступних навантажень:

- ***Pressure*** – тиск;
- ***Pipe Pressure*** – тиск в напірному трубопроводі;
- ***Hydrostatic Pressure*** – гідростатичний тиск;
- ***Force*** – сила;
- ***Remote Force*** – дистанційне навантаження;
- ***Bearing Load*** – тиск на опори;
- ***Bolt Pretension*** – натяг;
- ***Moment*** – момент;
- ***Generalized Plane Strain*** – узагальнена плоска деформація;
- ***Line Pressure*** – тиск на лінії;
- ***Thermal Condition*** – теплові навантаження;
- ***Pipe Temperature*** – температура в трубопроводі;
- ***Joint Load*** – навантаження в сполученнях;
- ***Fluid Solid Interface*** – взаємодія рідин (газів) і твердих тіл;
- ***Detonation Point*** – точка генерації вибухових хвиль.

Команда **Pressure** дозволяє задавати тиск на поверхні тіла. При цьому в дереві проекту з'являється відповідний пункт. Параметри прикладення тиску задаються у вікні деталізації (рис. 6.21). Тут проводиться вибір поверхні, на яку діє тиск (параметр **Geometry**), задається величина тиску (параметр **Magnitude**) і напрямок для прикладеного тиску (опція **Define By**).

Напрямок дії тиску можна задати вектором **Define By/Vector**, компонентами **Define By/Components** або по нормалі до заданої поверхні **Define By/Normal To**.

Додатне значення параметра **Magnitude** розглядається як тиск на поверхню, від'ємне – від поверхні.

Докладене тиск відображається в графічному вікні з зазначенням його величини і розмірності, а поверхня прикладення тиску підсвічується червоним кольором. Стрілкою близько поверхні зображується напрямок дії тиску (рис. 7.13).

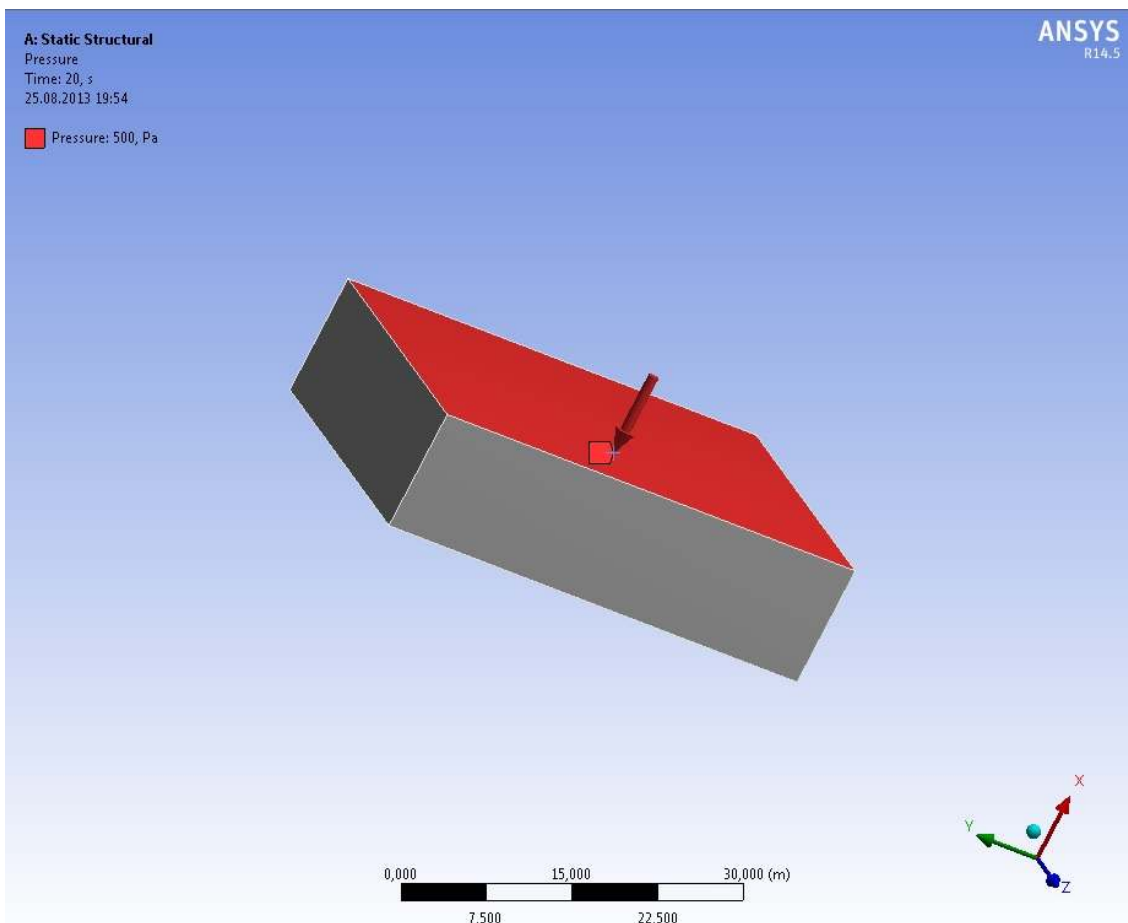


Рис. 7.13. Зображення тиску та його значення в графічному вікні

Величину тиску можна задати як фіксованою величиною – *Constant*, так і покроково в табличній формі – *Tabular*, і у вигляді функціональної залежності – *Function*. Для вибору форми завдання тиску необхідно в випадаючому меню параметра *Magnitude* (кнопка зі стрілкою праворуч) вибрати відповідну позицію.

Гідростатичний тиск задається за допомогою команди *Hydrostatic Pressure* і прикладається до поверхонь моделі за вибором користувача. Параметри та опції команди задаються у вікні деталізації. Обов'язковим параметром для визначення гідростатичного тиску є густина рідини (параметр *Fluid Density*).

Може бути вибраний спосіб завдання тиску – у вигляді вектора *Vector* або його компонентів *Components*. Величина *Magnitude* та напрям *Direction* гідростатичного тиску задається в розділі *Hydrostatic Acceleration*. Крім перерахованих обов'язкових параметрів також можливий вибір системи координат (параметр *Coordinate System*) для прикладеного навантаження (глобальна або призначена користувачем).

Приклад завдання гідростатичного тиску по поверхнях прямокутного паралелепіпеда зображений на рис. 7.14 де представлено вікно деталізації із заданими параметрами.

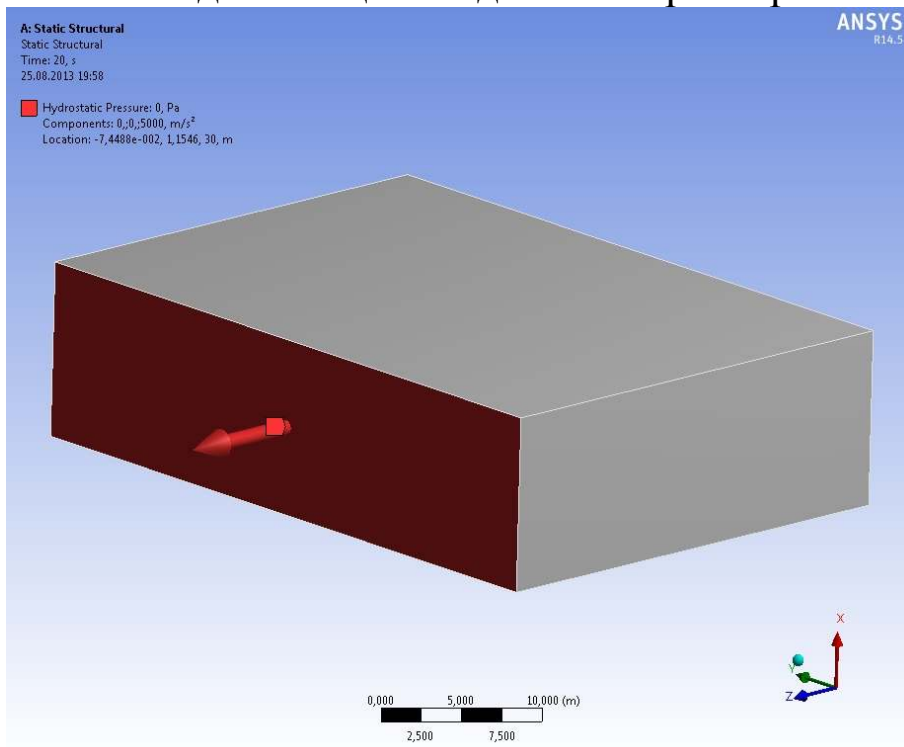


Рис. 7.14. Зображення гідростатичного тиску та його значення в графічному вікні

Команда **Force** дозволяє задавати силу. Необхідні параметри сили задаються у вікні деталізації. Сила може бути прикладена до точки, ребра або поверхні. Об'єкт прикладення сили задається в параметрі **Geometry**. Сила може бути визначена вектором **Define By/Vector** або своїми компонентами в глобальній або системі координат споживача **Define By/Components**.

Обов'язковим параметром для визначення є величина сили (параметр **Magnitude**). Величина сили може бути задана як константа, а також у вигляді таблиці або функції.

Прикладена сила розподіляється на всі виділені об'єкти. Якщо сила прикладена до двох однакових поверхонь, то на кожен діятиме половина заданої величини. При збільшенні площі поверхні прикладена сила залишається постійною, але тиск на одиницю площі зменшується.

Сила може бути додана тільки до однієї вершини. При виборі декількох вершин величина сили не буде задана.

На рис. 7.15 представлений приклад прикладення сили.

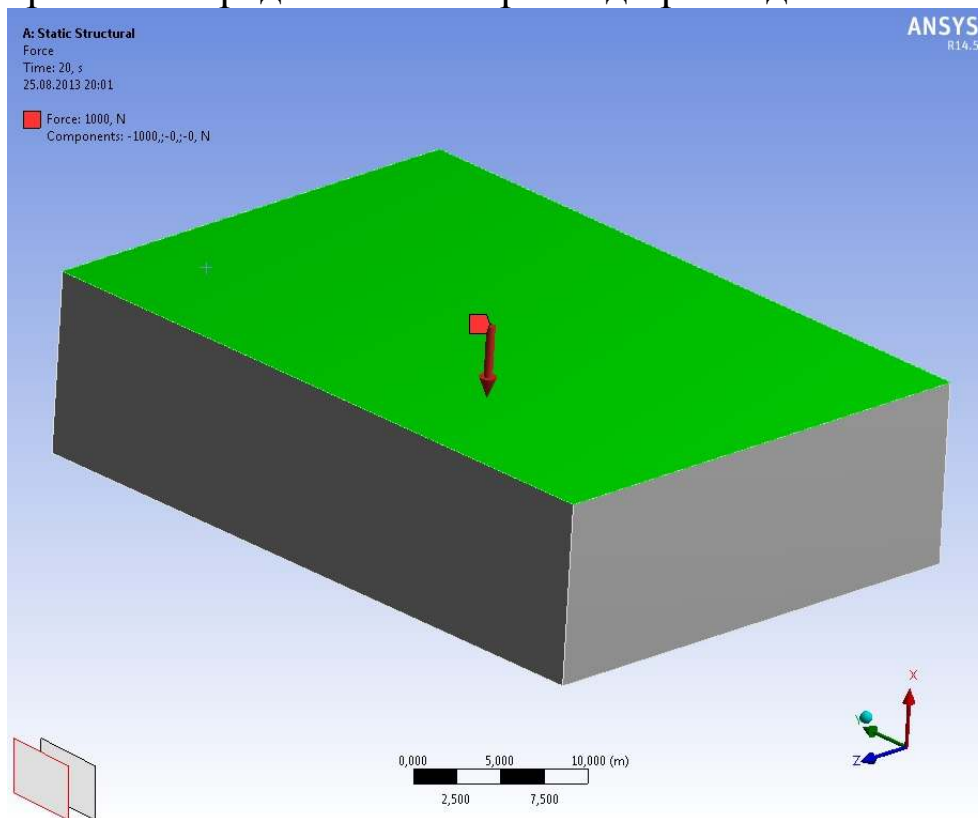


Рис. 7.15. Зображення сили та її значення в графічному вікні

Навантаження, що прикладене до грані або до ребра, що еквівалентне деякій силі і моменту сили, задається командою **Remote Force**.

Таке навантаження формально можна представити у вигляді сили, віддаленої від прикладеного об'єкта на деяку відстань. У вікні деталізації необхідно вказати точку прикладення сили (параметри **X Coordinate**, **Y Coordinate**, **Z Coordinate**) в глобальній системі координат або системі координат користувача. Сила задається напрямком вектора і його величиною **Define By/Vector** або компонентами в заданій системі координат **Define By/Components**.

Величина віддаленої сили може бути задана як константа, а також у вигляді таблиці або функції.

Для циліндричної поверхні можна задавати нерівномірно розподілене навантаження за допомогою команди **Bearing Load**. Радіальна компонента розподілена за вказаною поверхнею нерівномірно і максимальна з боку стиснення. Осьова компонента розподілена рівномірно по циліндру.

Для циліндричної поверхні може бути задана тільки одне таке навантаження. Якщо циліндрична поверхня є складовою, слід вибрати всі складові.

Нерівномірне навантаження може бути задане вектором або компонентами вектора в будь-якій системі координат. Приклад прикладення нерівномірного навантаження представлений на рис. 7.16.

Команда **Bolt Pretension** дозволяє моделювати навантаження при затягуванні болта (попередній натяг) і прикладається до циліндричної поверхні або тіла. Таке навантаження можна використовувати тільки в тривимірних моделях. Не можна прикладати дане навантаження до отвору. Для тіл слід вибрати локальну систему координат з віссю z , що спрямована уздовж попереднього натягу. Дане навантаження можна застосувати до одного тіла тільки один раз. Навантаження **Bolt Pretension** може задаватися як додаткова опція в послідовних навантаженнях.

Попередній натяг задається в Workbench двома способами: як зусилля натягу (сила) або як інсталяційний розмір (довжина) в початкових умовах. Вибір способу завдання здійснюється у вікні деталізації (опція **Define By**):

- **Load** – задається величина сили попереднього натягу (параметр *Preload*);
- **Adjustment** – задається інсталяційний розмір і його величина (параметр *Preadjustment*).

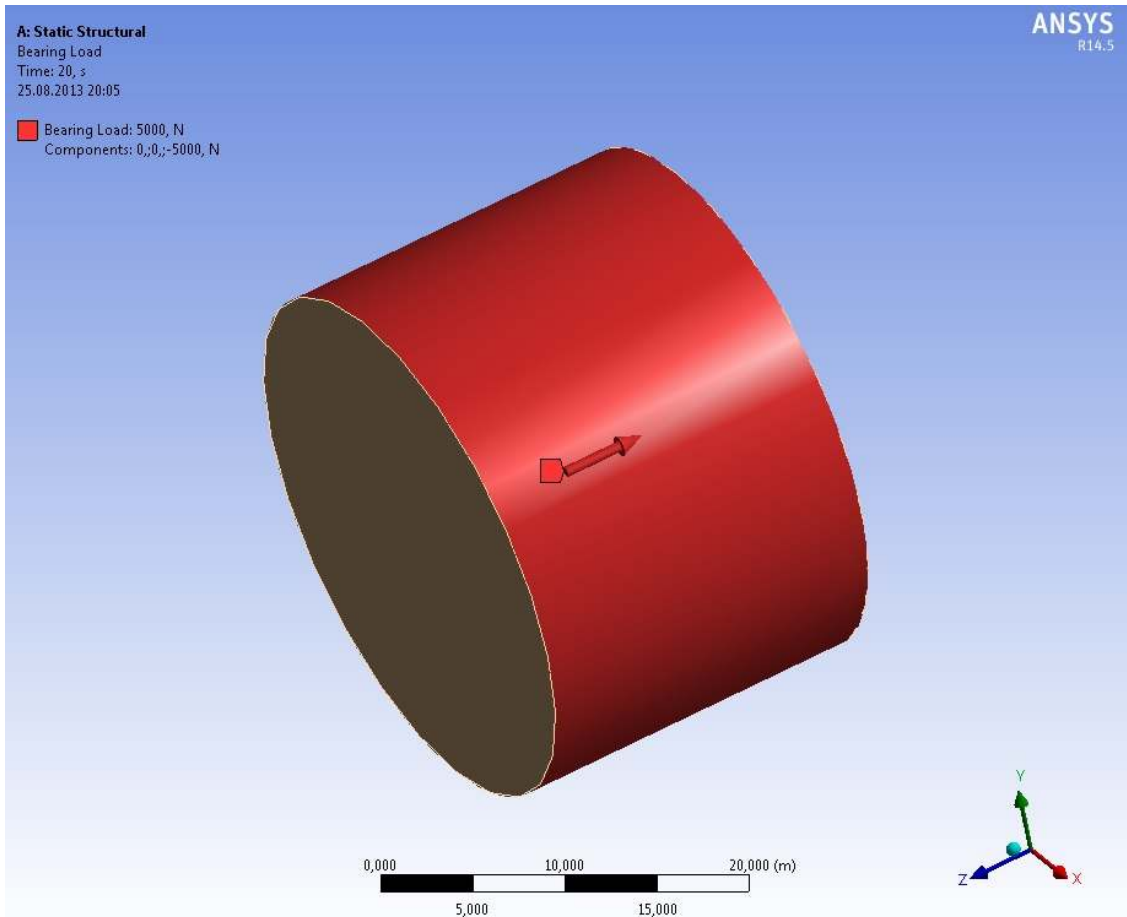


Рис. 7.16. Зображення нерівномірно розподіленого навантаження та його значення в графічному вікні

В результаті виконання цих команд задається попередній натяг, який відображується в графічному вікні у вигляді двох стрілок, спрямованих одна до одної. Приклад завдання попереднього натягу болта зображений на рис. 7.17.

При використанні команди **Bolt Pretension** рекомендується ущільнити сітку так, щоб по перерізу циліндричної поверхні вкладалося 2 або більше елементів. У статичному аналізі попереднє навантаження прикладається в початковому розв'язанні а зовнішні навантаження прикладаються в подальших розв'язаннях. Ці кроки розв'язання – попереднє навантаження і зовнішнє навантаження – виконуються послідовно.

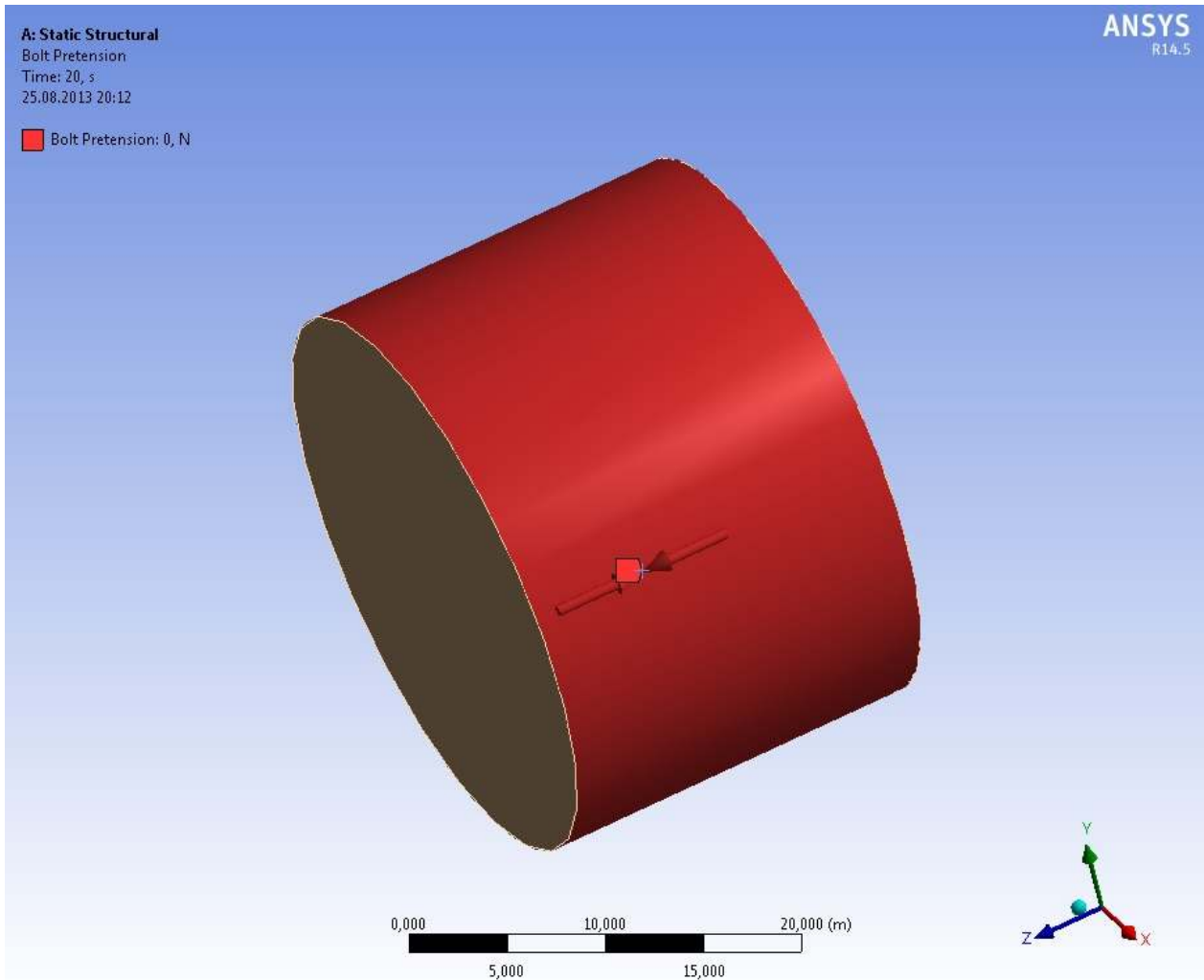


Рис. 7.17. Зображення попереднього натягу та його значення в графічному вікні

При наступних кроках розв'язання попередній натяг автоматично блокується **Lock**.

Командою **Moment** задається момент сили, який може бути прикладений до точки, до ребра або до поверхні. Параметри моменту сили встановлюються у вікні деталізації **Details Of "Moment"**. Параметр **Geometry** задає об'єкт прикладення моменту сили. Задавати момент можна вектором **Define By/Vector** або окремими компонентами вектора по вісях заданої системи координат **Define By/Components**. Напрямок обертальної дії моменту сили визначається щодо свого вектора за правилом правої руки. Величина моменту задається параметром **Magnitude** і може бути константою або функцією, яка визначається аналітичним виразом або таблично.

Об'єктів прикладення моменту сили може бути кілька, при цьому він рівномірно розподіляється між ними. Якщо момент сили прикладений до двох однакових поверхонь, то на кожну діятиме половина заданої величини.

Після завдання всіх необхідних параметрів моменту сили в графічному вікні напрямок обертальної дії моменту позначається червоною об'ємної стрілкою, а об'єкт прикладення моменту виділяється червоним кольором.

Команда ***Line Pressure*** дозволяє задавати тиск на ребрах моделі. Спочатку в параметрі ***Geometry*** необхідно визначити ребро, на якому буде задано тиск. Потім визначається спосіб завдання навантаження (опція ***Define By***): компонентами ***Components***, вектором ***Vector*** або по дотичній до вибраного ребра ***Tangential***. В останньому випадку задається тільки чисельне значення тиску.

Компоненти вектора задаються в глобальній системі координат або системі координат користувача.

Команда ***Thermal Condition*** дозволяє задавати температуру на кордонах моделі. Якщо використовується двовимірна модель, то при вказівці в параметрі ***Geometry*** одного боку моделі, температура буде задана і для іншої. Для об'ємних тіл температура задається по всій поверхні тіла. Величина температури задається параметром ***Magnitude*** і за замовчуванням дорівнює 22 °C.

ЛЕКЦІЯ 8

ГРАНИЧНІ УМОВИ (ОБМЕЖЕННЯ)

Завдання граничних умов (обмежень) – необхідний етап скінченно-елементного аналізу. Число граничних умов для моделі повинно бути достатнім для розрахунку розподілів всіх невідомих величин.

Граничні умови в Workbench задаються в розділі *Supports* панелі інструментів *Environment* (рис. 8.1) і поділяються на такі типи:

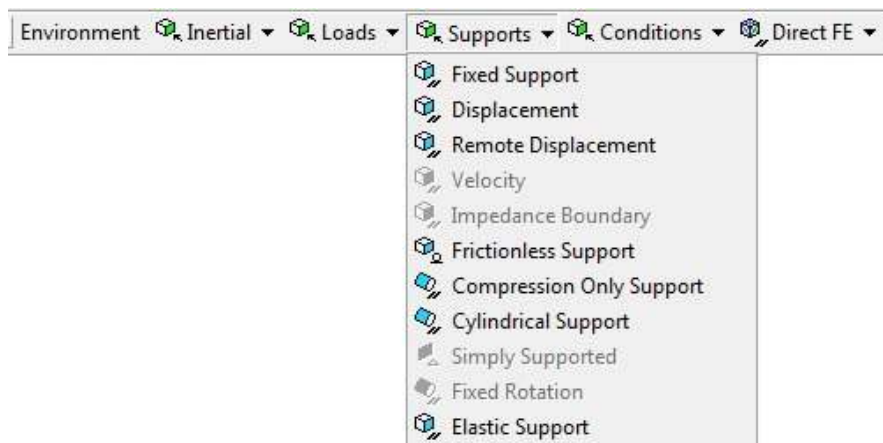


Рис. 8.1. Випадаюче меню Supports

- *Fixed Support* – жорстке закріплення;
- *Displacement* – переміщення;
- *Remote Displacement* – переміщення з поворотом;

- *Velocity* – швидкість;
- *Impedance Boundary* – граничний опір;
- *Frictionless Support* – закріплення без тертя;
- *Compression Only Support* – закріплення стисненням;
- *Cylindrical Support* – циліндричне закріплення;
- *Simply Supported* – просте закріплення;
- *Fixed Rotation* – заборона поворотів;
- *Elastic Support* – пружне закріплення;
- *Coupling* – зв'язування;
- *Constraint Equation* – обмеження, яке визначається рівнянням.

Жорстка закріплення *Fixed Support* виключає всі лінійні і обертальні переміщення обраних вершин, ребер, поверхонь.

Щоб задати жорстке закріплення, необхідно вставити команду *Fixed Support* в дерево проекту, потім вибрати необхідні об'єкти й у вікні *Details Of «Fixed Support»* підтвердити свій вибір натисканням кнопки *Apply* в полі параметру *Geometry*.

В графічному вікні жорстке закріплення відображається виділенням синім кольором закріпленої поверхні, ребра або точки (рис. 8.2).

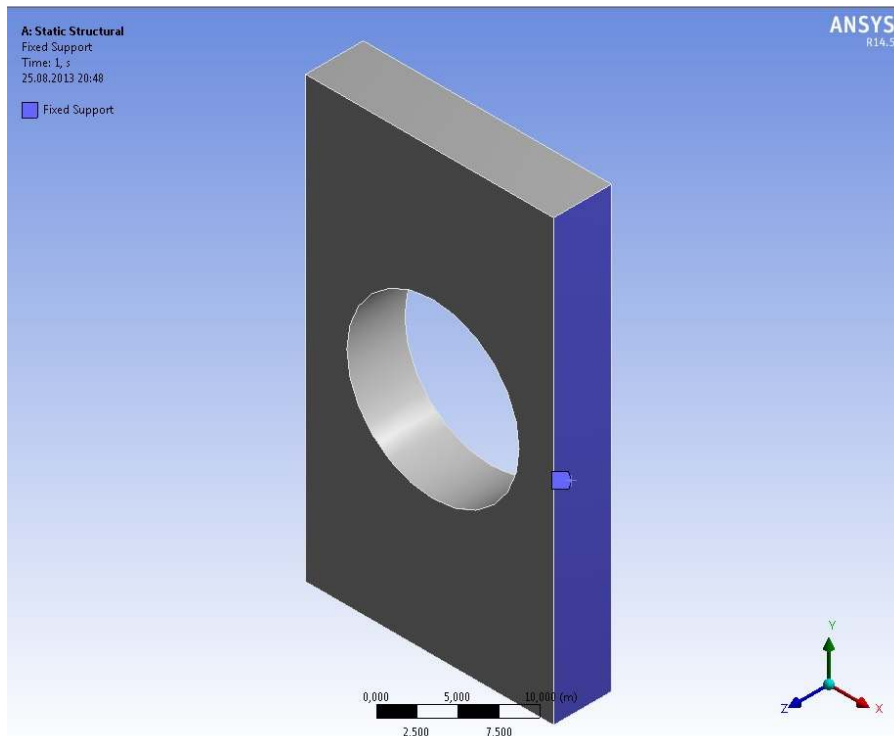


Рис. 8.2. Зображення жорсткого закріплення та його значення в графічному вікні

Переміщення вибраних вершин, ребер, поверхонь або об'ємів задається командою **Displacement**. Необхідні геометричні об'єкти вказуються у параметрі **Geometry**. Переміщення може бути задане двома способами (опція **Define By**):

- компонентами **Components** відносно глобальної системи координат, або системи координат користувача;
- по нормалі до обраної поверхні **Normal To**.

Знак «мінус» для переміщення відповідає від'ємному напрямку обраної вісі. Значення «0» для компоненти переміщення означає закріплення об'єкта у відповідному напрямку. Незазначені значення компоненти означають вільний рух об'єкта у відповідному напрямку (значення **Free** в полі компоненти).

В графічному вікні об'єкт, на якому задано переміщення, виділяється червоним кольором, стрілкою того ж кольору вказується напрямок його дії, а в текстовій частині представлені компоненти, які складають підсумковий вектор.

Нижче представлений приклад завдання переміщення верхньої грані паралелепіпеда (рис. 8.3).

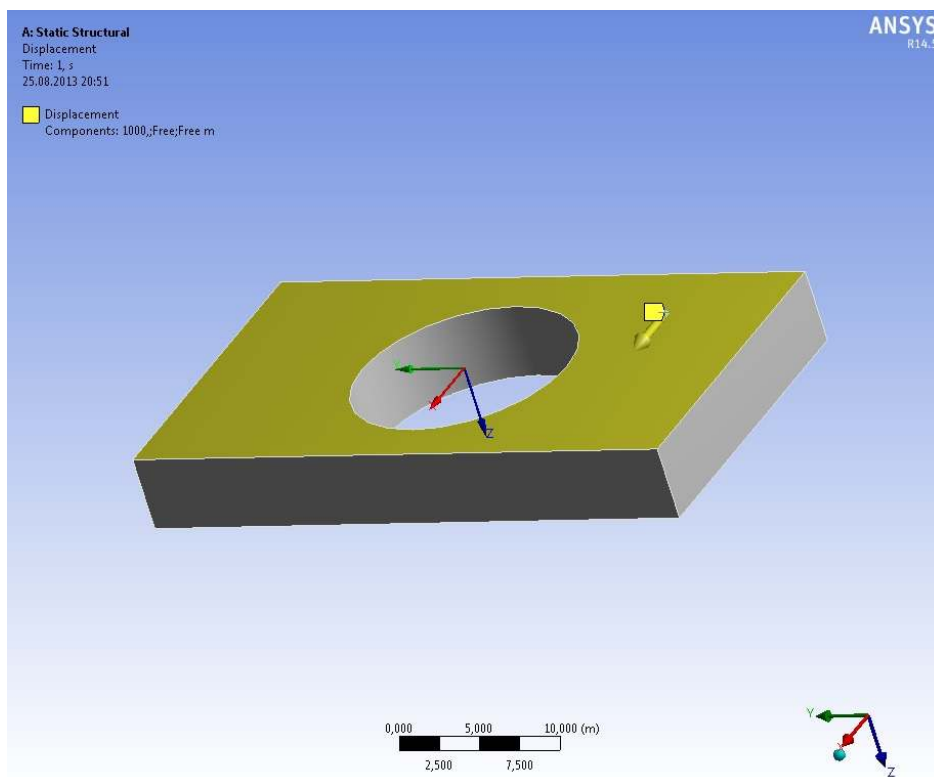



Рис. 8.3. Зображення переміщення верхньої грані та його значення в графічному вікні

Переміщення з поворотом навколо деякого центру задається за допомогою команди **Remote Displacement**. У вікні **Details of "Remote Displacement"** потрібно вибрати геометричний об'єкт, задати величину переміщення та кути повороту відносно вісей глобальної системи координат або системи координат користувача. Центр повороту задається координатами (параметри **X Coordinate**, **Y Coordinate**, **Z Coordinate**).

На рис. 8.4 зображений приклад переміщення з поворотом, прикладеного до виділеної поверхні паралелепіпеда. Об'ємною стрілкою жовтого кольору на рисунку позначено напрямок переміщення, значком  – центр повороту.

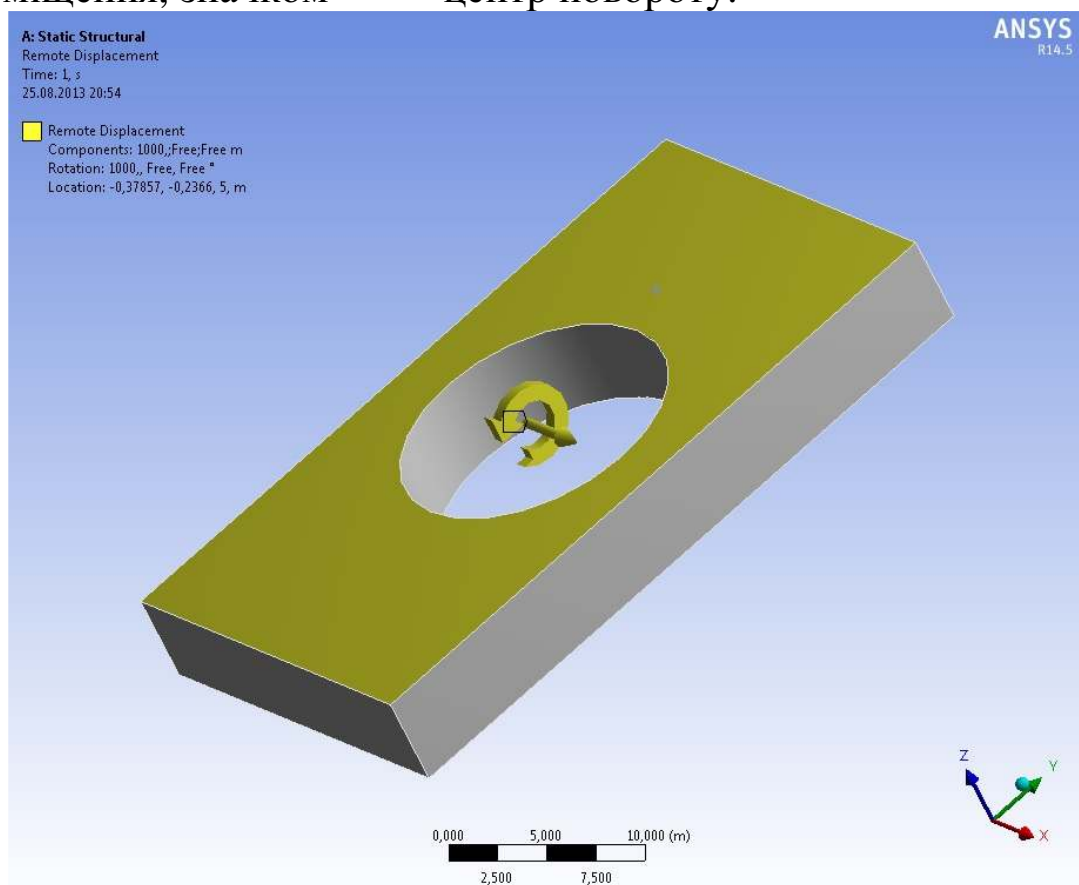


Рис. 8.4. Зображення переміщення з поворотом верхньої грані та його значення в графічному вікні

Текстова інформація графічного вікна містить перелік заданих компонент переміщення, кутів повороту і координат центру повороту із зазначенням їх величини і одиниці вимірювання.

Команда **Frictionless Support** дозволяє задавати закріплення без тертя і забороняє переміщення по нормалі до поверхні. Така

гранична умова може бути задана тільки на поверхні. Для твердих тіл закріплення без тертя може бути граничною умовою типу «площина симетрії» (площина симетрії задається заборонаю переміщень по нормалі). Поверхню необхідно вказати в параметрі **Geometry** і підтвердити вибір натисканням кнопки **Apply**.

Приклад закріплення без тертя до поверхні геометричної моделі представлений на рис. 8.5. Закріплена поверхня виділена синім кольором.

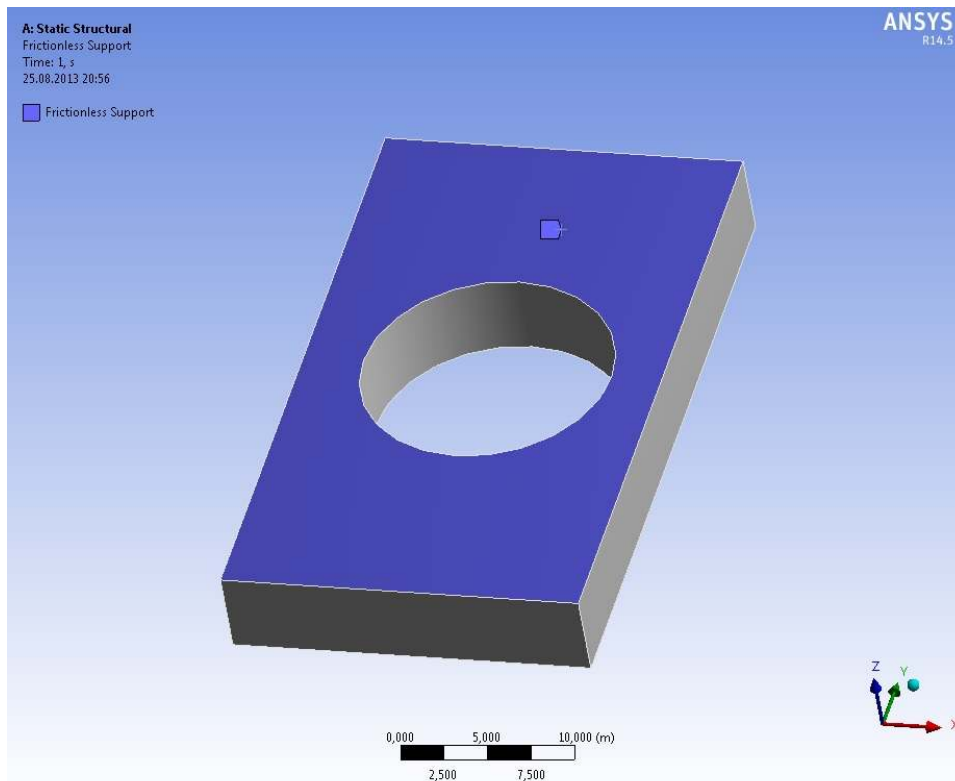


Рис. 8.5. Зображення закріплення без тертя верхньої грані в графічному вікні

Команда **Compression Only Support** виключає стиск і застосовується до поверхні. Необхідна поверхня задається в параметрі **Geometry**. Дане обмеження забороняє рух по нормалі в напрямку стиснення. Його можна використовувати для моделювання жорсткого закріплення поверхні, що контактує з деталлю в збірці, що має таку ж форму. Це дозволяє не вводити в розрахунок в явному вигляді контактуючу деталь.

Розглянуту команду можна використовувати для закріплення циліндричної поверхні, де форма поверхні, що стискається залишається незмінною. Сторона, що працює на розтяг, піддається деформації.

Використання команди ***Compression Only Support*** вимагає ітераційного нелінійного розв'язання. Сторона, що стискається невідома заздалегідь, тому необхідний ітераційний вирішувач, щоб виявити, яка сторона працює на стиск.

Команда ***Cylindrical Support*** реалізує циліндричне закріплення і може бути застосована до циліндричної поверхні для випадку малих деформацій в лінійному аналізі.

Закріплення циліндричної поверхні можливо в осьовому ***Axial***, радіальному ***Radial*** або дотичному ***Tangential*** напрямках. Відповідні опції у вікні налаштувань можуть приймати два значення: ***Free*** – вільне переміщення поверхні і ***Fixed*** – виключення переміщення в заданому напрямку (фіксація).

Поверхня вважається закріпленою, якщо хоча б один з напрямків ***Radial***, ***Axial*** або ***Tangential*** буде зафіксовано.

Команда ***Simply Supported*** застосовується для заборони переміщень ребер і вершин плоских або одновимірних моделей. Застосування цієї команди до ребра або вершин забороняє будь-яке переміщення об'єкта, але дозволяє обертання навколо нього. Для вказівки геометричного об'єкта необхідно вибрати потрібне ребро або вершину і підтвердити вибір, натиснувши на кнопку ***Apply*** в полі параметра ***Geometry***.

В графічному вікні закріплені ребра чи вершини виділяються синім кольором.

Команда ***Fixed Rotation*** аналогічна попередній і застосовується для заборони поворотів поверхонь, ребер і вершин плоских або одновимірних моделей. При використанні команди ***Fixed Rotation*** на виділених геометричних об'єктах забороняється поворот навколо вісей, але дозволяється переміщення вздовж них.

Для вказівки геометричного об'єкта необхідно вибрати потрібне ребро або вершину і підтвердити вибір, натиснувши на кнопку ***Apply*** в полі параметра ***Geometry***. Заборона поворотів може бути встановлена по одній або декількох вісях координатної системи. При цьому необхідно вибрати відповідну опцію параметрів ***Rotation X***, ***Rotation Y***, ***Rotation Z***. ***Fixed*** – закріплення прикладене, ***Free*** – вільне переміщення в зазначеному напрямку. За умовчанням кожному параметру привласнюється значення ***Fixed***. Напрямок вісей координат буде залежати від того, яка система

координат була обрана – глобальна *Global Coordinate System* або та, що задана користувачем. В графічному вікні закріплені лінії виділяються синім кольором.

ЛЕКЦІЯ 9

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ТА ЇХ ОБРОБКА

- 9.1. Параметри і опції вирішувача.
- 9.2. Керування результатами розв'язання.
- 9.3. Керування поточним аналізом.
- 9.4. Керування відображенням навантажень.

9.1. ПАРАМЕТРИ І ОПЦІЇ ВИРІШУВАЧА

Параметри та опції вирішувача встановлюються в розділі дерева проекту. Всі вони розділені на групи, кількість і склад яких залежить від типу поточного інженерного аналізу. Для міцнісного аналізу *Static Structural* налаштування вирішувача представлені в наступному переліку:

1. *Step Controls* – керування кроками чисельного розв'язання;
 - *Number Of Steps* - кількість кроків розв'язання;
 - *Current Step Number* - номер поточного кроку;
 - *Step End Time* - час кінця поточного кроку;
 - *Auto Time Stepping* - регулювання покрокового часу.
2. *Solver Controls* – керування вирішувачем:
 - *Solver Type* – визначення типу вирішувача;
 - *Weak Springs* – додавання пружин малої жорсткості;

- *Large Deflection* – облік великих деформацій;
 - *Inertia Relief* – керування силами інерції.
3. *Nonlinear Controls* – керування нелінійним розв’язанням:
- *Force Convergence* – критерій збіжності за силами;
 - *Moment Convergence* – критерій збіжності за моментами;
 - *Displacement Convergence* – критерій збіжності за переміщеннями;
 - *Rotation Convergence* – критерій збіжності за кутовими переміщеннями (поворотами);
 - *Line Search* – керування збіжністю ітераційного методу Ньютона-Рафсона.
4. *Output Controls* – керування результатами розв’язання:
- *Calculate Stress* – розрахунок напружень;
 - *Calculate Strain* – розрахунок деформацій;
 - *Calculate Contact* – розрахунок контакту;
 - *Calculate Results At* – розрахунок результатів.
5. *Analysis Data Management* – керування даними аналізу:
- *Solver Files Directory* – робоча директорія;
 - *Future Analysis* – майбутній аналіз;
 - *Scratch Solver Files Directory* – файл рішення директорії;
 - *Save ANSYS db* – збереження результатів у форматі бази даних ANSYS;
 - *Delete IJneededFiles* – видалення тимчасових файлів;
 - *Nonlinear Solution* – нелінійне розв’язання;
 - *Solver Units* – вибір системи одиниць вимірювання вирішувача;
 - *Solver Unit System* – відображення системи одиниць, використовуваної в процесі розв’язання.
6. *Visibility* – керування відображенням навантажень.

9.2. КЕРУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТАМИ РОЗВ’ЯЗАННЯ

Група *Output Controls* дозволяє керувати результатами чисельного розв’язання і складається з наступних опцій (рис. 9.1):

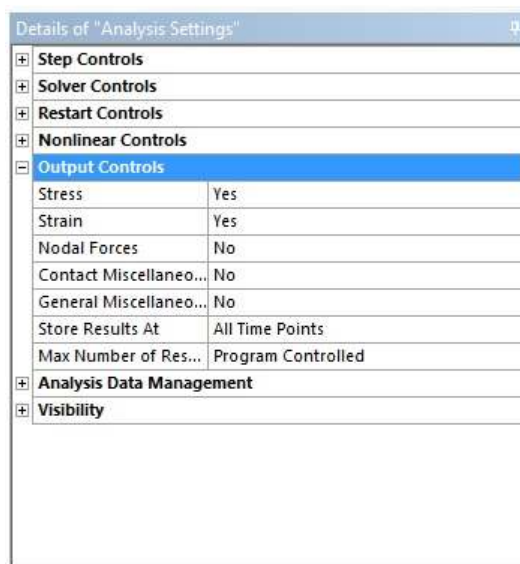


Рис. 9.1. Група Output Controls у вікні Details of "Analysis Settings"

- **Calculate Stress;**
- **Calculate Strain;**
- **Calculate Contact;**
- **Calculate Results At.**

Три перші опції дозволяють виключати з розрахунку наступні характеристики: напруження **Stress**, деформацію **Strain**, параметри контактуючих тіл **Contact**. Остання опція **Calculate Results At** визначає значення часу, в яких результати повинні бути доступні для постпроцесингу і записані у файл результатів:

- **All Time Points** – всі кроки за часом;
- **Last Time Point** – останній крок за часом;
- **Equally Spaced Time Point** – кроки з часу через рівні інтервали.

В останньому випадку потрібно задати кількість тимчасових точок значення параметра **Number Of Time Points**. Відзначимо, що при використанні вирішувача ANSYS максимальну кількість наборів результатів, що включаються у файл результатів для одного аналізу, за замовчуванням дорівнює 1000.

9.3. КЕРУВАННЯ ПОТОЧНИМ АНАЛІЗОМ

Опції групи **Analysis Data Management** призначені для організації роботи з даними поточного аналізу. Шлях до модельних

файлів, необхідних для запуску вирішувача, зберігає параметр ***Solver Files Directory***.

Ця інформація доступна тільки для перегляду.

Опція ***Future Analysis*** вказує, чи будуть результати цього аналізу використовуватися як навантаження або початкова умова (стан) в подальшому аналізі.

Доступно два значення: ***None*** і ***Prestressed Analysis***.

Інформаційний параметр ***Scratch Solver Files Directory***, доступний тільки для перегляду, показує шлях до директорії, в яку буде записуватися поточне чисельне розв'язання.

По завершенні чисельного розв'язання, у цей параметр записується порожній рядок.

Опція ***Save ANSYS db*** дозволяє зберегти розрахункові результати у форматі бази даних ANSYS.

Вона включається в тому випадку, якщо базу даних передбачається відкривати в Mechanical APDL (ANSYS з класичним інтерфейсом).

Опція ***Delete Unneeded Files*** призначена для видалення з робочих папок Workbench тимчасово створених файлів. За умовчанням вона має значення ***"Yes"***, тобто тимчасові файли будуть видалені. При необхідності ця опція може бути відключена.

Якщо в розглянутій задачі задані нелінійні контактні або граничні умови, нелінійна поведінка матеріалів та ін., то потрібно нелінійне розв'язання.

У цьому випадку автоматично активізується відповідний вирішувач, а його статус відображається опцією ***Nonlinear Solution***. Нелінійний вирішувач вимагає більше часу, ніж лінійний, так як для отримання розв'язання виконується більше число ітерацій.

Опція ***Solver Units*** (рис. 9.2) надає можливість вибору для вирішувача системи одиниць вимірювання і має два налаштування: ***Active System*** – активна система одиниць та ***Manual*** – ручний вибір системи одиниць.

Типово для вирішувача задана активна (використовувана) система одиниць, яка встановлюється в пункті ***Unit*** головного меню. Використовувана користувачем система одиниць відмічається в ньому галочкою ліворуч.

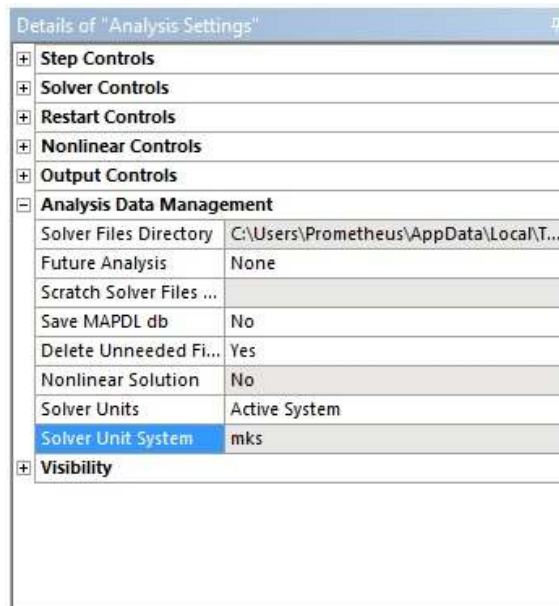


Рис. 9.2. Група *Analysis Data Management* у вікні *Details of "Analysis Settings"* з обраним пунктом *Solver Unit System*

В цьому випадку параметр *Solver Unit System* буде доступний тільки для перегляду. При виборі значення *Manual* в полі параметра *Solver Unit System* надається вибір передбачених у програмі систем одиниць вимірювання.

9.4. КЕРУВАННЯ ВІДОБРАЖЕННЯМ НАВАНТАЖЕНЬ

Група налаштувань *Visibility* дозволяє керувати відображенням навантажень в поточному аналізі. Навантаження і обмеження позначаються латинськими літерами в алфавітному порядку. За замовчуванням відображаються всі задані навантаження. Для відключення відображення навантаження потрібно у відповідному полі змінити значення *Display* на *Omit*.

З М І С Т

ПЕРЕДМОВА	4
<i>Лекція 1. Метод скінченних елементів</i>	5
1.1. Загальна інформація.....	5
1.2. Основні поняття МСЕ.....	6
1.3. Інтерполяції шуканої функції за допомогою функції форми.....	10
1.4. Рівняння жорсткості скінченних елементів.....	13
1.5. Розв'язуючі рівняння МСЕ. граничні та початкові умови.....	15
1.6. Розв'язання рівнянь МСЕ.....	18
1.7. Аналіз результатів розв'язання.....	20
1.8. Реалізація МСЕ в пакеті ANSYS.....	21
<i>Лекція 2. Основи роботи в ANSYS Workbench</i>	24
2.1. Графічний інтерфейс Workbench.....	25
2.2. Робота з проектом в Workbench.....	28
<i>Лекція 3. Геометричне моделювання</i>	35
3.1. Графічний інтерфейс модулю Design Modeler.....	37
3.2. Створення ескізу геометричної моделі.....	43
3.3. Інструменти малювання.....	47
3.4. Інструменти редагування ескізу.....	49
3.5. Завдання обмежень та зв'язків між об'єктами.....	53
3.6. Завдання розмірних параметрів моделі.....	55
<i>Лекція 4. Створення об'ємних моделей</i>	60
4.1. Найпростіші операції моделювання.....	61
4.2. Керування елементами в дереві побудови.....	70
<i>Лекція 5. Керування матеріалами та їх властивостями</i>	73
5.1. Графічний інтерфейс модуля керування матеріалами.....	74
5.2. Робота з матеріалами та їх властивостями.....	77
5.3. Використання пластичних матеріалів.....	81
<i>Лекція 6. Генерація скінченно-елементної сітки</i>	87
6.1. Порядок розбиття.....	87

6.2. Загальні налаштування генератора сіток.....	91
6.3. Робота з меню Mesh Control.....	98
6.4. Локальна зміна сітки.....	101
6.5. Перегляд сітки скінченних елементів.....	101
6.6. Помилки при генерації сітки.....	102
<i>Лекція 7. Навантаження</i>	103
7.1. Налаштування вирішувача.....	103
7.2. Види навантажень і особливості їх завдання.....	105
7.3. Конструкційні навантаження.....	114
<i>Лекція 8. Граничні умови (обмеження)</i>	122
<i>Лекція 9. Результати розв'язання та їх обробка</i>	129
9.1. Параметри і опції вирішувача.....	129
9.2. Керування результатами розв'язання.....	130
9.3. Керування поточним аналізом.....	131
9.4. Керування відображенням навантажень.....	133