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 CE, геометричні характеристики, порядок апроксимації у CE, 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 ВСТУПу, FEMAP не має конкретної системи вимірів геометричних і фізичних величин. Тому при створенні моделі користувачу необхідно обрати конкретну систему вимірів, та суворо дотримуватися нею. У FEMAP є діалог (викликається командою **Tools→Convert Units...**) 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 коефіцієнта (для довжини, сили, часу, маси, температури, 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**).

Для введення у модель нового матеріалу командою "Model→Material..." викликається діалогова панель "Define Material – Isotropic" (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:

Unit Co	nve	rsion											×
- Base Fa	actor	s Multiply	Ado	ł		Multiply	ļ	٨dd			Multiply	, Add	
Length	1,		0,	٦.	<u>F</u> orce	1,	0,		<u>T</u> ime	1,		0,	1
<u>M</u> ass	1,		0,		Temp	1,	0,		<u>E</u> nergy	1,		0,	Ī
		Multiply		A	dd				Multiply		Add		
Length		1,		0,		D <u>a</u> mpingRot		1,			0,		
Area		1,		0,		Mass		1,			0,	<u>C</u> alculate	
Inertia		1,		0,		Mass-Len		1,			0,	<u>R</u> eset	ī.
Force		1,		0,		Mass/Len		1,			0,		2
Moment		1,		0,		Mass/Area		1,			0,	Invert	
Spring		1,		0,		Density		1,			0,	Load	٦
SpringRo	ot	1,		0,		Mass Inertia		1,			0,	C aug	ร่
Pressure		1,		0,		Temperature		1,			0,	<u></u> ave	
Accelera	tion	1,		0,		Thermal Expansion	n	1,			0,		
AccelRo	t	1,		0,		Therm Conductivit	у	1,			0,		
Velocity		1,		0,		Specific Heat		1,			0,	<u>0</u> K	
VelocityF	lot	1,		0,		Heat Gen Rate		1,			0,	Cancel	5
Damping		1,		0,		Energy/Mass		1,			0,		

Рис.3.1. Діалогова панель перетворення розмірностей

• 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 додержуватися обраної системи (див. табл.3.1);

- 53 -

UGS.F93

Розділ 3. Створення скінченно-елементної моделі тіла

Define Material - ISOTROPIC 🛛 🔀	
ID I Iitle Color 55 Palette Layer 1 Type	
General Function References Nonlinear Creep Electrical/Optical Phase	
Stiffness	Material Type 🛛 🔀
Youngs Modulus, <u>E</u> O, TensionO,	
Shear Modulus, <u>G</u> 0, Compression 0,	
Poisson's Ratio, n <u>u</u> 0, Shear 0,	O Orthotropic (2D)
	Orthotropic (3D)
Expansion Coeff, a 0, Conductivity, k 0, Specific Heat, Cp 0, Heat Generation Factor 0, Reference Temp 0,	 Anisotropic (2D) Anisotropic (3D) Hyperelastic Eluid Other Types
fy Load Save Copy OK Cancel	
a)	б)

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

• при наявності впливу температури на властивості матеріалу – перейти на вкладку "Function References", у діалогових вікнах тих параметрів, що змінюються, обрати необхідну функцію типу 2..vs.Temperature. Функції можна створити не виходячи з діалогової панелі, якщо ініціювати кнопку 🜆 на ній.

№ 3/п	Назва (на панелі)	Зміст	Одиниця виміру, система SI	Характерні зна- чення*				
	Секція Stiffness (пружність)							
1	Young Modulus, E	Модуль Юнга	\mathbf{M}	$(0.7-2.5) \cdot 10^5$				
2	Shear Modulus, G	Модуль зсуву	MPa = N / mm	G = E / [2(1 + nu)]				
3	Poisson's Ratio, nu	Коефіцієнт Пуассона	—	0.23-0.42				
	Секція Thermal (men	лові)						
4	Expansion Coeff, a	Коефіцієнт лінійного темпе- ратурного подовження	$l/{}^{o}K$	$(0.5 - 2.5) \cdot 10^{-5}$				
5	Conductivity, k	Коефіцієнт теплопровідності	$W/(m \cdot {}^{o}K)$	85–400				
6	Specific Heat, C_P	Питома теплоємність	$J/(kg \cdot {}^oK)$	$(0.38-0.88) \cdot 10^3$				
7	Heat generation factor	Коефіцієнт генерації тепла	—	Ι				
	Секція Limit Stress (г	раничні напруження, межі плин	ності)					
8	Tension	При розтязі	MPa	60-1800				
9	Compression	При стиску	MPa	120-1800				
10	Shear	При зсуві	MPa	40-700				
	Інші							
11	Mass Density, $ ho$	Густина матеріалу	kg/m^3	$(2.7-9) \cdot 10^3$				
12	Damping, 2C/C _o	Коефіцієнт конструкційного демпфірування G	_	$(1-10) \cdot 10^{-3}$				
13	Reference Temp	Температура випробування	^{o}K ($^{o}C + 273.15$)	<293, 293, >293				
	* – залізо, титан, алюміній, мідь та сплави на їх основі, сталі, чавуни							

Таблиця 3.1. Основні характеристики ізотропного матеріалу

• щоб для задачі про напружено-деформований стан врахувати пружну нелінійність або пластичність – перейти на вкладку "Nonlinear" (див. рис.3.3-а), обрати та задати властивості нелінійно-пружного або пластичного матеріалу. Кнопка "Extended Material Model..." © Рудаков К.М. - 54 -

призначена для врахування впливу температури або швидкості деформування на межу плинності (підключенням функції типу 2..vs. Temperature або 9..vs. Strain Rate);

Define Material - ISOTROPIC	Define Material - ISOTROPIC
ID 1itleColor 55 PaletteLayer 1Type	ID 1
General Function References Nonlinear Creep Electrical/Optical Phase Nonlinearity Type Nonlinear Elastic None © Elasto-Plastic (Bi-Linear)	General Function References Nonlinear Creep Electrical/Optical Phase Creep Formulation None Empirical Model Iabular Model
Initial Yield Stress 0. Plastic Friction Angle Plasticky Modulus, H 0. Compute From Langert Modulus E2 Egtended Material Model	Creep Options Tabular Creep Law Threshold Strain 0, Beference Temp 0, Tegp Dependent Rate 0,
Hardening <u>B</u> ule O.Isotropic Function Dependence O.None	$ \begin{array}{c c} \mbox{Empirical Creep Law and Coefficients} \\ \hline & a^r(s^{\rm trb})r(t^{\rm trd}) & a & 0 & e & 0 \\ \hline & \bullet A^r(t-E^{\rm tr}(Rt)) + Kt & b & 0 & f & 0 \\ A = & \bullet a^*s^{\rm trb} & \bullet a^*E^{\rm trb}(b^*s) & f & 0 & f & 0 \\ R = & \bullet c^*E^{\rm tre}(d^*s) & c^*s^{\rm trd} & c & 0 & g & 0 \\ K = & \bullet e^r(sinh(f^*s)^{\rm trg}) & e^*E^{\rm tre}(f^*s) & d & 0 & 0 \\ \end{array} $
foy Load Save Copy QK Cancel	fay Load Save Copy ΩK Cancel
Define Material - ISOTROPIC	Define Material - ISOTROPIC
ID 1 Iile Color 55 Palette Layer 1 Type	D 1 Itle Color 55 Palette Layer 1 Type General Function References Nonlinear Creep Electrical/Optical Phase
Liechtrall Function Heterences Nonlinear Treep Liechtral/Uptical Phase InfraRed Properties InfraRed Properties Emissivity 0, 0.None 0, Specular Reflectivity 0, 0.None Image: Comparison of the second seco	Phase Change Properties Reference Enthalpy 0, Lower Imperature for phase change 0, Temperature Bange 0, Latent Heat of Fusion per unit mass 0, Specific Heat above Phase Change 0,

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

• щоб для задачі про напружено-деформований стан врахувати повзучість матеріалу – перейти на вкладку "Сгеер" (див. рис.3.3-б), обрати та задати властивості матеріалу при повзучості:

• на вкладці "Electrical/Optical" (див. рис.3.3-в) – ввести електрооптичні характеристики ізотропних та ортотропних матеріалів (для моделювання теплопередачі в програмах, подібних до **ТМG**).

• на вкладці "Phase" (див. рис.3.3-г) – ввести характеристики фазових переходів (звичайно – для задач теплопередачі і термічного аналізу в останніх версіях Nastran та ABAOUS);

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

Діаграма деформування для нелінійно-пружного матеріалу (Nonlinear Elastic) задається функцією типу 4..vs. Stress, де параметр X – це напруження, а Y – деформації (вибираєть-

ся зі списку "Function Dependence", див. рис.3.3-а) або 13.. Stress vs. Strain (X та Y деформації та напруження). 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), після введення значення E_{τ} за допомогою кнопки "Compute From Tangent Modulus, Et...". Діаграма деформування для пружно-пластичного матеріалу загального типу (Plastic) задається функцією аналогічно нелінійно-пружному матеріалу (обирається зі списку "Function Dependence"). Але розвантаження пружно-пластичного матеріалу моделюється лінійно-пружним (використовується модуль Юнга Е). Увага: ця функція повинна мати точку (0, 0); для матеріалу, що має різний опір розтяганню та стискуванню, – розташовуватися в 1-му й 3-му квадранті. Перша її ділянка повинна мати тангенс кута нахилу, що дорівнює модулю Юнга, тобто $\sigma_2 / \varepsilon_2 = E$, причому $\sigma_2 = \sigma_s$, де σ_s – межа плинності (див. Розділ Д5.1.1.4 Додатка).

Для критеріїв плинності (Yield Criterion) 2...Mohr-Coulomb та 3..Drucker-Prager (для матеріалів типу грунтів) потрібно ввести значення "2*Cohesion" (подвоєне значення коефіцієнта зчеплення) та "Friction Angle" (кут внутрішнього тертя).

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

формулою $\varepsilon^{c}(\sigma,t) = A(\sigma) \cdot \{1 - \exp[-R(\sigma) \cdot t]\} + K(\sigma) \cdot t$ • емпіричною (Empirical **Model**), de $A(\sigma) = a \cdot \sigma^b$ also $A(\sigma) = a \cdot \exp(b \cdot \sigma)$; $R(\sigma) = c \cdot \exp(d \cdot \sigma)$ also $R(\sigma) = c \cdot \sigma^d$; $K(\sigma) = e \cdot [sh(f \cdot \sigma)]^g$ 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 позначення);

• табличною моделлю (Tabular Model), де у вікнах секції "Tabular Creep Law" для коефіцієнтів Кр, Ср (стадія первинної повзучості) та Сs (стадія вторинної повзучості) необхідно вказати функції типу 4..vs.Stress.

Для усіх трьох варіантів ще вводяться значення "Threshold Strain" (граничне напруження), "Reference Temp" (температура описання) та "Temp Dependent Rate" (швидкість, що залежна від температури).

У ортотропних матеріалах для тривимірних скінченних елементів (3D Orthotropic) характерна наявність трьох площин та трьох напрямків пружної симетрії, причому $(nu)_{ii}/E_i = (nu)_{ii}/E_i$, де i, j = 1,2,3. Тому характеристики матеріалу E, G, nu, a мають по три значення, а k навіть шість (симетрична матриця 3x3). 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 а теж дорівнює двом.

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

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 (після скасування попередніх дій командою Undo), 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).

- 56 - © Рудаков К.М.

Доцільно спочатку задати назву цієї "властивості" (**Title**), при необхідності змінити її **ID**, обрати зі списку матеріал для CE або створити новий за допомогою кнопки 🛃.

	Define Property - BEAM Element Type
Define Property - PLATE Element Type	ID 1 BEAM_01 daterial 1Steel 45 d
ID 1 Ide Ide Ide	Color 110 Palette Layer 1 Elem/Property Type
Color 110 Palette Layer 1 Elem/Property Type	Property Values Stress Recovery (2 to 4 Blank=Square)
Property Values Additional Options	Area, <u>A</u> 27,52 0. End B Y Z
Thicknesses, Tavg or T1 0, Bend Stiffness, 12I/T**3 0,	Moment of Igertia, I1 or Izz 262,0876 0. 2 8,771903 -3,267044 3.267044
blank or T2 0, TShear/Mem Thickness.ts/t 0,	l2 or lyy 1561,339 0. 3 -0.428097 16,73296
blank or T3_0, Bending 0Plate Material	Torsional Constant, J 5,91871 0. 4 -6,428097 16,73296
blank or T4_0, Iransverse Shear UPlate Material	Y Shear Area 8,576252 0, End B 1 0, 0,
Nonstructural mass/grea 0, NEWsetran Tension Only	≥ shear kies (15,70435 0, 2 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
	Warping Constant 0, 0, 4 0, 0,
Too Fiber () Load Save OK	Perimeter 70,4 0.
Bottom Fiber 0, Copy Cancel	Z Negtral Axis Offset 5,616677 5,616677 Shape End B
	Loag Save Copy
a)	ნ)

Рис.3.4. Діалогові панелі "Define Property" для СЕ типу: а) – PLATE; б) – BEAM

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 з назвою, яка відповідає обраному типу СЕ, вказати додаткові властивості СЕ (не для всіх типів СЕ), якщо модель готується для програм Nastran, FEMAP Structural, DYNA, ABAQUS.



Рис.3.5. Діалогові панелі призначення:

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

Після команди "**OK**" діалогова панель "**Define Property**" прийме вигляд, відповідний обраному типу СЕ. Якщо це потрібно для даного типу СЕ, на ній з'являться декілька діалогових вікон для введення загальних значень для СЕ, пов'язаних з геометричними або фізичними характеристиками (див. рис.3.4).

У таблицю 3.2. за абеткою зведені параметри СЕ (можливо, не всі), значення яких потрібно вводити в діалогові вікна власноручно.

Для описання складних перерізів одновимірних СЕ 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 СЕ типу **BEAM** можна застосувати модель тонкостінного стрижня, якщо встановити опції "Compute Shear Center Offset" (обчислити зміщення від центра вигину) та "Compute Warping Constant" (обчислити секторальний момент інерції). Цей тип СЕ ще може враховувати повздовжню зміну розмірів перерізу за лінійним законом. Для цього потрібно спочатку для першого кінця СЕ (End A) призначити форму та розміри перерізу (вони помістяться у діалогові вікна для початку СЕ, потім (див. рис.3.4-б) встановити опцію "Tapered Beam" (балка, що звужується), застосувати кнопку "Shape End B…" і зробити аналогічні призначення для другого кінця СЕ (End B).

Параметр	Пояснення	Типи СЕ	
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	
Effortivonoss Fostor F	коефіцієнт приведеної площі перерізу	Shoor Popol	
Effectiveness Factor, F	додаткових ребер жорсткості ³	Shear Panel	
Failure Theory	теорія (критерій) руйнування	Laminate	
Fiber (Ton Bottom)	шар (вершини, основи): відстань для	Banding only Plata Plain Strain	
Tiber (Top, Bottom)	виводу напружень	Bending only, Plate, Plain Strain	
Friction Coefficient	коефіцієнти тертя вздовж осей У та Z	Gap	
Н	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	коефіцієнт жорсткості для відносного	Slide Line	
Stiffness	зміщення	Side Line	
Nonstructural mass/area,	неконструкційна маса на одиницю	Майже усі двовимірні	
N.S.Mass/Area	площі		
Nonstructural mass/length	неконструкційна маса на одиницю	Майже усі одновимірні	
Outer Diameter Do	довжини горијнији тјематр	Tube Curved Tube	
Denetration		Slide I ine	
Dorimotor	пропикнстня	Dod Bar Boom Curved Boom	
	периметр	Kou, Dar, Deam, Curveu Beam	

	2.2			•	•
a o nun g	47	Основні	папаметни	скінченних	enementir
гаолици	0.1	. Othobin	mapamerph	ский тенника	catementin

© Рудаков К.М.

попереднє навантаження	Gap
радіус	Bar, Beam, Curved Beam
початкова температура	Laminate
CE	
координатна система для СЕ	Side Line
статичний коефіцієнт тертя	Slide Line
жорсткість ⁴	Spring, DOF Spring
коефіцієнт встановлення натягу, що допускається ⁵	Slide Line
жорсткість при розтяганні	Gap
товщина (вершини, основи)	Bar, Beam, Curved Beam
TODUUUUA	Bar, Beam, Curved Beam,
товщина	Shear, Axisymmetric Shell
саралис знанания торшини	Membrane, Bending only,
середне значення товщини	Plain Strain
полярний момент інерції перерізу	Rod
поперечний зсув	Plate
поперечна жорсткість при закритому зазорі	Gap
згинальна жорсткість, що приєднана ⁶	Plate
ширина	Bar, Beam, Curved Beam, Gap
ширина основної та підлеглої повер- хонь, які контактують	Slide Line
ширина основи	Bar, Beam, Curved Beam
	попереднє навантаження радіус початкова температура координатна система для CE статичний коефіцієнт тертя жорсткість ⁴ коефіцієнт встановлення натягу, що допускається ⁵ жорсткість при розтяганні товщина (вершини, основи) товщина середнє значення товщини полярний момент інерції перерізу поперечна жорсткість при закритому зазорі згинальна жорсткість, що приєднана ⁶ ширина ширина основної та підлеглої повер- хонь, які контактують

¹ $BS = 12I/T^3$, де T – товщина СЕ; $I = I_P/t_P$; 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 $F \le 1.01$ площа перерізів дорівнює 0.5Ftb, а при F > 1.01 вона дорівнює $0.5Ft^2$, де t -товщина СЕ, b – середня величина ширини СЕ;

4 $C_N = \Delta x / N$ або $C_T = \Delta \varphi / T$, де Δx , $\Delta \varphi$ – зміни довжини та кута кручення пружини; N, T – повздовжня сила та момент кручення відповідно;

⁵ коефіцієнт встановлення натягу, що допускається (0 ≤ k_f ≤ 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 – середня 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.

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

У файлі rebeam.doc (у папці ...\Femap93) наведені дані про додаткові бібліотеки (файли reishape.esp, reangle.esp, retee.esp, rechan.esp, retube.esp та repipe.esp) одновимірних СЕ типу BEAM, TUBE тощо з конкретними варіантами перерізів, що виробляє промисловість США, наведеними в 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 "Choose Library..." – стандартний діалог відкриття файлу. Увага: у тексті є застереження, що це тільки довідкові дані, що при їх застосуванні потрібно уважно порівнювати ці характеристики з реальними, оскільки можливі зміни у стандарті.

Для СЕ типу LAMINATE можна створити та застосовувати структуру "Lavup" (сандвіч, листковий пірог) – набір з шарів матеріалів, які мають або різні характеристики, або мають різну орієнтацією осей анізотропії матеріалу відносно СЕ. Для цього командою Model→Layup... або кнопкою 🗐 викликається діалогова панель "Layup Editor" (див. рис.3.6-а). На ній у полі "Material" обирається (або за допомогою кнопки 🗟 створюється) матеріал шару, у полях "Thickness" та "Angle" вказуються відповідно товщина шару та кут *θ* орієнтації осі анізотропії матеріалу відносно СЕ (див. рис.Д3.2-а Додатка 3). Кнопкою "New Ply" ці дані переносяться до таблиці шарів (у обраний у таблиці шар). У полі "Global Ply ID (optional)" можна обрати або за допомогою кнопки 🖻 та діалогової панелі "Global Ply Definition" (див. рис.3.6-б) створити глобальний шар, який буде доступний для всіх сандвічів моделі. Увага: цей глобальний шар можна використовувати у таблиці лише один раз (якщо їх введено декілька, то буде враховуватися лише один на тій позиції, на яку був введений останнім). Для змін значень у таблиці потрібно змінити значення у полі (над таблицею) та відповідною кнопкою з початком назви "Update ..." – ввести ці значення в таблицю. Кнопка "Duplicate" дублює один або декілька обраних рядків у таблиці. Кнопка "Rotate" дозволяє для всіх обраних у таблиці шарів (за допомогою клавіші "Ctrl") одночасно змінити значення кута (шляхом алгебраїчного додавання значення на панелі, що з'явиться). Кнопки "Move Up", "Move Down" та "Reverse" дозволяють змінювати порядок розташування шарів у таблиці. Кнопка "Symmetry" створює у таблиці симетричну копію обраних шарів. Є ще кнопки "Copy", "Paste", "Load…", "Save…", "Delete", "OK" та "Cancel", а також поля "ID" та "Title", які не потребують пояснень.

Layup Editor				
ID 1 Title Layup_01				Glabal Ply Definition
<u>G</u> lobal Ply ID (optional) <u>M</u> aterial		<u> </u>	Angle	
1Global Ply 01 🛛 🚽 🖿 2AISI 4130 Str	eel	🖌 😴 4,	0,	
Top of Layup		Nev	v Ply	Material D.None
Ply ID ∇ Global Ply Material	Thickness Angle	Update Global Plu	Undate Material	Thickness
3 I. IS-SPH Stanless H1025	4 0	opdate chobarr ly	Obque materia	
1 115-5PH Stainless H1025	0.15 45.	Update Thic <u>k</u> ness	Update Angle	
		Duglicate	<u>Symmetric</u>	
		D <u>e</u> lete	<u>R</u> everse	
		Move Up	Move <u>D</u> own	
		Rotate	Compute	ОК
		Сору	Paste	Cancel
		Load	Save	
Bottom of Layup		<u>o</u> k	Cancel	
	a)			ნ)

Рис.3.6. Діалогові панелі для створення: а) – сандвіча; б) – глобального шару

Якщо ініціювати кнопку "Compute", то на інформаційну панель "Messages" будуть виведені розрахункові значення про *усереднені* характеристики сандвіча: загальна жорсткість "Total Thickness"; ортотропні властивості у площині "In-Plane Properties (2-D orthotropic)", а саме модулі пружності (Ex, Ey, Gxy), коефіцієнти Пуассона (NUxy, NUyx), коефіцієнти теплового розширення (Alphax, Alphay, Alphaxy), модулі згину (Exb, Eyb. Gxyb), коефіцієнти Пуассона при згині (NUxyb, NUyxb), коефіцієнти теплового розширення при згині (Alphaxb, Alphayb, Alphaxyb). Крім того, виводяться шість матриць: A (просторової жорсткості), B (жорсткості зв'язків), D (згінної жорсткості) та обернені ці матриці A-Inv, B-Inv, D-Inv (для досвідчених користувачів).

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

Це основний та швидкий метод створення скінченно-елементної сітки (CEC). Усі команди доступні через меню "**Mesh**" та мнемонічне меню "**Mesh**" (див. рис.1.5).

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 скінченного елемента (CE);
- 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 CE, "Min Elem" – мінімальна кількість CE на будь-якому ребрі. Після створення CEC усі CE 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 CEC – 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):

• Size At Point... (розмір CE в околі точки *на границі поверхні*): обираються точки, призначається розмір CE. Для скасування призначень теж обираються точки, вказується *ну-льовий* розмір;

			Automatic Mesh Sizing	×
Mesh Size Along Curves			CInitial Sizing	Surface Interior Mesh Growth
Mesh Size Number of Elements	Node Spacing C Egual • Parametric • Biased C Length • Geometric Bias	<u>H</u> eset	Element Size 5,833333	Growth Factor Growth Factor Growth Factor Growthere-Based Mesh Refinement Refinement Ratio O.1
✓ Element Size ✓ Min Elem on Lines ✓ Min Elem on Closed Edges ✓ Min Elem on Other Edges	Bias Eactor 1.8 Small Elements at Start Small Elements at End Small Elements at Center Small Elements at Both Ends	©K Cancel	✓ Max Angle _olerance 25, ✓ Max Elem on Small Eeature 6 Max Sige of Small Feature 5,833 ↓ Yertex Aspect Ratio 3, ↓ Length Based Sizing ✓ Mapped Meshing Refinement	Refine Surface Mesh Quad Mesh Layer Options Layers 0 <u>QK</u>
	a)			б)

Рис.3.7. Діалогові панелі розмітки СЕ: а) – на кривих; б) – на поверхнях

• Size Along Curve... (розмір CE на лінії): обираються лінії, після чого з'являється відповідна діалогова панель (див. рис.3.7-а). Звичайно вказується кількість CE (Number of Element) на лінії; принцип призначення кроків точок розмітки: рівномірний (Equal), лінійний (Biased) або логарифмічний (Geometric Bias); тип координати, яка буде використовуватися вздовж лінії (це важливо для сплайнової кривої): параметрична (Parametric) або довжина (Length); коефіцієнт збільшення кроку (Bias Factor); де розташовувати найменший CE (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 CE приблизно однакового розміру, доцільно задавати не кількість CE, а середнє значення розміру CE (Element Size), яке застосовується для визначення кількості CE на кожній кривій окремо. Тоді додатково ще можна вказати мінімальні кількості CE (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;

• Size on Surface... (розмір CE на поверхні): обираються поверхні, після чого з'являється відповідна діалогова панель "Automatic Mesh Sizing" (див. рис.3.7-б). На ній потрібно вказати максимальний розмір CE (Element Size); мінімальну кількість елементів на ребрі (Min Elements on Edge); максимальний кут, що допускається (Max Angle Tolerance, див. рис.3.8); 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.3.8), що дозволяє побудувати якісну сітку на криволінійних границях; а опція "Refine Surface Mesh" – що після цього СЕС необхідно ще раз оптимізувати;



Рис.3.8. До завдання значення "Max Angle Tolerance"

• Size on Solid... (розмір СЕ для "твердого" тіла). Але відповідна процедура викликається й з панелі AutoMesh Solids... (кнопкою "Update Mesh Sizing"), тому її розглянемо у Розділі 3.3.2.6;

• Interactive... (модифікацією вже заданої на ребрах розмітки): 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 лінії або просто обрати лінію 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:

• Custom Size Along Curve... (групами на лінії): обирається лінія, після чого з'являється відповідна діалогова панель (див. рис.3.9-а) для часткової розмітки лінії. Панель має вже знайомі елементи у секціях "Mesh Point Data" та "Spacing", а також деякі нові. У вікні "Mesh Definition" поміщається список груп, заголовки яких створюються автоматично та вміщують інформацію про значення локальної координати початку групи розмітки (At), кількість CE (Elem) та коефіцієнта 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 лінії, причому на основі введених груп. Це команди:

- Equal (рівними відрізками): з'являється діалог для введення кількості груп (від 2 до 160), кожна з яких буде мати один СЕ;
- Fill (заповнення): усі групи будуть розмічені на відрізки (СЕ) вказаного розміру;
- Expand (розділення): всі групи діляться на групи з одним СЕ, тобто кількість груп буде дорівнювати кількості СЕ;
- Match (відповідності): обирається інша лінія, з якої розмітка переноситься на активну, модифікуючи введені групи;
- Match Mesh (відповідності до сітки): обирається вже існуючі вузли на будь-якій лінії, розмітка розташування цих вузлів переноситься на активну, модифікуючи введені групи;

• **Mapped Divisions on Surface...** (ділення параметричним чином на ребрах поверхні (з трьома або чотирма ребрами) "твердого" тіла): обирається поверхня (не конструкційна, див. Розділ 2.2.4), на діалоговій панелі "**Mesh Size on Surface**" (див. рис.3.9-б) вказується кіль-

- 62 -

кість CE за напрямками двох параметрів: s (напрямок вказано стрілкою) та t, а також значення коефіцієнтів *збільшення* кроку від *початку* координат (**Bias**). Увага: для поверхні з трьома ребрами локальні координати на них s, t та s, тобто перше та третє ребра будуть розмічені однаково;

			Mesh Size on Surface
Custom Mesh Spacing Along Curve	;		s t
Mesh Definition 1: At 0.446 <u>1 Elem, 1. Bias</u> 2: At 1. 1 Elem, 1. Bias	Mesh Point Data Location 0.67 Num Elements 8	Spacing Parametric Length	Bias 12 Bias 1,5 2, Reset DK Cancel
	 ○ Egual ○ Biased ○ Geometric Bias Bias Factor 3,6 	Locate Move Add / Edit	6) Custom Mesh Mesh Locations OUse Existing Points
Equal Fill Expand	Small Elements at Start Small Elements at End Small Elements at Center Small Elements at Both Ends	Delete <u> <u> </u> </u>	Use Existing <u>N</u> odes <u>C</u> reate Points <u>Remove All Points</u>
			<u>D</u> K Cancel

а) в) Рис.3.9. Діалогові панелі розмітки СЕ: а) – на кривих; б) – на поверхнях; в) – з урахуванням точок та вузлів

• Mesh Point on Surface... (з урахуванням точок на поверхні): 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.3.9-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).

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):

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

• Attributes Along Curve... (вздовж кривих для одновимірних CE): спочатку обираються криві, потім на діалоговій панелі "Curve Mesh Attributes", що з'являється (див. рис.3.10-а), обирається "Property" або створюється нова "властивість" (кнопка); у секції "Orient Using" обирається спосіб, за яким буде вказуватися орієнтація осі Y перерізу одновимірного CE ("Vector" – вектором або "Location" – точкою); у секції "Offset" – спосіб завдання відступу (зміщення) осі CE 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 (див. рис.3.10-б): TX, TY, TZ (встановлюються розриви), RX, RY та/або RZ (встановлюються шарніри). Опцією "Reverse Element Direction" міняється напрямок внутрішньої координатної системи у CE;

• Attributes On Surface... (на поверхні для двовимірних CE): спочатку обирається поверхня, потім на діалоговій панелі "Surface Mesh Attributes", що з'являється (див. рис.3.10в), обирається "Property" або створюється нова "властивість" (кнопка); у вікні "Offset" задається зміщення CE відносно поверхні (при необхідності); • Attributes On Volume... (для об'ємів) або Attributes On Solid... (для "твердих" тіл): обираються об'єкти, для них обираються зі списку заздалегідь створені "Property".

		Define Element Releases
Curve Mesh Attributes Property 2.Beam_01	× •	End A IX TY TZ RX RY RZ End B TX TY TZ RX RY RZ QK Cancel
Urient Using Ultsets O Vector O Vector Location Cocation Releases Radial	End A Offset End B = End A End B Offset No Offsets	6) Surface Mesh Attributes Property 2Plate_02
Reverse Element Direction	<u>OK</u> Cancel	✓ Offset 0,3 New Prop □K
	a)	c)

Рис.3.10. Діалогові панелі призначення геометричним об'єктам атрибутів: а), б) – для кривих; в) – для поверхонь

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: обирається поверхня, потім на діалоговій панелі "**Surface Mesh Approach**" (див. рис.3.11-а) призначається один із варіантів:

Surface Mesh Approach		Feature Suppression
Mesher Not Specified Free - Parametric Free - Planar Projection Fast Tri - Parametric Fast Tri - Planar Projection	Mesh Control Point 1 Point 2 Point 3 Point 4	 ✓ Feature Selection ✓ Automatic ✓ Smaller Than Ø.0264395 ✓ Face Area Less Than Ø.99045E-4 Ø.8estore ✓ Edges Shorter Than Ø.00264395 ✓ Surfaces
 Mapped - Four Corner Mapped - Three Corner Mapped - Three Corner Fan Matched - Link to Surface 	<u>D</u> K Cancel	Set Color To ✓ Curves 8254 ✓ Surfaces 8254 Palette <u>D</u> K Cancel
:	a)	б)

Рис.3.11. Діалогові панелі: а) – впорядкування СЕС на поверхні; б) – виключення особливостей СЕС

- "Not Specified" (немає впорядкування) використовується за замовчанням;
- "Free Parametric" параметричне впорядкування;

• "Free – Planar Projection" – вільного типу, але на основі проекції 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 проекції 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 кута 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.

- 64 -

3.3.1.4. Виключення несуттєвих особливостей у "твердих" тілах

Команда Mesh→Mesh Control→Feature Suppression... призначена для знаходження несуттєвих особливостей у "твердих" тілах, для яких СЕС створюватися не буде. Вона викликає однойменну діалогову панель (див. рис.3.11-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 на панелі "Messages" (виділяється червоним кольором). Але досить часто "у спадщину" залишається поверхнева СЕС з елементів типу PLOT ONLY, яка на екрані виглядає як потрібна сітка. Тому доцільно переглянути властивості отриманої СЕС, наприклад, за допомогою команди "List→Model→Element…" або з використанням панелі "Entity Info" та мнемонічного меню "Select" (див. Розділ 1.3).

Доволі часто виникає необхідність повністю або частково видалити скінченноелементну сітку. Якщо це не можливо зробити командою скасування останньої дії (Undo), то застосовуються інструменти меню "Delete". Спочатку обираються всі або частина CE (команда Delete->Model->Element..., кнопка "Select All" або вказуються CE, які потрібно видалити, двічі – команда "OK"), потім видаляються всі вузли (команда Delete->Model-> Node..., кнопка "Select All", підтвердити видалення). Після оновлення зображення екрана (Ctrl+D) або перегенерації моделі (Ctrl+G) тіло вже не має зайвих а ні CE, 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.3.12-а), яка викликається кнопкою "**Node Param…**" діалогових панелей створення СЕС (див. рис.3.12-б, рис.3.13-а, рис.3.15-а,в) можна:

Node Parameters	Geometry Mesh Options
Output Coordinate System (D.Basic Rectangular v Increment 1 Superelement ID (0=Residual) (0	Node and Element Options Node JD 1 CSys 0.Basic Rectangular Merge Nodes Noge Param Elem ID 1 Property Image Rectangular Image Rectangular
Loor 46 <u>Falette</u> Layer 1 Type 0Node V Permanent Constraints TX TY TZ RX RY RZ	Generate Element Shape Nodes Tri Elements and Nodes Quad Brick Alternate Tri
a)	б)



• 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 системі (Output Coordinate System), яка є обраною. Увага: тримірні 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 Nastran при розв'язуванні крайової задачі; • змінити крок нумерації вузлів (Increment), колір зображення, ID рівня та/або суперелемента (в які будуть поміщені створені вузли);

• уточнити (змінити) тип об'єкта (потрібно лише у деяких випадках), що буде створюватися (діалогове вікно "**Турe**"): 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.3.12-б, рис.3.13-а, рис.3.15-а,в) можна змінити крок нумерації СЕ (Increment), колір зображення 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.3.12-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 (кнопка 🗵, див. Розділ 3.2) "властивість" СЕ.

У 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.3.12-б). Її розглянуто у Розділі 3.3.2.2.

У Nastran є декілька типів одновимірних СЕ: ROD, TUBE, CURVED TUBE, BAR, BEAM, LINK, CURVED BEAM, SPRING, DOF SPRING, GAP та PLOT ONLY (див. Додаток 3). Але є ще один тип СЕ: двовимірний AXISYMMETRIC SHELL, який створюється на лініях, що *не пересікають вісь обертання* Z.

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 режимі "**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.3.13-а). На ній можна:

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

• обрати (Property) або створити (кнопка , див. Розділ 3.2) "властивість" СЕ. Увага: в Nasran 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). Є ще один тип двовимірного СЕ – AXISYMMETRIC SHELL, але він створюється на лініях (див. Розділ 3.3.2.3).

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 створену 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";

Automesh Surfaces	
Node and Element Options	
Node ID 1 CSys 0Basic Rectangular V Node Param Elem Param	Проміжний вузол на ребрі
Elem ID 1 Property 1Plate_01	Max Distortion
Mesh Control	Angle
Min Elements Between Boundaries 1 O All Iriangles V Fast Tri Mesh	Реальне Точне положення положення
Max Element Aspect Ratio 2, :1 ③ Quads (when all internal angles are within	значення
Quick-Cut boundaries with more than 60, degrees of 90 degrees)	Distortion Angle
30 nodes.	
Mesh Smoothing	
Laplacian Max Iterations 20	Кутові вузля СЕ
C Centroidal Smooth To 0.001 DK Cancel	
a)	б)

Рис.3.13. Діалогова панель завдання параметрів створення СЕС на поверхнях (а); до завдання значення "Max Distortion Angle" (б)

• 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 активізувати 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.3.13-б). Увага: збільшення цього значення може збільшити похибки майбутніх розрахунків.

Результат – СЕС у вигляді чотирьохкутних або трикутних двовимірних СЕ та вузлів на їх ребрах. СЕ мають вказані у "**Property**" властивості, зокрема створені зі вказаного матеріалу, мають перший або другий порядок наближення.

Увага: при створенні вісесимметричної сітки необхідно враховувати, що вісь обертання Z не повинна пересікати контур CEC, що форма CE, у випадку застосування Nastran – трикутна (для Femap Structural – будь яка), а порядок наближення – другий (параболічні CE). Колові 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 поміщаються в рівень (Layer), якому належать базові для СП поверхні.

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

• Single in Solid... (одинична у тілі): почергово 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);

• Trim To Solid... (обрізати надлишки СП можна): послідовно обрати СП, надлишки якої видаляються, та відповідне "тверде" тіло. Надлишками вважаються менші частини СП,

що лежать у єдиній площині. Якщо надлишки не зникли, дати команду "Ctrl+G" або Geometry→Midsurface→Cleanup...;

• 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 між СП (про їх створення див. Розділ 2.2.3.4);

Surface Extend Options	
Extend Shape	Extend To
💽 Linear	⊙ Solid
🔘 Continuous Curvature	O Location
O Reflective	O Distance 0,
	<u> </u>

Рис.3.14. Діалогова панель розширення СП

• Extend... (розширення): обирається одне з ребер СП, на панелі, що з'являється (див. рис.3.14) у секції "Extend Shape" (форма розширення) обрати "Linear" (лінійна) або "Continuous Curvature" (продовження викривлення) або "Reflective" (відбиття), у секції "Extend To" (розширити до) обрати "Solid" ("тверде" тіло) або "Location" (буде вказувати-

ся точка) або "Distance" (на дистанцію) та вказати цю дистанцію;

• 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 автоматично;

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

Видалені надлишки поміщаються в рівень "Mid-Surfaces to Delete", з якого, при необхідності, можна частково повернути СП, і який можна видалити.

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 (фактично – тільки матеріал, оскільки при цьому автоматично визначається тип СЕ – **PLATE**, та його товщина).

3.3.2.6. Створення тривимірної скінченно-елементної сітки для "твердого" тіла

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

Для створення *mempaгональної* тривимірної СЕС на основі "твердих" тіл є команда **Mesh→Geometry→Solids...** Обираються "тверді" тіла. Якщо модель ще не має введеного матеріалу, з'являється діалогова панель для його створення (див. рис.3.2-а). Після створення матеріалу з'являється діалогова панель "Automesh Solids" (див. рис.3.15-а), причому, якщо до цього не було створено "Property" для "твердого" тіла (СЕ типу Solid), то воно створюється автоматично, з СЕ *1-го порядку наближення*. Для зміни порядку наближення необхідно створювати та підключати нову "Property".

Якщо матеріал був створений раніше, але не була створена необхідна "**Property**", то все одне з'являється діалогова панель створення матеріалу. Тоді необхідно підключити раніше створений матеріал за допомогою кнопки "**Copy…**". Якщо необхідна "**Property**" була створена раніше, діалогова панель "**Automesh Solids**" (див. рис.3.15-а) з'являється відразу.

На панелі "Automesh Solids" можна:

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

• встановити опцію "Midside Nodes", тобто створювати (або застосовувати) *проміжні* вузли СЕ для апроксимації геометрії тіла (квадратичних функцій форми CE). 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;

Node and Element Options Node ID 1 CSys C Elem ID 1 Property	Basic Rectangular Vode Param)	Solid Automeshing Options
Mesh Generation ☐ Surface Mesh Only Tet ☑ Midside <u>N</u> odes	Growth Ratio 1.5 to 1 Update Mesh Sizing	Solid Meshing Options <u>C</u> heck Surface Elements <u>D</u> elete Surface Elements
Automatic Mesh Sizing Size For	a)	Adjust Nodal Precision S <u>m</u> ooth Solid Elements S <u>m</u> ooth Tolerance 1,E-4
Basic Curve Sizing Element Size O,16666 Beplace Mesh Sizes on All Curve Min Elements on Edge Max Angle Iolerance Max Size of Small Feature Max Size of Small Feature Yentex Aspect Ratio Length Based Sizing Manned Meshing Befinement	Surface Interior Mesh Growth Growth Factor Growth Factor Refinement Ratio Refine Surface Mesh Uad Mesh Layer Options Layers Assembly / Multi-Solid Sizing Adjacent Surface Matching Remove Previous Slaving Adjust Colors	 ✓ Midside Nodes on Surfaces ✓ Limit Midside Distortion Angle Max Angle 10, Max Elem to Allocate (0 = Automatic) Status Options Detailed Status Messages
✓ Suppress Short Edges ☐ Auto Boundary Small Surf		

Рис.3.15. Діалогові панелі: а) – створення тетрагональної СЕС "твердого" тіла; б) – завдання розмірів СЕС та інших параметрів процесу; в) – додаткових опцій

• 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 CEC);

• обрати (**Property**) або створити (кнопка **I**, див. Розділ 3.2) "властивість" СЕС;

• змінити параметри вузлів та/або СЕ;

• змінити значення "**Tet Growth Ratio … to 1**", тобто коефіцієнта збільшення розмірів CE (від поверхні – усередину тіла).

На панелі "Automesh Solids" є кнопка "Update Mesh Sizing…", яка викликає діалогову панель "Automatic Mesh Sizing" (див. рис.3.15-б) для додаткового налаштування процесу створення тривимірної СЕС.

На ній можна обрати "Tet Meshing" або "Hex Meshing" (тетрагональні або гексагональні CE); вказати: максимальний розмір CE (Element Size); мінімальну кількість елементів на ребрі (Min Elements on Edge); максимальний кут, що допускається (Max Angle Tolerance, див. рис.3.8); максимальну кількість (Max Elem of Small Feature) та розмір (Max Size of Small Feature) CE 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), "Suppress Short Edges" (придушення коротких кромок) з відсотковим розміром цих кромок та "Auto Boundary Small Surf" (автоматично знаходяться границі малих поверхонь (задається відсоток малості), ці поверхні об'єднуються с сусідніми "великими" поверхнями). Останні опції можуть покращити створену CEC.

Є й інші параметри: коефіцієнт зменшення для вершини (Vertex Aspect Ratio); у секції "Surface Interior Mesh Growth" – коефіцієнт зміни розміру СЕС на внутрішньої частині по-

- 69 -

верхні (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) та "Skip Sizing on Slaved Surfaces" (ігнорувати розмітку СЕС на підлеглих поверхнях) – тільки для випадку "Tet Meshing"; "Remove Previous Slaving" (видалити попередню супідрядність) та "Adjust Colors" (корегувати кольори).

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.3.15-в), 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 однаково прийдеться видаляти;

• "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 описаного вище, 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.3.15-а). Параметри, що задаються на ній, розглянуті вище.

Hex Mesh Solids				×
Node and Element Op	tions			
Node ID 1	CSys	0Basic Rectangular 🛛 🗸	Node <u>P</u> aram	<u>E</u> lem Param
Elem ID 1	Property	2Solids_01	v 💶 🗌	Options
Mesh Generation Surface Mesh On Midside Nodes	ly	✓ Merge Nodes on Slaved ☐ Alternate Smoothing	Surfaces	<u>O</u> K Cancel

Рис.3.16. Діалогова панель створення гексагональної СЕС "твердого" тіла

та зшиванням у єдину СЕС.

Гексагональна СЕС дозволяє одержати більш точні результати, але не завжди може бути створеною швидко, оскільки вимагає гексагональних (восьмикутних) обрисів тіла. Мету можна досягти, проводячи "розсічення тіла з відповідністю" (див. Розділ 2.2.5.2) на восьмикутні частини з наступним одночасним створенням СЕС

Для створення *гексагональної* СЕС дається команда Mesh→Geometry→ HexMesh Solids..., обираються "тверді" тіла, з'являється діалогова панель "Hex Mesh Solids" (див. рис.3.16). Вона майже аналогічна розглянутої панелі "Automesh Solids" (див. рис.3.15-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. Це може допомогти 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.3.12-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 нахилу 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 створюванні 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 можливості 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… або Copy…);

• 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".

Другий варіант:

• виконати перші два пункти першого варіанта;

• створити потрібну кількість "**Property**", що відрізняються лише матеріалами;

• за допомогою команди Modify→Update Elements→Property ID... обрати CE, 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**".

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

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...** З'являється діалогова панель з характерним початком назви "**Define ...**". Її вигляд відповідає типу СЕ (див. рис.3.17), який можна змінити (кнопка "**Туре...**"). На панелі можна:



Рис.3.17. Характерний вигляд діалогових панелей: а, в, г, д, е) – створення СЕ; б) – завдання заборонених ступенів свободи на кінцях СЕ

• призначити інший **ID**, колір, рівень; обрати раніше створену або створити (кнопка **I**, див. Розділ 3.2) "**Property**";

• для одновимірних СЕ типів **CURVED TUBE**, **BAR**, **BEAM**, **CURVED BEAM** та **GAP** у секції "**Orientation**" (див. рис.3.17-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.3.17-а) призначити на обох кінцях відстані (див. рис.Д3.1); кнопкою "**Releases…**" викликати діалогову панель "**Define Element Releases**" (див. рис.3.17-б), де заборонити деякі ступені свободи вузлів на кінцях СЕ;

• для двовимірних СЕ усіх типів (див. рис.3.17-в) та вісесиметричного СЕ вказати кількість кутових вузлів: "Quad" (чотири) або "Triangle" (три); для тривимірного (див. рис.3.17-д) – форму СЕ: "**Brick**" (гексаедр, 6 граней), "**Wedge**" (призма з трикутною основою, 5 граней) або "**Tetra**" (тетраедр, 4 грані);

• ввести номера вузлів, на основі яких буде створюватися СЕ (див. рис.3.17), причому для всіх типів СЕ, крім випадків, зображених на рис.3.17-г,е, якщо оставити поля з номерами вузлів пустими, то після команди "**OK**" з'явиться стандартний діалог обирання вузлів. **Ува-**га: порядок призначення номерів вузлів повинен відповідати шаблону нумерації вузлів у СЕ (див. Додаток 3);

• для СЕ типу SLIDE LINE (див. рис.3.17-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 годинникової 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 8.1;

• для СЕ типу **RIGID** (див. рис.3.17-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 Розділі ДЗ.4.5. 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 CEC 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 або другого порядку апроксимації. СЕ створюються на основі параметричного описання лінії, поверхні або об'єму. Викликається діалогова панель "Generate Between Corners" (див. рис.3.18-а). На ній у секції "Node and Element Options" окрім вже відомих є опція "GenClockwise" (генерувати вузли за годинниковою стрілкою – для циліндричної та сферичної систем координат); у секції "Generate" потрібно вказати, що створювати: вузли, CE (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 CE (тут напрямок 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 обирання вузлів. Увага: порядок розташування вузлів – проти годинникової стрілки, а для тривимірної – як на рис.2.16;

• 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!) – 2ої. З'являється діалогова панель "Generate Ruled Region" (див. рис.3.18-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 або другого порядку апроксимації в залежності від "Property" та обраної кількості вузлів. СЕ створюються на основі параметричного описання лінії, поверхні або об'єму. #Nodes – кількість вузлів у напряму від однієї групи вузлів до другої, включаючи вузли цих груп;

UGS.F93

	Generate Ruled Region 🛛 🗙
Generate Between Corners Node and Element Options Node ID 228 CSys 0. Basic Rectangular Image: Concession of the second sec	Node and Element Options Node JD 228 CSys 0Basic Rectangular GenClockwise Node Param Elem ID 61 Property 2.Plate_01 Image: Constraint of the param Elem Param Generate Between Ends Element Shape End Nodes Dir 2 DK Nodes Tri Wedge Left Dir 3 Cancel Nodes 1, Image: QK Dir 3 Cancel
O Both ● £ Node Increment ● Quad Brick ✓ 6 8 Geometric Bias ● Quad Brick	6)
a)	Nodes (Blank for Coords) Elements Along Edge Line Elements From 21 Number 12 Bias 1. Io 56 or, Size Close Boundary

в)

Рис.3.18. Характерний вигляд діалогових панелей створення СЕ: а) – між кутовими вузлами; б) - між двох груп вузлів; в) – двовимірної нерегулярної між кутовими вузлами з розміткою контуру

• Mesh→Transition... (створення нерегулярної двовимірної СЕС на основі 3-ох або 4ох кутових вузлів та розмітки контуру): на діалоговій панелі "Transition Boundary" (див. рис.3.18-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 Boundary Mesh" (абсолютно аналогічна панелі, зображеної на рис.3.13-а), 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 \rightarrow Extrude \rightarrow), обертання (Mesh \rightarrow Revolve \rightarrow) та витягування (Mesh \rightarrow Sweep \rightarrow). Основою для створення СЕС є криві з *розміткою* кількості СЕ (\rightarrow Curve...), СЕ нижчої розмірності (\rightarrow Elements...) або поверхні СЕ (\rightarrow 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.3.19-а). Потрібно обрати раніше створений варіант властивості двовимірного СЕ або задати новий (кнопка 🛄), ввести кількість СЕ вздовж напрямку видавлювання (Elements along Length). Якщо дати команду "OK", то з'явиться стандартний діалог завдання напрямку 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.3.19-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 CE) 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'єкта (точки, вузла тощо), а реальна довжина видавлювання визначається проекцією положення об'єкта на напрямок вектора; величиною "Distance" (введена довжина вектора буде ігноруватися). За допомогою кнопки "Offset..." можна вказати (вектором) відступ від обраних кривих (з "опорними" CE), на якому будуть створюватися нові СЕ. Коли всі необхідні призначення будуть зроблені, стає активною кнопка "OK". Після створення CE знов з'явиться діалогова панель "Generation Options" для продовження процесу, причому база початку створення нових CE 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...) CE із завчасно створених одновимірних або двовимірних СЕ відповідно. Обираються "опорні" однотипні СЕ, з'являється діалогова панель "Generation Options" (див. рис.3.19-а), на якій вже будуть доступні опції секції "Раrameters", де можна обрати варіант "Match Original Entities" (колір та рівень нових СЕ будуть відповідати "опорним" CE) або "Use Current Setting" (використовувати поточні призначення у "Property"). Якщо опорні CE – одновимірні, то наступні дії – аналогічні описаним вище. Якщо опорні СЕ – двовимірні, то напрям можна обирати не

Parameters Use Current <u>S</u> ettings Match Original <u>E</u> ntities	vlethod ● <u>V</u> ector ● Normals ● Normals with Thickness <u>C</u> orrection	Advanced >>
Options Property 4Plate_01 Elements along Length	Delete Original Eleme	I DK nts Cancel
neration Options	a)	
arameters Use Current Settings Match Property 4Plate_01 xtrusion Vectors	Original Entities	nce and Elements Length Elements 1, 1,
Offset Reset Offset Fo	Along Offset: No Off Along: Must S	set OK pecify Cancel



тільки вектором, а й нормаллю до їх поверхні (Normals) або нормаллю з корекцією товщини СЕ, що створюються, вздовж всієї поверхні (Normals witch 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 видавлювання. 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 другій, тобто "Parabolic") визначається "опорними" СЕ та "Property";

• на основі процедури обертання, коли основою є завчасно створені та розмічені криві (команда Mesh→Revolve→Curves...) або одновимірні чи двовимірні СЕ (команда Mesh→Revolve→Elements...). Обираються незамкнені криві або "опорні" СЕ, з'являється описана вище діалогова панель "Generation Options" (див. рис.3.19-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 видавлювання, що описана вище, з однією відмінністю: траєкторія створення СЕ задається заздалегідь створеними розміченими безперервними лініями. Є варіант витягування СЕ із застосуванням ліній (команда Mesh→Sweep→Curve...) або одновимірних чи двовимірних СЕ (команда Mesh→Sweep→Element...). Спочатку (відповідно команді) обираються "опорні" криві або однотипні СЕ, потім – криві майбутньої траєкторії. З'являється діалогова панель "Generation Options" (див. рис.3.20), на якій майже всі опції розглянуті вище. Відмінність від випадку Mesh→Extrude→... полягає у тому, що ребра нових СЕ будуть *дотичними* до траєкторії переміщення. Опцію "Alignment Curve" потрібно активізувати, коли траєкторія переміщен-

ня – просторова *не плоска* крива, щоб задати додатковий об'єкт (лініюю), відносно якої будуть орієнтуватися СЕ, що створюються (**alignment** – вирівнювання).

Generation	Options 🔀
Parameters O Use Cu O Match (rrent <u>S</u> ettings Jriginal <u>E</u> ntities
Options Property Delete	2Plate_01 Driginal Elements nt Curve
	<u>D</u> K Cancel

Рис.3.20. Діалогова панель опцій

витягування СЕ

Ще є можливість проводити описані вище процедури видавлювання, обертання та витягування, коли опорними об'єктами є поверхні двовимірних або тривимірних СЕ (**Mesh** \rightarrow **Sweep** \rightarrow **Element Face...**), які обираються за допомогою діалогу "Select Element Faces" (див. рис.3.21-а). На ній **ID** СЕ та номер його сторони можна вводити у список:

• шляхом обирання CE на робочій площині "мишею";

• набиранням на клавіатурі потрібних номерів та команди "<<Add" (додати);

• групою СЕ з однаковим номером поверхні СЕ: кнопкою "Multiple…" викликається стандартний діалог обирання СЕ, після чого з'являється діалогова панель "Face Selection for Elemental Loads" (див. рис.3.21-б), де номер поверхні СЕ вводиться у поле "Face".

Select Element Faces	Face Selection
Element 17 Element 45, Face 1 <<< Add	Method Selection Info Selection Info Element Near Coordinates Face Adjacent Faces Iolerance Model Free Faces Front Face
a)	ნ)



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 двовимірних скінченних елементів

Тривимірну *тетрагональну* СЕС можна отримати на основі двовимірної СЕС, яка створює *замкнений* простір. Дається команда **Mesh→Geometry→Solids from Elements...**, обираються "опорні" СЕ (часто це всі СЕ), з'являється вже знайома діалогова панель "Automatic Mesh Sizing" (див. рис.3.15-а). Параметри, що задаються на ній, розглянуті у Розділі 3.3.1.1. Після команди "OK" (на створення СЕС) може з'явитися панель із запитанням: чи перетворювати вихідні СЕ на трикутні. Якщо не погодитися, то СЕС створюватися не буде.

За допомогою команди Mesh->Geometry->HexMesh from Elements... можна створити *гексагональну* СЕС або СЕ у вигляді *шестигранних* та *п'ятигранних* призм на основі двовимірної СЕС у складі чотирикутних або трикутних СЕ відповідно, причому повинно бути одна або більша кількість *пар* поверхонь, між якими створюється нова СЕС у вигляді вказаної кількості 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 "Hi". Якщо "Hi", то доведеться додатково обирати один із вузлів десь *на*

границі поверхні "основи", потім – *відповідний* йому вузол на границі "верхній" 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 циклічною симетрією, 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 потім при створенні зв'язків обрати за допомогою кнопки "Elem Param…".



Рис.3.22. Характерний вигляд діалогових панелей створення зв'язків для команд: a) – Closest Link... та Multiple...; б) – Unzip... та Coincident Link...

Діалогова панель "Generate Connection Options" (див. рис.3.22) – майже однакова для всіх команд групи Mesh→Connect. На ній у секції "Connection Type" обирається тип зв'язку: "None", "Constraint Equations" (формульний) 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). Для СЕ типу RIGID є опція "Reverse Directory" (змінити напрямок), а для СЕ типу GAP – "Adjust Gap Length" (пристосувати розмір зазору).

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

• Closest Link... (близький зв'язок): почергово обираються вузли двох груп, між якими попарно за принципом "близького вузла" будуть створюватися зв'язки;

• Multiple... (множинний зв'язок): після призначення властивостей зв'язку у діалоговому режимі вказуються пари вузлів, що зв'язуються;

• Unzip... (роз'єднання): обираються CE, потім – їх *спільні* вузли, що будуть роз'єднуватися, потім вказуються властивості зв'язків між обраними вузлами. Команду звичайно застосовують для роз'єднання CEC тіла на зв'язані або незв'язані (None) частини;

• Coincident Link... (у вузлах, що співпадають): обираються вузли, призначається максимальна відстань між вузлами, що будуть зв'язані.

3.5.2. Редагування скінченно-елементної сітки

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

Командою Mesh→Editing→Interactive... викликається діалогова панель "Mesh Editing" (див. рис.3.23-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" відміняє 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.3.23-б). На ній також обирається 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.3.23-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**".



двовимірної СЕС:

а) – інтерактивного; б) – "розчленовування"



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.

3.5.3. Перегенерація та очищення скінченно-елементної сітки

У FEMAP перегенерацію реалізовано тільки для двовимірних СЕС.

Командами (загальну частину команди Mesh→Remesh→ опускаємо): Refine... (роздрібнювати); Update... (оновлювати) або Unrefine... (укрупнювати) викликається панель для обирання CE (можна користуватися протяганням "миші" з притиснутою клавішею "Shift"). Потім для одновимірних CE достатньо ввести коефіцієнт зменшення (*ціле* число >1) / збільшення (<1) розміру CE. Для інших типів CE з'являється діалогова панель "Refinement and Remeshing Options" (див. рис.3.24-а). На ній обирається відповідна дія (опції "Refine", "Remesh" або "Unrefine"), вказується коефіцієнт зменшення / збільшення розміру CEC "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.

Refinement and Remeshing Options	Sliver Removal	
Remeshing Options ○ Refine ○ Refine ○ Remeshing ○ Remeshing ○ Unrefine Break Angle 45, ○ Unrefine	Current Statistics Cleanup Options Angle Min: 9,99E+30 Max: -9,99E+30 Min Angle Length Min: 9,99E+30 Avg: 0, Min ×: -9,99E+30 Max: -9,99E+30 OK	001 ncel
a)	6)	

a)

Рис.3.24. Вигляд діалогових панелей: а) – перегенерації СЕ; б) – видалення дуже малих СЕ

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

Потім може з'явитися діалогова панель "Generate Boundary Mesh", ідентична зображеної на рис.3.13-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 \rightarrow Remesh \rightarrow Cleanup Slivers... та Mesh \rightarrow Remesh \rightarrow Edge Removal... можна видалити дуже малі CE та CE з короткими гранями відповідно. В обох випадках спочатку обираються CE, серед яких буде проводитися процедура. У першому випадку з'являється діалогова панель "Sliver Removal" (див. рис.3.24-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 видалятися буде вузол "To", після чого CE, що примикають, оновляться.

3.5.4. Перетворення скінченно-елементної сітки у STL-моделях

Імпортовані **STL**-моделі тіла описуються трикутними площинами, які у FEMAP сприймаються як поверхневі CE типу **PLOT PLANAR**. Тобто геометричних об'єктів тіла (точок, кривих, поверхонь тощо) зовсім немає. У такому випадку у FEMAP є можливість створити тривимірну CEC: командою **Mesh**->Geometry->Solid from Elements.... Однак побудована таким чином CEC буде неякісною. Тому у FEMAP є інструменти для переробки поверхневих CE **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, вони є площинами або комбінаціями близьких за орієнтацією площин, які об'єднують деяку кількість CE 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.3.13-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'ємні 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 CE, до яких ці ребра будуть "прикріплятися", потім – діалог вибору/призначення "**Property**" ребер жорсткості, потім – діалог вибору опорних вузлів. Якщо ці ребра – балочного типу, то додатково з'явиться діалог призначення напряму осі Y перерізу CE (див. Додаток 3). Доцільно помістити "**Property**" ребер жорсткості на окремий рівень (**Layer**), щоб забезпечити зручний доступ до них у подальшому. Для тривимірної СЕС ребра жорсткості можуть створюватися у вигляді одновимірних або двовимірних CE. Увага: FEMAP створює одновимірні ребра жорсткості на *всіх* ребрах СЕ, що містять вказані вузли. Тому після створення їх потрібно переглянути та видалити зайві. Для зміщення 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.3.25-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!

Mesh Smoothing	Generation Options	X
Method Iterations Fix Nodes ① Laplacian ① Centroidal ☐ Iolerance ①,001 ① Cancel	Element Options Parameters Use Existing Nodes Use Current Settings Node Increment 1 Node Offset Image: Additional Setting Settings Match Loads, Constraints Update Every Repetition	<u>R</u> epetitions 1 Trap <u>w</u> idth
a)	 آر)	

Рис.3.25. Діалогові панелі: а) – згладжування СЕ; б) – копіювання СЕ

3.5.7. Операції маніпулювання вузлами та скінченними елементами

Декілька операцій копіювання вузлів та СЕ Mesh→ (Сору..., Radial Copy..., Scale..., Rotate... та Reflect...) аналогічні за виконанням операціям копіювання геометричних об'єктів, викладеним у Розділі 2.2.6.1. Після обирання об'єктів з'являється діалогова панель "Generation Options" (див. рис.3.25-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. Зокрема, опція цієї діалогової панелі: "Match Loads, Constraints…" дозволяє переносити граничні умови з оригінальних об'єктів (вузлів, CE) на знов створені.

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 CE аналогічні за виконанням відповідним операціям для геометричних об'єктів, викладеним у Розділах 2.2.6.2 та (про "Layer…") 1.7.1.

Увага: після цих операцій можуть з'являтися 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 – невірним.

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.3.26, 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 упорядковані за наростанням

(Ascending) або убуванням (Descending). Опція "Verify Renumber" дозволяє переглянути список відповідності, а "Constant Offset" – змінити усі номера 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 обраних СЕ (почергово): кількість (обриси СЕ) та номера 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 Nastran, FEMAP Structural, DYNA, ABAQUS); "властивість"

Renumber To	X
Starting ID 1 Incre	ement 1
C Sort Renumbered Order by	Sort Order
 Original ID 	Ascending
Selection Order	Descending
<u>○</u> <u>C</u> olor	
○ Layer	Verify <u>R</u> enumbering
<u>○ T</u> ype	Constant Offset
Property	
O Minimum <u>N</u> ode ID	
OX OY OZ	
C <u>S</u> ys 0Basic Rectangular 🛛 🗸	<u> </u>
Absolute <u>V</u> alue	Cancel
·	,

Рис.3.26. Діалогова панель перенумерування СЕ

CE (Property ID...); матеріал CE (Material ID...); кут орієнтації осі пружної симетрії характеристик анізотропного матеріалу двовимірних CE (Material Angle...); орієнтацію (Line Element Orientation...), зміщення (Line Element Offsets...) або ступені свободи кінців (Beam/Bar Releases...) перерізу одновимірних CE типів BAR, BEAM та CURVED BEAM; напрямок (Line Element Reverse Direction... та Reverse Normal/Orient First Edge...); порядок наближення у CE (Linear/Parabolic Order...); перевірити проміжні вузли (Midside Nodes...); розділити чотирикутні CE на трикутні (Split Quads...); змінити товщину або зміщення двовимірних CE (Adjust Plate Thickness/Offset...).

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

Напрямок (**Reverse Normal/Orient First Edge...**) у двовимірних СЕ можна змінювати за допомогою опцій (див. рис.3.27-а):

• "Reverse Normal Direction". Порядок нумерації вузлів у СЕ змінюється таким чином, що двовимірні перевертаються "догори дном" ("inside-out"). Увага: якщо до СЕ було прикладене навантаження, напрямок його дії зміниться на протилежний;

• "All Normals Outward" або "All Normals Inward". Усі зовнішні або внутрішні нормалі на сторонах обраних СЕ будуть погоджені;



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

• "Align First Edge to Vector". Порядок нумерації вузлів у СЕ зміниться 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 СЕ (Material Angle...) може змінюватися (див. рис.3.27-б): вздовж осей СЕ (None – Turn of Material Orientation Angle), вказується вектором (Set Angle Using Vector Direction), вздовж глобальних координат (Set Angle Using Coordinate Axis) або кутом THETA (Angle Value, див. Додаток 3).

При зміні порядку наближення у СЕ (Linear/Parabolic Order...) на другий (Parabolic Element) автоматично створюються нові вузли, а при зміні на перший (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...).

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 кутовими вузлами) положення, тому точність апроксимації геометрії криволінійної поверхні знизиться.

Update Plate Element Thickness or Offset				
Method		Update		
Vary <u>B</u> etween Nodes		⊙ T <u>h</u> ickness		
Erom Node	<u>V</u> alue	Limits (Blank to Skip)		
<u>T</u> o Node	Value	Tolerance 1,E-8		
○ Equation or Constant		<u>M</u> in Value		
[D Variable i	Thick=Node, Off=Elem	Max Value		
Vajue				
Average for Each Element		<u>OK</u> Cancel		

Рис.3.28. Діалогова панель змінювання товщини або зміщення у двовимірних СЕ

На діалоговій панелі (див. рис.3.28), що викликається командою Adjust Plate Thickness / Offset..., вказується параметр CE, який змінюється: товщина (Thickness) або зміщення (Offset). За методом "Vary Between Nodes" вказані значення (Value) змінюються від вузла (From Node) до інших вузлів CE 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.

a) Update Rigid Elements
Update Rigid Elements
Coefficient of Thermal Expansion
0, Material
<u>O</u> K Cancel

Рис.3.29. Діалогові панелі: а) – редагування викривлення балки; б) – завдання коефіцієнта температурного розширення

Для СЕ типу ВЕАМ першого порядку наближення є ще команда Modify→Update Elements→Beam Warping... (викривлення балки, див. рис.3.29-а). Якщо після команди обрано декілька СЕ, то буде активною тільки секція "Add/Modify Warping" з опціями: "None" (видалити точки деформування з кінців обраних СЕ), "Continuous" (створити вузли/скалярні точки (на кінцях СЕ) таким чином, щоб вигин був безперервним), "All Continuous" (як попередня, але додатково ця властивість переходить на СЕ, суміжні з обраними), "Discontinuous" (відмінити безперервність), а також радіокнопками "Node Type", які можуть обиратися як "Node" (вузли) або "Scalar Point" (скалярні точки). Якщо після команди обрано один СЕ, то буде активною і секція "Edit Single" з опцією "Edit Warping DOF", яка дозволяє призначити номера вузлів для "EndA" та "ЕпdB" (тобто на кінцях CE).

Команда Modify \rightarrow Update Element \rightarrow Remove Cross Section дозволяє виправити "Property" СЕ типу BEAM або BAR з іншим чином заданими осями перерізу, які були отримані з файлу результатів від іншої процесорної програми (як СЕ типу PBEAML або PBARL). Це стосується значень напружень у точках перерізу. Потребує лише обирання СЕ.

Команда Modify→Update Element→Rigid Thermal Expansion... дозволяє змінити у всіх обраних СЕ типу RIGID значення коефіцієнта температурного розширення. Викликається діалогова панель "Update Rigid Element" (див. рис.3.29-б), на якій, окрім поля для коефіцієнта, є ще кнопка "Material...", яка дозволяє обрати матеріал, з якого буде введено нове значення коефіцієнта для СЕ типу RIGID.

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 \rightarrow Model \rightarrow (Function..., Material... або Property...) обрати усі (Select All) або частку, отримати та переглянути список та вирішити, чи є у списку *зайві* набори (запам'ятати їх ID), чи вірні в них 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. Додамо, що на панелі "Check/Merge Coincident" (див. рис.2.25-а) для вузлів є ще секція "Nodes to Keep/Merge" з такими опціями: "Automatic" (автоматично), "Select Nodes to be Merges" (оберіть вузли для злиття (потім знову з'явиться панель для обирання вузлів)), "Keep Lower ID" (призначати нижні значення номерів вузлів, що зіллються), "Keep Higher ID" (призначати верхні значення номерів вузлів, що зіллються).

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.3.30), 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 номера СЕ, що співпадають, вторинна – останні. Цю вторинну групу СЕ можна видалити цілком командою **Delete→Group...** (вказати **ID** групи). Одиничні СЕ можна видаляти командою **Delete→Model→Element...**



Рис.3.30. Діалогова панель контролю СЕ, що співпадають

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.3.31а). На ній вказується максимально допустима відстань вузлів від площини (Max Allowable Distance from Plane). Якщо обрати опцію "Move Nodes Closer than Allowable Distance onto Plane", то всі вузли, розташовані не дальше вказаної відстані, будуть спроектовані на площину. Площина задається автоматично трьома першими обраними вузлами (не повинні лежати на лінії), або у стандартному діалогу, коли встановлено опцію "Specify Plate Manually".

3.6.4. Контроль геометричних параметрів скінченних елементів

Командою **Tools** \rightarrow **Check** \rightarrow **Distortion**... (перекручування) спочатку викликається стандартна діалогова панель для вибору CE, потім з'являється панель "Check Element Distortions" (див. рис.3.31-б). На ній можна призначити до перевірки геометричні параметри СЕ та встановити граничні значення:

	Check Element Distortions	
	Maximum Allowable Values	
Check Planarity of Nodes	Aspect <u>R</u> atio 10, to 1	Charle Element Name In
Max Allowable Distance from Plane 0,001	✓ Iaper 10, to 1	
Maye Nodes Closer than Allowable Distance anto Plane	Alternate Taper 0,5 to 1	Coordinate System 0Basic Rectangular
	✓ Internal Angles 30, deg.	Update/Beverse Element Normals
Speciry Plane Manually	✓ Warping 5, deg.	Specifu Normal Vector
NOTE: If you do not specify the plane manually, it will be	Tet Collapse 10, to 1	
	✓ Jacobian 0,4 to 1	
OK Cancel	Make Group with Distorted Elements	
	Check/Fixup Invalid Elements	
	<u>D</u> K Cancel	
a)	ნ)	B)



• "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.3.32-а), A_{ср} – 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 нормалями до центрів трикутників на чотирикутних гранях СЕ (див. рис.3.32-б);

• "Tet Collapse" (виродження тетраедра): найбільше відношення ребра до висоти тетраедра (СЕ), проведеної зі спільного для них кута (див. рис.3.32-в);

• "Jacobian" (якобіан): порівняння форми реального СЕ з формою ідеального СЕ відповідного типу (тільки для СЕ типу Shell (3, 4 або 8 вузлів), Tetrahedral (4 або 10 вузлів), Hexahedral (8 або 20 вузлів). У СЕ Tetrahedral та Hexahedral положення проміжних вузлів в аналізі не враховується. Ідеальний показник = 0.0, найгірший = 1.0, а також 2.0. Увага: значення 2.0 вказує, що фатальна помилка при спробі аналізу гарантована, оскільки СЕ визначений не повністю, вивернутий навиворіт, дуже викривлений або має проміжний вузол, занадто зсунутий у напрямку кутового вузла.



Рис.3.32. Контроль геометричних параметрів скінченних елементів: a) – "Alternate Taper"; б) – "Warping"; в) – "Tet Collapse"

Якщо встановити опцію "Make Group with Distorted Elements", буде створена група із CE, параметри геометрії яких не задовольняють вказаним критеріям (для подальшого виправлення). Опція "Check / Fixup Invalid Elements" дозволяє провести додаткову перевірку якості CE (нульова довжина ребра, відсутність вузлів, відповідність типу, подвійні суперечливі призначення тощо).

Звіт про виявлені недоліки СЕС 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.3.31-в). Опція "**Update/Reverse Element Normals**" вказує на необхідність змінити направлення 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. Другій порядок наближення приводить до збільшення часу для розв'язування системи алгебраїчних рівнянь, що породжується методом скінченних елементів, але при однаковій кількості СЕ підвищує точність отриманих результатів.