

Розділ 3

СТВОРЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ТІЛА

Скінченно-елементна модель тіла може створюватися автоматично (на основі створеної геометричної моделі) або у діалоговому режимі (без геометричної моделі) або комбінацією цих варіантів. Ще її можна отримати з інших джерел. У цьому випадку потрібно розпочати новий проект (**File**→**New**), дати команду **File**→**Import**→**Analysis Model...**, обрати назву програми, яка створила модель, вказати (при необхідності) варіант версії формату, обрати файл у файлової системі; або дати команду **File**→**Import**→**FEMAP Neutral...**, знайти файл моделі з розширенням імені **.neu** або **.fno**.

Кожному скінченному елементу при створенні необхідно надати деякі властивості: тип SE, геометричні характеристики, порядок апроксимації у SE, матеріал, з якого він створений тощо. Остання характеристика (матеріал) може вибиратися з бази даних (раніше створених), може мати властивості, залежні від деяких параметрів. Такі залежності формулюються за допомогою функцій (див. Розділ 1.8).

3.1. Завдання властивостей матеріалів

Як вже вказувалося у ВСТУПі, FEMAP не має конкретну систему вимірів геометричних і фізичних величин. Тому при створенні моделі користувачу необхідно обрати конкретну систему вимірів, та суворо дотримуватися неї. У FEMAP є діалог перетворення розмірностей (див. рис.3.1), за допомогою якого можна швидко отримати масштабні коефіцієнти перетворення *похідних* величин: достатньо для *основної* величини (секція „**Base Factors**”) у полі „**Multiply**” ввести нове значення масштабного коефіцієнту (довжини, сили, часу, енергії), а у полі „**Add**” – значення початку відліку та дати команду „**Calculate**”. За допомогою кнопки „**Invert**” можна миттєво інвертувати призначення, а кнопки „**Load...**” – зчитати масштабні коефіцієнти з одного із файлів, наданих фірмою – розробником FEMAP (мають розширення імені **.cf**). Ця діалогова панель викликається командою **Tools**→**Convert Units...**

Для введення у модель нового матеріалу командою „**Model**→**Material...**” викликається діалогова панель „**Define Isotropic Material**” (див. рис.3.2-а). Якщо матеріал має більш складні властивості, потрібно кнопкою „**Type...**” викликати діалогову панель „**Material Type**” (див. рис.3.2-б) та зробити необхідне призначення (для „**Other Types**” є багато спеціальних варіантів, характерних для програм **LS-DYNA3D**, **ABAQUS** та **MARC**). Діалогова панель для введення властивостей матеріалу прийме необхідний вигляд.

За допомогою кнопки „**Load...**” можна викликати список матеріалів, поміщених у базу даних, обрати необхідний.

Для створення матеріалу потрібно:

- вказати ім'я матеріалу (**Title**), при необхідності можна встановити для нього інші **ID** та рівень (**Layer**);
- ввести у діалогові вікна необхідні для розв'язування крайової задачі значення (інші можна не вводити), причому строго дотримуватися обраної системи (див. табл.3.1);

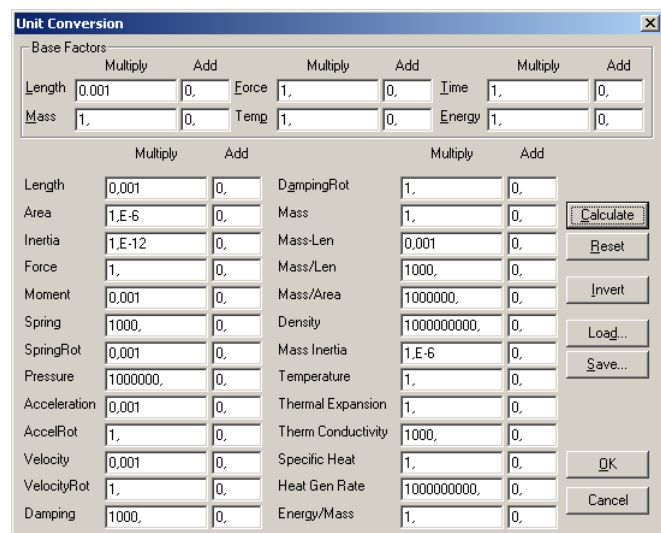


Рис.3.1. Діалогова панель перетворення розмірностей

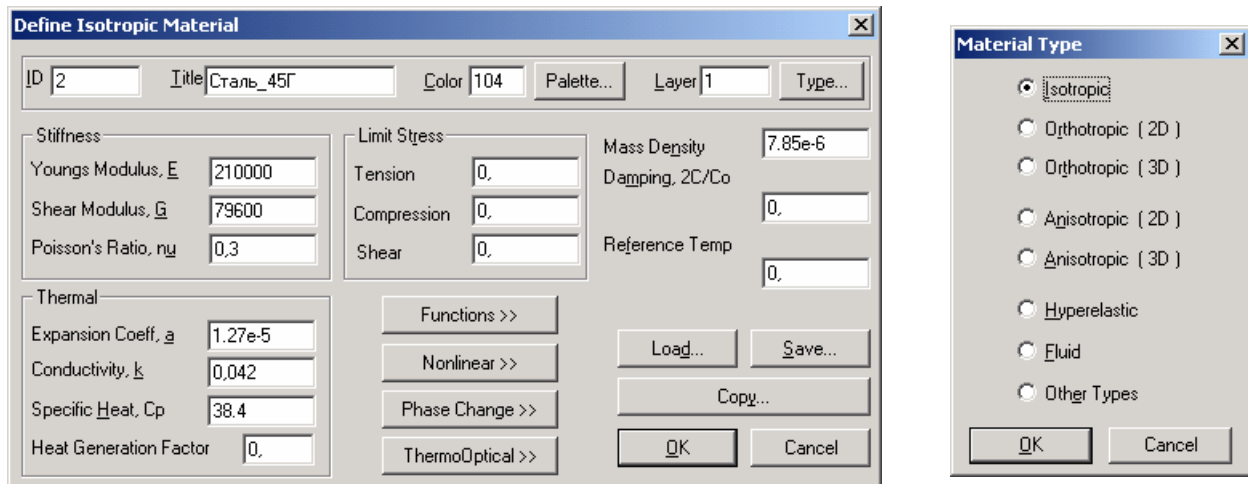


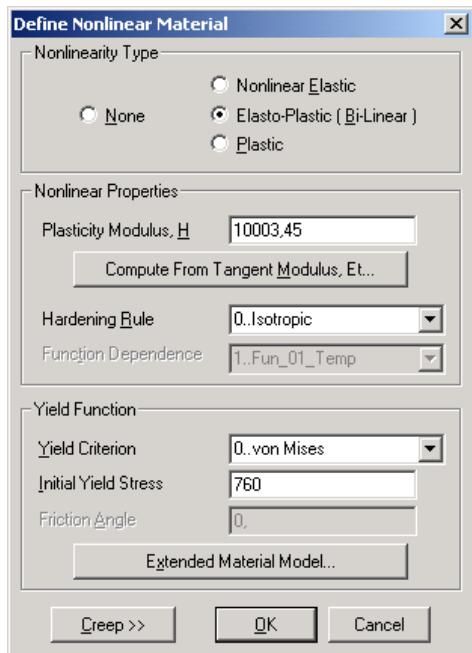
Рис.3.2. Діалогові панелі: а) – введення властивостей ізотропного матеріалу;
б) – призначення типу матеріалу

• при наявності впливу *температури* на властивості матеріалу натиснути кнопку „**Functions>>**”, встановлювати курсор у діалогових вікнах тих параметрів, що змінюються, комбінацією клавіш „**Ctrl+F**” (є підказка) викликати панель обирання функцій та робити вибір (необхідні функції типу **2..vs.Temperature** потрібно створити заздалегідь);

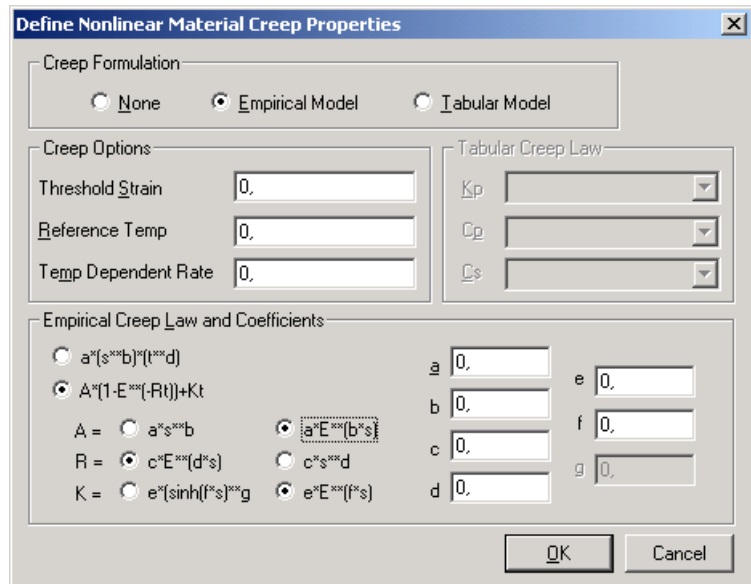
Таблиця 3.1. Основні характеристики ізотропного матеріалу

№ з/п	Назва (на панелі)	Зміст	Одиниця виміру, система SI	Характерні значення*
<i>Секція Stiffness (пружність)</i>				
1	Young Modulus, E	Модуль Юнга	$MPa = N/mm^2$	$(0.7-2.5) \cdot 10^5$
2	Shear Modulus, G	Модуль зсуву		$G = E/[2(1+\nu)]$
3	Poisson's Ratio, ν	Коефіцієнт Пуассона	–	0.23–0.42
<i>Секція Thermal (теплові)</i>				
4	Expansion Coeff, α	Коефіцієнт лінійного температурного подовження	$1/^\circ K$	$(0.5-2.5) \cdot 10^{-5}$
5	Conductivity, k	Коеф. теплопровідності	$W/(m \cdot ^\circ K)$	85–400
6	Specific Heat, C_p	Питома теплоємність	$J/(kg \cdot ^\circ K)$	$(0.38-0.88) \cdot 10^3$
7	Heat generation factor	Коефіцієнт генерації тепла	–	–
<i>Секція Limit Stress (граничні напруження, межі плинності)</i>				
8	Tension	При розтязі	MPa	60–1800
9	Compression	При стиску	MPa	120–1800
10	Shear	При зсуві	MPa	40–700
<i>Інші</i>				
11	Mass Density, ρ	Щільність матеріалу	kg/m^3	$(2.7-9) \cdot 10^3$
12	Damping, $2C/C_0$	Коефіцієнт конструкційного демпфірування G	–	$(1-10) \cdot 10^{-3}$
13	Reference Temp	Температура випробування	$^\circ K$ ($^\circ C + 273$)	<293, 293, >293
* – залізо, титан, алюміній, мідь та сплави на їх основі, сталі, чавуни				

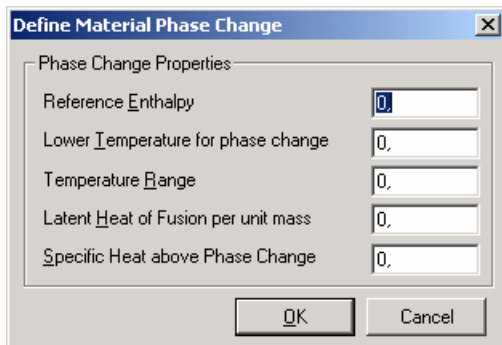
• щоб для задачі про напружено-деформований стан врахувати пружну нелінійність або пластичність, необхідно кнопкою „**Nonlinear>>**” ініціювати діалогову панель „**Define Nonlinear Material**” (див. рис.3.3-а), обрати та задати властивості нелінійно-пружного або пластичного матеріалу. Кнопка „**Extended Material Model...**” призначена для врахування впливу температури або швидкості деформування на межу плинності (підключенням функції **2..vs.Temperature** або **9..vs. Strain Rate**);



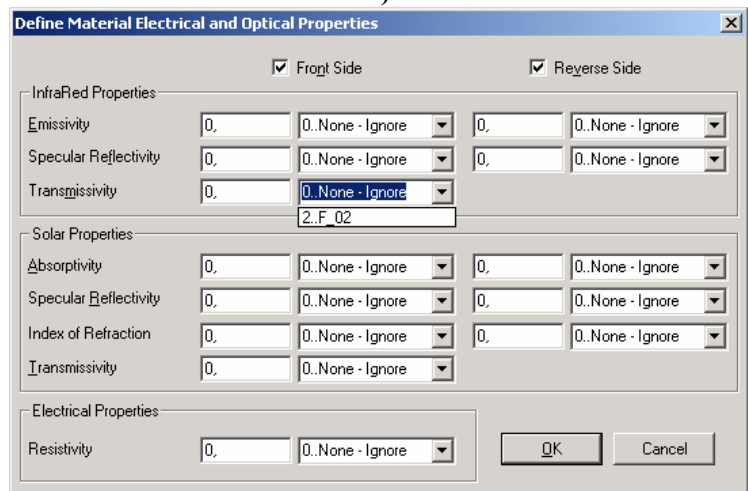
а)



б)



в)



г)

Рис.3.3. Діалогові панелі введення властивостей матеріалу: а) – пружно-нелінійного або пластичного; б) – при повзучості; в) – при фазових переходах; г) – електрооптичних

- щоб для задачі про напружено-деформований стан врахувати повзучість матеріалу, необхідно кнопкою „Creep>>” ініціювати діалогову панель „Define Nonlinear Material Creep Properties” (див. рис.3.3-б), обрати та задати властивості матеріалу при повзучості;
- кнопкою „Phase Change>>” викликається діалогова панель (див. рис.3.3-в) для введення характеристик фазових переходів (звичайно – для задач теплопередачі і термічного аналізу в останніх версіях MSC.Nastran та ABAQUS);
- кнопкою „ThermoOptical>>” викликається діалогова панель (див. рис.3.3-г) для введення електрооптичних характеристик ізотропних та ортотропних матеріалів (для моделювання теплопередачі в програмах, подібних до TMG).

Увага: якщо не задати необхідні для даного типу задачі дані, наприклад, значення модулю Юнга та/або коефіцієнта Пуассона (лінійно-пружній), межу плинності „Initial Yield Stress” (пластичний матеріал), щільність матеріалу (задачі нестационарної теплопровідності та динамічні), то це викличе фатальну помилку при спробі розв’язати задачу.

Додатково відзначимо таке.

Діаграма деформування для нелінійно-пружного матеріалу (**Nonlinear Elastic**) задається функцією типу **4..vs. Stress**, де параметр **X** – це напруження, а **Y** – деформації (вибирається зі списку „Function Dependence”, див. рис.3.3-а). Розвантаження проводиться із застосуванням цієї ж функції. Модуль лінійного зміцнення (**Plasticity Modulus, H**) для пружно-

пластичного матеріалу з кусково-лінійною апроксимацією (**Elasto-Plastic, Bi-Linear**) обчислюється за формулою $H = E_T / (1 - E_T / E)$, де E – модуль Юнга, E_T – дотичний модуль (з апроксимації діаграми розтягу зразка). Діаграма деформування для пружно-пластичного матеріалу (**Plastic**) задається функцією типу **4..vs. Stress** аналогічно нелінійно-пружному матеріалу. Але розвантаження пружно-пластичного матеріалу моделюється лінійно-пружним, тобто використовується модуль Юнга E .

Для критеріїв плинності (**Yield Criterion**) **2..Mohr-Coulomb** та **3..Drucker-Prager** (для матеріалів типу ґрунтів) потрібно ввести значення „**2* Cohesion**” (подвоєне значення коефіцієнту зчеплення) та „**Angle of Internal Friction**” (кут внутрішнього тертя).

Повзучість матеріалу описуються (див. рис.3.3-б) одним з трьох варіантів:

- емпіричною формулою $\varepsilon^c(\sigma, t) = A(\sigma) \cdot \{1 - \exp[-R(\sigma) \cdot t]\} + K(\sigma) \cdot t$ (**Empirical Model**), де $A(\sigma) = a \cdot \sigma^b$ або $A(\sigma) = a \cdot \exp(b \cdot \sigma)$; $R(\sigma) = c \cdot \exp(d \cdot \sigma)$ або $R(\sigma) = c \cdot \sigma^d$; $K(\sigma) = e \cdot [sh(f \cdot \sigma)]^g$ або $K(\sigma) = e \cdot \exp(f \cdot \sigma)$; a, b, c, d, e, f, g – постійні, що вводяться; σ – напруження; t – час;

- емпіричною формулою (**Empirical Model**) $\varepsilon^c(\sigma, t) = a \cdot \sigma^b \cdot t^d$ (ті ж позначки);

- табличною моделлю (**Tabular Model**), де у вікнах секції „**Tabular Creep Law**” для коефіцієнтів Kp , Cp (стадія первинної повзучості) та Cs (стадія вторинної повзучості) необхідно вказати функції типу **4..vs.Stress**.

Для усіх трьох варіантів ще вводяться значення „**Threshold Strain**” (порогові напруження), „**Reference Temp**” (температура описування) та „**Temp Dependent Rate**” (швидкість, що залежна від температури).

У ортотропних матеріалів для тривимірних скінченних елементів (**3D Orthotropic**) характерна наявність трьох площин та трьох напрямків пружної симетрії, причому $(nu)_{ij} / E_i = (nu)_{ji} / E_j$, де $i, j = 1, 2, 3$. Тому характеристики матеріалу E, G, nu, a мають по три значення, а k навіть шість (симетрична матриця 3×3). Для двовимірних та вісесиметричних скінченних елементів (**2D Orthotropic**) напрямки головних осей позначені як $1, 2, z$, задаються два значення E , три – G , одне – nu , а граничними можуть бути по два значення напружень або деформацій при розтязі та стиску. Кількість коефіцієнтів a теж дорівнює двом.

У анізотропних матеріалів – повний набір характеристик (**3D Anisotropic**) або дещо обмежений (**2D Anisotropic**). Високо-еластичні матеріали (резина, каучук, полімери тощо) описуються дещо іншими рівняннями, ніж звичайні пружні.

Додаткову інформацію про характеристики матеріалів поміщено в Додатку 5.

3.2. Завдання атрибутів „Properties” скінченних елементів

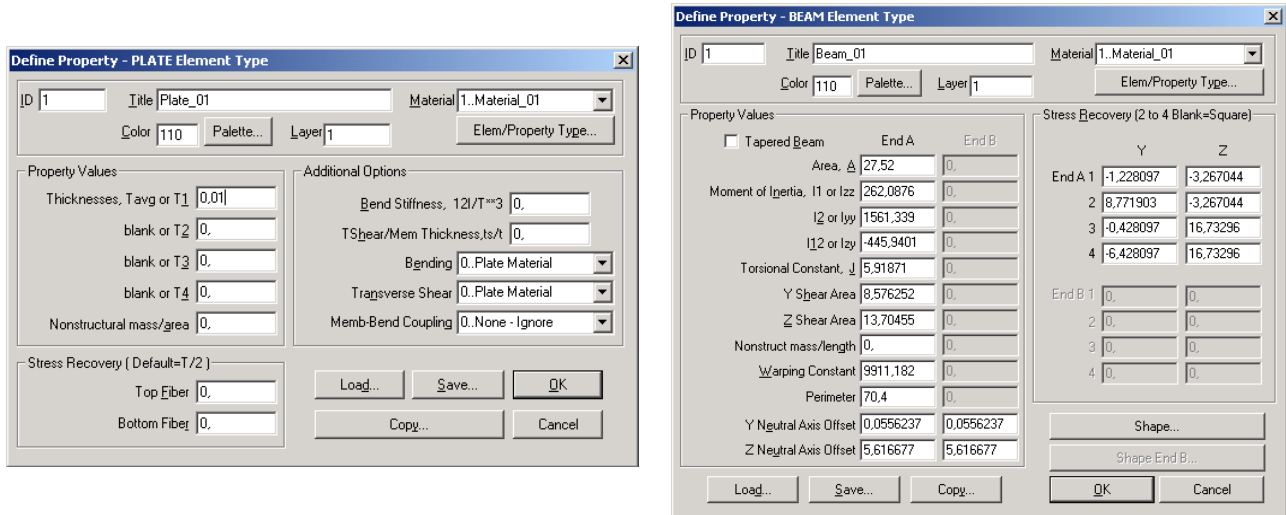
Атрибут, або властивість (**Properties**) – це об’єкт (список) з обраним конкретним типом СЕ та з призначеними його характеристиками, зокрема: ID матеріалу, обрисом та розмірами перерізу та іншими. Атрибути можна створювати безпосередньо при створенні СЕС тіла. Але щоб не робити це знов та знов, доцільно їх створювати заздалегідь та зберігати у бібліотечному файлі.

Командою „**Model→Property...**” викликається діалогова панель „**Define Property**” (див. рис.3.4), яка має вигляд, відповідний типу СЕ (за замовчанням – для СЕ типу **PLATE**). Доцільно спочатку задати назву цієї „властивості” (**Title**), при необхідності змінити її **ID**, обрати зі списку матеріал для СЕ.

Якщо потрібен інший тип СЕ або інша орієнтація матеріалу у СЕ, потрібно кнопкою „**Elem/Property Type...**” викликати відповідну діалогову панель (див. рис.3.5-а), де можна:

- обрати тип СЕ (типи СЕ та їх застосування приведено у Додатку 3);
- встановити опцію „**Parabolic Elements**”, щоб призначити у СЕ *другий* порядок апроксимації майбутнього розв’язку задачі (*підвищиться точність, але й час розв’язування теж*);

- кнопкою „**Element Material Orientation**” викликати однойменну панель та вказати орієнтацію властивостей анізотропного матеріалу або вектором, або як співпадаючу з напрямком осі координатної системи, або кутом нахилу;
- кнопкою „**Formulation...**” викликати панель „**Element Formulation**”, вказати додаткові властивості CE, якщо модель готується для програм **FEMAP Structural, DYNA, ABAQUS** та інших.

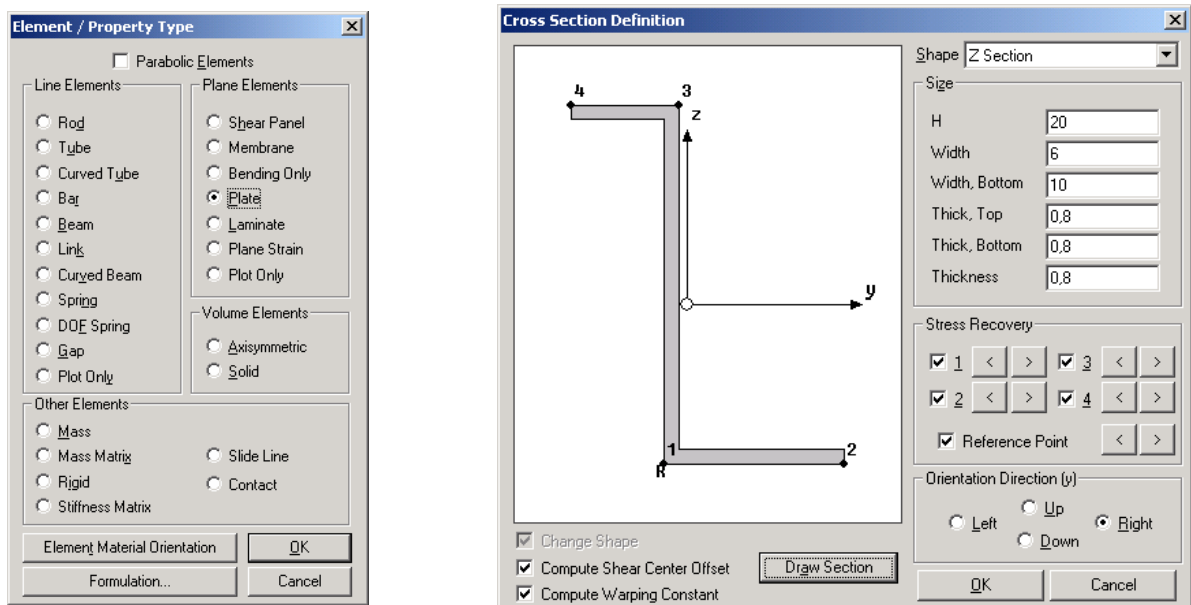


а)

б)

Рис.3.4. Діалогові панелі „Define Property” для CE типу: а) – PLATE; б) – BEAM

Після команди „ОК” діалогова панель „Define Property” прийме вигляд, відповідний обраному типу CE. Якщо це потрібно для даного типу CE, на ній з’являться декілька діалогових вікон для введення загальних значень для CE, пов’язаних з геометричними або фізичними характеристиками (див. рис.3.4).



а)

б)

Рис.3.5. Діалогові панелі призначення:

а) – типу CE; б) – геометричних характеристик перерізу одновимірного CE

У таблицю 3.2. за абеткою зведені параметри CE, значення яких потрібно вводити в діалогові вікна власноручно.

Для описання складних перерізів одновимірних CE типу **BAR, BEAM, CURVED BEAM** є додатковий інструмент, який викликається кнопкою „Shape...” (див. рис.3.4-б). З’являється діалогова панель „Cross Section Definition” (див. рис.3.5-б), на якій у вікні

„Shape” (Форма) потрібно обрати обрис перерізу, який відразу відображається у вікні; задати характерні розміри перерізу, змінити у секції „Stress Recovery” (вихідні напруження) нумерацію характерних точок та положення контрольної точки (**Reference Point**) для виводу (у таблицю результатів розрахунків) значень напружень (кнопками „Next”); встановити орієнтацію локальних осей перерізу. Для SE типу **BEAM** можна застосувати модель тонкостінного стрижня, якщо встановити опції „Compute Shear Center Offset” (обчислити зміщення від центра згину) та „Compute Warping Constant” (обчислити секторальний момент інерції). Цей тип SE ще може враховувати повздовжню зміну розмірів перерізу за лінійним законом. Для цього потрібно спочатку для першого кінця SE (**End A**) призначити форму та розміри перерізу (вони помістяться у діалогові вікна для початку SE, потім встановити опцію „Tapered Beam” (балка, що звужується) та застосувати кнопку „Shape End B...” і зробити аналогічні призначення для другого кінця SE (**End B**).

Таблиця 3.2. Основні параметри скінченних елементів

Параметр	Пояснення	Типи SE
Allowable Tensile Stress	допустиме напруження розтягу	Rod (для ANSYS)
Angle	кут	Laminate
Area, A	площа поперечного перерізу	Rod, Bar, Gap
Area Moment of Inertia	момент інерції площини	Rod (для ANSYS)
Bend Radius, r	радіус кривизни	Curved Tube
Bend Stiffness, BS	згинальна жорсткість, що приєднана ¹	Bending only, Plate
Bending	згин	Plate
BondShr Allow	допустимий відносний зсув шарів	Laminate
Bottom Surface	зміщення нижньої поверхні	Laminate
Coef. for Torsional Stress, C	коефіцієнт напружень при крученні ²	Rod
Compression Stiffness	жорсткість при стискуванні	Gap
Damping	коефіцієнт в'язкого демпфірування	Spring, DOF Spring
Effectiveness Factor, F	коефіцієнт приведеної площі перерізу додаткових ребер жорсткості ³	Shear Panel
Failure Theory	теорія (критерій) руйнування	Laminate
Fiber (Top, Bottom)	шар (вершини, основи): відстань для виводу напружень	Bending only, Plate, Plain Strain
Friction Coefficient	коефіцієнти тертя вздовж осей Y та Z	Gap
H	висота	Bar, Beam, Curved Beam
Initial Gap	початковий зазор	Gap
Initial Tension (Cable Only)	сила початкового натягу (гнучка нить)	Rod
Initial Slack	початкове послаблення	Rod (для ANSYS)
Inner Diameter, Di	внутрішній діаметр	Tube, Curved Tube
Max Penetration	максимальне проникнення	Gap
Max Adjustment Ratio	максимальний коеф. настроювання	Gap
Min Penetration Ratio	мінімальний коефіцієнт проникнення	Gap
Memb-Bend Coupling	мембранно-згинальне підкріплення	Plate
Nonsliding Frictional Stiffness	коефіцієнт жорсткості для відносного зміщення	Slide Line
Nonstructural mass/area, N.S.Mass/Area	неконструкційна маса на одиницю площі	Майже усі двовимірні
Nonstructural mass/length	неконструкційна маса на одиницю довжини	Майже усі одновимірні
Outer Diameter, Do	наріжний діаметр	Tube, Curved Tube
Penetration	проникання	Slide Line
Perimeter	периметр	Rod, Bar, Beam, Curved Beam
Preload Force	попереднє навантаження	Gap
Radius	радіус	Bar, Beam, Curved Beam
RefTemp	початкова температура	Laminate
Slide Line Plane (Coord Sys XY)	координатна система для SE	Slide Line
Static Frictional Coefficient	статичний коефіцієнт тертя	Slide Line
Stiffness	жорсткість ⁴	Spring, DOF Spring

Stiffness Scale Factor	коефіцієнт встановлення натягу, що допускається ⁵	Slide Line
Tension Stiffness	жорсткість при розтяганні	Gap
Thick (Top, Bottom)	товщина (вершини, основи)	Bar, Beam, Curved Beam
Thickness	товщина	Bar, Beam, Curved Beam, Shear
Thickness, Tavg or T1	товщина	Membrane, Bending only, Plain Strain
Torsion Constant, J	полярний момент інерції перерізу	Rod
Transverse Shear	поперечний зсув	Plate
Transverse Stiffness	поперечна жорсткість при закритому зазорі	Gap
TShear/Mem Thickness	згинальна жорсткість, що приєднана ⁶	Plate
Width	ширина	Bar, Beam, Curved Beam, Gap
Width (Master, Slave)	ширина основної та підлеглої поверхонь, які контактують	Slide Line
Width Bottom	ширина основи	Bar, Beam, Curved Beam

¹ $BS = 12I/T^2$, де T – товщина CE; $I = I_p/t_p$; I_p – момент інерції перерізу одного ребра жорсткості; t_p – крок ребер;
² $C = J/W_K$, де W_K – момент опору перерізу при крученні;
³ при $F \leq 1.01$ площа перерізів дорівнює $0.5Ftb$, а при $F > 1.01$ вона дорівнює $0.5Ft^2$, де t – товщина CE, b – посередня величина ширини CE;
⁴ $C_N = \Delta x/N$ або $C_T = \Delta \varphi/T$, де Δx , $\Delta \varphi$ – зміни довжини та кута кручення пружини; N , T – поздовжня сила та момент кручення відповідно;
⁵ коефіцієнт встановлення натягу, що допускається ($0 \leq k_f \leq 1$), регулює величину штрафу на взаємне проникання. Якщо $k_f = 0$ (за замовчанням), то допускається взаємне проникнення (натяг) поверхонь, що контактують, на величину біля 1-2% від переміщень вузлів цих поверхонь у напрямку нормалі до них. При збільшенні k_f натяг, що допускається, зменшується;
⁶ $TS = t_s/t$, де t_s – товщина ребра згинальної жорсткості, що приєднаний; t – посередня товщина скінченного елемента.

Усі параметри, що обчислюються у FEMAP за допомогою інструмента „Shape...” автоматично, не розглядаємо. Доцільно у секції „Stress Recovery” звернути увагу на значення координат точок, в яких будуть виведені значення напружень.

У файлі **rebeam.doc** (у папці \Femap81) наведені дані про додаткові бібліотеки (файли reishape.esp, reangle.esp, retee.esp, rechan.esp та retube.esp) одновимірних CE типу **BEAM**, **TUBE** тощо з конкретними варіантами перерізів, що виробляє промисловість США, наведених у посібникові „AISC Manual of Steel Construction” (таври, двотаври, швелери, трикутники, труби тощо). Їх можна підключити з панелі „Define Property ...” (див. рис.3.4-а): клавішею „Load...” викликати панель „Select From Library”, на ній клавішею „Library...” – стандартний діалог відкриття файлу. **Увага:** у тексті є застереження, що це тільки довідникові дані, що при їх застосуванні потрібно уважно порівнювати ці характеристики з реальними, оскільки можливі зміни у стандарті.

Для CE типу **GAP** параметри секції „Interface Element Option” – для програми ABAQUS; CE типу **LINK** – для програм MSC/PAL та CDA/SPRINT I, тому тут їх не розглядаємо.

3.3. Створення скінченно-елементної моделі тіла на основі геометричної моделі

Це основний та швидкий метод створення скінченно-елементної сітки (SEC). Усі команди доступні через меню „Mesh” та електронні кнопки (див. рис.1.2-ж та рис.1.3-і).

3.3.1. Підготовка до автоматичного створення скінченно-елементної сітки

3.3.1.1. Завдання параметрів автоматичного створення скінченно-елементної сітки

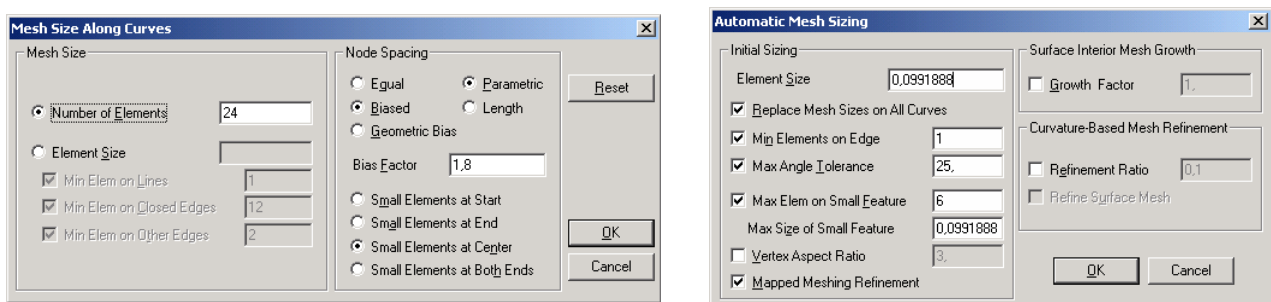
Важливо: автоматична (на основі вже існуючої геометричної моделі) побудова СЕС тіла (конструкції) завжди спирається на три таких показника:

- максимальний розмір скінченого елемента (СЕ);
- мінімальна кількість СЕ на ребрі (кривій);
- розмітка на кривих, що є *осями* одновимірних тіл або *границями поверхонь* (ребрами) двовимірних та тривимірних тіл.

Команда **Mesh**→**Mesh Control**→**Default Size...** викликає діалогову панель „**Default Mesh Size**”, на якій вказуються два показника: „**Size**” – максимальний розмір СЕ, „**Min Elem**” – мінімальна кількість СЕ на будь-якому ребрі. Після створення СЕС усі СЕ будуть мати приблизно однакові розміри у всьому тілі. Якщо це не влаштовує, у FEMAP є інструменти для *локальних* призначень додаткових умов. При їх застосуванні потрібно мати на увазі, що для користувача створення двовимірних та тривимірних СЕС – творчий процес, оскільки автоматичні алгоритми привносять у нього деяку невизначеність: результат не завжди співпадає з попередніми уявленнями користувача. Потрібен досвід їх застосування.

Розмітку у FEMAP можна проводити таким чином (однаковий для усіх команд початок **Mesh**→**Mesh Control**→ опускаємо):

- розміром СЕ в околі точки *на границі поверхні (Size At Point...)*: обираються точки, призначається розмір СЕ. Для скасування призначень теж обираються точки, вказується *нульовий* розмір;
- на кривій (**Size Along Curve...**): обираються криві, після чого з’являється відповідна діалогова панель (див. рис.3.6-а). Звичайно вказується кількість СЕ (**Number of Element**) на кривій; принцип призначення кроків точок розмітки: рівномірний (**Equal**), лінійний (**Biased**) або логарифмічний (**Geometric Bias**); тип координати, яка буде використовуватися вздовж кривої (це важливо для сплайнової кривої): параметрична (**Parametric**) або довжина (**Length**); коефіцієнт збільшення кроку (**Bias Factor**); де розташовувати найменший СЕ (**Small Elements at**): на початку (**Start**), на кінці (**End**), посередині (**Center**) або на обох кінцях (**Both Ends**) кривий. Якщо обрано декілька кривих, на яких бажано мати СЕ приблизно однакового розміру, доцільно задавати не кількість СЕ, а посереднє значення розміру СЕ (**Element Size**), яке застосовується для визначення кількості СЕ на кожній кривій окремо. Тоді додатково ще можна вказати мінімальні кількості СЕ (**Min Elem on**): вздовж лінії (**Lines**), на замкнутих (**Closed Edges**) та інших (**Other Edges**) кромках. **Увага:** електронною кнопкою „**Reset**” можна „очистити” усі обрані криві від раніш зроблених призначень;



а)

б)

Рис.3.6. Діалогові панелі розмітки СЕ: а) – на кривих; б) – на поверхнях

- на поверхні (**Size on Surface...**): обираються поверхні, після чого з’являється відповідна діалогова панель „**Automatic Mesh Sizing**” (див. рис.3.6-б). На ній потрібно вказати максимальний розмір СЕ (**Element Size**); мінімальну кількість елементів на ребрі (**Min Elements on Edge**); максимальний кут, що допускається (**Max Angle Tolerance**, див. рис.3.7); максимальну кількість (**Max Elem of Small Feature**) та розмір (**Max Size of Small Feature**) СЕ у околі

малих особливостей. Ще на ній можна встановити опцію „**Replace Mesh Sizes on All Curves**” (замінити розміри сітки на усіх кривих), тобто відмінити попередню розмітку; а також опції „**Length Based Sizing**” (розмітка, що основана на довжині) та „**Mapped Meshing Refinement**” (вдосконалене відображення сітки). Є ще параметри: коефіцієнт зменшення для вершини (**Vertex Aspect Ratio**); у секції „**Surface Interior Mesh Growth**” – коефіцієнт зростання розмірів СЕС по мірі віддалення від границі поверхні (**Growth Factor**); у секції „**Curvature-Based Mesh Refinement**” включена опція „**Refinement Ratio**” вкаже на те, на кривих границях розмітку СЕ необхідно провести відповідно до вказаного коефіцієнту, який дорівнює відношенню $H/L < 1$ (див. рис.3.7), що дозволяє побудувати якісну сітку на криволінійних границях; а опція „**Refine Surface Mesh**” – що після цього СЕС необхідно ще раз оптимізувати;

- для „твердого” тіла (**Size on Solid...**). Але ця процедура викликається й командою **Mesh→Geometry→Solids...**, яка дається при автоматичному створенні СЕ, тому її розглянемо у Розділі 3.3.2.6;

- модифікацією вже заданої на ребрах розмітки (**Interactive...**): з’являється діалогова панель „**Interactive Mesh Sizing**”. На панелі потрібно радіокнопкою обрати характер дії: додати (**Add**), видалити (**Subtract**) або задати (**Set To**) кількість елементів, потім вказати значення, лише у останню чергу – ввести з клавіатури **ID** кривих або просто обрати криву на робочому полі та натиснути ліву кнопку „миші”. Результат з’явиться негайно, діалогова панель не зникає. **Увага:** панель має таку специфіку: **ID** обраної на робочому полі кривої у відповідному вікні не з’являється (практично це й не потрібне).

Додаткові можливості для проведення розмітки:

- групами на кривій (**Custom Size Along Curve...**): обирається лінія, після чого з’являється відповідна діалогова панель (див. рис.3.8-а) для часткової розмітки кривої. Панель має вже знайомі елементи у секціях „**Mesh Point Data**” та „**Spacing**”, а також значну кількість нових. У вікні „**Mesh Definition**” поміщується список груп, заголовки яких створюються автоматично та вміщують інформацію про значення локальної координати початку групи розмітки (**At**), кількість СЕ (**Elem**) та коефіцієнту збільшення кроку (**Bias**). Завжди є „фінальна” група, яка „замикає” розмітку та яку не можна видалити. Локальна координата може мати значення від 0 до 1. Її можна вводити з клавіатури або візуально за допомогою кнопки „**Locate...**”. Коли значення для групи обрані, необхідно натиснути на кнопку „**Add/Edit**”. Кнопка „**Move...**” дозволяє візуально редагувати локальну координату раніше введеної групи. Кнопки під вікном „**Mesh Definition**” дозволяють проводити зміни призначень для *всієї* обраної кривої, причому на основі введених груп. Це команди:

- ♦ рівними відрізками (**Equal**): з’являється діалог для введення кількості груп (від 2 до 160), кожна з яких буде мати один СЕ;
- ♦ заповнення (**Fill**): усі групи будуть розмічені на відрізки (СЕ) вказаного розміру;
- ♦ розділення (**Expand**): всі групи діляться на групи з одним СЕ, тобто кількість груп буде дорівнювати кількості СЕ;
- ♦ відповідності (**Match**): обирається інша крива, з якої розмітка переноситься на активну, модифікуючи введені групи;

- ділення параметричним чином на ребрах поверхні (з трьома або чотирма ребрами) „твердого” тіла (**Mapped Divisions on Surface...**): обирається поверхня, на діалоговій панелі „**Mesh Size on Surface**” (див. рис.3.8-б) вказується кількість СЕ за напрямками двох параметрів s (напрямок вказано стрілкою) та t , а також значення коефіцієнтів збільшення кроку від

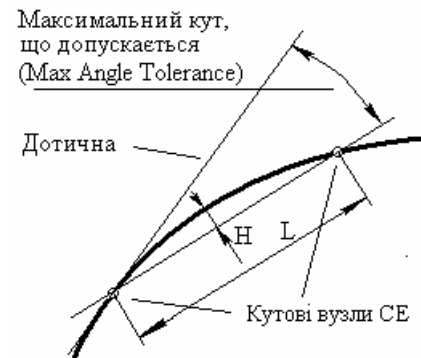


Рис.3.7. До завдання значення „**Max Angle Tolerance**”

початку координат (**Bias**). **Увага:** для поверхні з трьома ребрами локальні координати на них s , t та s ;

- з урахуванням точок на поверхні (**Mesh Point on Surface...**): обирається поверхня „твердого” тіла, на якій у всіх точках (з границями включно) будуть обов’язково створені вузли СЕС. Потім з’являється додаткова діалогова панель „Custom Mesh” (див. рис.3.8-в). На неї необхідно обрати один з варіантів: „Use Existing Points” (використати точки, що існують), „Use Existing Nodes” (використати вузли, що існують), „Create Points” (створити точки) або „Remove All Points” (видалити всі точки).

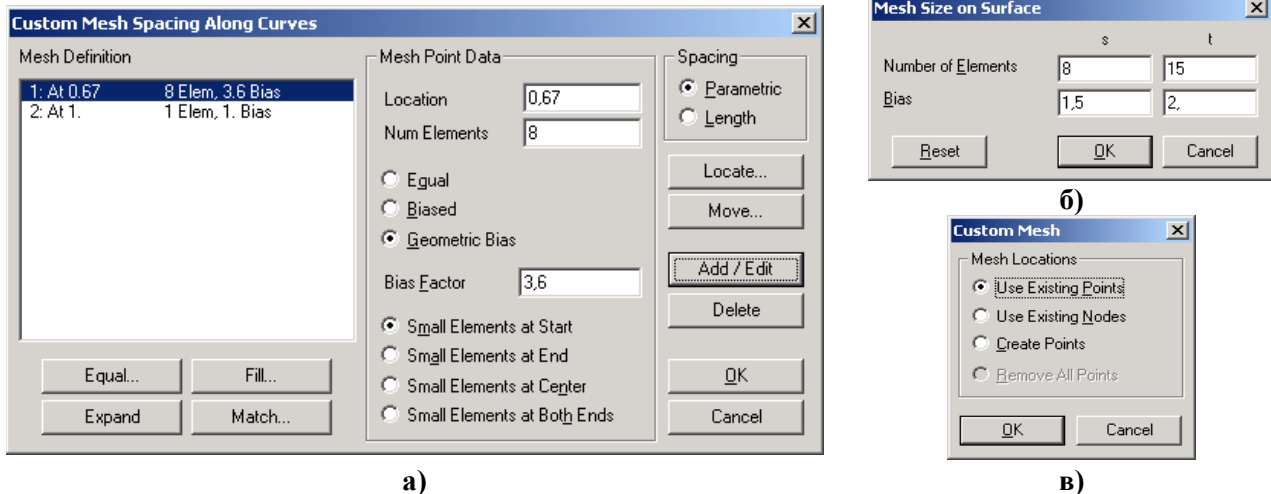


Рис.3.8. Діалогові панелі розмітки СЕС: а) – на кривих; б) – на поверхнях; в) – з урахуванням точок та вузлів

3.3.1.2. Призначення атрибутів скінченно-елементної сітки геометричним об’єктам

Призначення геометричним об’єктам атрибутів може прискорити створення СЕС або покращити її якість. Цю процедуру можна проводити (однаковий для усіх команд початок **Mesh**→**Mesh Control**→ опускаємо):

- для точок (**Attributes At Point...**): спочатку обираються точки, потім зі списку раніш введених „властивостей” СЕС (**Property**) – варіант, який може бути приписаний точці. У MSC.Nastran це може бути лише масовий СЕС;

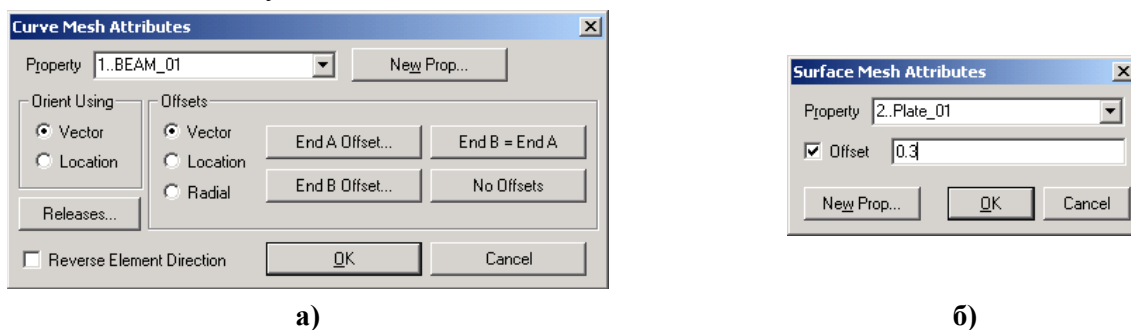


Рис.3.9. Діалогові панелі призначення геометричним об’єктам атрибутів: а) – для кривих; б) – для поверхонь

- вздовж кривих для одновимірних СЕС (**Attributes Along Curve...**): спочатку обираються криві, потім на діалоговій панелі „Curve Mesh Attributes”, що з’являється (див. рис.3.9-а), обирається „Property” або створюється нова „властивість” (**New Property...**); у секції „Orient Using” обирається спосіб, за яким буде вказуватися орієнтація осі Y перерізу одновимірного СЕС („Vector” – вектором або „Location” – точкою); у секції „Offset” – спосіб завдання відступу (зміщення) осі СЕС від обраних кривих: „Vector”, „Location” або „Radial”; кнопками „End A Offset”, „End B Offset” або „End B = End A” – їх величини („No Offset” – відсутність). Кнопкою „Released...” (рухливість) викликається панель для відключення на

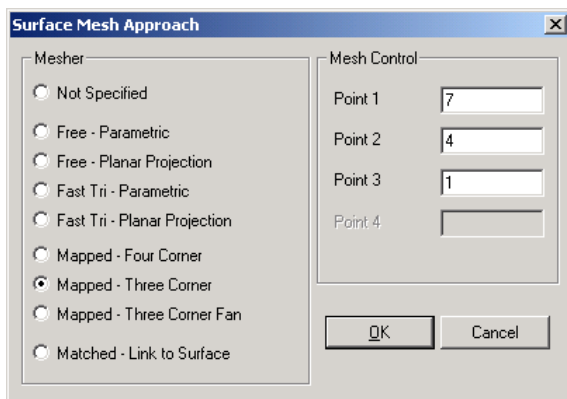
кінцях „End A” та/або „End B” відповідності (зв’язку) для окремих ступенів свободи: **TX**, **TY**, **TZ** (встановлюються розриви), **RX**, **RY** та/або **RZ** (встановлюються шарніри). Опцією „**Reverse Element Direction**” міняється напрямок внутрішньої координатної системи у СЕ;

- на поверхні для двовимірних СЕ (**Attributes On Surface...**): спочатку обирається поверхня, потім на діалоговій панелі „**Surface Mesh Attributes**”, що з’являється (див. рис.3.9-б), обирається „**Property**” або створюється нова „властивість” (**New Property...**); у вікні „**Offset**” задається зміщення СЕ відносно поверхні (при необхідності);

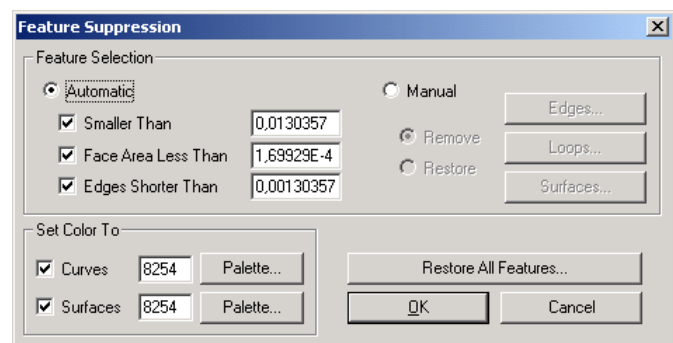
- для об’ємів (**Attributes On Volume...**) або „твердих” тіл (**Attributes On Solid...**): обираються об’єкти, для них обираються зі списку заздалегідь створені „**Property**”.

3.3.1.3. Впорядкування майбутньої скінченно-елементної сітки на поверхні

Командою **Mesh**→**Mesh Control**→**Approach On Surface...** викликаються інструменти для впорядкування СЕС на поверхні „*твердого*” тіла: спочатку обирається поверхня, потім на діалоговій панелі „**Surface Mesh Approach**” (див. рис.3.10-а) призначається один з варіантів:



а)



б)

Рис.3.10. Діалогові панелі: а) – впорядкування СЕС на поверхні;

б) – виключення особливостей СЕС

- „**Free – Parametric**” – параметричне впорядкування;
- „**Free – Planar Projection**” – вільного типу, але на основі проєкції СЕС с площини, яка буде потім обраною. Для поверхонь з малою кривизною може давати кращі результати, ніж попередній варіант;

- „**Fast Tri – Parametric**” – параметричне впорядкування, коли використовується швидкий алгоритм під назвою **FEMAP Fast Triangle mesher** (див. Розділ 1.5, **Database...**);

- „**Fast Tri – Planar Projection**” – вільного типу, але на основі проєкції СЕС с площини, яка буде потім обраною (див. попереднє пояснення). Для поверхонь з малою кривизною може давати кращі результати, ніж попередній варіант;

- „**Mapped – Four Corner**” та „**Mapped – Three Corner**” – типу, що відображається (має вісь симетрії), використовуючи інформацію про 4 або 3 кути поверхні (**Point 1 ...**), що призначаються;

- „**Mapped – Three Corner Fan**” – подібно попередньої, але віялового типу;

- „**Matched – Link to Surface**” – СЕС створюється подібною до СЕС на поверхні, що буде додатково вказана (**Master Surface**). **Увага:** ці поверхні не повинні десь спрягатися. Також це не можна робити на поверхні з **Multi-surface boundaries**;

- „**Not Specified**” – використовується за замовчанням.

3.3.1.4. Виключення несуттєвих особливостей у „твердих” тілах

Команда **Mesh**→**Mesh Control**→**Feature Suppression...** призначена для знайдення несуттєвих особливостей у „твердих” тілах, для яких СЕС створюватися не буде. Вона викликає однойменну діалогову панель (див. рис.3.10-б), де можна обрати відповідні опції: „**Smaller Than**” (менш ніж – для замкнених кривих), „**Face Area Less Than**” (площа грані

менш ніж) та/або „**Edges Shorter Than**” (кромки, коротші ніж) та вказати їх максимальні розміри. Ці особливості будуть виділятися кольорами, що призначені у секції „**Set Color To**”. Якщо замість „**Automatic**” обрати „**Manual**”, то можна видалити (**Remove**) або відновити (**Restore**) вказані за допомогою кнопок об'єкти: „**Edges...**” (кромки), „**Loops...**” (замкнуті криві) або „**Surfaces...**” (поверхні). Також можна кнопкою „**Restore All Features...**” відмінити усі виключення.

3.3.2. Створення скінченно-елементної сітки тіла або конструкції на основі геометричної моделі

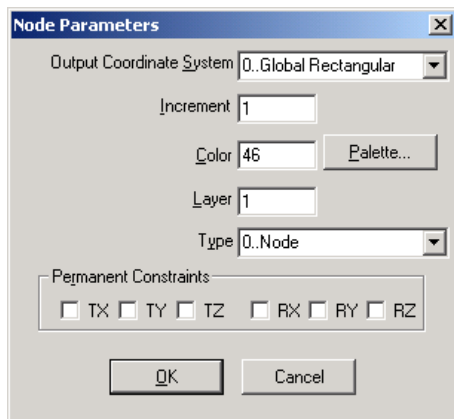
Проводиться командами **Mesh→Geometry→...**

Увага: невдале закінчення створення СЕС супроводжується відповідним повідомленням (виділяється червоним кольором). Але досить часто „у наслідок” остається поверхнева СЕС з елементів типу **PLOT ONLY**, яка на екрані виглядає як добра. Тому доцільно переглянути властивості отриманої СЕС, наприклад, за допомогою команди „**List→Model→Element...**” або останнього з перемикачів панелі стану (див. Розділ 1.3).

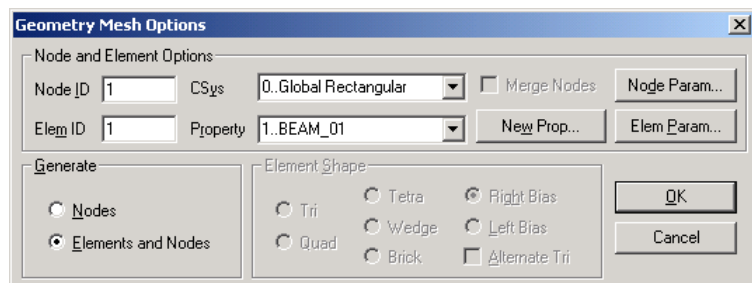
Доволі часто виникає необхідність повністю або частково видалити скінченно-елементну сітку. Якщо це не можливо зробити командою відміни останньої дії (**Undo**), то застосовуються інструменти меню „**Delete**”. Спочатку обираються всі або частка СЕ (команда **Delete→Model→>Element...**, кнопка „**Select All**” або вказуються СЕ, які потрібно видалити, двічі – команда „**OK**”), потім видаляються всі вузли (команда **Delete→Model→>Node...**, кнопка „**Select All**”, підтвердити видалення). Після оновлення зображення екрану (**Ctrl+D**) або регенерації моделі (**Ctrl+G**) тіло вже не має зайвих а ні СЕ, а ні вузлів.

3.3.2.1. Завдання параметрів вузлів та скінченних елементів

Це загальні дії на етапі створення СЕС. На діалоговій панелі „**Node Parameters**” (див. рис.3.11-а), яка викликається кнопкою „**Node Param...**” діалогових панелей створення СЕС (див. рис.3.11-б, рис.3.12-а, рис.3.14-а,в) можна:



а)



б)

Рис.3.11. Діалогові панелі завдання параметрів:
а) – вузлів; б) – створення СЕС у точках або на лініях

- виключити деякі ступені свободи *всіх* вузлів СЕС, що будуть створюватися: у секції „**Permanent Constraint**” (попереднє закріплення) встановити відповідні опції для **TX**, **TY**, **TZ** (переміщень у напрямку вказаних осей), **RX**, **RY**, **RZ** (обертань навколо вказаних осей) у тієї координатної системи (**Output Coordinate System**), яка є обраною. **Увага:** тривимірні та вісесиметричні СЕ не мають ступенів свободи **RX**, **RY**, **RZ** (обертань), хоча у діалогу вони присутні. Ці ступені свободи бажано виключити, щоб значно зменшити розмір файлу *.f06, що буде створюватися програмою MSC.Nastran при розв'язуванні крайової задачі;

- змінити крок нумерації вузлів (**Increment**), колір відображення, **ID** рівня (в який будуть поміщені створені вузли);

• уточнити (змінити) тип об'єкта (потрібно лише у деяких випадках), що буде створюватися (діалогове вікно „Type”): вузли (**0..Node**), скалярна (**1..Scalar Point**) або додаткова точка (**2..Extra Point**).

На діалоговій панелі „Element Parameters”, яка викликається кнопкою „Elem Param...” діалогових панелей створення СЕС (див. рис.3.11-б, рис.3.12-а, рис.3.14-а,в) можна змінити крок нумерації СЕ (**Increment**), колір відображення СЕ, **ID** рівня (в який будуть поміщені створені СЕ).

3.3.2.2. Створення скінченних елементів у точках

Дається команда „Mesh→Geometry→Point...”, обираються точки, з'являється діалогова панель „Geometry Mesh Options” (див. рис.3.11-б). На ній можна:

• змінити координатну систему (**CSys**), початковий номер вузлів та/або елементів, якщо це потрібно (**Node ID**, **Elem ID**);

• обрати (**Property**) або створити („New Prop...”, див. Розділ 3.2) „властивість” СЕ.

У MSC.Nastran є лише два типу СЕ, що містять тільки один вузол: **MASS** та **MASS MATRIX** (див. Додаток 3). Тому отриманий результат – СЕ у вигляді одного вузла.

3.3.2.3. Створення скінченно-елементної сітки на лініях

Дається команда „Mesh→Geometry→Curve...”, обираються лінії, з'являється діалогова панель „Geometry Mesh Options” (див. рис.3.11-б). Її розглянуто у Розділі 3.3.2.2.

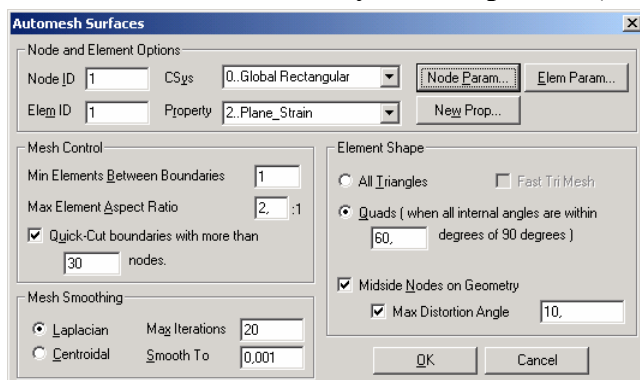
У MSC.Nastran є декілька типів одновимірних СЕ: **ROD**, **TUBE**, **CURVED TUBE**, **BAR**, **BEAM**, **CURVED BEAM**, **LINK**, **SPRING**, **DOF SPRING**, **GAP** та **PLOT ONLY** (див. Додаток 3).

При створенні СЕС будуть враховані призначення щодо СЕС, зроблені завчасно (див. Розділ 3.3.1). Результат – СЕС у вигляді (на екрані) ліній та вузлів на них. Відрізок лінії між вузлами – одновимірний СЕ, який має вказані у „Property” обрис, розміри та орієнтацію перерізу, створений зі вказаного матеріалу. Реальні обрис і орієнтацію СЕ можна побачити у режимах „Solid” або „Rendered Solid”, якщо викликати командою **View→Options...** (або клавішею **F6**) панель „View Options” та встановити на ній для „Element – Orientation/Shape” значення „2..Show Inertia Ratio”, а також встановити опцію „Show Orientation”.

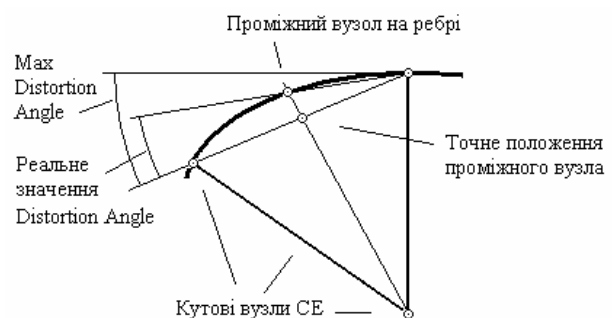
3.3.2.4. Створення двовимірної та вісесиметричної скінченно-елементної сітки

Двовимірною моделлю звичайно представляють тонкостінні тіла у вигляді пластин та оболонок, а вісесиметричною – вісесиметричні тіла, зокрема й оболонки.

Дається команда „Mesh→Geometry→Surface...”, обираються поверхні, з'являється діалогова панель „Geometry Mesh Options” (див. рис.3.12-а). На ній можна:



а)



б)

Рис.3.12. Діалогова панель завдання параметрів створення СЕС на поверхнях (а); до завдання значення „Max Distortion Angle” (б)

- змінити координатну систему (для вісесиметричних – обрати циліндричну);
- змінити початковий номер вузлів та/або елементів (**Node ID**, **Elem ID**);

• обрати (**Property**) або створити („**New Prop...**”, див. Розділ 3.2) „властивість” СЕ. **Увага:** є декілька типів двовимірних СЕ: **SHEAR PANEL**, **MEMBRANE**, **BENDING ONLY**, **PLATE**, **LAMINATE**, **PLANE STRAIN** та **PLOT ONLY**, і лише один тип вісесиметричних СЕ: **AXISYMMETRIC** (див. Додаток 3).

При створенні СЕС будуть враховані призначення щодо СЕС, зроблені завчасно (див. Розділ 3.3.1). Однак на панелі у секції „**Mesh Control**” можна встановити додаткові параметри, що будуть мати пріоритет, якщо виникають протиріччя: мінімальну кількість СЕ між границями (**Min Elements Between Boundaries**); максимальне відношення між довжинами сторін СЕ „**Max Element Aspect Ratio**”: бажано не більше 10:1, допустимо <100:1; відключити опцію „**Quick-Cut boundaries with more than ... nodes**” (швидка розбивка границь, коли кількість на ній більше ніж ... вузлів): іноді це поліпшує створення СЕС. Крім того:

• у секції „**Mesh Smoothing**” (згладжування сітки) вказується алгоритм згладжування сітки, коли вузли центруються відносно сусідніх: вузлів (**Laplacian**) або центрів СЕ (**Centroidal**). Ітерації проводяться поки зміщення вузлів перевищують значення „**Smooth To**”, але кількість ітерацій обмежено величиною „**Max Iteration**”;

• у секції „**Element Shape**” (форма елементів) можна обрати „**All Triangles**” (всі – трикутні) або „**Quads (when all internal angles are within ... degrees of 90 degrees)**”, тобто чотирикутні, причому кути можуть різнитися на вказану величину (відносно 90 градусів). Якщо СЕ мають проміжні вузли, то для більш точного опису нелінійних границь тіла необхідно активувати опції „**Midside Nodes on Geometry**” (помістити проміжні вузли на границях) та „**Max Distortion Angle**” (максимальний кут відхилення), вказати (редагувати) його значення. Чим більше кривизна границі, тим більше значення цього кута (див. рис.3.12-б). **Увага:** збільшення цього значення може збільшити похибки майбутніх розрахунків.

Результат – СЕС у вигляді чотирикутних та/або трикутних двовимірних СЕ та вузлів на їх ребрах. СЕ мають вказані у „**Property**” властивості, зокрема створені зі вказаного матеріалу.

Увага: при створенні вісесиметричної сітки необхідно враховувати, що вісь обертання **Z** не повинна пересікати контур СЕС, що форма СЕ, у випадку застосування Nastran – трикутна (для Femap Structural – будь яка), а порядок наближення – другий (параболічні СЕ). Кольові ребра вироджені у точки, а поверхні – у лінії, тому потім силові навантаження потрібно прикладати до цих об’єктів як до вихідних, тобто враховувати їх реальні довжини та площі.

3.3.2.5. Створення двовимірної скінченно-елементної сітки на основі серединних поверхонь

Доволі часто „тверде” тіло як би складено з декількох тонких елементів з постійною або кусково-лінійною товщиною. Такі тіла теж можна апроксимувати двовимірними СЕ на основі *серединних поверхонь* (СП). Хоча ці операції поміщено в меню „**Geometry**”, все ж СП доцільно створювати саме при побудові СЕС. **Увага:** нові СП не завжди помішуються в рівень (**Layer**), якому належать базові для СП поверхні.

СП створюються командами (загальну частину **Geometry** → **Midsurface** → опускаємо):

• **Single in Solid...** (одинична у тілі): по чергово обираються дві поверхні, між якими з’являється СП, яка не виходить за границі тіла;

• **Single...** (одинична): аналогічно попередньої, тільки СП прямокутної форми та більша за тіло (іноді це потрібно з міркувань зручності);

• надлишки таких СП можна обрізати (**Trim To Solid...**, обрати СП та відповідне „тверде” тіло) та видалити (**Cleanup...**, обрати СП, надлишки якої видаляються). Надлишками вважаються менші частини СП, що лежать у єдиній площині;

• командою **Trim with Curve...** (розрізати лінією) можна розрізати СП лініями, які є на СП, причому лінії автоматично подовжуються до границь СП. Такими лініями можуть бути лінії пересічення СП (про їх створення див. Розділ 2.2.3.4).

- **Automatic...**: спочатку обираються декілька поверхонь, потім задається максимальна допустима відстань між поверхнями, між якими можуть бути створені СП. З'являються СП, на яких автоматично створюються лінії їх пересікань, а їх надлишки – видаляються;

- трьома окремими командами, що фактично замінюють одну попередню: **Generate...** – створюють СП, **Intersect...** – створюють лінії їх пересікань, **Cleanup...** – видаляють надлишки.

Увага: видалення надлишків СП – не остаточне, оскільки вони поміщуються в рівень „Mid-Surfaces to Delete”, який доцільно переглянути, при необхідності – частково повернути СП, лише потім видалити цей рівень остаточно.

Створення СЕС на СП – як у Розділі 3.3.2.4. Але якщо СП створено для частини тіла з постійною товщиною, то командою **Assign Mesh Attributes...** можна призначити атрибути СЕС для такої СП, причому тип СЕ – PLATE, а його товщина визначається автоматично.

3.3.2.6. Створення тривимірної скінченно-елементної сітки для „твердого” тіла

У MSC.Nastran є тільки один тип тривимірних СЕ – **SOLID** та декілька його модифікацій. За формою він може бути (див. Додаток 3, рис.Д3.6) *гексагональним* (8 кутів і 6 поверхонь) та (як вироджені випадки гексагонального) *п'ятигранною призмою* (6 кутів і 5 поверхонь) і *тетрагональним* (4 кути і 4 поверхні); без проміжних (1-го порядку наближення) та з проміжними (параболічний, або 2-го порядку наближення) вузлами на ребрах.

Для створення *тетрагональної* тривимірної СЕС на основі „твердих” тіл є команда **Mesh → Geometry → Solids...** Обираються „тверді” тіла, з'являється діалогова панель „**Automatic Mesh Sizing**” (див. рис.3.13). На ній потрібно обрати „**Tet Meshing**” або „**Hex Meshing**” (тетрагональні або гексагональні СЕ); вказати: максимальний розмір СЕ (**Element Size**); мінімальну кількість елементів на ребрі (**Min Elements on Edge**); максимальний кут, що допускається (**Max Angle Tolerance**, див. рис.3.7); максимальну кількість (**Max Elem of Small Feature**) та розмір (**Max Size of Small Feature**) СЕ у околі малих особливостей. Ще на ній можна встановити опцію „**Replace Mesh Sizes on All Curves**” (замінити розміри сітки на усіх кривих), тобто відмінити попередню розмітку поверхонь та ребер; опції „**Length Based Sizing**” (розмітка, що основана на довжині), „**Mapped Meshing Refinement**” (вдосконалене відображення сітки). Останні опції можуть покращити створену СЕС.

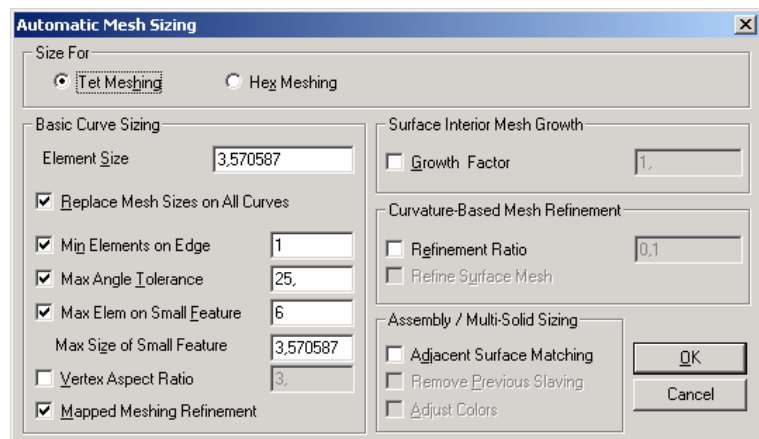


Рис.3.13. Діалогова панель завдання параметрів створення СЕС у „твердому” тілі, тетрадральні СЕ

Є й інші параметри: коефіцієнт зменшення для вершини (**Vertex Aspect Ratio**); у секції „**Surface Interior Mesh Growth**” – коефіцієнт зміни розміру СЕС на внутрішньої частині поверхні (**Growth Factor**); у секції „**Curvature-Based Mesh Refinement**” включена опція „**Refinement Ratio**” вкаже на те, що у зонах великої кривизни базову сітку необхідно змінити відповідно до вказаного коефіцієнту, а опція „**Refine Surface Mesh**” – що після цього СЕС необхідно ще раз оптимізувати.

Крім того, на ній у секції „**Assembly / Multi-Solid Sizing**” (Трансляція / розміри для декількох тіл) можна встановити опції: „**Adjacent Surface Matching**” (вирівнювати положення вузлів на суміжних поверхнях) – тільки для випадку „**Tet Meshing**”; „**Remove Previous Slaving**” (видалити попередню супідрядність) та „**Adjust Colors**” (корегувати кольори).

Після обрання матеріалу (автоматичне підключення, якщо він попередньо обирався) з'являється діалогова панель „**Automesh Solids**” (див. рис.3.14-а), на якій можна:

- змінити початковий номер вузлів та/або елементів, якщо це потрібно (**Node ID**, **Elem ID**); змінити координатну систему;
- обрати (**Property**) або створити („**New Prop...**”, див. Розділ 3.2) „властивість” СЕС;
- змінити параметри вузлів та/або СЕ;
- встановити опцію „**Surface Mesh Only**”, тобто створити сітку тільки на поверхні тіла (типу **PLOT ONLY**. Після цього сітку можна відредагувати (див. Розділ 3.4) і на її основі командою **Mesh→Geometry→Solids from Elements...** створити тривимірну СЕС);
- встановити опцію „**Midside Nodes**”, тобто створювати (або застосовувати) *проміжні* вузли СЕ для апроксимації геометрії тіла (квадратичних функцій форми СЕ). **Увага:** СЕС з проміжними вузлами дозволяє майже точно апроксимувати криволінійні поверхні, забезпечує більш точний розв'язок задачі, але приводить до значного збільшення потрібної дискової та оперативної пам'яті та часу розв'язання задачі;
- змінити значення „**Tet Growth Ratio ... to 1**”, тобто коефіцієнта збільшення розмірів СЕ усередину тіла (від поверхні).

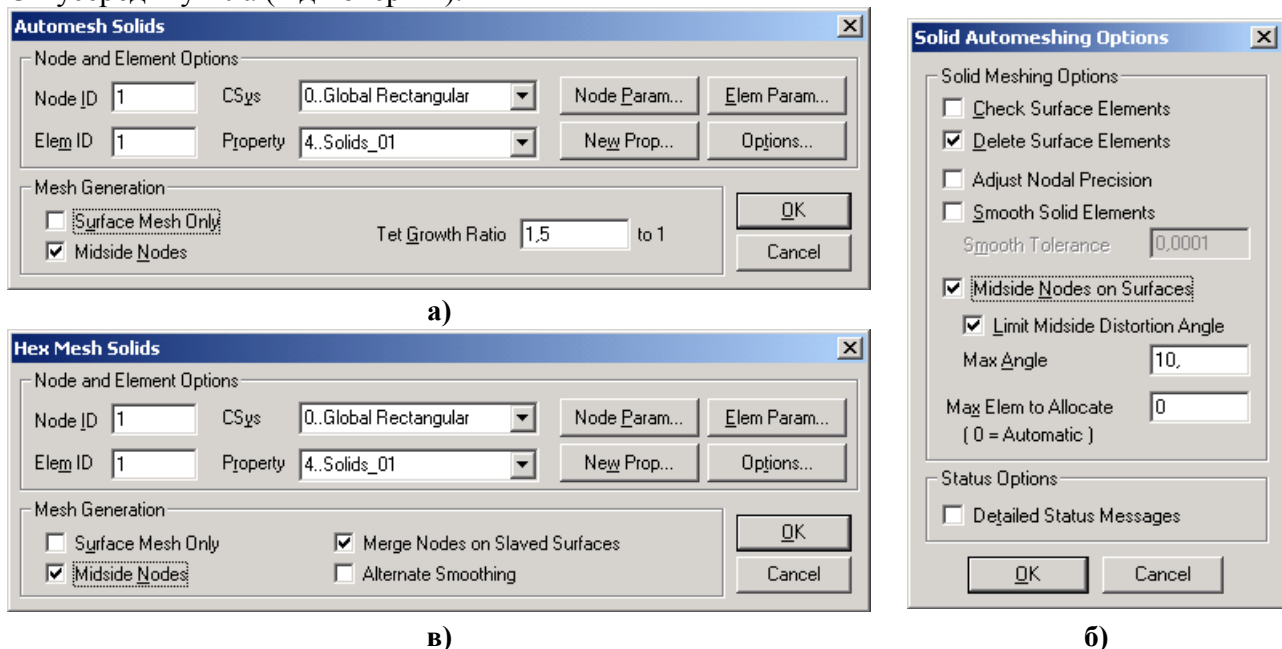


Рис.3.14. Діалогові панелі: а) – створення тетрагональної СЕС „твердого” тіла; б) – додаткових опцій; в) – створення гексагональної СЕС „твердого” тіла

При створенні СЕС будуть враховані призначення щодо СЕС, зроблені завчасно (див. Розділ 3.3.1). Однак на панелі є електронна кнопка „**Options**”, яка викликає діалогову панель „**Solid Automeshing Options**” (див. рис.3.14-б), де можна встановити додаткові опції:

- „**Check Surface Elements**” та „**Delete Surface Elements**”: перевірити та видалити поверхневі СЕ. Нагадаємо, що поверхневі СЕ створюються як допоміжні, тому їх бажано видаляти, коли вони вже непотрібні;
- „**Adjust Nodal Precision**”: корегувати вузлову точність;
- „**Smooth Solid Elements**”: згладити тривимірні СЕ з погрішністю „**Smooth Tolerance**”;
- „**Midsides Nodes on Surface**”: помістити проміжні вузли СЕ на поверхні тіла. **Увага:** це обов'язково потрібно робити, якщо тіло має криволінійні поверхні. При цьому можна задати граничне значення зміни кутів при цих вузлах (**Limit Midside Distortion Angle**) величиною „**Max Angle**”;
- „**Max Elem to Allocate (0 = Automatic)**”: максимальна кількість створюваних СЕ;
- „**Detailed Status Messages**”: вивести докладну інформацію.

Крім того, тривимірну тетрагональну СЕС можна отримати на основі поверхонь, які створюють *замкнений* простір. Дається команда **Mesh→Geometry→Solids from Surfaces...**, обираються поверхні, з'являється діалогова панель „**Automatic Mesh Sizing**” (див. рис.3.13). Параметри, що задаються на ній, розглянуті у Розділі 3.3.1.1.

Гексагональна СЕС дозволяє одержати більш точні результати, але не завжди може бути створеною швидко, оскільки вимагає гексагональних (восьмикутних) обрисів тіла. Звичайно мету можна досягти, проводячи „розсічення тіла зі відповідністю” (див. Розділ 2.2.5.2) на восьмикутні частини з наступним одночасним створенням СЕС та зшиванням у єдину СЕС (дії, за виключенням останнього пункту, майже аналогічні описаним у Розділі 3.3.2.7).

Для створення *гексагональної* СЕС дається команда **Mesh→Geometry→HexMesh Solids...**, обираються „тверді” тіла, з'являється діалогова панель „**Hex Mesh Solids**” (див. рис.3.14-в). Вона майже аналогічна розглянутій панелі „**Automesh Solids**” (див. рис.3.14-а), за виключенням опцій:

- „**Merge Nodes on Slaved Surfaces**”: об'єднати співпадаючі вузли на суміжних та/або підпорядкованих поверхнях;

- „**Alternate Smoothing**”: застосувати альтернативний (відносно звичайного) алгоритм згладжування СЕС. Доволі часто це допомагає одержати гексагональну сітку тоді, коли це не вдалося звичайним алгоритмом.

Результат – СЕС у вигляді (на екрані) чотирьохкутних та/або трикутних граней тривимірних СЕ, що виходять на поверхні тіла, та вузлів у їх вершинах та на їх ребрах. СЕ мають вказані у „**Property**” властивості, зокрема „створені” зі вказаного матеріалу.

3.3.2.7. Створення тривимірної скінченно-елементної сітки на основі об'єму

Дається команда „**Mesh→Geometry→Volume...**”, обираються об'єми, з'являється діалогова панель „**Geometry Mesh Options**” (див. рис.3.11-б). На ній будуть активними майже усі опції, тому, окрім розглянутих у Розділі 3.3.2.2 дій, можна:

- у секції „**Element Shape**” обрати форму СЕ: „**Tetra**” (тетраедр, 4 грані), „**Wedge**” (призма з трикутною основою, 5 граней) або „**Brick**” (гексаедр, 6 граней). Для СЕ типу „**Tetra**” та „**Wedge**” ще можна вказати напрямок уклону граней: „**Right Bias**” (правий), „**Left Bias**” (лівий) або „**Alternate Tri**” (змішаний);

- встановити опцію „**Merge Nodes**”, щоб об'єднати вузли, що співпадають.

3.3.2.8. Створення скінченно-елементної моделі конструкції з різних матеріалів

Доволі часто цільна конструкція створюється з різних матеріалів: покриттям, зварюванням або „жорстким” з'єднанням (посадкою з натягом, болтовим з'єднанням тощо). Тому виникає необхідність у створенні скінченно-елементної моделі з різних матеріалів.

Не зважаючи на те, що у FEMAP при автоматичному створенні скінченно-елементної сітки завжди *всі* одночасно створені СЕ будуть мати *однаковий* матеріал, є можливість для досягнення бажаної мети.

Спочатку необхідно створити конструкцію як *єдине* „тверде” тіло (при необхідності – об'єднати окремі частини за допомогою команди **Geometry→Solid→Add...** (див. Розділ 2.2.5.2)).

Перший варіант:

- за допомогою команди **Geometry→Solid→Slice Match...** розрізати це тіло на частини, кожна з котрих у подальшому повинна мати свій матеріал, тобто „розрізати з відповідністю” (див. Розділ 2.2.5.2);

- створити потрібні матеріали, записати їх у бібліотеку (кнопкою „**Save...**”). Якщо матеріали створені раніше – „завантажити” їх (кнопкою **Load...**). Створити „**Property**” з одним із введених матеріалів;

- створити автоматично сітку СЕ для *усіх* частин тіла одночасно, обравши для них створену раніше „**Property**”. При цьому на поверхнях, які розрізали тіло „зі відповідністю”, вузли скінченно-елементної сітки отримують *різні* номери, але (майже) *однакові* координати, тобто вони – співпадаючі;

- об'єднати ці вузли за допомогою команди **Tools→Scheck→Coincident Nodes...**, (аналогічно описаному у Розділі 2.2.6.3 для точок); вузли обирати кнопкою „**Select All**”;

- за допомогою команди **Modify→Update Elements→Material ID...** обрати *будь-який* СЕ із тієї частини тіла, де потрібно змінити матеріал, та на панелі „**Select Material for Update**”, що з'явиться, обрати зі списку матеріалів, що активізовані, потрібний матеріал. *Усі* СЕ даної частини конструкції змінять матеріал на вказаний, автоматично буде створена нова „**Property**”.

Отже, вся конструкція буде складатися з декількох „твердих” тіл із різних матеріалів, „зшитих” у вузлах на поверхнях розсічення в єдину скінченно-елементну модель.

Другий варіант:

- створити декілька „**Property**”, що відрізняються лише матеріалами;
- за допомогою команди **Modify→Update Elements→Property ID...** обрати СЕ в яких необхідно змінити матеріал, та на панелі „**Select Property for Update**”, що з'явиться, обрати зі списку „**Property**”, що активізовані, потрібну.

Цей варіант не завжди зручніше першого, оскільки в ньому необхідно безпомилково обрати всі СЕ, де буде змінюватися „**Property**”.

3.4. Створення скінченно-елементної моделі тіла без геометричної моделі

СЕС можна створювати й без геометричної моделі. Більш того, деякі СЕ можна створити тільки так (**MASS, MASS MATRIX, STIFFNESS MATRIX** та **SLIDE LINE**).

Створення окремих вузлів майже у всьому аналогічно створенню точок (див. Розділ 2.2.2), тільки команда – інша: **Model→Node...**

Увага: при подальшому формулюванні крайової задачі доволі часто значне спрощення та прискорення процесу завдання граничних умов на поверхнях СЕ та у вузлах досягається прикладенням цих умов до геометричних об'єктів моделі (**Point, Curve, Surface, Solid**). Але геометричні об'єкти передають ГУ до СЕС тільки тоді, коли об'єкти СЕС та геометричні об'єкти „асоційовані”. Така асоціація призначається автоматично, якщо СЕС створена на основі геометричної моделі. Коли СЕС створюється іншим чином, то такої асоціації автоматично не виникає. У Розділі 4.1.2 описано процедуру створення асоціацій.

3.4.1. Створення скінченно-елементної сітки на основі повного набору вузлів

Окремі СЕ на основі повного набору вузлів (або точок) можна створити за допомогою команди **Model→Element...** (**увага:** необхідно заздалегідь створити відповідні „**Property**”). З'являється діалогова панель з характерним початком назви „**Define ...**”. Її вигляд відповідає типу СЕ (див. рис.3.15), який можна змінити (кнопка „**Type...**”). На панелі можна:

- призначити інший **ID**, колір, рівень; обрати раніш створену „**Property**”;
- для одновимірних СЕ типів **CURVED TUBE, BAR, BEAM, CURVED BEAM** та **GAP** у секції „**Orientation**” (див. рис.3.15-а) ввести додатковий вузол (або вектор), що визначає його орієнтацію (див. рис.Д3.1);

- для одновимірних СЕ типу **BEAM** та **CURVED BEAM** у секції „**Offset**” (див. рис.3.15-а) призначити на обох кінцях відстані (див. рис.Д3.1); кнопкою „**Releases...**” викликати діалогову панель „**Define Element Releases**” (див. рис.3.15-б), де заборонити деякі ступені свободи вузлів на кінцях СЕ;

- для двовимірних СЕ усіх типів (див. рис.3.15-в) та вісесиметричного СЕ вказати кількість кутових вузлів: „**Quad**” (чотири) або „**Triangle**” (три); для тривимірного (див. рис.3.15-д) – форму СЕ: „**Brick**” (гексаedr, 6 граней), „**Wedge**” (призма з трикутною основою, 5 граней) або „**Tetra**” (тетраedr, 4 грані);

- ввести номери вузлів, на основі яких буде створюватися СЕ (див. рис.3.15), причому для всіх типів СЕ, крім випадків, зображених на рис.3.15-г,е, якщо оставити поля з номерами вузлів пустими, то після команди „**OK**” з'явиться стандартний діалог обирає вузлів. **Увага:**

порядок призначення номерів вузлів повинен відповідати шаблону нумерації вузлів у СЕ (див. Додаток 3);

- для СЕ типу **SLIDE LINE** (див. рис.3.15-г) сформувати набори *провідних* (кнопка „**Master Node...**”) та *ведених* (кнопка „**Slave Node...**”) вузлів, причому кожний такий набір повинен мати однакову кількість вузлів, а напрямок обходу – проти часової стрілки. **Увага:** по-перше, площина, в якій розташований цей (плоский) СЕ – тільки **XY**, тому, якщо потрібно, необхідно ввести локальну систему; по-друге, цей СЕ у своїй площині повинен бути „розтягнутим” вздовж *всієї можливої поверхні* контакту. Більш докладно – у Розділі 6.3.7;

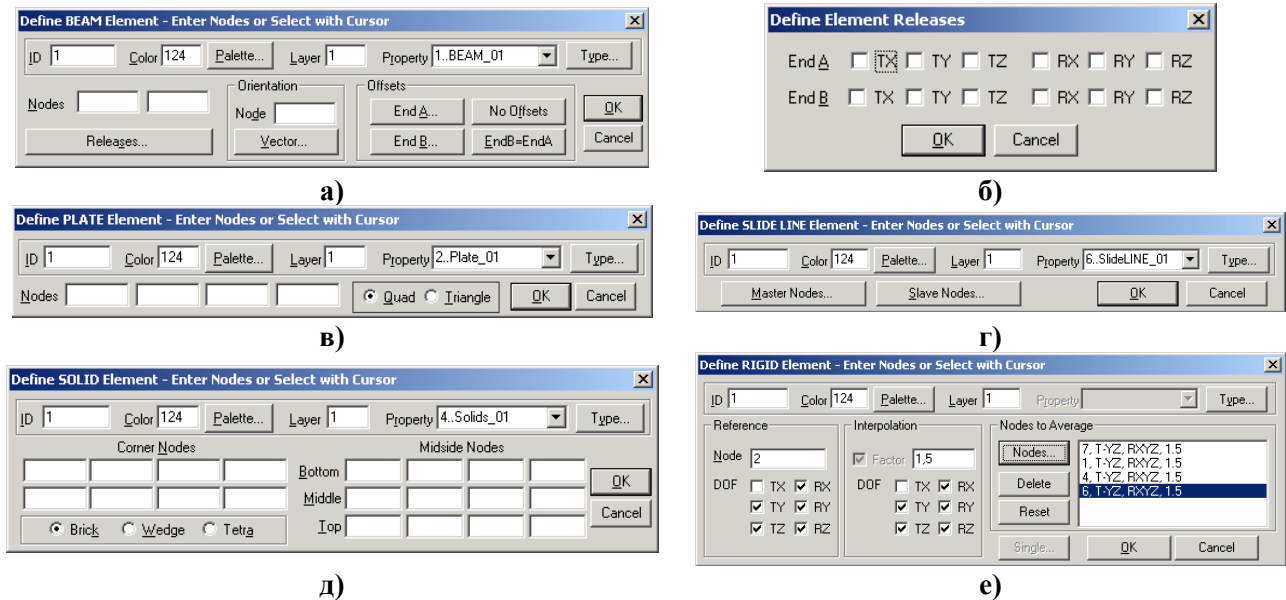


Рис.3.15. Характерний вигляд діалогових панелей:

а, в, г, д, е) – створення СЕ; б) – завдання заборонених ступеней свободи на кінцях СЕ

- для СЕ типу **RIGID** (див. рис.3.15-е) слід у секції „**Reference**” вказати номер „головного” вузла та заборонені ступені свободи, за допомогою кнопки „**Nodes**” викликати панель та обрати вузли, що будуть зв’язані з „головним” (**увага:** не більш 12 для одного СЕ, включно з „головним”). При необхідності – у секції „**Interpolation**” ініціювати опцію „**Factor**”, ввести значення коефіцієнта збільшення (зменшення) жорсткості зв’язку та вказати, яких „заборонених” ступенів свободи вузлів це стосується (більш докладно – у „**Help**”: “**FEMAP User Guide**” → “**Element Reference**” → „**Other Elements**”). Про інший варіант створення зв’язків – у Розділі 6.1.2.4.

3.4.2. Створення скінченно-елементної сітки на основі опорних вузлів

У FEMAP є інструменти створення СЕС на основі малої кількості опорних вузлів. Це такі варіанти:

- **Mesh**→**Between...** (між кутовими вузлами): одновимірна (між двома), двовимірна (між трьома або чотирма) чи тривимірна (між 4...8 вузлами) СЕС *першого* порядку апроксимації. СЕ створюються на основі параметричного описання лінії, поверхні або об’єму. Викликається діалогова панель „**Generate Between Corners**” (див. рис.3.16-а). На ній у секції „**Node and Element Options**” окрім вже відомих є опція „**GenClockwise**” (генерувати вузли за часовою стрілкою – для циліндричної та сферичної систем координат); у секції „**Generate**” потрібно вказати, що створювати: вузли, СЕ (якщо вузли вже є) або одночасно вузли та СЕ (**Both**); у секції „**Corners**” – кількість опорних вузлів; у секції „**Mesh Size**” – кількість вузлів (**#Nodes**) та параметри (**Bias**) збільшення розмірів СЕ (тут напрямком **Dir1** – від 1-го до 2-го вузла), а також можна встановити опцію „**Geometric Bias**” (геометрична пропорція). Якщо створюються тільки СЕ (вузли вже є), то потрібно буде вказати перший вузол (**First Corner Node**), прирощення номерів (**Node Increment**) та їх кількість (**#Nodes**). Форма СЕ залежить

від розмірності, обирається у секції „**Element Shape**”: для одновимірного – лінія (**Line**), для двовимірного – трикутник (**Tri**) або чотирикутник (**Quad**), для тривимірного – як у Розділі 3.3.2.7. Номера опорних вузлів можна ввести у відповідні поля секції „**Corner Nodes**”, або, якщо оставити поля з номерами вузлів пустими, то після команди „**OK**” з’явиться стандартний діалог обираєнні вузлів. **Увага:** порядок розташування вузлів – проти часової стрілки, а для тривимірної – як на рис.2.13;

- **Mesh→Region...** (між двох груп вузлів, що протистоять, причому групи мають *однакову* кількість вузлів): спочатку обираються вузли 1-ої групи, потім (у тому же порядку!) – 2-ої. З’являється діалогова панель „**Generate Ruled Region**” (див. рис.3.16-б), на якій вводяться необхідні дані. **Увага:** значення у полях „**Dir 2**” та „**Dir 3**” (коли вони активні) повинні дорівнювати кількості вузлів у цих напрямках. У результаті простір між групами вузлів заповнюється СЕ обраного типу, *першого* порядку апроксимації. СЕ створюються на основі параметричного описання лінії, поверхні або об’єму. **#Nodes** – кількість вузлів у напрямку від однієї групи вузлів до другої, включаючи вузли цих груп (тобто на один більше, ніж буде створено СЕ у цьому напрямку);

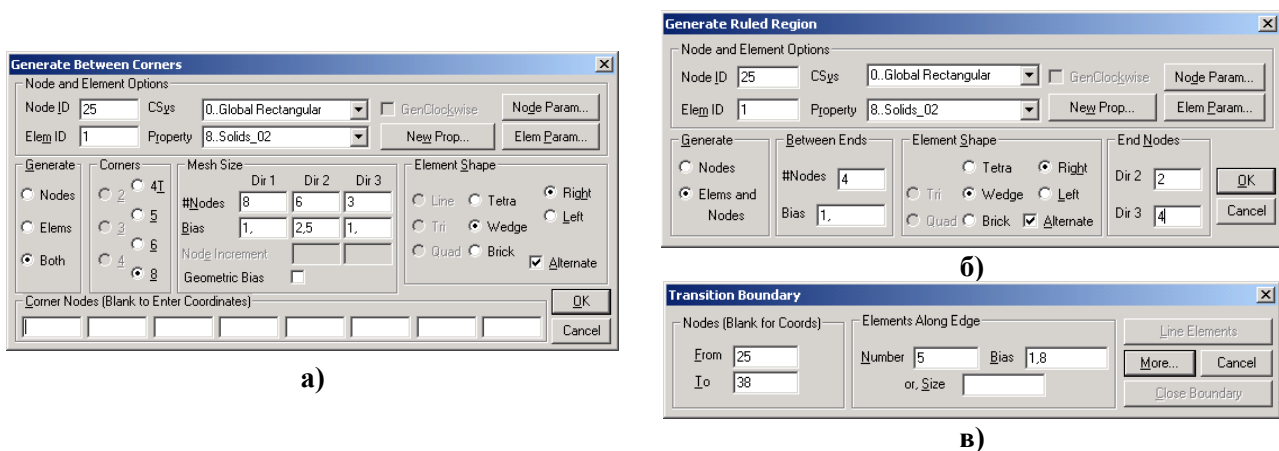


Рис.3.16. Характерний вигляд діалогових панелей створення СЕ:

а) – між кутковими вузлами; б) - між двох груп вузлів; в) – двовимірної нерегулярної між кутковими вузлами з розміткою контуру

- **Mesh→Transition...** (створення нерегулярної двовимірної СЕС на основі 3-ох або 4-ох куткових вузлів та розмітки контуру): на діалоговій панелі „**Transition Boundary**” (див. рис.3.16-в), вказуються початковий (**From**) та кінцевий (**To**) кути (вузли) майбутнього контуру, кількість СЕ вздовж (прямої) лінії контуру, коефіцієнт збільшення розміру СЕ (**Bias**) або орієнтовний розмір СЕ (**Size**). Подається команда продовження (кнопкою „**More...**”) або, на заключному етапі, – „закриття” контуру „**Close Boundary**” (стає активною на третьому контурі). З’явиться діалогова панель „**Generate Property Mesh**”, де призначається або обирається „**Property**” СЕ. **Увага:** якщо цією процедурою СЕ додаються у вже існуючу СЕС, то на стику виникають вузли, „що співпадають”, їх потрібно об’єднати аналогічно розглянутому у Розділі 2.2.6.3. для точок (команда **Tools→Check Coincident Nodes...**).

3.4.3. Створення скінченно-елементної сітки на основі операцій видавлювання, обертання та витягування

У FEMAP є інструменти створення СЕС на основі операцій видавлювання (команда **Mesh→Extrude→**), обертання (**Mesh→Revolve→**) та витягування (**Mesh→Sweep→**). Основою для створення СЕС є криві з *розміткою* кількості СЕ (**→Curve...**), СЕ нижчої розмірності (**→Elements...**) або поверхні СЕ (**→Element Face...**).

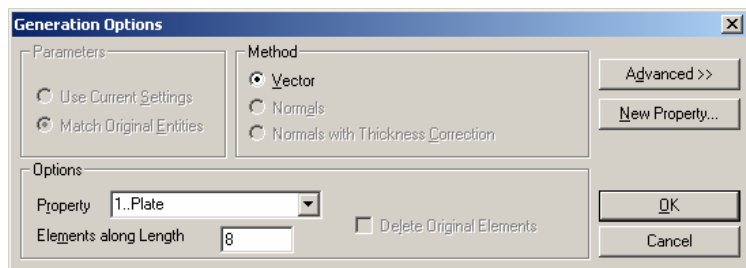
Це такі варіанти:

- „*видавлювання*” двовимірних СЕ як результат заповнення скінченними елементами поверхні, яка утворюється при переміщенні кривих (команда **Mesh→Extrude→Curve...**). Обираються криві з *розміткою* кількості СЕ (можуть мати раніше створені СЕ, які назвемо

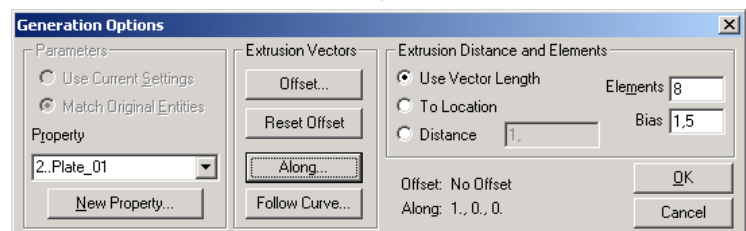
„опорними”), з’являється діалогова панель „**Generation Options**” (див. рис.3.17-а). Потрібно обрати раніше створений варіант властивості *двовимірного* СЕ або задати новий (кнопкою „**New Property...**”), ввести кількість СЕ вздовж напрямку видавлювання (**Elements along Length**). Якщо дати команду „**OK**”, то з’явиться стандартний діалог завдання *напряму* вектором, причому вказана *довжина* цього вектору буде довжиною видавлювання. Після цього будуть створені (видавлені) нові СЕ з *рівномірним* кроком. Якщо замість „**OK**” ініціювати кнопку „**Advanced>>**”, панель „**Generation Options**” модифікується (див. рис.3.17-б). На ній можна додатково встановити: збільшення розміру СЕ у напрямку видавлювання (у полі „**Bias**”), напрямок видавлювання *вектором* (за допомогою кнопки „**Along...**”) або *вздовж* раніше створених (бажано – розмічених під кількість СЕ) *ліній* (прямих або кривих, за допомогою кнопки „**Follow Curve...**”). Якщо напрямок вказується вектором (не кривою), то довжину видавлювання можна встановити: довжиною вектора (**Use Vector Length**); існуючим об’єктом (**To Location**), причому з’явиться стандартне діалогове вікно для вибору об’єкту (точки, вузла тощо), а реальна довжина видавлювання визначається проекцією положення об’єкту на напрямок вектору; величиною „**Distance**” (введена довжина вектора буде ігноруватися). За допомогою кнопки „**Offset...**” можна вказати (вектором) відступ від обраних кривих (з „опорними” СЕ), на якому будуть створюватися нові СЕ. Коли всі необхідні призначення будуть зроблені, стає активною кнопка „**OK**”. Після створення СЕ знов з’явиться діалогова панель „**Generation Options**” для продовження процесу, причому база початку створення нових СЕ буде перенесена на кінець попередньо створених СЕ. **Увага:** якщо були „опорні” СЕ, то вони не видаляються, а створені двовимірні СЕ будуть мати перший порядок апроксимації;

- „*видавлювання*” двовимірних або тривимірних (**Mesh→Extrude→Element...**) СЕ із завчасно створених одновимірних або двовимірних СЕ відповідно. Обираються „опорні” *однотипні* СЕ, з’являється діалогова панель „**Generation Options**” (див. рис.3.17-а), на якій вже будуть доступні опції секції „**Parameters**”, де можна обрати варіант „**Match Original Entities**” (копір та рівень нових СЕ будуть відповідати „опорним” СЕ) або „**Use Current Setting**” (використовувати поточні призначення у „**Property**”). Якщо опорні СЕ – одновимірні, то наступні дії – аналогічні описаним вище. Якщо опорні СЕ – двовимірні, то кнопка „**Advanced...**” буде недоступною, а напрям можна обирати не тільки вектором, а й нормаллю до їх поверхні (**Normals**) або нормаллю з корекцією товщини СЕ, що створюються, вздовж всієї поверхні (**Normals with Thickness Correction**). Останнє має значення для двовимірних СЕ на криволінійній поверхні. Коли напрямок задається нормаллю, ще буде необхідно задати довжину витискування (на панелі „**Offset Extrusion**”, що з’явиться), причому знак „+” або „-” вкаже напрямок процесу витискування. Якщо опцію „**Delete Original Elements**” (видалити оригінальні СЕ) не активізувати, після створення нових СЕ з’явиться запит: чи видаляти їх, чи ні. **Увага:** порядок апроксимації СЕ (перший або другий, тобто „**Parabolic**”) визначається „опорними” СЕ;

- на основі процедури *обертання*, коли основою є завчасно створені та розмічені криві (команда **Mesh→Revolve→Curves...**) або одновимірні чи двовимірні СЕ (команда



а)



б)

Рис.3.17. Діалогові панелі опцій видавлювання СЕ

Mesh→Revolve→Elements...). Обираються *незамкнені* криві або „опорні” СЕ, з’являється описана вище діалогова панель „**Generation Options**” (див. рис.3.17-а). Після команди „**OK**” вказується вектор, відносно якого проводити обертання, а також кут обертання (**Rotation Angle**) й, якщо потрібно, зміщення (**Translation Distance**) *останніх* вузлів нових СЕ вздовж вказаного вектора. **Увага:** опорні об’єкти не повинні пересікатися з віссю обертання, хоча й можуть на ній закінчуватися;

- на основі процедури *витягування*, яка майже аналогічна процедурі витискування, що описана вище, з однією відмінністю: траєкторія створення СЕ задається заздалегідь створеними *розміченими безперервними* лініями. Є варіант витискування СЕ із застосуванням ліній (команда **Mesh→Sweep→Curves...**) або одновимірних чи двовимірних СЕ (команда **Mesh→Sweep→Elements...**). Спочатку (відповідно команді) обираються „опорні” криві або *однотипні* СЕ, потім – криві майбутньої траєкторії. З’являється діалогова панель „**Generation Options**” (див. рис.3.18), на якій майже всі опції розглянуті вище. Відмінність від випадку **Mesh→Extrude→...** полягає у тому, що ребра нових СЕ будуть *дотичні* до траєкторії переміщення. Опцію „**Alignment Curve**” потрібно активізувати, коли траєкторія переміщення – просторова *не плоска* крива, щоб задати додатковий об’єкт (лінію), відносно якої будуть орієнтуватися СЕ, що створюються (**alignment** – вирівнювання).

Увага: при видавлювання або витягуванні тривимірних СЕ із двовимірних СЕ з кривою поверхнею або вздовж нелінійної кривої проводиться відповідне корегування довжин ребер нових тривимірних СЕ, яке не завжди є геометрично можливим (від’ємна довжина є помилкою).

3.4.4. Створення тривимірної скінченно-елементної сітки на основі поверхневих скінченних елементів

Тривимірну *тетрагональну* СЕС можна отримати на основі поверхневої СЕС, яка створює *замкнений* простір. Дається команда **Mesh→Geometry→Solids from Elements...**, обираються „опорні” СЕ (часто це всі СЕ), з’являється діалогова панель „**Automatic Mesh Sizing**” (див. рис.3.6-б). Параметри, що задаються на ній, розглянуті у Розділі 3.3.1.1.

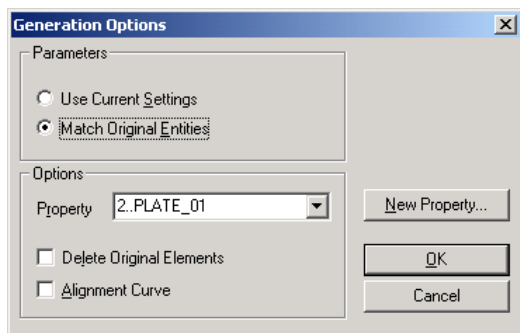


Рис.3.18. Діалогова панель опцій витягування СЕ

За допомогою команди **Mesh→Geometry→HexMesh from Elements...** можна створити *гексагональну* СЕС або СЕ у вигляді *n’ятигранних призм* на основі поверхневої СЕС у складі чотирикутних або трикутних СЕ відповідно, причому повинно бути одна або більша кількість *пар* поверхонь, між якими створюється нова СЕС у вигляді декількох шарів СЕ.

Поверхні кожної пари не повинні лежати в одній площині. На них потрібно мати двовимірну СЕС, з подібним заповненням та з однаковою кількістю СЕ. Спочатку обираються СЕ з поверхонь „основи” (**Elements on Base**), потім – відповідні їм СЕ з „верхніх” поверхонь (**Elements on Top**). Оскільки порядок слідування СЕ при вибиранні не має значення, то зручно встановити метод обирання СЕ як „СЕ на поверхні” (**on Surface**). Втім, не завжди потрібні всі СЕ, що є на поверхні.

Коли всі необхідні СЕ обрані, з’являється запитання „**OK to Automatically match Top and Bottom Meshes ?**” (автоматизувати знаходження СЕС обох шарів ?), на яке можна дати відповідь „**Так**” або „**Ні**”. Якщо „**Ні**”, то доведеться додатково обирати один із вузлів десь *на границі* поверхні „основи”, потім – *відповідний* йому вузол на границі „верхньої” поверхні. Наприкінці вказується кількість шарів СЕ, що буде поміщено між поверхнями (**Layers Between Base and Top**). Всі опорні двовимірні СЕ автоматично видаляються.

Коли всі необхідні СЕ обрані, з’являється запитання „**OK to Automatically match Top and Bottom Meshes ?**” (автоматизувати знаходження СЕС обох шарів ?), на яке можна дати відповідь „**Так**” або „**Ні**”. Якщо „**Ні**”, то доведеться додатково обирати один із вузлів десь *на границі* поверхні „основи”, потім – *відповідний* йому вузол на границі „верхньої” поверхні. Наприкінці вказується кількість шарів СЕ, що буде поміщено між поверхнями (**Layers Between Base and Top**). Всі опорні двовимірні СЕ автоматично видаляються.

Коли всі необхідні СЕ обрані, з’являється запитання „**OK to Automatically match Top and Bottom Meshes ?**” (автоматизувати знаходження СЕС обох шарів ?), на яке можна дати відповідь „**Так**” або „**Ні**”. Якщо „**Ні**”, то доведеться додатково обирати один із вузлів десь *на границі* поверхні „основи”, потім – *відповідний* йому вузол на границі „верхньої” поверхні. Наприкінці вказується кількість шарів СЕ, що буде поміщено між поверхнями (**Layers Between Base and Top**). Всі опорні двовимірні СЕ автоматично видаляються.

Увага: кожна порція СЕ, створених описаним вище чином, є *окремим* блоком СЕ. Для з'єднання СЕ у єдину СЕС потрібно об'єднати вузли, що співпадають, аналогічно розглянутому у Розділі 2.2.6.3. для точок (команда **Tools**→**Check Coincident Nodes...**).

3.5. Модифікація скінченно-елементної моделі тіла

Доволі часто створену СЕС потрібно модифікувати: вводити додаткові зв'язки, змінювати розміри СЕ, об'єднувати їх або, навпаки, розділяти на декілька нових СЕ тощо.

3.5.1. Створення зв'язків між вузлами

Як це було зазначено у Розділі 1.6, якщо задача характеризується повною циклосиметрією, коли циклічно повторюються як геометрія, так і умови навантаження, то необхідно моделювати лише характерну частину конструкції (вирізати поверхнями), створювати таку СЕС, щоб вузли на цих поверхнях розташувалися однаково, потім для відповідних вузлів СЕС на цих поверхнях вводити зв'язки (щоб вони мали однакові розв'язки). Є й інші випадки, коли необхідно створювати зв'язки між вузлами.

Увага: щоб ці зв'язки потім не заважали зображенню СЕС, доцільно для них заздалегідь створити окремий рівень (**Layers**), який обрати за допомогою кнопки „**Elem Param...**”.

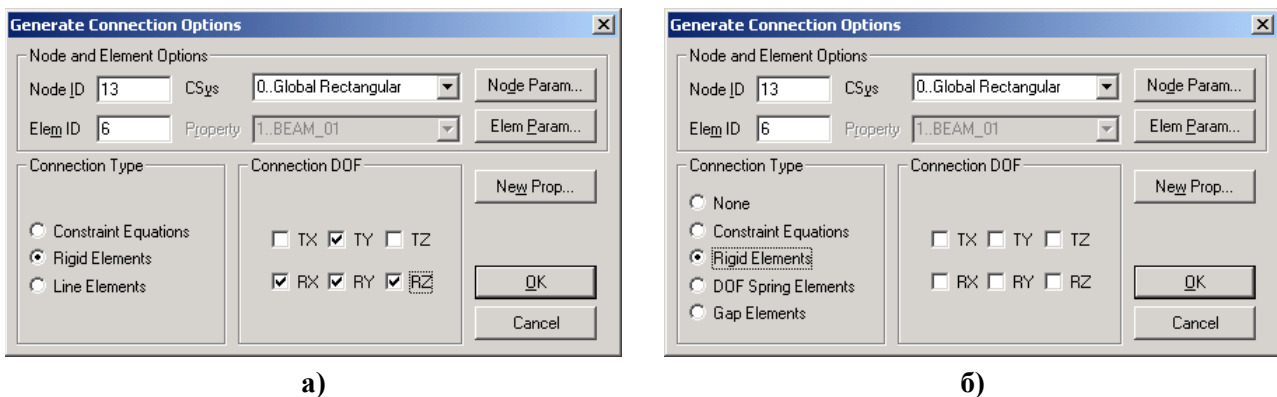


Рис.3.19. Характерний вигляд діалогових панелей створення зв'язків для команд: а) – **Closest Link...** та **Multiple...**; б) – **Unzip...** та **Coincident Link...**

Діалогова панель „**Generate Connection Options**” (див. Рис.3.19) – майже однакова для всіх команд групи **Mesh**→**Connection**. На ній обирається тип зв'язку: формульний (**Constraint Equations**) або один із типів СЕ („**Rigid**”, „**Line**”, „**DOF Spring**” чи „**Gap**”); призначається „**Property**” (треба обрати або створити). Для жорсткого СЕ „**Rigid**” ще необхідно призначити ступені свободи, що зв'язуються. Щоб формульний зв'язок був активним, необхідно заздалегідь командою **Model**→**Constraint**→**Equation** задати формулу (див. Розділ 5.1.2.3).

Отже, для створення зв'язків між вузлами є група команд **Mesh**→**Connection**→, які розрізняються способом вибору вузлів (вказану загальну частину команди опускаємо):

- **Closest Link...** (ближчий зв'язок): по чергово обираються вузли двох груп, між якими попарно за принципом „ближчого вузла” будуть створюватися зв'язки;
- **Multiple...** (множинний зв'язок): після призначення властивостей зв'язку у діалоговому режимі вказуються пари вузлів, що зв'язуються;
- **Coincident Link...** (у вузлах, що співпадають): обираються вузли, призначається максимальна відстань між вузлами, що будуть зв'язані;
- **Unzip...** (роз'єднання): обираються СЕ, потім – їх *спільні* вузли, що будуть роз'єднуватися, потім вказуються властивості зв'язків між обраними вузлами. Команду звичайно застосовують для роз'єднання СЕС тіла на зв'язані або незв'язані (**None**) частини.

3.5.2. Редагування скінченно-елементної сітки

У FEMAP редагування СЕС реалізовано тільки для двовимірних СЕС. Є два режими: „**Interactive**” та „**Split**”.

Командою **Mesh**→**Editing**→**Interactive...** викликається діалогова панель „**Mesh Editing**” (див. Рис.3.20-а). На ній обирається один з варіантів розділення СЕ на декілька СЕ, потім на робочому полі FEMAP за допомогою „миші” обирається потрібний СЕ та натискається ліва кнопка „миші” – СЕ візуально ділиться на частини. Кнопка „**Undo**” відмінює розділення останнього СЕ. Якщо опцію „**Merge**” зробити активною, то будуть об’єднані всі вузли СЕС, що співпадають. Реальне розділення проводиться після команди „**Done**”.

Командою **Mesh**→**Editing**→**Split...** викликається дещо інша діалогова панель, але з тією ж назвою (див. Рис.3.20-б). На ній також один з варіантів розділення СЕ на декілька СЕ, потім кнопкою „**Pick Element**” викликається стандартна панель для обирання СЕ. Призначення опції „**Merge Nodes**” таке ж саме, як й опції „**Merge**” на Рис.3.20-а. Коли навпіл діляться СЕ з 4-ма кутами, то стає доступною опція „**Warping**”, призначення якої докладно описано у Розділі 3.6.4. Реальне розділення проводиться після команди „**Done**”.

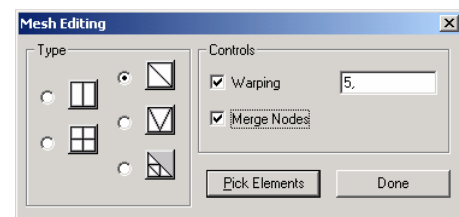
Увага: наявність у СЕС тіла „висячих” вузлів (вузол на границі двох СЕ є вузлом лише одного з цих СЕ) рівнозначна розрізу (тріщині) у тілі, що приводить до локального дуже значного концентратора напружень.



а)

Рис.3.20. Вигляд діалогових панелей редагування двовимірної СЕС:

а) – інтерактивного; б) – „розчленовування”



б)

3.5.3. Регенерація та очищення скінченно-елементної сітки

У FEMAP регенерацію реалізовано тільки для двовимірних СЕС.

Командами (загальну частину команди **Mesh**→**Remesh**→ опускаємо): **Refine...** (здрибнювати); **Update...** (оновлювати) або **Unrefine...** (укрупнювати) викликається панель для обирання СЕ (можна користуватися протяганням „миші” з притиснутою клавішею „**Shift**”). Потім для одновимірних СЕ достатньо ввести коефіцієнт зменшення (цільне число >1) / збільшення (<1) розміру СЕ. Для інших типів СЕ з’являється діалогова панель „**Refinement and Remeshing Options**” (див. Рис.3.21-а). На ній обирається відповідна дія (опції „**Refine**”, „**Remesh**” або „**Unrefine**”), вказується коефіцієнт зменшення /збільшення розміру СЕС „**Refinement Ratio**” та величина кута розриву „**Break Angle**” (тільки для „**Unrefine**”). **Увага:** якщо значення цього кута буде вище деякого критичного (залежить від геометрії тіла в околі зовнішніх кутів), то такий зовнішній кут тіла може бути „зрізаним”. Опція „**Delete Original Nodes and Elements**” встановлена за замовчанням.

Кнопкою „**Exclude Nodes From Boundary**” можна викликати стандартний діалог вибору вузлів на контурі області обраних СЕ, які будуть видалені у процесі регенерації СЕС. Після команди „**OK**” з’являється панель для обрання вузлів на контурі області обраних СЕ, відстань між якими буде обов’язково зменшуватися або збільшуватися. **Увага:** саме ці обрані вузли будуть значно впливати на результат регенерації СЕС.

Потім може з’явитися діалогова панель „**Generate Boundary Mesh**”, ідентична зображеної на рис.3.12-а, де можна змінити будь-які параметри майбутньої СЕС. Результат – нова СЕС замість тих СЕ, що були обрані, причому вузлів, що співпадають, не виникає.

Командами **Mesh**→**Remesh**→**Cleanup Slivers...** та **Mesh**→**Remesh**→**Edge Removal...** можна видалити дуже малі СЕ та СЕ з короткими гранями відповідно. В обох випадках спочатку обираються СЕ, серед яких буде проводитися процедура. У першому випадку з’являється діалогова панель „**Sliver Removal**” (див. Рис.3.21-б), де необхідно вказати критичні розміри кута та довжини ребра (наведена відповідна статистика). У другому випадку з’являється діалогова панель для обирання двох кутових вузлів: „**From**” та „**To**” на короткій грані, причому видаляться буде вузол „**To**”, після чого СЕ, що примикають, оновляться.

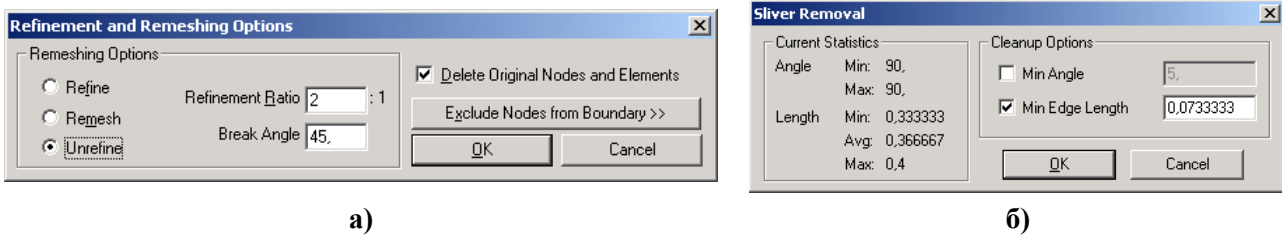


Рис.3.21. Вигляд діалогових панелей: а) – перегенерації СЕ; б) – видалення дуже малих СЕ

3.5.4. Перетворення скінченно-елементної сітки у STL-моделях

Імпортовані STL-моделі тіла описуються трикутними площинами, які у FEMAP сприймаються як поверхневі СЕ типу **PLOT PLANAR**. Тобто геометричних об'єктів тіла (точок, кривих, поверхонь тощо) зовсім немає. У такому випадку у FEMAP є можливість створити тривимірну СЕС: командою **Mesh→Geometry→Solid from Elements...** Однак побудована таким чином СЕС буде неякісною. Тому у FEMAP є інструменти для переробки поверхневих СЕ STL-моделі, що викликаються групою команд **Mesh→Remesh→**:

- **Build Remeshing Regions...** (побудувати області регенерації): обираються СЕ (звичайно – усі), вказується кутовий параметр (**Angle Tolerance**), що визначає градацію областей, що будуть створюватися. Ці області отримують різне забарвлення, є площинами або комбінаціями близьких за орієнтацією площин, які об'єднують деяку кількість СЕ STL-моделі;

- **Edit Remeshing Regions...** (редагувати області регенерації): у діалоговому режимі вказується номер СЕ STL-моделі (**Move Elem**) та номер СЕ регіону іншого забарвлення, в який він буде переміщений. **Увага:** для зручності виконання цієї процедури кожний регіон автоматично поміщено в окремий рівень (**Layer**);

- **Mesh Remeshing Regions...** (перегенерація): з'являється інформація про максимальний розмір майбутніх СЕ (можна відредагувати), потім – звичайна діалогова панель створення двовимірних СЕ (див. рис.3.12-а), за допомогою якої створюється нова СЕС із СЕ типу **PLOT ONLY**;

- **Convert Facets...** (конвертувати грані). Вона використовується тоді, коли поверхня тіла „зібрана” з трикутних поверхневих СЕ і всі описані вище методи перебудови СЕС не спрацьовують. Тоді цією командою гарантовано створюється поверхнева сітка з трикутних СЕ, яку потім можна змінювати командами **Mesh→Remesh→**.

Отримана СЕС буде значно краще, ніж вихідна, але й вона може мати дуже витягнуті СЕ. **Увага:** СЕС обов'язково потрібно очистити (див. Розділ 3.5.3), можна ще її відредагувати та перенумерувати (див. Розділи 3.5.3 та 3.5.8), навіть призначити дещо інші координати вузлів СЕ (**Modify→Edit→Node...**). Остання дія – створення тривимірної СЕС командою **Mesh→Geometry→Solid from Elements...** (об'єми СЕ від поверхневих СЕ).

3.5.5. Створення ребер жорсткості

Додаткові ребра жорсткості – звичайне конструктивне рішення. У FEMAP скінченні елементи, що їх моделюють, створюються командою **Mesh→Edge Members...** З'являється діалог вибору СЕ, до яких ці ребра будуть „прикріплятися”, потім – діалог вибору „**Property**” ребер жорсткості, потім – діалог вибору опорних вузлів. Якщо ці ребра – балочного типу, то додатково з'явиться діалог призначення напрямку осі **Y** перерізу СЕ (див. Додаток 3). Отже, „**Property**” ребер жорсткості необхідно створити завчасно, причому доцільно помістити „**Property**” на окремий рівень (**Layer**), щоб забезпечити зручний доступ до них у подальшому. Для тривимірної СЕС ребра жорсткості можуть створюватися у вигляді одновимірних або двовимірних СЕ.

Увага: FEMAP створює одновимірні ребра жорсткості на *всіх* ребрах СЕ, що містять вказані вузли. Тому після створення їх потрібно переглянути та видалити зайві. Для зміщен-

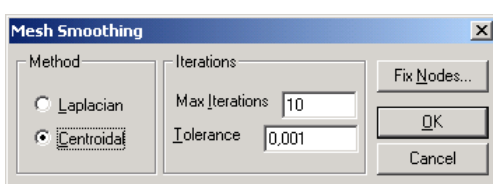
ня СЕ, що моделюють ребра жорсткості, у просторі, зручно користуватися командою **Modify**→**Update Element**→**Offset...** (див. Розділ 3.5.9).

3.5.6. Згладжування скінченно-елементної сітки

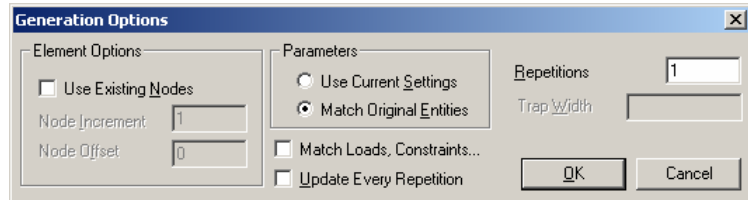
Іноді поліпшення СЕС можна отримати у наслідок процедури **Mesh**→**Smooth...** (тільки для двовимірної або тривимірної СЕС). Спочатку потрібно обрати СЕ, що будуть приймати участь у процесі згладжування СЕС, потім на відповідній панелі (див. Рис.3.22-а) – обрати метод (**Laplacian** або **Centroidal**) та параметри ітераційного процесу. Ще за допомогою кнопки „**Fix Nodes**” можна вказати вузли, які не будуть змінювати свої координати. **Увага:** ця процедура може дати несподівані результати, особливо для тривимірної СЕС!

3.5.7. Операції маніпулювання вузлами та скінченними елементами

Декілька операцій копіювання вузлів та СЕ **Mesh**→ (**Copy...**, **Radial Copy...**, **Scale...**, **Rotate...** та **Reflect...**) аналогічні за виконанням операціям копіювання геометричних об'єктів, викладених у Розділі 2.2.6.1. Після обирання об'єктів з'являється діалогова панель „**Generation Options**” (див. Рис.3.22-б). На ній для СЕ будуть активні всі опції, а для вузлів – тільки опції секції „**Parameters**”, а також опції „**Update Every Repetition**” та „**Repetitions**”. Пояснення до опцій див. у Розділі 2.2.6.1.



а)



б)

Рис.3.22. Діалогові панелі: а) – згладжування СЕ; б) – копіювання СЕ

Декілька операцій меню „**Modify**”: переміщення (**Move To...**, **Move By...**), обертання (**Rotate To...**, **Rotate By...**), вирівнювання (**Align...**), масштабування (**Scale...**), редагування (**Edit...**), зміни кольорів (**Color...**) та переміщення на інші рівні (**Layer...**) вузлів та СЕ аналогічні за виконанням відповідним операціям для геометричних об'єктів, викладених у Розділах 2.2.6.2 та (про „**Layer...**”) 1.7.1.

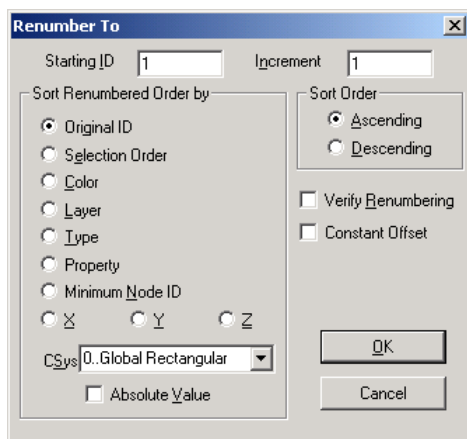


Рис.3.23. Діалогова панель перенумерування СЕ

Увага: після цих операцій можуть з'явитися вузли та СЕ, що співпадають. Їх потрібно об'єднати (вузли – аналогічно описаному у Розділі 2.2.6.3 для точок, СЕ – за процедурою Розділу 3.6.2), інакше СЕС тіла буде „розірваною”, а майбутній розв'язок крайової задачі - невірний.

3.5.8. Перенумерування об'єктів скінченно-елементної сітки тіла

Команди **Modify**→**Renumber**→ (**Coord Sys...**, **Node...**, **Element...**, **Material...** або **Property...**) спочатку викликають стандартну діалогову панель для обирання об'єктів, потім – панель „**Renumber To**” (див. Рис.3.23, для СЕ). На ній вказується:

- новий початковий номер об'єктів (**Starting ID**) та

крок змінювання номерів (**Increment**);

- критерій сортування: за ідентифікатором (**Original ID**), порядком вибору (**Selection Order**), кольором (**Color**), рівнем (**Layer**), типом (**Type**), „властивістю” (**Property**), мінімальним номером вузла у кожному СЕ (**Minimum Node ID**), порядком положення вздовж вказаної координати (**X**, **Y**, **Z**) вказаної системи координат (**CSys**) відповідно до поточного значення чи за модулем (опція **Absolute Value**). Значення будуть впорядковані за наростанням

(**Ascending**) або убунням (**Descending**). Опція „**Verify Renumber**” дозволяє переглянути список відповідності, а „**Constant Offset**” – змінити усі номери на величину, вказану як „**Starting ID**”.

3.5.9. Команди змін параметрів скінченно-елементної сітки тіла

Командою **Modify→Edit→Node...** можна змінити усі параметри обраних вузлів (почергово): координатну систему для виводу результатів, координати, колір зображення, рівень, заборонені ступені свободи тощо.

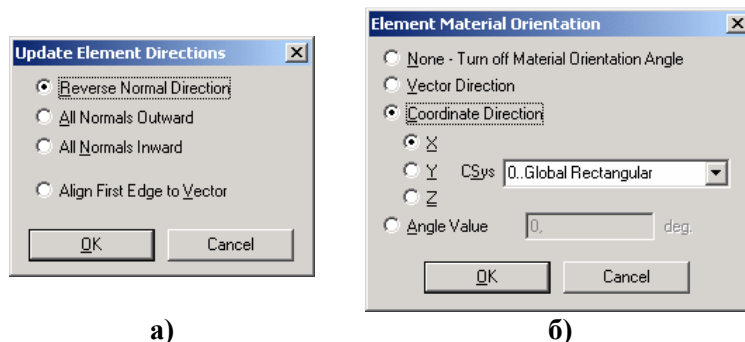
Командами **Modify→Update Other→ (Node Definition CSys..., Output CSys... та Perm Constraint...)** можна змінити для обраних вузлів, відповідно, координатні системи: вихідну та для виводу результатів, а також заборонені ступені свободи.

Командою **Modify→Edit→Element...** можна змінити деякі параметри *одного* обраного СЕ: кількість (обриси СЕ) та номери вузлів, що його створюють, рівень, „**Property**”.

Більш значну кількість параметрів для *декількох* обраних СЕ можна змінити одночасно за допомогою групи команд **Modify→Update Elements→**: тип СЕ (**Type...**); опис СЕ (**Formulation...**, для програм **FEMAP Structural, DYNA, ABAQUS**); „властивість” СЕ (**Property ID...**); матеріал СЕ (**Material ID...**); кут орієнтації осі пружної симетрії характеристик анізотропного матеріалу двовимірних та тривимірних СЕ (**Material Angle...**); орієнтацію (**Orientation...**), зміщення (**Offsets...**) або ступені свободи кінців (**Releases...**) перерізу одновимірних СЕ типів **BAR, BEAM** та **CURVED BEAM**; напрямок (**Reverse...**); порядок наближення у СЕ (**Order...**); перевірити проміжні вузли (**Midside Nodes...**); розділити чотирикутні СЕ на трикутні (**Split Quads...**); змінити товщину або зміщення двовимірних СЕ (**Adjust Plate...**).

Тут більшість параметрів та дій – знайомі. Наведемо додаткові відомості.

Напрямок (**Reverse...**) може змінюватися опціями (див. Рис.3.24-а):



а)

б)

Рис.3.24. Діалогові панелі зміни:

а) – напрямку СЕ; б) – орієнтації матеріалу у СЕ

для двовимірних СЕ. Усі зовнішні або внутрішні нормалі на сторонах обраних СЕ будуть погоджені;

- „**Align First Edge to Vector**”. Тільки для двовимірних СЕ. У всіх обраних СЕ порядок нумерації вузлів буде змінено так, щоб перше ребро СЕ (з вузлами позицій 1 та 2) було зорієнтовано у напрямку вказаного вектора.

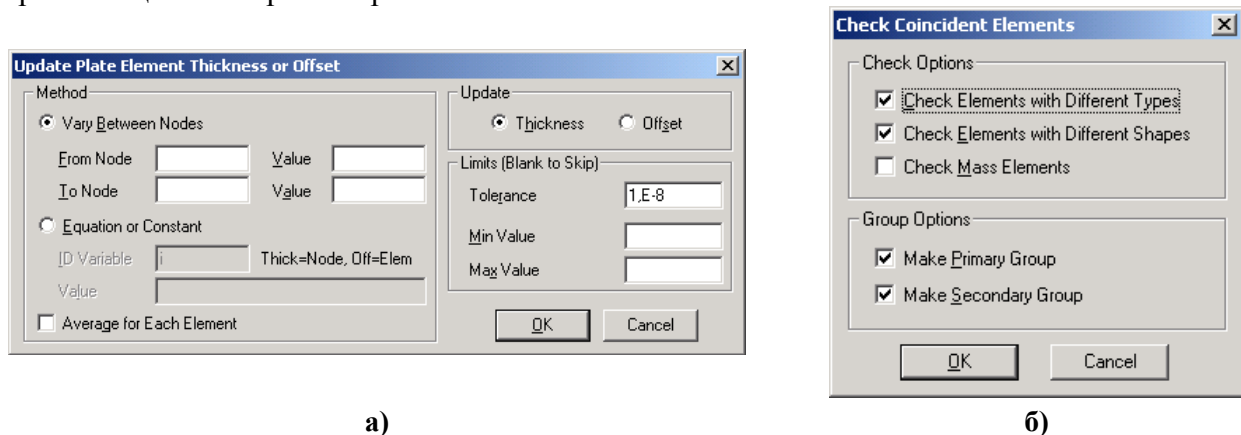
Кут орієнтації осі пружної симетрії характеристик анізотропного матеріалу двовимірних та тривимірних СЕ (**Material Angle...**) може змінюватися (див. Рис.3.24-б): вздовж осей СЕ (**None**), вказується вектором (**Vector Direction**), вздовж глобальних координат (**Coordinate Direction**) або кутом **THETA (Angle Value**, див. Додаток 3).

При зміні порядку наближення у СЕ (**Order...**) на другий (**Parabolic Element**) автоматично створюються нові вузли, а при зміні на першій (**Linear Element**) проміжні вузли видаляються тільки із СЕ. **Увага:** тому в обох випадках необхідно потім дати команду на видалення надлишкових вузлів (**Delete→Model→Nodes...**) та знаходження і з'єднання вузлів, що співпадають (**Tools→Check→Coincident Nodes...**).

- „**Reverse Normal Direction**”. Порядок нумерації вузлів у СЕ змінюється таким чином, що одновимірні СЕ міняють місцями кінцівки, а двовимірні та тривимірні СЕ перевертаються „догори дном” („inside-out”). **Увага:** якщо до СЕ була прикладена навантаження, його напрямок зміниться на протилежний;

- „**All Normals Outward**” або „**All Normals Inward**”. Тільки

За командою (**Midside Nodes...**) перевіряються та коректуються (при необхідності) положення (координати) проміжних вузлів. **Увага:** проміжні вузли, що лежали на *криволінійній* поверхні, займуть нове, дійсне проміжне (між кутковими вузлами) положення, тому точність апроксимації геометрії поверхні знизиться.



а)

б)

Рис.3.25. Вигляд діалогових панелей: а) – змінювання товщини або зміщення у двовимірних СЕ; б) – контролю СЕ, що співпадають

На діалоговій панелі (див. Рис.3.25-а), що викликається командою **Adjust Plate...**, вказується параметр СЕ, який змінюється: товщина (**Thickness**) або зміщення (**Offset**). За методом „**Vary Between Nodes**” вказані значення (**Value**) змінюються від вузла (**From Node**) до інших вузлів СЕ лінійно, пропорційно відстані між цим вузлом та вузлом у полі „**To Node**”; за методом „**Equations or Constant**” змінна „**i**” вказує на номер вузла або СЕ при змінюванні товщини або зміщення відповідно. Якщо встановлено опцію „**Average for Each Element**”, то товщина розраховується відносно координати центра СЕ та призначається всім вузлам СЕ однаковою, якщо ні – усі вузли можуть мати свої значення. У секції „**Limits (Blank to Skip)**” можна вказати точність обчислення (**Tolerance**), мінімальні та максимальні значення, що можуть піддаватися модифікації. При виконанні цієї команди будуть створюватися нові „**Property**”, з однаковими назвами але під різними номерами.

3.6. Контроль параметрів скінченно-елементної моделі тіла

Після створення більш-менш складної СЕС бажано провести контроль її параметрів. Якщо цього не зробити, можна зовсім не отримати результатів розрахунків (фатальні помилки) або отримати неякісні результати, наприклад, локальні концентрації напружень там, де їх не повинно бути. Це може бути наслідком наявності вузлів та СЕ, що співпадають, розірваної СЕС, майже вироджених СЕ, помилок при завданні характеристик матеріалів, властивостей СЕ тощо (помилки у початкових та граничних умовах теж можливі, але тут їх не розглядаємо). Отже, контроль параметрів створеної СЕС – дуже корисна процедура.

3.6.1. Контроль функцій, характеристик матеріалів та властивостей скінченних елементів

Функції, характеристики матеріалів та „властивості” (**Property**) СЕ можна переглянути у *списку*: за допомогою команди **List→Model→ (Function..., Material... або Property...)** обрати усі (**Select All**), отримати та переглянути список та вирішити, чи є у списку *зайві* набори (запам’ятати їх **ID**), чи вірні значення.

Якщо є зайві – їх бажано видалити: дати команду **Delete→Model→ (Function..., Material... або Property...)**, вказати **ID** набору, що буде видалятися, видалити.

Для виправлення помилок у значеннях є команда **Modify→Edit→ (Function..., Material... або Property...)**: вказати **ID** набору, що буде редагуватися, провести виправлення.

3.6.2. Контроль вузлів та скінченних елементів, що співпадають

Контроль вузлів, що співпадають, проводиться аналогічно описаному у Розділі 2.2.6.3 для точок.

Увага: доцільно спочатку переглянути список вузлів, що співпадають, лише потім приймати рішення про їх об'єднання.

СЕ, що співпадають, це СЕ, що мають однаковий перелік вузлів. Контроль таких СЕ має деякі особливості. Командою **Tools**→**Check**→**Coincident Elem...** (обрати усі СЕ), викликається діалогова панель (див. Рис.3.25-б), на якій є опції „**Check Elements with Different Types**”, „**Check Elements with Different Shapes**” та „**Check Mass Elements**” (перевіряти СЕ різних типів, різної форми та масові відповідно). Списки СЕ, що співпадають, можна просто переглянути або, встановивши опції „**Make Primary Group**” та „**Make Secondary Group**” (створити первинну та вторинну групи), внести у групи. Первинна група містить найменші номери СЕ, що співпадають, вторинна – останні. Цю вторинну групу СЕ можна видалити цілком командою **Delete**→**Group...** (вказати **ID** групи). Одиначні СЕ можна видаляти командою **Delete**→**Model**→**Element...**

3.6.3. Контроль розташування вузлів на заданій площині

Командою **Tools**→**Check**→**Planar...** спочатку викликається стандартна діалогова панель для вибору вузлів, потім з'являється панель „**Check Planarity of Nodes**” (див. Рис.3.26-а). На ній вказується максимально допустима відстань вузлів до площини (**Max Allowable Distance from Plane**). Якщо обрати опцію „**Move Nodes Closer than Allowable Distance onto Plane**”, то всі вузли, розташовані не далі вказаної відстані, будуть спроектовані на площину. Площина задається автоматично трьома першими обраними вузлами (не повинні лежати на лінії), або у стандартному діалозі, коли встановлено опцію „**Specify Plane Manually**”.

3.6.4. Контроль геометричних параметрів скінченних елементів

Командою **Tools**→**Check**→**Distortion...** (перекручування) спочатку викликається стандартна діалогова панель для вибору СЕ, потім з'являється панель „**Check Element Distortions**” (див. Рис.3.26-б). На ній можна призначити до перевірки геометричні параметри СЕ та встановити граничні значення:

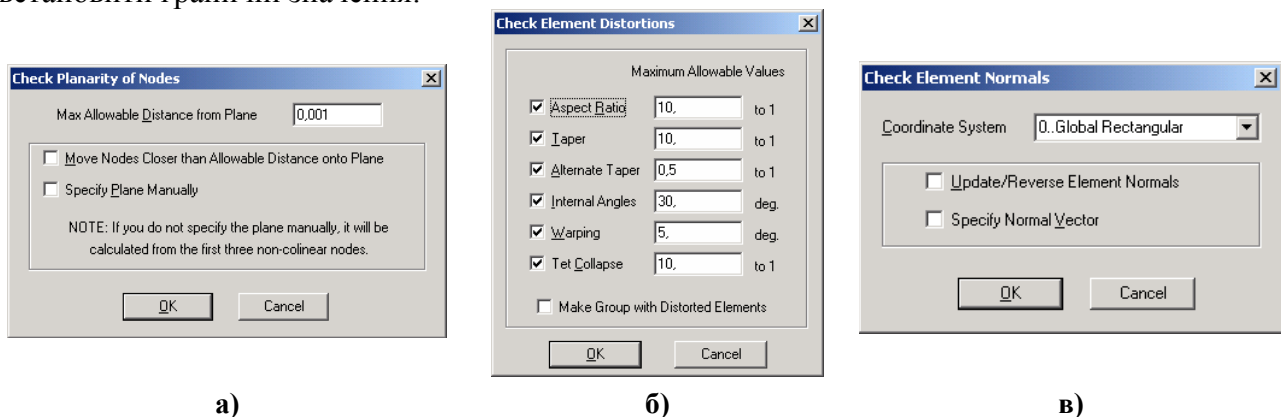


Рис.3.26. Вигляд діалогових панелей контролю: а) – площинності поверхні СЕ; б) – геометричних параметрів СЕ; в) – напрямків нормалей до поверхонь двовимірних СЕ

- „**Aspect Ratio**”: відношення найдовшого ребра СЕ до найкоротшого (значення 100:1 та більше викликає фатальну помилку при розв’язуванні задачі; значення 10:1 забезпечує задовільні, а 1:1 – найкращі результати);

- „**Taper**” (тільки для СЕ з чотирикутними гранями): відношення протилежних ребер (довшого до коротшого), так зване звужування;

- „**Alternate Taper**” = $\max\{(A_i - A_{cp}) / A_{cp}\}$, де A_i – площі 4-х трикутників (див. Рис.3.27-а), A_{cp} – середня площа цих трикутників (тільки для СЕ з чотирикутними гранями);

- „**Internal Angles**”: відхилення внутрішніх кутів від оптимальних (від 60 градусів для трикутних та від 90 градусів для чотирикутних граней СЕ);
- „**Warping**” (викривлення: максимальний кут між нормаллями до центрів трикутників на чотирикутних гранях СЕ (див. Рис.3.27-б);
- „**Tet Collapse**” (виродження тетраедра): найбільше відношення ребра до висоти тетраедра (СЕ), проведеної зі спільного для них кута (див. Рис.3.27-в).

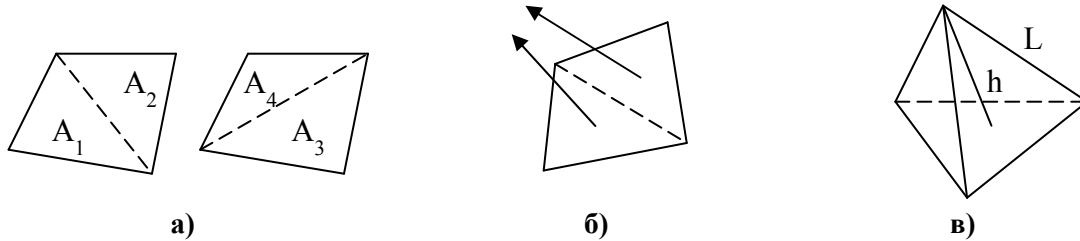


Рис.3.27. Контроль геометричних параметрів скінченних елементів: а) – „Alternate Taper”; б) – „Warping”; в) – „Tet Collapse”

Якщо встановити опцію „**Make Group with Distorted Elements**”, буде створена група із СЕ, параметри геометрії яких не задовольняють вказаним критеріям (для подальшого виправлення).

Звіт про виявлені недоречності з’явиться на полі текстових повідомлень, червоним кольором.

Командою **Tools**→**Check**→**Normals...** (нормалі) спочатку викликається стандартна діалогова панель для вибору СЕ (тільки двовимірні), потім з’являється панель „**Check Element Normals**” (див. Рис.3.26-в). Опція „**Update/Reverse Element Normals**” вказує на необхідність змінити напрямлення нормалі до грані СЕ у протилежну сторону. Бажаний напрямок нормалі є тим, що має обраний СЕ з найменшим **ID**, або вказується додатково вектором після включення опції „**Specify Normal Vector**”. Звіт про проведені зміни з’явиться на полі текстових повідомлень.

Увага: для двовимірних та тривимірних задач (тіл) перевагу треба віддавати СЕ другого порядку наближення з чотирикутними гранями, з приблизно однаковими розмірами ребер у СЕ, з кутами, наближеними до оптимальних. Другий порядок наближення приводить до збільшення часу для розв’язування системи алгебраїчних рівнянь, що породжуються методом скінченних елементів, але підвищує точність отриманих розв’язків.