# Розділ 6

# МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ПРО НАПРУЖЕНО-**ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТІЛ. СТАТИКА**

NX Nastran для розв'язування крайових задач про напружено-деформований стан (НДС) тіл застосовує постановку задачі у переміщеннях з використанням варіаційного принципу Лагранжа та методу скінченних елементів. Такі розрахунки можуть вимагати дуже значні об'єми оперативної та ще більше дискової пам'яті, а також займати багато часу на етапі обчислення. Це тому, що метод скінченних елементів породжує велику за розміром систему алгебраїчних рівнянь, яка займає багато пам'яті ПЕОМ та відносно довго розв'язується.

Основні теоретичні відомості про статичні крайові задачі про НДС тіл наведені у Додатках 5 та 6.

# 6.1. Завдання початкових і граничних умов у FEMAP

У Розділі 4.1. викладені загальні відомості щодо завдання граничних умов. Тут викладемо лише додаткові відомості, характерні для задач про НДС тіл.

Для цих задач розрізняють два типу граничних умов: ГУ 1-го роду (закріплення, переміщення вузлів, зв'язки ступенів свободи різних вузлів) та усі інші ГУ: зосереджені сили, розподілені на поверхні зусилля (природні ГУ, або ГУ 2-го роду), об'ємні (вага, інерційні та "температурні" сили).

#### 6.1.1. Завдання початкових умов

За замовчанням вважається, що усі початкові умови – нульові. Однак можна призначити інші варіанти початкових умов, використавши для цього результати попередньо проведених розрахунків. Докладно про цю процедуру викладено у Розділі 4.1.4.5.

Увага: якщо у розрахунках необхідно враховувати температурні деформації, то потрібно:

• провести, якщо це ще не було зроблено, розрахунок теплового стану тіла (див. Розділ 5);

• за допомогою команди Model → Load → From Output... підключити один з отриманих векторів значень температури у вузлах як граничну умову задачі (див. Розділ 4.1.4.5, рис.4.9-а та рис.4.10-а);

• командою Model→Load→Body... викликати діалогову панель "Create Body Loads" (див. рис.5.1-а), перевірити або змінити (останнє припустимо тільки у випадку попереднього розв'язування стаціонарної задачі теплопровідності) значення температури тіла (у полі "Default Temperature", внизу), яка призначається для усіх вузлів СЕС.

# 6.1.2. Завдання граничних умов 1-го роду (закріплень, переміщень, зв'язків)

Щоб крайову задачу про НДС тіла можна було розв'язати, тіло обов'язково повинне мати такій набір ГУ 1-го роду (закріплення у просторі, задані переміщення, зв'язки), які виключають для тіла усі можливості рухатися як жорстке ціле: як у поступальний, так і в обертальний спосіб. Але ці закріплення, переміщення та зв'язки не повинні суперечити розрахунковій схемі крайової задачі, створювати паразитні напруження та деформації.

Такі закріплення, відомі переміщення та зв'язки потім передаються програмою до вузлів скінченно-елементної сітки (СЕС).

Як вже зазначалося у Вступі, DOF – ступені свободи вузла скінченно-елементної сітки. Загалом їх шість: три – переміщення (Translation) вузла вздовж координатних осей (позначаються як TX, TY та TZ), три – обертання (Rotation) вузла навколо осей, що паралельні відповідної координатної осі (позначаються як RX, RY та RZ). Отже, для виключення можливості тілу рухатися як жорсткому цілому достатньо ввести ГУ 1-го роду для 6-ти ступенів свободи одного або декількох вузлів. При цьому потрібно враховувати, які DOF (ступені свободи) мають вузли скінченного елемента обраного типу (див. "Help" або Додаток 3). Наприклад, тривимірні CE – тільки перші три DOF, а вісесиметричні – тільки дві DOF: TR та TZ (для циліндричної системи координат позначення TX і TY змінюються на TR і TT), тобто тільки переміщення (на інші DOF можна не звертати уваги – усі призначання до них ігноруються).

У FEMAP ГУ 1-го роду можна задавати безпосередньо у вузлах, у вузлах на поверхні та на геометричних об'єктах (точках, лініях, поверхнях). Але й у останньому випадку вони передаються до вузлів, які *асоційовані з даними геометричними об'єктами* (про асоціації вузлів див. Розділ 4.1.2).

Команда **Model→Constraint→Set** дозволяє створити новий набір ГУ 1-го роду (тільки для закріплень) або обрати його зі списку раніш уведених.

# 6.1.2.1. Створення власної системи координат

Іноді для завдання граничних умов 1-го роду (і не тільки) потрібна система координат, яка має іншу орієнтацію осей, ніж глобальна. Командою Model→Coord Sys... викликається відповідна діалогова панель (див. рис.6.1), де потрібно: дати їй назву (Title); вказати тип глобальної системи (Ref CSys); при необхідності – змінити номер рівня (Layer) та колір зображення; вказати метод призначення її положення. Після команди "OK" послідовно вводяться для методів:

• Angles: координати початку нової системи, кути обертання відносно осей основної системи (градуси);

• Workplane: нічого (координати початку нової системи знаходяться "в нулях" робочої площині (РП), осі X та Y – паралельні осям X та Y РП, вісь Z – перпендикулярна РП);

• XY, YZ, ZX Locate: координати

Define Coordinate System		
	Ref CSys 0Basic R	ectangular 🖌
<u>C</u> olor 60 <u>Palette</u> <u>L</u> ayer	1	
Method	Туре	
💿 Angles 🛛 🔿 Workplane	<u>     R</u> ectangular	ОК
O XY Locate O YZ Locate O ZX Locate	🔘 Cyli <u>n</u> drical	
OXY <u>A</u> xes OYZ Ax <u>e</u> s OZX Axe <u>s</u>	◯ Sp <u>h</u> erical	Cancel

Рис.6.1. Діалогова панель для створення власної системи координат

трьох точок, а саме початку нової системи, кінця першої осі (таким способом задається її напрямок), останньої точки, що визначає площину XY, YZ або ZX відповідно;

• XY, YZ, ZX Axes: координати початку нової системи, напрямок першої осі, напрямок другої осі.

# 6.1.2.2. Завдання граничних умов 1-го роду у вигляді закріплень

Варіанти закріплення ступенів свободи вузлів (DOF) через *геометричні об'єкти* – стандартні та розширені (див. рис.6.2). У залежності від типу геометричного об'єкта дається команда Model→Constraint→On Point... (→On Curve... або →On Surface...), обираються об'єкти і призначається один із вказаних нижче варіантів закріплення.

У секції "Standard Types" для всіх типів геометричних об'єктів: "Fixed" – повне закріплення; "Pinned – No Translation" – повна заборона переміщень (шарнір); "No Rotation" – повна заборона обертань (тільки для вузлів, що мають DOF=456).

У секції "Advanced Types" (розширений тип закріплень) є такі варіанти:

• "Arbitrary in CSys" (в обраній зі списку системі, зокрема, і у спеціально створеній) – повний контроль над всіма DOF вузлів, асоційованих з геометричним об'єктом. Увага: система "-1..Use Nodal



Рис.6.2. Діалогова панель закріплення вузлів через геометричні об'єкти

**Output Set**" – для виводу результатів у вузлах, яка автоматично створюється для вузлів, що асоціюються з геометричним об'єктом;

• "Surface" (на поверхні будь-якої геометрії):

- "Sliding along Surface (Symmetry)" (ковзання вздовж поверхні, тобто буде заборонено переміщення у нормальному до будь-якої точки поверхні напрямку (звичайно так моделюють відкинуту симетричну частину тіла); у робочому полі FEMAP на поверхні з'являться позначки "S");
- "Move Normal to Surface (AntiSymmetry)" (переміщення будуть можливими лише у напрямку нормалі до будь-якої точки поверхні; на ній з'являться позначки "N");
- "Sliding in Specified Direction" (переміщення будуть можливими лише у вказаному напрямку, дотичному до поверхні у будь-якій її точці; на поверхні з'являться позначки "**D**");

• "Cylinder / Hole" (на циліндричної поверхні, зокрема в отворі) – комбінація з таких варіантів (для виводу результатів у вузлах автоматично створюється локальна циліндрична система координат):

- "Constraint Radial Growth" закріплення у радіальному напрямку (DOF=1), на поверхні з'являться позначки "СR";
- "Constraint Rotation around Axis" заборона обертання навколо осі поверхні (DOF=2), на поверхні з'являться позначки "CT";
- "Constraint Sliding along Axis" заборона переміщення вздовж осі поверхні (DOF=3), на поверхні з'являться позначки "CS".

Примітка 6.1. Якщо вузли СЕС мають DOF обертання, то для призначення для них умов закріплення потрібно включити опцію "Include Rotational DOF" (застосовувати DOF обертання, тобто DOF=456). Тоді на поверхні до позначки додається "R".

Примітка 6.2. У складних випадках є сенс ще до запуску процесу розв'язування задачі привести умови закріплення до вузлів (за допомогою команди Model-Constraint-Expand..., див. Розділ 4.1.4.6) і ретельно перевірити, які локальні координати у вузлах були введені і які DOF були реально закріплені (див. також Розділ 6.1.2.6).

Команда Model→Constraint→Nodal... викликає діалог введення ГУ 1-го роду у вигляді закріплення безпосередньо для вузлів. Спочатку обирається вузол або декілька (всі) ву-



Рис.6.3. Діалогова панель закріплення вузлів

будуть заборонені (встановити "прапорці") або призначити за допомогою кнопок один з варіантів: "Free" (усі DOF – вільні); "Fixed" (усі DOF – заборонені); "Pinned" (тільки обертання); "No Rotation" (тільки лінійні переміщення); "X Symmetry", "Y Symmetry" або "Z Symmetry" (тіло та ГУ мають симетрію у вказаному напрямку); "X AntiSymm", "Y AntiSymm" або "Z AntiSymm" (тіло та

злів

3

З'являється

ГУ мають антисиметрію у вказаному напрямку).

Примітка 6.3. Як це вже зазначалося у Розділі 3.3.2.1, ще на етапі створення скінченно-елементної сітки (СЕС) можна виключити деякі DOF всіх вузлів СЕС. Щоб ці призначення змінити, зовсім не потрібно видаляти СЕ та створювати їх знов. Достатньо ввести нові значення для усіх вузлів (див. попередній абзац).

Примітка 6.4. Як це вже зазначалося у Розділі 1.6, ще на етапі створення розрахункової моделі, якщо тіло має геометричну площину симетрії та всі умови навантаження теж симетричні відносно цієї площини, то симетричну частину потрібно відкинути, замінивши відкинуту частину граничними умовами симетрії: заборонити ступені свободи (DOF) вузлів скінченно-елементної сітки, що розташовані на цієї площині, в напрямку, перпендикулярному до цієї площини. Таких площин може бути декілька: 1, 2 або 3. При цьому:

• приблизно у 2, 4 або 8 разів (відповідно) зменшується розмір системи рівнянь, що породжується методом скінченних елементів;

олнаковими

Nodal Constraints/DOF" (див. рис.6.3).

Тут можна змінити координатну систему

"Coord Sys", самостійно вказати DOF, що

закріпленнями.

діалогова панель "Create

• у стільки же разів зменшуються потрібний розмір оперативної пам'яті та пам'яті на магнітному носії;

• ще значніше зменшується час розв'язування системи рівнянь;

• дійсно досягається симетрія розв'язку крайової задачі.

Досить часто замість команди Model→Constraint→Nodal... зручніше користуватися можливостями команди Model→Constraint→Nodal on Face... (закріплення у вузлах на грані). Докладно про варіант призначень ГУ (не тільки 1-го роду) у вузлах на грані (Nodal on **Face...**) викладено у Розділі 4.1.1.

Увага: грані СЕ (називаються "Face ID") мають номери від 1 до 6 максимум; інші грані та об'єкти – номери 1 та вище.

6.1.2.3. Завдання граничних умов 1-го роду у вигляді переміщень або кутів обертання

Коли заздалегідь відомо про закон переміщення або обертання вузла або іншого об'єкта проекту, відповідне ГУ задається за допомогою команд Model →Load: призначається тип об'єкта для прикладення ГУ (→Nodal..., →Nodal оп Face..., інші) і обираються об'єкти; на діалоговій панелі "Create Loads on ... ", що з'являється (див. рис.6.4), обирається "Displacement" (переміщення) або "Enforces Rotation" (призначений кут обертання, у градусах), виконуються інші дії (див. Розділи 4.1.3 та 4.1.4).

Увага: варіанти ГУ "Velocity" (швидкість), "Acceleration" (прискорен-

Create Loads on Surface	es					
Load Set 1 Load_0"	1					
Title				Coord Sys 0	Basic Rectangular	~
<u>Color</u> 10 <u>Palette</u>	Layer 1					
Force Per Area Porce Per Area Force Per Node Moment Moment Per Area Moment Per Node Displacement Enforced Rotation Velocity Botational Velocity	Direction     O     Co     Ve     Alc     No     No     Load	mponents ctor ing Curve rmal to Plane rmal to Surface	Specify.		Method Constant Variable Data Surface Advar	anced
Acceleration		⊻alue	Time/Freq Deper	ndence	Data Surfa	ace
Pressure	TX	0,014	0None	<mark>⊻ <sup>1</sup>xy</mark>	0None	
Temperature	TY	0,			0None	✓ III
Element Temperature	TZ	0,			0None	<ul> <li>III</li> </ul>
Heat Flux Heat Flux Per Area Heat Flux Per Node Heat Generation Element Heat Flux Convection	PI	nase 0,	0None	<b>√ fxy</b> K	Car	ncel

Рис.6.4. Діалогова панель для введення граничних умов до окремих об'єктів тіла

ня) та "Rotational Acceleration" (прискорення при обертанні) не є ГУ 1-го роду, тому нагадаємо про обов'язковість завдання ГУ 1-го роду для тіла (див. перший абзац Розділу 6.1.2).

6.1.2.4. Завдання граничних умов 1-го роду у вигляді зв'язків

У Розділі 3.4.1. вже розглядалися зв'язки між вузлами, які створювалися за допомогою СЕ типу RIGID. У FEMAP є ще одна можливість створення зв'язків між вузлами – за формулою  $\sum a_i q_i = 0$ , де  $q_i$  – ступені свободи вузлів,  $a_i$  – призначені коефіцієнти.

Create Constraint Equation		
Constraint Equation       Constraint Set 1       ID 1       Title       Color 8312       Palette       Layer 1       Coefficient       ·1       Node ID       DOF       TX       RX       Y       RZ	Select Constraint Definition to Edit           1Constraint on Surface         2Constraint on Node         3Constraint on Node	Select Type of Constr.
Multiple Nodes Delete <u>QK</u> Cancel a)	б)	в)



Командою Model→Constraint→Equation... викликається діалогова панель "Create Constraint Equation" (див. рис.6.5-а), на якій вказуються: ID формули; колір зображення зв'язків; рівень (Layer); значення коефіцієнта a; номер вузла; ступені свободи DOF, що

зв'язуються. Дається команда "Add" (додати) і вказана інформація з'являється у великому вікні діалогової панелі. Коли усі компоненти даної суми набрані, дається команда "ОК". Якщо у сумі є значна кількість вузлів з однаковими призначеннями (окрім їх номерів), то можна кнопкою "Multiple Nodes…" викликати стандартний діалог обирання вузлів. У FEMAP є обмеження для кількості членів у сумі: до 70. На рис.6.5-а зображено стан діалогового вікна після подачі команди "Add" перед командою "OK", тобто після формування рівняння TZ(4) - TZ(49) = 0, яке вказує, що переміщення вузлів 4 і 49 у напрямку координатної осі Z повинні бути однаковими.

Для повернення до попередньої ситуації є кнопка "Replace", для видалення непотрібних або помилково набраних компонентів суми - команда "Delete".

#### 6.1.2.5. Редагування або видалення граничних умов 1-го роду

Для редагування вже сформованого списку ГУ 1-го роду дається команда Modify→Edit→Constraint – Definition..., на панелі "Select Constraint Definition to Edit", яка з'явиться (див. рис.6.5-б), обирається потрібний варіант або всі варіанти (є кнопка "All"). Є й інша команда: Modify→Edit→Constraint – Individual..., яка викликає панель "Select Type of Constr..." (див. рис.6.5-в), де обирається потрібний варіант умов, дається команда "OK" та обираються об'єкти вказаного типу з ГУ 1-го роду. У обох випадках, якщо така модифікація можлива, одна за одною будуть з'являться відповідні діалогові панелі із заповненими полями, які можна редагувати. Але така можливість реалізується не завжди. Якщо таке редагування не вдалося, приходиться видаляти окремі групи ГУ. Є три варіанта: командою Delete→Model→Constrain – Definition... викликається діалогова панель "Select Constrain Definition(s) to Delete" (аналогічна зображеної на рис.6.5-б) зі списком варіантів ГУ; або командою Delete → Model → Constrain – Individual... викликається діалогова панель "Constrain List Options" (аналогічна рис.6.5-б, тільки замість радіокнопок – опції), обираються варіанти ГУ, що будуть видалятися; або командою Delete→Model→Constrain – Set... видаляється навіть повний список з ГУ.

#### 6.1.2.6. Контроль закріплення тіла

контролю введених ГУ 1-го роду потрібно за допомогою команди Для List→Model→Constraint – Definition... або List→Model→Constraint – Individual... викликати стандартну діалогову панель для обирання списків з ГУ (див. рис.6.5-б та рис.6.5-в), тому дії при обиранні необхідних варіантів ГУ описані вище. Після останньої команди "ОК" у вікні повідомлень (Messages) з'явиться відповідний список. Якщо він не поміщається у стандартну кількість рядків, необхідно її збільшити, як це описано у Розділі 1.5.

	Messages			
Femap with NX Nastran	Check Constraints			
	Constraint Factors for Set 1			
	Translation X =	2. Y =	1. Z =	8.
Include Nodal Permanent Constraints?	Rotation X =	128. Y =	128. Z =	128.
Yes No Cancel	Max Separation of X Constr	aints X = 0.	Y = 1.	Z = 0.
	Max Separation of Y Constr	aints X = 0.	Y = 0.	Z = 0.
	Max Separation of Z Constr	aints X = 1.	Y = 1.	Z = 0.
a)		б)		

Рис.6.6. Контроль закріплення тіла: а) – запитання щодо підключення постійних вузлових зв'язків; б) – результат перевірки умов закріплення тіла

Якщо умови закріплення приведені до вузлів (зокрема, за допомогою команди Model→Constraint→Expand...), можна застосувати автоматичний варіант контролю. Дається команда Tools → Check → Constraints..., дається відповідь на запитання (див. рис.6.6-а) щодо підключення для аналізу постійних вузлових зв'язків. У вікні повідомлень з'явиться звіт (див. рис.6.6-б). У рядках "Translation" та "Rotation" буде вказано загальну кількість заборонених або постійно зв'язаних ступенів свободи вузлів за переміщенням та обертанням відповідно. У сумі їх не повинно бути менше, ніж шість; причому у рядку "Translation" не повинно бути нулів. У рядку "Rotation" можуть бути нулі, навіть усі, оскільки обертання тіла можна запобігти забороною переміщень вузлів. Увага: якщо СЕ не враховує якісь DOF, то й при аналізу призначених умов закріплення на ці DOF не треба звертати уваги.

У трьох останніх рядках звіту показуються максимальні відстані між вузлами за напрямками **X**, **Y** і **Z**. **Увага**: якщо у *двох* стовпчиках одночасно усі значення (для напрямків **X**, **Y** або **Z**) близькі до нуля або нулі, то це неприпустима ситуація, окрім випадку, коли у рядку "**Rotation**" у напрямку зі *третьою* назвою – не нуль та коли ця **DOF** – значуща. Це тому, що всі нулі у стовпчику означають, що всі ці вузли лежать в одній площині; а всі нулі у двох стовпчиках – на одній осі. Отже, відносно цієї осі тіло може обертатися, якщо у рядку "**Rotation**" для цієї осі – нуль.

#### 6.1.3. Завдання силових граничних умов

#### 6.1.3.1. Завдання об'ємних силових граничних умов

На діалоговій панелі "Create Body Loads" (див. рис.6.7), яка викликається командою Model→Load→Body... (англ. Body – маса, тіло), можна визначити (окрім початкової температури тіла) об'ємні (потенційні) сили, що будуть діяти на все тіло. Вони можуть призначатися:

• у секції "Translational Accel / Gravity (length/time/time)" параметрами "Ax", "Ay" та/або "Az" як осьові компоненти вектора прискорення (у системі SI розмірність – м/c<sup>2</sup>), що виникає під дією цих сил (наприклад, прискорення вільного падіння);

• у секції "Rotational Acceleration (radians/time/time)" параметрами "Arx", "Ary" та/або "Arz" як компоненти кутового прискорення обертання (у системі SI розмірність – радіан/с<sup>2</sup>) відносно осей X, Y та/або Z. При цьому вважається, що тіло обертається відносно точки, координати якої задаються значеннями "X", "Y" та/або "Z" у секції "Center of Rotation";

Create Body Lo	ads	
Load Set 1	Load_01	
Translational Act	cel / Gravity (length/time/time)	Rotational Acceleration (radians/time/time)
Active	Time/Freq Dependence	Time/Freq Dependence
Ax 0,	0None 🔽 🕵	Arx 0, 0None 🗸 👧
Ay 0,	0None 🔽 😾	Ary 0, 0None 🖌 😽
Az -9.81	0None 🔽 🖍	Arz 0, 0None 🗸 🕵
- Rotational Veloc	ity (revolutions/time)	Center of Rotations
🗹 Acti <u>v</u> e	Time/Freq Dependence	Specify or Pick Location
Wx 0,	0None 🔽 🕵	× 0,
Wy 0,	0None 🔽 🖍	Υ 0,
Wz 0,	0None 🔽 🖍	Ζ 0,
Thermal		
🗹 Active Del	fault <u>T</u> emperature T 293,	Rotating Around Vector

Рис.6.7. Діалогова панель для введення граничних умов для усього тіла

• у секції "Rotational Velocity (revolutions/time)" параметрами "Wx", "Wy" та "Wz" як кількість обертів за прийняту одиницю часу (у системі SI розмірність – об/с) навколо осей X, Y та/або Z.

Кожне з таких навантажень може бути функцією часу (1..vs. Time) або частоти коливань (3..vs. Frequency), для чого є поля обирання функцій впливу та кнопки виклику діалогової панелі (див. рис.1.16) для створення функцій.

#### 6.1.3.2. Завдання статичних лінійних силових граничних умов

Статичні лінійні силові ГУ – це зосереджені сили, моменти та тиск. Відповідне ГУ задається за допомогою команди Model→Load: призначається тип об'єкта для прикладення ГУ (→Nodal..., →Nodal on Face..., інші) і обираються об'єкти; на діалоговій панелі "Create Loads on ... ", що з'являється (див. рис.6.4), обирається один з варіантів: "Force" (сила), "Force per Area" (сила на площині), "Force per Node" (сила у вузлі), "Moment" (момент), "Moment per Area" (момент на площині), "Moment per Node" (момент у вузлі) або "Pressure" (тиск. Увага: *додатне* значення тиску – тиск, що діє *у тіло*). Виконуються інші стандартні дії, розглянуті у Розділах 4.1.3 та 4.1.4.

# 6.1.3.3. Завдання силових граничних умов "болтового з'єднання"

Можна змоделювати болтове з'єднання з попереднім навантаженням у болті (тобто з силою затягування). Це можна робити для таких типів аналізу: Linear Static Analysis (лінійний статичний), Modal Analysis (модальний динамічний), Buckling (стійкість) і Advanced Nonlinear Analysis (Solution 601 – передовий нелінійний аналіз).

Болт у FEMAP 9.3 моделюється як один або декілька CE типу **BAR** або **BEAM** першого порядку апроксимації (не Parabolic).

Після створення відповідних СЕ можна заздалегідь створити болт-регіони. Команда Connect-Bolt Region... викликає панель "Bolt Region" (див. рис.6.8-а), де обираються або безпосереднью СЕ або лінії, з якими асоційовані СЕ: створюється болт-регіон з призначеною назвою (Title).

Bolt Region		X
ID 1	Color 20488 Palette	Layer 1
Title BoltRegion_0*		<< Add
Defined By Curves O Elements	Element 2 Element 3 Element 4	Multiple Delete Reset
Element 4		<u>Q</u> K Cancel
	<b>a</b> )	



Рис.6.8. Діалогові панелі: а) – створення болт-регіону; б) – завдання попереднього навантаження (Preload) у болтах регіону або окремих болтах

Попереднє навантаження у болті створюється командою Model→Load→Bolt Preload...: на діалоговій панелі (див. рис.6.8-б) обирається або "Bolt Region(s)" (регіон вже створений) або "Element(s)" (буде створюватися новий болт-регіон), задається величина (сила) попереднього навантаження у болті. Після команди "OK" залишилося обрати або існуючий болт-регіон, або СЕ для нового болт-регіону. Увага: якщо після застосування варіанта "Bolt Region(s)" із розв'язку буде видно, що попереднє навантаження реально було створено лише для одного CE (з найменшим номером у Bolt-регіоні), то необхідно відмовитися від регіонів та використовувати варіант "Element(s)" (напевно, у програмі є помилка).

**Примітка 6.5**. Якщо СЕ типу **BAR** або **BEAM** приєднуються (у вузлах) до СЕ типу **Solid**, вузли яких не враховують ступені свободи 4, 5 та 6, то необхідно у таких вузлах за допомогою команди **Modify→Update Other→Perm Constraint...** заборонити вказані ступені свободи, інакше буде фатальна помилка з номером 9137 (тіло є недостатньо закріпленим).

#### 6.1.3.4. Завдання силових граничних умов типу "нестислива рідина"

У FEMAP 9.3 з'явилися інструменти для завдання навантаження у вигляді приєднання до геометричної поверхні або поверхні СЕ деякого об'єму нестисливої рідини. У результаті FEMAP створює матрицю приєднаної маси. Такий тип навантаження підтримується для наступних типів крайових задач у NX Nastran 5.0 (див. табл.4.2): 103 (Modal Analysis), 107 ... 112 (Complex Modal Analysis та Dynamic Analyses), 129 (Nonlinear Transient Analysis), які будуть розглянуті в Розділі 7, та задачі типа 200 (Optimization).

Командою Connect→Fluid Region... викликається діалогова панель "Fluid Region" (див. рис.6.9-а).

У секції "Fluid Options" (опції рідини) є такі опції:

• "CSys" – система координат, повинна бути *декартового* типу: глобальною або спеціально створеною локальною, причому вісь **Z** повинна бути перпендикулярною до вільної поверхні рідини, оскільки вздовж цієї осі буде визначатися товщина шару рідини;

• "Z Free Surface" – відстань від початку координати до вільної поверхні рідини, повинна бути ≥ 0.0. Якщо початок координатної системи встановити "на дні", то опція визначає всю товщину рідини, якщо "вище дна", то – частину товщини. У такий спосіб можна відсікати "гарантовану" товщину шару рідини від змінюваної. Ще один варіант розглянуто у Розділі 7.2 (діє тільки для динамічного аналізу);

• "XZ Plane" та "YZ Plane" – вказує, який тип симетрії шару рідини пов'язаний з цими площинами: відсутня (0..None), симетрія (1..Symmetry) або кососиметрія (2..Antisymmetry).

Fluid Region		×	<ul> <li>Defined By</li> <li>Surfaces</li> <li>Elements</li> </ul>	
ID     1     Color     20488     Palette     Layer     1       Fluid Options     Defined By       CSys     0Basic Rectangular     Image: Surface Su	Title FluidRegion_01	<< Add Multiple	Element Face	
Fluid Density     1e-5     Surface     10       XZ Plane     0None     V     Positive Side       YZ Plane     0None     V	Region Options	Delete       Reset       OK       Cancel	Fluid Region Options Fluid Options Characteristic Length 0.	
1Symmetry 2AntiSymmetry			<u>D</u> K     Cancel	

a)

B) Рис.6.9. Діалогові панелі завдання силових ГУ типу "нестислива рідина"

У секції "Defined By" (визначення регіону) радіокнопками "Surfaces" або "Elements" визначаються геометричні поверхні та їхні сторони (у полі "Surface" та опцією "Positive Side") або СЕ та їхні поверхні (у полях "Element" та "Face", див. рис.6.9-б), з якими взаємодіє рідина. Список формується у стандартний спосіб за допомогою кнопок "<<Add", "Multiple...", "Delete" та "Reset".

Кнопкою "Region Options…" викликається панель "Fluid Region Options" (див. рис.6.9-в) з опціями:

• "Characteristic Length" – характерна довжина: взаємодією зі СЕ, які лежать за межами цієї величини, NX Nastran нехтує;

• "Exact Integration Factor" – фактор точного інтегрування. Якщо відстань між двома СЕ є меншою, ніж вказане значення, помножене на корінь квадратний з розміру (площі) великого СЕ, то у СЕ застосовується точне інтегрування. Інакше – для інтегрування використовується тільки центральна точка СЕ.

У разі присутності у моделі силових граничних умов типу "нестислива рідина" FEMAP у результатах формує дані з назвою "Fluid Pressure" (тиск рідини) при встановленні значень "1..Print Only" (\*.f06), "2..PostProcess Only" (\*.op2), "3..Print and PostProcess" (\*.op2 та \*.f06), або "5..Punch and PostProcess" (\*.op2) на панелі "NASTRAN Output Requests".

# 6.1.3.5. Завдання нелінійних силових граничних умов

У FEMAP можна задати у вузлах сили такі, що залежать від зміщення або швидкості руху обраного вузла.

Команда **Model\rightarrowLoad\rightarrowNonlinear Force** викликає діалогову панель, яку зображено на рис.6.10. У секторі "Relationship" (взаємозв'язок) є 4 варіанта таких зв'язків (див. табл.6.1): "Tabular Function" (відповідно до табличної функції, яка обирається зі списку створених раніше функцій у секторі "Options"); "Product of Two Variables" (від двох змінних); "Positive Variable to a Power" (степенева функція, при додатної змінної); "Negative Variable to a Power" (степенева функція, при негативної змінної).

Варіант у секторі Relationship	Формула (F=Сила, Х=Переміщення/Швидкість)
<b>Tabular Function</b>	$F_i(t) = Scale \cdot Table(X_j(t))$
<b>Product of Two Variables</b>	$F_i(t) = Scale \cdot X_j(t) \cdot X_k(t))$
Positive Variable to Power	$F_{i}(t) = \begin{cases} Scale \cdot [X_{j}(t)]^{Power}, \ якщо \ X_{j}(t) > 0\\ 0, \qquad $
Negative Variable to Power	$F_{i}(t) = \begin{cases} -Scale \cdot [-X_{j}(t)]^{Power}, \text{ якщо } X_{j}(t) < 0\\ 0, \qquad $

Таблиця 6.1. Визначення сили від зміщення або швидкості руху обраного вузла

Load Set 1 Load 01			
-	Apply Fo	rce To	
Lolor 10 Palette Layer 1	Node		
Relationship	DOF		
<ul> <li>Tabular Function</li> </ul>			
O Product of Two Variables	-Based O	n	
O Positive Variable to a Power	Node		
Negative Variable to a Power	DOF		
Options	Туре	0Displacement 🗸	]
Scale Factor	Node		
Power			
Table 0 None			Cancel

Рис.6.10. Діалогова панель завдання сили, що є залежною від зміщення або швидкості руху обраного вузла

У секторі "Apply Force To" вказуються номера вузла та його ступені свободи (вузол можна обрати курсором "миші" на робочому полі FEMAP), до яких сила буде прикладеною; у секторі "Based **On**" – теж номера вузла/вузлів та його/їх ступені свободи, а також величину (Туре), від якої сила буде залежати: 0..Displacement (зміщення) або 1..Velocity (швидкість).

Інші варіанти нелінійності, які можна реалізувати у FEMAP, пов'язані з геометричною або фізичною нелінійністю.

# 6.2. Завдання опцій та параметрів нелінійного аналізу

Коли у задачі передбачається будь-яка нелінійність, для кожного з наборів навантажень (активізувати командою Model→Load→Set...) потрібно задати опції та параметри нелінійного аналізу. Увага: при застосуванні модифікованого підходу Лагранжа (тип задачі 22...Advanced Nonlinear Static – див. Розділ 6.4) це робити не обов'язково.

Командою Model→Load→Nonlinear Analysis... викликається діалогова панель "Load Set Options for Nonlinear Analysis" (див. рис.6.11-а). На ній кнопкою "Default" спочатку встановлюються типові значення. Кнопкою "Сору..." можна з набору навантажень, де призначення вже зроблені, скопіювати дані для поточного набору.

У секціях панелі вказується:

• у "Solution Type" – тип задачі: статична (Static), повзучість (Creep) або еволюційна (Transient);

Load Set Options for Nonlinear Analysis	Load Set 1 Load 01
Load Set 1 Load_01 Solution Type O 006 O Chatter O Server O Type int	Arc-Length Solution Strategy Constraint Type 1Crisfield Max Diverging Conditions 3
Basic       Direction       Convergence Tolerances         Number of Increments       Displacement       0.001         Time Increment       Displacement       0.001         Max Iterations / Step       25       Work       1.E-7         Stiffness Updates       Solution Strategy Overrides       Arc-Length Method	Quasi-Newton Vectors     25       Min ArcLen Adjust Ratio     0,25     Max Line Searches / Iter     4       Max ArcLen Adjust Ratio     4,     Line Search Tolerance     0,5       Scale for Constraint Load     Max Bisections / Increment     5       Desired Iterations     12     Max Incremental Rotation     20,       Max Increments     20     Stress Fraction Limit     0,2
Iterations Before Update       5         Output Control       Full Newton-Raphson         Intermediate       2.ND         Output Every Nth Step       1         Advanced       Copy         Defaults       OK         Cancel	Additional Transient Options         Time Step Skip Factor       5         Steps for Dominant Period       Overall Struct Damping (G)         Bounds to Maintain Step       0.75         Elem Damp Freq (W3-Hz)       Elem Damp Freq (W4-Hz)         QK       Cancel
a)	ნ)



• у "Basic" – кількість часових кроків (Number of Increments), розмір часового кроку (Time Increment) та максимальну кількість ітерацій на кожному кроці (Max Iterations / Step). При лінійному статичному аналізі завжди робиться лише один крок: від початкового стану до кінцевого. При розв'язуванні нелінійної задачі всі навантаження, що задані, будуть прикладеними до тіла не відразу, а з наростанням однаковими частинами. Для цього вводиться внутрішній параметр з назвою **Time** (позначимо як  $\tau$ ), який змінюється від 0 до 1 за формулою  $\tau = n \cdot \Delta \tau$ , де n – номер поточного кроку навантаження,  $\Delta \tau = 1/N$ , а N – кількість таких кроків, яке вводиться у діалоговому полі "Number of Increments". Відповідно до цього серед результатів розрахунку буде N таблиць, у назві яких присутнє значення **Тіте**, для якого цей результат отримано. Якщо з якоїсь причини процес розв'язування задачі перервано (наприклад, фатальна помилка як результат виродження геометрії CE), то кількість таблиць буде меншою, ніж число N. Ця кількість може й перевищувати число N, якщо програма NX Nastran прийняла рішення про доцільність зменшення кроку навантаження (була задіяна адаптивна процедура);

• у "Stiffness Updates" – один з 5-ти методів (AUTO, ITER, SEMI, TSTEP, ADAPT) модифікування матриці жорсткості тіла (МЖ); а також кількість ітерацій (Iteration Before Update), через яку матриця буде модифікуватися. Якщо метод обрано невірно, автоматично буде встановлено той, що використовується "за замовчанням", тобто **0..Default**. У випадку нелінійної статичної задачі (Static) можна застосовувати AUTO, ITER або SEMI. У інших (нестатичних) – AUTO, TSTEP та ADAPT, причому у 0..Default використовується метод ADAPT, тобто з автоматичним вибором часового кроку. У методі AUTO МЖ оновлюється виходячи з оцінок збіжності різних чисельних методів (квазіньютонівського, з лінійною ітерацією, половинного поділу) та обиранням того з них, що дасть мінімальну кількість оновлень МЖ. Метод SEMI подібний методу АUTO, але оновлення МЖ обов'язково проводиться і на першої ітерації після зміни навантаження, що буває ефективно для високонелінійних процесів. Методи ITER та TSTEP проводять оновлення МЖ після кожної порції з кількості ітерацій, яка вказана у полі "Iteration Before Update", що також може бути ефективним для високонелінійних процесів, зокрема коли передбачається, що геометрія тіла у процесі деформування може різко змінитися (наприклад, в задачі про "проклацювання"). Метод TSTEP застосовується при нелінійному аналізі у часі (Transient);

• у "Output Control" – формування таблиць результатів на проміжних часових кроках (варіанти опції "Intermediate": 0..Default (за замовчанням), YES (виводити), NO (не виводити), ALL (на усіх кроках)) для типів задачі "Static" та "Creep" або через вказану кількість кроків (Output Every Nth Step) для типу задачі "Transient", коли значення "Intermediate" обрано як YES);

• у "Convergence Tolerances" – допуски (точність) для задоволення умов збіжності для навантажень (Load), переміщень (Displacement) та внутрішньої роботи (Work);

• у "Solution Strategy Overrides" – коректування процесу розв'язування глобальної нелінійної системи алгебраїчних рівнянь, яка породжується методом скінченних елементів.

Звичайно корегування роблять, якщо виникають проблеми у одержанні розрахунків. Це може бути обумовлено специфічними властивостями крайової задачі, тому загальних рекомендацій немає. Зокрема, метод "Arc-Length Method" формує величину часового кроку (та довантаження) з урахуванням інформації про переміщення вузлів тіла. Повний метод Ньютона-Рафсона (Full Newton-Raphson) дуже швидко сходиться, але потребує додаткового часу для створення додаткової матриці для повної матриці САР на кожній ітерації. Модифікований метод Ньютона-Рафсона (Modified Newton-Raphson) не потребує такої дії, але сходиться значно повільніше, тому для його прискорення можуть застосовуватися додаткові процедури: "Line Search" (лінійного пошуку), "Quasi-Newton" (квазіньютонівського прискорення) та/або "Bisection" (половинного поділу).

Кнопкою "Advanced…" викликається діалогова панель "Advanced Load Set Options for Nonlinear Analysis" (див. рис.6.11-б) для призначення додаткових параметрів, що корегують (тут не розглядаємо). Звичайно це потребує значного досвіду користувача.

Увага. Тільки деякі скінченні елементи можуть моделювати нелінійний статичний аналіз та аналіз еволюційних процесів, причому з особливостями, вказаними у таблиці (див. "Chapter 2. Elements for Nonlinear Analysis" у книзі "NX Nastran Basic Nonlinear Analysis. User's Guide", яка міститься у файлі .../FEMAP93/NastranHelp/NXNastran/nast/misc/doc/ docs/pdf/bas\_nonlinear.pdf):

UGS.F93

Тип СЕ	Особливості	Нелінійна пружність	Пружно- пластич- ність	Тільки гео- метрична неліній- ність
Spring	3-D демпфер з 6-тю сту- пенями свободи	+	-	_
Spring	осьовий в'язко-пружний зв'язок (модель Фойхта)	+	_	+
Rod, Tube	осьова деформація (кручення – лінійне)	+	+	+
Beam	пластичний шарнір у ко- жному кінці СЕ (центра- льна секція, поперечний зсув, кручення – лінійні)	+	+ (тільки пружно – ідеально- пластичний)	+
Plate (QUAD4, TRIA3)	<ol> <li>Shell та Plate: 112 шарів, поперечний зсув – лінійний;</li> <li>Plane Strain: MID2=-1 PARAM,NLAYER=1;</li> <li>Plane Stress: MID2=0, PARAM,NLAYER=1</li> </ol>	+	+	+
Plane strain, Axisymmetric (CQUADX, CTRIAX)	ізопараметричні	+ (гіперпруж- ність)	_	-
Solid (HEXA, 8 Nodes)	8 точок Гауса; функція напружень	+	+	+
Solid (HEXA, 20 Nodes)	ізопараметричні, 27 точок Гауса	+	+	+
Solid (PENTA, 6 Nodes)	6 точок Гауса; функція напружень	+	+	+
Solid (PENTA, 15 Nodes)	ізопараметричні, 21 точка Гауса; функція напружень	+	+	+
Solid (TETRA, 4 Nodes)	1 точка Гауса	+	+	+
Solid (TETRA, 10 Nodes)	4 точки Гауса	+	+	+
Solid (TETRA, 10 Nodes)	ізопараметричні, 5 точок Гауса	+	+	+

Більшість інших типів СЕ можуть включатися в нелінійну модель тіла за умовою, що вони залишаються лінійними на протязі усього аналізу. Найчастіше помилкове застосування СЕ у нелінійному аналізі пов'язано с використанням СЕ типу **Bar**, **Rigid** та **Gap**.

**Примітка 6.6**. Задача з *лінійними* властивостями матеріалу теж може розв'язуватися як і задача нелінійної пружності, якщо:

• у тілі будуть враховуватися значні переміщення. Наприклад, при моделюванні спіральної пружини;

• навантаження тіла буде перевищувати критичні значення. Це буде так звана закритична поведінка тіла, або задача про його стійкість (див. Розділ 6.3.6).

# 6.3. Моделювання статичних крайових задач про НДС тіл

Статичні крайові задач про НДС тіл можуть бути лінійно та нелінійно пружні, пружнопластичні, з урахуванням температурних деформацій та повзучості матеріалу. Окремі класи задач – задачі про стійкість тіл, про оптимізацію конструкцій, та про контакт тіл. Основні теоретичні відомості про крайові задачі про НДС тіл викладено у Додатках 5 та 6. Більшість дій, необхідних для створення моделі крайової задачі у FEMAP, розглянуто у Розділі 2 (створення геометричної моделі), Розділі 3 (створення скінченно-елементної моделі), Розділі 4 та Розділі 6.1 (загальні відомості про завдання початкових і граничних умов). Тому тут викладемо лише додаткові відомості, характерні для різних типів крайових задач.

# 6.3.1. Крайові задачі лінійної пружності та термопружності

Лінійна пружність – простіший варіант задачі. Для матеріалу достатньо задати модулі пружності. Якщо за результатами розрахунку буде оцінюватися запас міцності у тілі, то ще додатково потрібно ввести граничні напруження; якщо температурні деформації (термопружність) – коефіцієнт лінійного температурного подовження (див. Розділ 3.1). Про завдання початкових умов див. Розділ 6.2.1.1; ГУ 1-го роду – Розділ 6.1.2; силових граничних умов – Розділ 6.1.3. Крім того, для задачі термопружності необхідно ввести у початкові умови таблицю розподілу температури у тілі (див. Розділ 6.1.1), яку було отримано при попередньому розв'язуванні задачі теплопровідності.

Для запуску процесу розрахунку крайової задачі створюється завдання: дається команда Model→Analysis..., на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" ініціюється кнопка "New...", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) значення "1..Static" (тобто статична задача). Всі інші дії, пов'язані з запуском процесу розрахунку крайової задачі, вже описані в Розділі 4.2. Цей тип крайової задачі можна розв'язувати, крім NX Nastran, іншими аналізаторами, але розглядаємо тільки NX Nastran.

У процесі розв'язування задачі на екрані монітора можуть з'являтися повідомлення, що потребують відповіді "**Так**" або "**Ні**", попередження про деякі не фатальні помилки, а іноді – навіть фатальні. Наприклад, фатальну помилку викличе відсутність наборів початкових та/або граничних умов, недостатнє закріплення тіла тощо.

# 6.3.2. Крайові задачі нелінійної пружності для ізотропного матеріалу

Від формулювання задачі лінійної пружності відрізняються:

• завданням властивості *ізотропного* (і тільки!) матеріалу як нелінійного пружного (див. Розділ 3.1): на діалоговій панелі "Define Material – ISOTROPIC" на вкладці "Nonlinear" (див. рис.3.3-а) потрібно радіокнопкою обрати варіант "Nonlinear Elastic", у полі "Function Dependence", що з'явиться, – вказати на створену функцію (заздалегідь або за допомогою кнопки (), зліва внизу) нелінійної залежності напруження від деформації (типу 4..vs. Stress – діаграму деформування матеріалу, яка повинна бути заданою у 1-му та 3-му квадрантах, щоб моделювати різні властивості матеріалу при розтягу та стиску) або залежності від температури (типу 2..vs. Temperature);

• встановленням опцій нелінійної задачі командою Model→Load→Nonlinear Analysis... (див. Розділ 6.2). Спочатку кнопкою "Default..." потрібно встановити ті, що передбачені "за замовчанням" для варіанта типу задачі "Static", потім у діалоговому вікні "Number of Increments" – вказати кількість кроків навантаження (>0), у вікні "Max Iterations / Step" – максимальну кількість ітерацій на кожному кроці навантаження, а у вікні "Intermediate" – виводити чи ні проміжні результати; у секції "Convergence Tolerances" – точність розв'язування САР; у секції "Solution Strategy Overrides" – вказати інший метод розв'язування нелінійної САР (при бажанні). Увага: задана точність розв'язування нелінійної задачі може оказатися завищеною, що приведе до передчасного припинення процесу розв'язування задачі з фатальними помилками;

• створенням завдання: дається команда Model→Analysis..., на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" ініціюється кнопка "New...", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) значення "10..Nonlinear Static" (нелінійна статика) або "22..Advanced Nonlinear Static" (нелінійна статика, "передовий" аналіз – див. Розділ 6.3.8).

- 131 -

#### 6.3.3. Крайові задачі нелінійної пружності для матеріалу типу "гума"

Від формулювання задачі *нелінійної* пружності для ізотропного матеріалу розрізняється завданням на діалоговій панелі "**Material Type**" (див. рис.3.2-б) варіанта "**Hyperelastic**" та призначенням на діалоговій панелі "**Define Material – HYPERELASTIC**" потрібних властивостей матеріалу (див. рис.6.12-а та Розділ Д5.1.4.3 Додатку 5).

Define Materia	al - HYPEREL <i>I</i>	STIC				×
ID 2	<u>T</u> itle		<u>C</u> olor 55	Palette	Layer 1	Туре
General Phase	e					
Distortional De	eformation Consta	nts ( <u>Aij</u> ) 2	2	4	5	
0 0.0	0,	0,	0,	4 0,	0,	
1 0,	0,	0,	0,	0,		
2 0,	0,	0,	0,			
3 U, 4 O,	0,	U,				
5 0,						
 	formation Constar	nts (Di)			1	
0,	0,	0,	0,	),	Therm <u>E</u> xp Mass Densitu	0,
Strain Energy	Polynomial Order	(0=Default)			Damping	0,
Disto	o <u>r</u> tional U		olumetric U		Re <u>f</u> Temp	0,
Simple	Equibiaxial	Simple Shear	Pure Shear	Pure Vol		
0	l ension	0	0	Compression		
<b>f</b> xy Loa	a <u>d S</u> aʻ	/e	Сор <u>у</u>		<u>o</u> k	Cancel
			a)			

Рис.6.12. Діалогові панелі введення властивостей матеріалу:

a) – гіперпружного типу "гума"; б) – пружно-пластичного для моделі Друкера-Прагера

Увага: не усі типи СЕ можуть моделювати такий матеріал. У "Help" рекомендують перевіряти це перед застосуванням бажаного типу СЕ.

У секції "Distortional Deformation Constants (Aij)" задаються компоненти матриці  $A_{ij}$ , причому  $A_{00} = 0$ , а в секції "Volumetric Deformation Constants (Di)" – компоненти  $D_i$ .

Для неогуківського матеріалу – тільки  $A_{10}$  та  $D_1$ ; для лінійної моделі Муні-Рівліна –  $A_{10}$ ,  $A_{01}$  та  $D_1$ . Для більш точних моделей потрібно ввести й інші компоненти, а також у секції "Strain Energy Polynomial Order (0=Default)" – величини в полях "Distortional" та "Volumetric", які вказують на ступені апроксимаційних поліномів: від 0 до 4 (0 – лінійний, 1 – квадратичний, …) для частин функціонала пружної енергії, що описують "викривлення" та зміну об'єму відповідно.

Є й інші варіанти. Якщо на панелі "Define Material" ініціювати кнопку "Туре…" та обрати "Other Types", у списку "Material Type" можна знайти п'ять варіантів гіперпружного матеріалу: від 501.. до 505.. (докладніше – у "Help", а саме у розділі FEMAP→Commands→4. Finite Element Modeling→4.2 Creating Finite Elements Entities→4.2.3 Model, Material→4.2.3.6 Other Types...), причому ці моделі можна застосовувати лише для типів задач 601 та 701 (див. табл.4.2).

Є ще один варіант. За допомогою функції типу 4..vs. Stress можна задати залежності напружень від деформацій: Simple Ten/Comp (простий розтяг/стиск), Equibiaxial Tension (двовісний розтяг), Simple Shear (простий зсув), Pure Shear (чистий зсув), Pure Vol Compression (чистий об'ємний стиск).

Оскільки переміщення та деформації – значні та дуже значні, то при прикладенні силових навантажень у відповідних місцях необхідно задати їх залежними від зміщення точки прикладення (див. Розділ 6.1.3.5).

При створенні завдання, на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" (викликається командою Model→Analysis...) ініціюється кнопка "New...", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) значення "10..Nonlinear Static" (нелінійна статика) або "22..Advanced Nonlinear Static" (нелінійна статика, "передовий" аналіз – див. Розділ 6.3.8).

При цьому рекомендують обирати ітераційний метод розв'язування системи алгебраїчних рівнянь (встановити у полі "Iterative Solver" на діалоговій панелі "NASTRAN Executive and Solutions Options", див. рис.4.15-а).

# 6.3.4. Крайові задачі пружно-пластичності

Від формулювання задачі нелінійної пружності для ізотропного матеріалу розрізняється завданням на діалоговій панелі "Define Material – ISOTROPIC", на вкладці "Nonlinear" (див. рис.3.3-а) у секції "Nonlinearity Type" властивості матеріалу як нелінійного з *пластичними* деформаціями: "Elasto-Plastic (Bi-linear)" або "Plastic", див. Розділ 3.1.

Тут нагадаємо, що потрібно обрати критерій плинності матеріалу (зі списку "Yield Criterion"), обов'язково задати величину межі плинності матеріалу (Initial Yield Stress) для критеріїв плинності "0..fon Mises" та "1..Tresca"; або значення "2\*Cohesion" (подвоєне значення коефіцієнта зчеплення) та "Friction Angle" (кут внутрішнього тертя) для критеріїв плинності "2..Mohr-Coulomb" та "3..Drucker-Prager" (для матеріалів типу грунтів). Також потрібно задати модуль лінійного зміцнення (Plasticity Modulus, *H*) для пружно-пластичного матеріалу з кусково-лінійною апроксимацією (Elasto-Plastic, Bi-Linear) або (для випадку "Plastic") обрати у полі "Function Dependence" функцію нелінійної залежності напруження від деформації (типу 4..vs. Stress) – діаграму деформування матеріалу (заздалегідь створену, або за допомогою кнопки (). У полі "Hardening Rule" потрібно обрати модель зміцнення матеріалу; "0..Isotropic", "1..Kinematic" або "2..Isotropic+Kinematic". Кнопка "Extended Material Model..." призначена для врахування впливу температури або швидкості деформування або обох факторів одночасно на межу плинності (підключенням функції 2..vs.Temperature та/або 9..vs.Strain Rate) для критерію плинності "0..fon Mises", а також викликає діалогову панель "Extended Drucker-Prager Material" (див. рис.6.12-б).

Увага: при розв'язуванні задач з ґрунтами бажано враховувати гравітаційне тяжіння (задавати у вигляді прискорення вільного падіння, що діє у всьому об'ємі, див. рис.6.7).

У UGS.F93 у випадку підключення до завдання довільної кількості наборів закріплень та навантажень ("**MultiSet…**") всі такі комбінації прикладаються до тіла *послідовно*, причому значення з попереднього розв'язку вважаються початковими для наступних розв'язків.

Тому, якщо потрібно розв'язати крайову задачу пружно-пластичності з умовами повного або часткового розвантаження після активного пружно-пластичного навантаження, то потрібно створити необхідну кількість наборів навантажень, останній з яких задає умови розвантаження, причому для набору з умовами розвантаження теж необхідно встановити опції нелінійної задачі (командою Model→Load→Nonlinear Analysis...). Потім при створенні завдання для розрахунку потрібно підключити до завдання всі ці набори навантажень: на панелі "Analysis Set Manager" застосувати кнопку "MultiSet…", потім послідовно обрати набори: один або більше – закріплень (Constraint) та всі – навантажень.

Можна розв'язувати задачу при малих або значних (встановлена опція "LGDISP" на панелі "NASTRAN Bulk Data Options", див. рис.4.15-б) зміщеннях (геометрична нелінійність). Нагадаємо, що при урахуванні геометричної нелінійності ще можна застосовувати опції "LANGLE" та "LGSTRN" (див. Розділ 4.2.6).

При створенні завдання, на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" (викликається командою Model→Analysis...) ініціюється кнопка "New...", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) значення "10..Nonlinear Static" (нелінійна статика) або "22..Advanced Nonlinear Static" (нелінійна статика, "передовий" аналіз – див. Розділ 6.3.8).

#### 6.3.5. Крайові задачі повзучості

Ці задачі – еволюційні, коли деформації у тілі (та напруження) залежать від часу.

Від формулювання задачі нелінійної пружності відрізняється:

• завданням на вкладці "Creep" (див. рис.3.3-б) діалогової панелі "Define Material – **ISOTROPIC**" одного з трьох варіантів опису властивостей матеріалу при повзучості (див. Розділ 3.1);

• створенням двох ідентичних наборів навантаження (створити один набір, командою **Model\rightarrowLoad\rightarrowCopy... зробити його копію);** 

• для першого набору навантаження (призначити активним за допомогою команди Model→Load→Set...) завданням на діалоговій панелі "Load Set Options for Nonlinear Analysis" (викликається командою Model→Load→Nonlinear Analysis...) варіанта "Static" та значень у активних полях та хоча б у одному полі "Convergence Tolerances";

• для другого набору навантаження (призначити активним) завданням на тій же діалоговій панелі варіанта "Сгеер", аналогічних значень у активних полях та додатково кількість часових кроків "Number of Time Steps" і розмір часового кроку у полі "Time Increment". Увага: повний час моделювання тіла в умовах повзучості буде визначатися результатом перемноження величин полів "Number of Time Steps" та "Time Increment". Оскільки у програмі застосовується алгоритм автоматичної корекції часового кроку (у бік зменшення, коли це потрібно з умов стійкості розв'язку та погодженості просторово-часової сітки), то результати розрахунків звичайно мають більшу кількість таблиць, ніж це задається у полі "Number of Time Steps".

Увага: всі інші дані цих двох наборів навантаження повинні бути ідентичними.

Відповідно до завдання, спочатку буде розв'язана звичайна крайова задача про статичне навантаження, а потім – задача повзучості, з урахуванням досягнутого (у першій задачі) рівня напружень.

При створенні завдання на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" (викликається командою Model-Analysis...) ініціюється кнопка "New...", на панелі "Analysis Set" обирасться у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) значення "10..Nonlinear Static" (нелінійна статика) або "22...Advanced Nonlinear Static" (нелінійна статика, "передовий" аналіз – див. Розділ 6.3.8).

#### 6.3.6. Крайові задачі про пружну стійкість тіл

Перш ніж моделювати таку задачу, доцільно ознайомитися з викладеним у Розділі Д5.2.7 Додатка 5. У всякому разі потрібно мати на увазі, що вважається, що форми втрати стійкості – саме такі, як і власні форми коливань (підхід Ейлера). Тому алгоритм буде знаходити одну або декілька власних частот та форм коливань, а це потребує значної кількості дій.

Усі типи СЕ можуть застосовуватися, але є такі обмеження:

• матеріал – тільки лінійно-пружний;

• щоб мати задовільну точність, СЕ типу **CURVED BEAM** не повинні перекривати дугу кола більшу, ніж 15 градусів;

• вісесиметричні СЕ моделюють тільки вісесиметричні складові критичного навантаження и форми втрати стійкості, які звичайно не є найнижчими;

• двовимірні СЕ (ПНС і ПДС) моделюють тільки двовимірні складові критичного подовжнього навантаження и форми втрати стійкості, які звичайно не є найнижчими.

Від моделювання задач лінійної пружності відрізняються тим, що:

• властивості матеріалу повинні мати, окрім модулів пружності, ще одну характеристику: густину (Mass Density, див., наприклад, рис.3.2-а);

• при створенні завдання для розрахунку (дається команда Model->Analysis..., на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" ініціюється кнопка "New..."), на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) значення "7..Buckling" (стійкість);

• у розділі "Options" панелі "Analysis Set Manager" з'являться два підрозділи: "NASTRAN Modal/Buckling" та "NASTRAN ModalXYPlot", які настроюються за допомогою діалогових панелей "NASTRAN Bulking Analysis" та "NASTRAN XY Output for Modal Analysis" відповідно (див. рис.6.13);

• на діалоговій панелі "NASTRAN Bulking Analysis" (див. рис.6.13-а) у секції "Real Solution Methods" потрібно обрати один з методів (Lanczos, Inverse Power або Inverse Power/Sturm) для знаходження декількох власних частот (форм втрати стійкості), кількість яких встановлюється у полі "Number Desired" секції "Eigenvalues and Eigenvectors". У секції "Range of Interest" у полях "From" та "To"можна вказати діапазон власних частот, який цікавить користувача. Ще можна змінити спосіб збирання матриці мас (Default, Lumped (розподілена) або Coupled (конденсована));

ASTRAN Buckling Analysis			
Skip ElGx	Method	ID 1	
Real Solution Methods	Range of Interest	[manimum	
◯ <u>G</u> ivens	From		NASTRAN XY Output for Modal
Modified Givens			
O In <u>v</u> erse Power	IO U,		Output Requests
Inverse Power/Sturm	Eigenvalues and Eigenvectors		Summary
○ <u>H</u> ouseholder	Number Estimated	0	Modal Participation Factors
O Modified Householder	Number Desired	1	Modal Effective <u>M</u> ass
⊙ Lanc <u>z</u> os	Hamber Desired		Modal Effective <u>W</u> eight
Complex Solution Methods	Normalization Method	Mass	Modal Effective Mass Fraction
OHessenberg	O Mass Node ID 0	💿 Default	Reference <u>N</u> ode 0
Complex Inverse Power	Max	Lumped	
○ Complex Lanczos		Coupled	Nevt OK
Solution Type	Complex Solution Options	Maul	
O Direct	Convergence 0,		
	Region Width 0,		
	Overall Damping (G)		
	a)		б)

Рис.6.13. Діалогові панелі для настроювання: а) – аналізу втрати стійкості; б) – виводу інформації у допоміжний файл \*. f06

• на діалоговій панелі "NASTRAN XY Output for Modal Analysis" (див. рис.6.13-б) у секції "Output Request" можна ініціювати опції "Summary", "Modal Participation", "Modal Effective Mass", "Modal Effective Weight" та "Modal Effective Mass Fraction", які вказують, які відомості виводити у допоміжний файл \*.f06. Якщо у полі "Reference Node" вказати номер вузла, що існує в моделі, то відомості будуть виводитися у системі координат цього вузла (інакше – у декартовій системі);

• серед результатів розрахунку є один набір результатів статичного розрахунку з назвою "NX NASTRAN Case 1" та стільки наборів результатів розрахунків на стійкість, скільки призначено у параметрі "Number Desired" або відповідають вказаному діапазону власних частот. Їх назви починаються зі слова Eigenvalue, потім – номер критичного стану, потім – значення параметра  $\beta$ , наприклад, "**3..Еigenvalue 2 1.917812**". Критичне навантаження дорівнює прикладеному, помноженому на  $\beta$ . Тому, якщо деякі значення  $|\beta|$  менше одиниці, то це означає, що задане навантаження тіла перевищує відповідні критичні навантаження. Якщо  $\beta$  – від'ємний, то це вказує на протилежний напрямок діючих на тіло навантажень.

Результати розрахунків доцільно переглядати у режимі "Deformed View" (переглянути форми втрати стійкості).

Примітка 6.7. Оскільки форми втрати стійкості утворюються на основі узагальненої проблеми про власні форми коливань тіла, причому у NX Nastran до уваги беруться тільки згинальні форми, то усі силові навантаження, що не відповідають відповідним схемам навантаження тіла, будуть проігноровані.

Примітка 6.8. Після проведення такого розрахунку часто виникає бажання отримати більш докладну інформацію про поведінку тіла після втрати стійкості. Її можна отримати,

якщо провести розрахунок тіла у варіанті нелінійного статичного аналізу (див. Розділ 6.3.2) з навантаженням, яке дещо перевищує критичне. Матеріал можна задати як лінійно-пружний, нелінійно-пружний або пружно-пластичний. При цьому досить часто необхідно додатково ввести хоча б незначну силу, "що збурює", або незначний дефект геометрії тіла, щоб викликати втрату стійкості тіла (звичайно при дещо нижчих рівнях навантаження, ніж у ідеальних умовах, тобто буде змодельована більш реалістична ситуація). Це потрібно робити тоді, коли нелінійний аналіз не виявив втрату стійкості конструкції. Якщо передбачається, що геометрія тіла у процесі нелінійного статичного аналізу може різко змінитися (наприклад, у задачі про "проклацювання", яка є різновидом задач про втрату стійкості тіла, див. Розділ Д5.2.7 Додатка 5), то у секції "Stiffness Updates" (див. рис.6.11-а) необхідно обрати метод 2..ITER та у полі "Iteration Before Update" ввести число 1, тобто зажадати оновлення матриці жорсткості САР після кожної ітерації. Результати нелінійного статичного аналізу доцільно переглядати у вигляді кривих залежності обраної функції (переміщення, напруження, ...) у вузлі (або СЕ) від внутрішнього параметра Тіте (траєкторія переміщень вузла, історія зміни напружень у вузлі, ...).

Примітка 6.9. Якщо при формулюванні завдання ввести значення параметра BUCKLE=2 (тобто PARAM, BUCKLE, 2, див. Розділ 4.3.2), то буде проведено нелінійний аналіз про стійкість тіла із застосуванням будь-якого метода розв'язування нелінійної САР (не тільки **2..ІТЕR**).

Увага: крайові задачі про пружну стійкість тіл мають значну специфіку, тому при їх моделюванні потрібно чітко представляти собі, які граничні умови прикладати, а також проводити ретельну перевірку та осмислення отриманих результатів.

# 6.3.7. Крайові задачі про оптимізацію конструкції

У NX Nastran peaniзовано ітераційний алгоритм, в якому підбирається один з вказаних параметрів СЕ типу **ROD**, **BAR** або **PLATE** у такий спосіб, щоб мінімізувалася цільова функція. У NX Nastran 5.0 є лише одна цільова функція: Minimize Weight, тобто мінімальна вага тіла.

Якщо в оптимізації беруть участь не всі СЕ, то спочатку потрібно для таких СЕ призначити нову "Property", але з тими же значеннями (створити нову "Property" за допомогою кнопки "Copy…", після команди Modify→Update Elements→Property ID обрати CE та призначити їм нову "Property").

Потім – перевірити (або призначити) у секції "Limit Stress" діалогової панелі для завдання властивостей матеріалу (команда Model→Material... або Modify→Edit→Material...) граничні напруження при розтягу (Tension), стиску (Compression) та зсуві (Shear).

Наступна дія: командою Model→Optimization... викликати діалогову панель "Design Optimization" (див. рис.6.14). Призначення ведуться послідовно у трьох секціях. У секції "Goal – Design Objective" (радіокнопка "Goal" – мета) обирається цільова функція та вказується обмеження у кількості ітерацій (Max Design Cycles).

У секції "Vary – Design Variables" (змінні проекту, радіокнопка "Vary") обирається геометричний параметр СЕ, за рахунок змінювання якого буде проводитися оптимізація: для СЕ типу ROD – Area, Torsion Constant; для BAR – Area, I1, I2 (головні моменти інерції), Torsion Constant; для PLATE – Thickness, тобто товщина (про параметри див. табл.3.2). Також вказується ID (номер) тієї "Property", який мають СЕ, що будуть приймати участь у процесі оптимізації; границі зміни розмірів (Maximum та Minimum), причому можна застосовувати конкретні значення (Value) або відсотки відхилення від вихідного значення (Percent); крок зміни в ітераціях (Change/Iter), причому нульове значення вказує на автоматичний вибір цього кроку програмою. Коли усі призначення для обраного ID "Property" зроблені, потрібно додати їх у список кнопкою "<<Add". Для редагування цього списку є кнопки "Delete" та "Reset", а для внесення змін у раніше створені дані – кнопка "<<Edit".

У секції "Limit – Design Constraints" (радіокнопка Limit) для кожної "Property" зі списку "Response" обирається характеристика напружено-деформованого стану (функція), на основі якої буде проводитися оптимізація, вказуються максимальні та мінімальні (Махі**mum**, **Minimum**) її значення, що допускаються (незаповнене значення дорівнює нулю). Доступні ті же кнопки з тими же функціями. Кнопка "<<**Multiple**" дозволяє *одночасно* обрати декілька "**Property**", які з'являться у списку з однаковими параметрами оптимізації, після чого ці параметри можна редагувати та вносити зміни за допомогою кнопки "<<**Edit**".

При створенні завдання для розрахунку (дається команда Model→Analysis..., на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" ініціюється кнопка "New..."), на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) значення "8..Design Optimization" (оптимальне проектування). Якщо для задачі було сформовано декілька наборів навантажень або закріплень, то буде активною кнопка "MultiSet..." – для створення багатоваріантного завдання для проведення оптимізації.

Нові значення параметрів СЕ, за рахунок змінювання яких була проведена оптимізація, поміщаються у таблицю результатів розрахунків. Зокрема, для СЕ типу РLATE це буде таблиця "...Plate Top Fiber" (верхній шар пластини, тобто половина її товщини). Інформація про те, як змінювалися цей та деякі інші параметри в ітераціях, поміщається у таблиці, які можна переглянути у вигляді функції: команда View→Select, радіокнопка "XY of Function", кнопка "Model Data...", список "Select" у секції "Function", функції "1..Design Objective" (maca), "2...Max Value of Constraint" (максимальна реакція зв'язків), "3.. Prop 1: Thickness" (товщина для "Property 1"), "3..Prop1: Rod Area" (площа перерізу стержня)

Design Optimization	
<u>◯ G</u> oal <u>◯ V</u> ary ⊙ <u>L</u> imit	Goal - De <u>s</u> ign Objective
Property 5 0. <vonmises stress<0.<="" th=""><th>Minimize Weight 💉</th></vonmises>	Minimize Weight 💉
	Max Design Cycles 5
	Vary - Design Variables
	Attribute Rod: Area 💌
	Property
	Maximum
	Value     Minimum
	Change / Iter %
	Limit - Design Constraints
	Response Node: X Displacement 💌
	Node
	Maximum
<pre>&lt;&lt; Add &lt;&lt;&lt; Edit &lt;&lt;&lt; Multiple</pre>	Minimum
<u>D</u> elete <u>R</u> eset	<u> </u>

Рис.6.14. Діалогова панель для введення параметрів оптимізації

або інші подібні (залежать від типу СЕ та умов оптимізації). Мінімізовані значення автоматично округляються до значень зі стандартного ряду розмірів.

Після відповідної зміни розмірів СЕ у "**Property**" доцільно провести звичайний (статичний) розрахунок для оновленої геометрії тіла.

# 6.4. Застосування модифікованого підходу Лагранжа для розв'язування крайових задач із всіма видами нелінійності

Будемо вважати, що при створенні завдання на розв'язок крайової задачі на діалоговій панелі "Analysis Set Manager" (викликається командою Model→Analysis...) була ініційована кнопка "New...", на панелі "Analysis Set" – у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) обрано замість "10..Nonlinear Static" значення "22..Advanced Nonlinear Static".

Відзначимо, що у варіанті "10..Nonlinear Static" застосовується повний підхід Лагранжа (Total Lagrange – TL), а у "22..Advanced Nonlinear Static" – модифікований підхід Лагранжа (Update Lagrange – UL).

Останній, відносно новий варіант аналізу, реалізовано у FEMAP 9.3 лише для NX Nastran, хоча є програми, в яких теж реалізовано UL-підхід, наприклад, ANSYS, LS-DYNA3D, MARC тощо, і з якими FEMAP 9.3 має інтерфейс.

**Увага**: у варіанті "**22..Advanced Nonlinear Static**" можуть застосовуватися не всі типи СЕ та матеріалів, а тільки у відповідності з таблицею 4.3.

У розділі "Options" з'являється підрозділ "NASTRAN Advanced Nonlinear Solver", який настроюється за допомогою діалогової панелі "NXSTRAT Solver Parameters" (див. рис.6.15).

#### 6.4.1. Опції діалогової панелі "NXSTRAT Solver Parameters"

У секції "Time Steps" (часові кроки) уводяться:

- "Number of Steps" (кількість часових кроків);
- "Time Increment" (часовий крок);
- "Output Every Nth Step" (виводити результати на кожному N-му кроці).

Кнопкою "Extra Time Steps" (внизу панелі) можна викликати панель "Advanced Nonlinear Time Steps" (див. рис.6.15-б), на якій можна вказати до 10-ті конкретних значень для часових кроків і часу виводу результатів.

У секції "Analysis Control" можна змінити метод розв'язування системи алгебраїчних рівнянь на: "0..Direct Sparse" (прямий, розріджена матриця – за замовчанням), "1..Multigrid" (багатосітковий) або "2..3-D Iterative" (ітераційний тривимірний). Якщо обрано варіант "1..Multigrid", то стають активними опції секції "Multigrid Solver", а саме: "Max Iterations" (максимальна кількість ітерацій); "EPSIA Tolerance", "EPSIB Tolerance" та "EPSII Tolerance" (точності збіжності).

NXSTRAT Solver Parameters					
Time Steps	Analysis Options				
Number of Steps 1	Shell Thickness Integ 2Gauss Integrati 💌				
Time Increment 1,	Shell DOF Angle 5,				
Output Every Nth Step 1	Element Death Time Delay 0,				
Analysis Control	Matrix Stabilization Factor 1,E-12				
Solver 0Direct Sparse	u/p Formulation for Almost Incompressible				
Multiarid Solver	Displacements Applied to Deformed				
Max Iterations 1000	Loads Change with Deformation				
EPSIA Tolerance 1,E-6	Translation Options				
EPSIB Tolerance 1,E-4	DRAD and D. Could Divid Lange Flag.				
EPSII Tolerance 1,E-8					
Restart Options	RBE2 opt USmall Rigid, Large Flex				
Restart Previous Analysis	Rigid Elem Spring U,				
Restart at Time 0,	Rigid Elem Youngs Mod U,				
Results Frequency 0	Rigid Elem Effective Area 0,				
Other Parameters					
Num Subgroups 1	Mass Formulation				
Solid Results in Material CSys	<ul> <li>Consistent</li> <li>Lumped</li> </ul>				
Next Extra Time Steps	<u>D</u> K Cancel				
	a)				

Advanced Nonlinear Time Steps 🛛 🗙						
	Num Steps	Time Increment	Output Interval			
1	1	1,	1			
2	0	0,	1			
3	0	0,	1			
4	0	0,	1			
5	0	0,	1			
6	0	0,	1			
7	0	0,	1			
8	0	0,	1			
9	0	0,	1			
10	0	0,	1			
		<u></u> K	Cancel			

б)

Рис.6.15. Діалогові панелі для настроювання: а) – параметрів аналізатора; б) – часових кроків

У секції "Restart Options" (опції рестарту) можна активувати опцію "Restart Previous Analysis" (перезапустити попередній аналіз) та задати час рестарту у полі "Restart at Time" (повинен дорівнювати часу завершення попереднього розв'язку або 0.0, тоді для рестарту буде використовуватися останній розв'язок). Значення у полі "Results Frequency" вказує, як часто зберігати/прикладати результати для рестарту. Якщо задати 0, то це теж само, як і 1; якщо задати <0, то результат буде прикладатися.

У секції "Other Parameters" опція "Num Subgroups" вказує, скільки груп СЕ з однаковими "Property" створено для більш ефективної обробки (має сенс, якщо кількість СЕ у групах перевищує 1000). Активна опція "Solid Results in Material CSys" вказує, що для СЕ типу Solid результати будуть виводитися в системі координат матеріалу (інакше – в тій системі координат, в якій описаний СЕ).

Секція "Analysis Controls" має декілька опцій:

• "Shell Thickness Integ" (можна обрати схему інтегрування у СЕ типу Shell в tнапрямку; за замовчанням – схема Гауса з 2-ма точками для інтегрування);

• "Shell DOF Angle" (5 або 6 ступенів свободи призначати для вузлів середньої поверхні оболонкового CE); • "Element Death Time Delay" (час "вмирання" СЕ з дуже викривленою внаслідок деформування геометрією (замість миттєвого видалення таких СЕ з матриці жорсткості системи): це часто дозволяє покращити збіжність у одержанні результатів аналізу);

• "Matrix Stabilization Factor" (чи використовувати стабілізаційний фактор для матриці жорсткості системи, його розмір);

• "u/p Formulation for Almost Incompressible" (використовувати u/p формулювання для CE з матеріалами, коефіцієнт Пуассона яких ≥ 0.48 (завжди використовується для CE з гіперпружним матеріалом));

• "Displacements Applied to Deformed" (застосовувати задані переміщення до початкової або здеформованої (ініціювати опцію) конфігурації);

• "Loads Change with Deformation" (задані тиск та інерційні сили залежать від деформацій тіла – при встановленої опції LGDISP, див. Розділ 4.2.6).

У секції "Translation Options" (опції перетворень) є такі опції:

• "9/27-Node Element Conversion". При встановленні проводиться перетворення СЕ: двовимірні з 3-ма ребрами та 6-тю вузлами – у 7-ми вузлові; з 4-ма ребрами та 8-ма вузлами – у 9-ти вузлові; тривимірні СЕ з 10 вузлами – у 11-ти вузлові, з 20 вузлами – у 27 вузлові;

• "RBAR Opt" та "RBE2 Opt" (опції для СЕ FEMAP типу Rigid) зі списками: "0..Small Rigid, Large Flex" – малі зміщення, великий згин; "1..Rigid" – жорсткий зв'язок; "2..Flexible" – гнучкий СЕ (Spring або Beam); "3..Use Springs" – СЕ типу Spring;

• "Rigid Elem Spring" – жорсткість СЕ, які моделюють СЕ RBAR та RBE2 (див. вище). Якщо оставити значення 0.0, то NX Nastran призначить значення жорсткості як результат перемноження максимального значення модуля Юнга моделі на найбільший розмір моделі. Якщо в моделі немає матеріалів, то буде призначено значення 10<sup>12</sup>;

• "Rigid Elem Young's Mod" – модуль Юнга матеріалу СЕ, які моделюють СЕ RBAR та RBE2 (див. вище). Якщо оставити значення 0.0, то NX Nastran призначить значення як 100 максимальних значень модуля Юнга моделі. Якщо в моделі немає матеріалів, то буде призначено значення 10<sup>12</sup>;

• "Rigid Elem Effective Area" – площа круглого поперечного перерізу СЕ, які моделюють СЕ RBAR та RBE2 (див. вище). Якщо оставити значення 0.0, то NX Nastran призначить значення як 0.01 від найбільшого розміру моделі;

• "Rigid Elem Critical Length" – критична довжина СЕ, які моделюють СЕ RBAR та RBE2 (див. вище) у випадку обирання "1..Rigid" або "2..Flexible". Якщо оставити значення 0.0, то NX Nastran призначить значення як  $10^{-6}$  максимального розміру моделі у випадку "1..Rigid" та як  $10^{-3}$  максимального розміру моделі у випадку "2..Flexible".

У секції "**Mass Formulation**" можна обрати тип матриці мас, яка буде використовуватися в динамічному аналізі: "**Consistent**" (розподілена) або "**Lumped**" (конденсована).

# 6.4.2. Опції діалогової панелі "NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters"

Ще у розділі "Options" з'являється підрозділ "NASTRAN Advanced Nonlinear Iteration/Convergence", який настроюється за допомогою діалогової панелі "NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters" (параметри та збіжності NXSTRAT, див. рис.6.16).

У секції "Analysis Control" зі списку "Auto Increment" (автоприріст) вибирається: "0..Off" (відключено); "1..On" (включена схема автоматичного прирощення – ATS); "2..Load-Displacement" (включена схема автоматичного прирощення с контролем зусилля-переміщення – LDC). Також можна встановити опцію "Continue of Non-Positive Definite" – продовжувати у випадку не позитивності матриці жорсткості (це можливо при великих викривленнях CE). Увага: якщо у полі "Auto Increment" встановлено "1..On" або "2..Load-Displacement", то для контактної задачі це те ж саме, що ця опція ("Continue of Non-Positive Definite") є встановленою.

У випадку обирання у секції "Analysis Control" зі списку "Auto Increment" варіанта "1..On" стає активною секція "Auto Time Stepping". Вона має такі опції:

• "Smallest Step Divisor" – найменший дільник кроку, потрібно задавати >1. Схема ATS не зможе застосовувати кроки навантаження, менші ніж величина, що задана у полі "Time Increment" (див. рис.6.15-а), поділена на значення "Smallest Step Divisor";

• "Largest Step Multiplier" – найбільший множник кроку, потрібно задавати >1. Це антипод попереднього значення;

• "Step Size Flag" – прапор розміру кроку: "0..Automatic" (призначається автоматично); "1..Match Convergence" (використовувати той розмір кроку, який привів до збіжності); "2..Original" (повертатися до первісного); "3..Match Solution Time" (призначати розміри кроків у відповідності до часу розв'язку);

• "Sub-Inc Division Factor" – фактор зміни кроку (якщо збіжність не досягнута, то крок ділиться на вказане значення цього фактора);

• "Low Speed Dyn Damp Factor" – вказує, чи виконувати повільний динамічний аналіз замість статичного, а також значення фактора динамічного демпфірування;

Analysis Control			Equilibrium Iter	ation an	id Convergend	e	Line Search Setting	IS	
Auto Increment 00ff		Max Iterations / Step 15			Line Search Tolerance 0,5				
Continue if Non-Positive D	efinite		Line Search	00ff	-	*	Line Search Energy	Thresh 0,	
Auto Time Stepping			Convergence	0.Ener	וחט	~	Newmark Time Inte	gration	
Smallest Step Divisor	10		E T		0.001	-	Alpha Coefficient	0.25	
Largest Step Multiplier			Energy Loleran	ice	0,001			0,20	
Step Size Flag 0Automatic		Contact Force	Tol	0,05		Delta Coefficient			
Sub-Inc Division Factor	2,		Ref Contact Fo	rce	0,01		Contact Control		
Low Speed Dyn Damp Fa	ctor 1,E-4		Force Toleran	ces			Impact	0Default	~
Load Displacement Control		Force Tolerand	е	0,01		Iterations for Pairing	0		
Node where Applied	0		Reference For	се	0,		Subdivide Method	0Tensile Force Ba	SI 💊
Displacement DOF	1TX	~	Reference Mor	nent	0,		Segment Type	00Id	~
Prescribed Displacement 0,		Distances	T - I			Disp Formulation	0Large Disp Formu	al. 💊	
Max Incremental Disp Factor	3,	-Displacement Tolera		i olerani			Damping Method	0 No Demoing	
Max Absolute Disp			Disp Tolerance		0,01		b amping method	ovo banping	
Max Arc-Length Subdiv	10		Reference Tra	nslation	0,		Normal Damping Coeff 0,		
Terminate after First Critical Point		Reference Rot	ation	0,		Tangential Damping	; Coeff 0,		

При обиранні у секції "Analysis Control" зі списку "Auto Increment" варіанта "2..Load-Displacement" стає активною секція "Load-Displacement Control". Вона має такі опції:

• "Node where Applied" - номер вузла, в якому для першого кроку розв'язування задачі задані зміщення;

• "Displacement DOF" - зі списку обирається ступінь свободи вузла (див. поопцію): "1..TX", передню , "**3..1**Z", "4..RX", "5..RY" aбо "6..RZ";

• "Prescribed **Displa-**

cement" – величина зміщення (див. дві попередні опції);

Рис.6.16. Діалогова панель для настроювання параметрів ітерацій та збіжності

• "Max Incremental Disp Factor" – максимально допустиме збільшення зміщення (див. попередню опцію) у процесі отримання розв'язку;

• "Max Absolute Disp" – максимальне значення зміщення (див. попередні опції), при досягненні якого процес отримання розв'язку буде зупиненим;

• "Max Arc-Length Subdiv" – максимально допустима кількість секторів дуги при застосуванні методу Arc-Length для обирання кроку навантаження (ціле значення >1);

• "Terminate after First Critical Point" – зупинити процес отримання розв'язку задачі при досягненні першої критичної точки рівноваги.

У секції "Equilibrium Iteration and Convergence" (керування ітераціями та збіжністю) є такі опції:

• "Max Iterations / Step" – максимальна кількість ітерацій у межах часового кроку (ціле число між 1 та 999). Якщо ця кількість буде досягнута, але збіжності – немає, при обирання у секції "Analysis Control" зі списку "Auto Increment" варіанта "0..Off" процес пошуку розв'язку буде зупинений;

• "Line Search" – лінійний пошук. Є варіанти: "0..Off" (відключений); "1..On" (включений);

- 140 -

• "Convergence" – призначення критерію збіжності: "0..Energy" (енергія); "1..Energy and Force" (енергія та сили); "2..Energy and Displacement" (енергія та зміщення); "3..Force" (сили); "4..Displacement" (зміщення). У залежності від обраного варіанта будуть активні поля для введення відповідних значень погрішностей (Tolerance) та номінальних значень для порівняння (Reference): "Energy Tolerance" (за енергією), секції "Force Tolerance" ("Force Tolerance" (за силами), "Reference Force" (сила) та "Reference Moment" (момент)), секції "Displacement Tolerance" ("Disp Tolerance" (переміщення), "Reference Translation" (переміщення) та "Reference Rotation" (поворот)).

Для контактної задачі є аналогічні поля "Contact Force Tol" та "Ref Contact Force".

У секції "Line Search Settings" (параметри лінійного пошуку) є опції:

• "Line Search Tolerance" – точність лінійного пошуку (за замовчанням = 0.5);

• "Line Search Energy Thresh" – поріг енергії лінійного пошуку;

У секції "Newmark Time Integration" (інтегрування у часі за методом Ньюмарка) є опції:

• "Alpha Coefficient" – коефіцієнт  $\alpha$ . У методі Ньюмарка  $\alpha \ge 0.25$ ;

• "Delta Coefficient" – коефіцієнт  $\delta$ . У методі Ньюмарка  $\delta \ge 0.5$ .

У секції "Contact Control" (контроль контакту) є опції:

• "Impact" – вплив. Обирається один з варіантів: "0..Default" (без впливів); "1..Adjust Vel/Accel" (застосувати пост-вплив регулювання швидкостей/прискорень); "2..Mod Newmark Param" (використовувати змінені параметри методу Ньюмарка);

• "Iterations for Pairing" – кількість ітерацій для з'єднання контактного вузла з сегментом. Може допомогти у збіжності контактного алгоритму, можна задавати значення від 0 до 99. Після вичерпання вказаної кількості ітерацій всі встановлені зв'язки вже не будуть переглядатися (стануть "замороженими");

• "Subdivide Method" – метод визначення. Обирається один з варіантів: "0..Tensile Force Based" (крок тим менше, чим більше контактні сили розтягнення); "1..Time Step Based" (крок обирається за схемою автоматичного прирощення – ATS);

• "Segment Type" – тип контактного сегмента. Обирається один з варіантів: "0..Old" (старий); "1..New" (новий, що розроблений для NX Nastran 4.1. Рекомендується у першу чергу для тетраедрального CE 2-го порядку наближення, з 10 вузлами);

• "Disp Formulation" – формулювання переміщень. Обирається один з варіантів: "0..Large Disp Formulation" або "2..Large Disp Formulation" (великі, коли умови контакту змінюються), "1..Small Disp Formulation" (малі, коли умови контакту фіксовані. Увага: пошук зони контакту відбудеться *тільки один раз*);

• "Damping Method" – метод демпфування, для прискорення стабілізації зон контакту; рекомендується застосовувати особливо при наявності жорсткого зміщення тіл, що контактують. Обирається один з варіантів: "0..No Damping" (немає); "1..1st Step Damping" (демпфування тільки на першому кроці контактного алгоритму) або "2..All Step Damping" (на всіх кроках контактного алгоритму). Для другого та третього варіантів необхідно увести коефіцієнти демпфування: "Normal Damping Coeff" (нормальний) та "Tangential Damping" (тангенціальний).