МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ПРО НАПРУЖЕНО-**ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТІЛ. КОНТАКТНІ ЗАДАЧІ**

Розрахунки крайових контактних задач можуть вимагати дуже значні об'єми оперативної та ще більше дискової пам'яті, а також займати дуже багато часу на етапі обчислення, оскільки розв'язуються із застосуванням ітерацій, в яких визначаються зони контакту, узгоджуються контактні зусилля та переміщення.

Основні теоретичні відомості про контактні крайові задачі про НДС тіл наведені у Додатку 8.

Контактні задачі формулюються для двох або більшої кількості тіл. При цьому тіла можуть мати як кінцеву (тіло, що деформується), так й нескінченну жорсткість (жорстке тіло або обмеження). У першому випадку спочатку створюються скінченно-елементні моделі всіх тіл, у другому випадку контактна поверхня жорсткого тіла покривається СЕ типу РІОТ **ONLY**. Потім вузли СЕ, що виходять на контактні поверхні, зв'язуються контактними СЕ.

Увага: якщо поверхня контакту відома та відсутнє взаємне проковзування поверхонь контакту, задачу доцільно розв'язувати як неконтактну, об'єднавши два тіла в одне.

У UGS.F93 є два методи формування можливих зон контакту в крайовій задачі про контакт тіл, а саме як контакт типу:

• "вузол-вузол", із застосуванням СЕ типу GAP у одновимірному та типу SLIDE LINE у дво- та тривимірному випадку;

• "поверхня-поверхня", із застосуванням регіонів. Реалізовано у програмах NX Nastran, NE/NASTRAN, ABAQUS, MARC, ANSYS, LS-DYNA3D тощо.

8.1. Формування зон контакту методом "вузол-вузол"

При формуванні зон контакту методом "вузол-вузол" застосовують контактні СЕ типу **GAP** у одновимірному та типу **SLIDE LINE** у дво- та тривимірному випадку.

Контактні СЕ типу GAP або SLIDE LINE створюються за допомогою команди **Model→Element...** (див. Розділ 3.4.1).

Проблеми при створенні контактних СЕ типу GAP (зазор) пов'язані з тим, що він не може мати довжину, що дорівнює нулю, а також допускає лише незначний натяг.

Якщо при створенні "Property" контактного СЕ на діалоговій панелі "Define Property - SLIDE LINE Element Type" обрати радіокнопкою варіант "Symmetrical Penetration", то будуть враховуватися тільки симетричні члени матриці жорсткості контактного СЕ, що прискорює розрахунок, але дещо знижує його точність.

Необхідно враховувати, що СЕ типу SLIDE LINE не має своєї координатної системи, але повинен знаходитися у площині ХҮ. Тому, якщо ця умова не виконується у глобальної системі координат, у потрібному місці необхідно створювати у відповідний спосіб орієнтовану локальну систему координат, в якій і задавати СЕ типу SLIDE LINE.

Фактично контактний СЕ типу SLIDE LINE містить перелік вузлів можливої зони контакту двох поверхонь, оскільки при його створенні послідовно (від початкового до кінцевого) вказуються (окремо на сторонах кожного тіла) всі вузли майбутнього контакту. У створених у такий спосіб списках програма шукає вузли, що протистоять один одному з деяким допуском (контактні пари вузлів), потім між ними створює СЕ типу GAP (лінія, що з'єднує два вузли, для моделювання роботи на розтяг (звичайно з незначною жорсткістю для моделювання, наприклад, сил молекулярного притягання), стиск і зсув).

Увага: оскільки контактний СЕ типу GAP не може бути створеним з нульовою довжиною, то одне з тіл, що контактують, спочатку потрібно зрушити як жорстке тіло (щоб з'явився зазор між ними) у напрямку, перпендикулярному до поверхні, створити всі СЕ типу GAP або SLIDE LINE та потім надати тілу вірне положення. Жорстке зміщення СЕ зручно проводити за допомогою команди Modify→Move By→Element.... Іноді є сенс не посувати, а масштабувати СЕ (командою Modify→Scale→Element..., наприклад, задати масштаб 0.99 відносно точки з нульовими координатами).

Про параметри СЕ типу **GAP** або **SLIDE LINE** див. у таблиці 3.2, про їх створення – у Розділі 3.4.1.

Оскільки СЕ типу **SLIDE LINE** – плоский, то він включає в зону контакту тіла лише один ряд вузлів на його поверхні. Тому в об'ємних та вісесиметричних контактних задачах необхідно вузли СЕС розміщувати рівними рядами з погодженою відстанню між ними. Якщо такі ряди контактних СЕ створювати методом копіювання раніше створених, то *виникають співпадаючі вузли*, які необхідно виявляти та ліквідувати ще до надання тілу, що посунуте, вірного положення.

Усі ці умовності та додаткові дії значно ускладнюють створення контактного "зв'язку".

8.2. Формування зон контакту із застосуванням регіонів

8.2.1. Загальні відомості

Модель контакту для NX Nastran можна створювати між "твердими" тілами (Solid), оболонкових СЕ (Shell) та твердими поверхнями (Rigid Surfaces).

Припускаються наступні умови моделювання контакту:

• контактні вузли та СЕ заздалегідь не відомі;

• тертя моделюється відповідно до закону тертя Кулона різних модифікацій (для аналізу типу 701 – тільки класичного формулювання);

• моделюється зчеплення та ковзання;

• поява та зникнення контактних зон (пар вузлів, з'єднань) може мати будь-яку послідовність;

- дозволені самоконтакт у тілі та двобічний контакт тонких частин тіла;
- може бути змодельованим прив'язаний контакт (тільки для аналізу типу 601);
- можливий тільки невеликий відносний зсув.

8.2.2. Автоматичний та "ручний" варіанти формування зон контакту із застосуванням регіонів

Якщо в моделі контакт здійснюється між поверхнями "твердих" тіл (Solid), то є сенс застосовувати автоматичний варіант пошуку контактних поверхонь, який ініціюється командою Connect-Automatic... (при відсутності "твердих" тіл ця команда не є активною). Після обирання "твердих" тіл з'явиться діалогова панель, що зображена на рис.8.1-а.

Auto Detection Options for Connections	
Coincident Surface Detection	
Tolerance 0,00504975	
Angular Tolerance 1, deg.	
Minimal Aggressive Detection Strategy	Define Connection Between Surfaces
Check for Connections in same Solid	Connect surfaces Connection Property
Combine all Connections between Solids	
Connection Property	Search for Related Surfaces
 Contact 	
⊙ Glued	
O Property	
<u>D</u> K Cancel	
a)	ნ)
Рис.8.1. Ліалогові пане	елі настроювання: а) – автоматичного пошуку поверхонь

контакту; б) – "ручного" пошуку поверхонь контакту

У секції "Coincident Surface Detection" є такі опції:

• "Tolerance" та "Angular Tolerance __ deg.": встановлюють критичні величини зазору та кута нахилу (градусів) між поверхнями "твердих" тіл, які не дозволять вважати, що ці поверхні можуть при аналізі контактувати;

• "Direction Strategy" (стратегія виявлення): від "Minimal" (мінімальна) до "Aggressive" (агресивна) – п'ять ступенів. Перший ступень ("Minimal") – тільки плоскі поверхні; другий – додатково розглядаються циліндричні, сферичні, конусні поверхні та тороїди; третій – додатково використовуються логічні (Бульові) операції; четвертий – як третій, але попередньо всі "тверді" тіла "роздуваються" на величину у 0.5 від "Tolerance" (від критичної величини зазору); п'ятий ("Aggressive") – як четвертий, але тіла "роздуваються" на повну величину "Tolerance";

• "Check for Connections in same Solid" – перевіряти на "самоконтакт", тобто з'єднання у тому же тілі (наприклад, берега тріщини у тілі при її закритті входять у контакт);

• "Combine all Connections between Solids" – об'єднати всі з'єднання у тілі в єдиний регіон. Потребує відключення у випадку наявності "самоконтакту";

У секції "Connection Property" є такі варіанти: "Contact" (створення нової контактної "Property"), "Glued" (створення нової контактної "Property" типу "клею") та "Property" (обрати зі списку вже існуючу "Property" та використати її).

Примітка 8.1. Варіант "Glued" не може застосовуватися у типах аналізу 601 та 701 (див. табл.4.2). Цей варіант має такі особливості: по-перше, створюються жорсткі зв'язки типу "Springs", які не допускають відносні зміщення об'єктів контакту; по-друге, не можна у NX Nastran застосовувати *ітераційний* процес розв'язування лінійної системи алгебраїчних рівнянь.

Можна використати "ручний" варіант пошуку контактних поверхонь: дати команду Сопnect→Surface.... З'явиться діалогова панель, що зображена на рис.8.1-б. У поля "Master" (головна) та "Slave" (підлегла) вводяться номера двох поверхонь або за допомогою кнопок "Multiple…" створюються списки поверхонь, обирається або (за допомогою кнопки 🕥) створюється контактна "Property" (див. нижче). Якщо встановити опцію "Search for Related Surfaces" (пошук зв'язаних поверхонь), то в регіон будуть автоматично включатися поверхні, які логічно пов'язані з вже знайденими. Наприклад, одна поверхня логічними операціями поділена на декілька; циліндричний отвір у середовищі Parasolid має дві логічно пов'язані поверхні.

8.2.3. Діалогова панель "Define Connection Property"

Діалогова панель "Define Connection Property" (окрім кнопки 🕥 ще викликається командою **Connect** \rightarrow **Connection Property...**) має загальну зону та 8 вкладок, з них лише три призначені для NX Nastran. В загальній зоні, окрім стандартних полів, є поле списку "Connect Type" (тип з'єднання) з двома варіантами: "0..Contact" (контакт) та "1..Glued" (склеювання). Кнопкою "Defaults" рекомендують заповнити опції стандартними призначеннями.

8.2.3.1. Вкладка "NX Linear" діалогової панелі "Define Connection Property"

Перша вкладка "NX Linear" (див. рис.8.2) призначена для настроювання аналізу типу 101лінійного статичного (див. табл.4.2).

У секції "Contact Pair (BCTSET)" є такі опції, значення яких можна змінювати у різних "Connection Property":

• "Friction" – статичний коефіцієнт тертя Кулона;

• "Min Contact Search Dist" – мінімальна відстань для пошуку пари контакту i – го вузла. Увага: при наявності натягу ця відстань може бути від'ємною;

• "Max Contact Search Dist" – максимальна відстань для пошуку пари контакту i – го вузла (вимірюється вздовж нормалі до поверхні СЕ з точки, яка має координати вузла).

У секції "Contact Property (BCTPARM)" опції повинні мати однакові значення у всіх "Connection Property". Тому FEMAP буде користуватися значеннями, які є лише в одній "Connection Property", яка пов'язана з найменшим номером СЕ. Це такий набір опцій:

• "Max Force Iterations" – максимальна кількість ітерацій для врівноваження контактних зусиль та досягнення умови взаємного не проникнення (внутрішній цикл);

• "Max Status Iterations" – максимальна кількість ітерацій для знаходження розв'язку;

• "Normal Penalty factor" фактор штрафу (жорсткості проникнення) для нормального напрямку;

• "Tangential Penalty factor" – фактор штрафу для тангенціального напрямку (у 10 ... 100 раз менший);

• "Force Convergence Tol" – точність збіжності контактних зусиль (евклідова норма);

• "Num Allow Contact Changes" - кількість СЕ у поточних зонах контакту, при якій алгоритм припинить пошук розв'язку;

• "Min Contact Percentage" – мінімальний відсоток від контактних СЕ, які вважаються активними;

• "Initial Penetration" – початкове проникнення. Варіанти зі списку: "0..Calculated" (обчислення з використанням координат вузлів), "2..Calculated/Zero **Penetrations**" (як попереднє, але при наявності проникнення встановлюється нульове

Define Connection Property					
	Palette	ler 1	Connect Type 0Contact	~	
Lolor 110 Palette Layer 1 NX Linear NX Adv Nonlin NX Explicit ABAQUS ANSYS MARC DYNA NEiNastran					
Friction	0, Min Contact Search Dist 0, Max Contact Search Dist 10,0995			0, 10,0995	
Contact Property (BCTPARM Max Force Iterations	Contact Property (BCTPARM) Max Force Iterations 10 Min Contact Percentage 100				
Max Status Iterations 100		Initial Penetration	2Calculated/Zero Penetrati 🗸		
Normal Penalty factor Tangential Penalty factor	Normal Penalty factor 10,		0Include shell thickness v 0Include All Elements v		
Force Convergence Tol 0,01		Contact Status	0Start from Prev Subcase 🗸		
Num Allow Contact Changes 0					
Eval Order 0Defa	BUTPARM and B ault	Refine Source	0Do Not Refir	ne 💌	
- Glued Contact Property (BGS Search Distance Penalty Factor	ET and BGPARM 0, 0,	Shell Z-Offset	0Include Z-Of	fset	
Defaults Load.	Save		OK	Cancel	

Рис.8.2. Діалогова панель настроювання "Connection Property" для аналізу типу 101

значення), "3..Zero Gap/Penetration" (для місць із зазорами та натягами – нуль);

• "Shell Offset" – враховувати товщину оболонки. Варіанти зі списку: "0..Include shell thickness" (враховувати) та "1..Do not include thickness" (не враховувати);

• "Avg Methods" – метод усереднення для контактних тиску та натягу. Варіанти зі списку: "0..Include All Elements" (включати всі СЕ зон контакту) та "1..Include Active Elements" (включати тільки активні (реально контактуючі) СЕ);

• "Contact Status" – статус контакту. Варіанти зі списку: "0..Start from Prev Subcase" (запуск від попереднього випадку) або "1.. Start from Init State" (запуск від початкового стану).

У секції "Common Contact Parameters (BCTPARM and BGPARM)" (загальні параметри контакту) є такі опції:

• "Eval Order" – порядок оцінювання взаємного проникнення. Варіанти зі списку: "0..Default" (за замовчанням, як є у NX Nastran), "1..Low" (низький порядок точності), "2..Medium" (середній) та "**3..Нідh**" (високий). Увага: підвищення точності збільшує час пошуку розв'язку;

• "Refine Source" – чи модифікувати сітку СЕ у зоні контакту? Варіанти зі списку: "0..Do Not Refine" (не робити цього) та "1..Refine Source to Target" (модифікувати).

У секції "Glued Contact Property (BGSET and BGPARM)" (властивості склеєного контакту) є такі опції:

• "Search Distance" – відстань для пошуку пари контакту i – го вузла. Увага: при наявності натягу ця відстань може бути від'ємною;

• "Penalty Factor" – фактор штрафу для всіх контактних пар (зв'язків). За замовчанням дорівнює 10⁶. Якщо спостерігається дроблення регіонів зв'язків, то рекомендують десь на порядок збільшити це число. Увага: занадто великі значення викликають збільшення помилок;

• "Shell Z-Offset" – враховувати товщину оболонки. Варіанти зі списку: "0..Include Z-Offset (враховувати)", "1..Do not Include Z-Offset" (не враховувати).

8.2.3.2. Вкладка "NX Adv Nonlin" діалогової панелі "Define Connection Property"

Друга вкладка "NX Adv Nonlin" (див. рис.8.3) призначена для настроювання аналізу типу 601 - нелінійного статичного (див. табл.4.2). Нагадаємо, що у цьому випадку для NX Nastran у полі "Connect Type" можна застосовувати лише варіант "0..Contact".

У секції "General" (загальні) є такі опції:

Define Connection Property				
ID 1Itle Connect Type				
<u>C</u> olor 110) Palette Layer	1 0Contact		
NX Linear NX Adv Nonlin NX Explicit ABAQUS ANSYS MARC DYNA NEiNastran				
General		Standard Contact Algorithm		
Contact Type 0Co	nstraint Function 🛛 🚩	Disp Formulation 0Use N	🛙 🛛 🗠	
Double-Sided		Consistent Stiffness		
Initial Penetration	0Eliminate 🔽	Tied Tolerance	0,	
Gap Distance	0,	Init Penetration Duration	0,	
Penetration Depth	0,	Surface Extension Factor	0,	
Segment Normal	0Default 💌	Friction Model 0Defau	ult (Param 1) 🔽	
Offset Type	0Single Sided 🛛 🖌	Friction Param 1	0,	
Offset Distance	0,	Friction Param 2	0,	
Time Activation		/ Friction Param 3	0,	
Birth Time	0,	Friction Param 4	0.	
Death Time	0,	Friction Param 5	0.	
Rigid Target Contact Alg	orithm	- Constraint Exection Contac	t Algorithm	
Penetration Tolerance 0, Constraint Function Contact Algorithm				
Normal Modulus 0,		Fristianal Constraint	0,	
Tangential Modulus 0,			0,	
Min Tensile Freeing Force	e 0,	Lompliance Factor	U,	
Max Total Freeing Force 0,				
Defaults Load Save Copy OK Cancel				

Рис.8.3. Діалогова панель настроювання "Connection Property" для аналізу типу 601

• "Contact Type" – алгоритм контакту: "0..Constraint Function" (обмежуючих функцій), "1..Segment Method" (метод сегмента) та "2..Rigid Target" (жорсткий цільовий);

• "Double Sided" – дозвіл на використання для контакту обох боків поверхні оболонки;

• "Initial Penetration" – початкове проникнення. Варіанти зі списку: "0..Eliminate" (видалити), "1..Eliminate/Print" (видалити, створити та вивести у файл відповідний список вузлів), "2..Ignored" (ігнорувати) та "3..Specify with Gap Distance" (задавати значенням з поля "Gap Distan**се**". При >0.0 – зазор; при <0.0 – проникнення, яке буде усунене);

• "Penetration Depth" – глибина проникнення для однобічного контакту, яка є допустимою;

• "Segment Normal" – чи використовувати інтерпольований сегмент для визначення нормалі до поверхні. Варіанти зі списку: "0..Default"

(як "1..Used" – для однобічного; як "-1..Not Used" – для двобічного контакту), "1..Used" (використовувати безперервний (інтерпольований) сегмент) та "-1..Not Used" (не використовувати);

• "Offset Type" – тип відступу. Варіанти зі списку: "0..Single Sided" (тільки для однобічних), "1..Single/Double-Sided" (для однобічних та двобічних) та "2..Half Shell Thick" (половина

товстої оболонки);

• "Offset Distance" – розмір відступу (для перших двох варіантів "Contact Type" можна задавати різний розмір у різних регіонах контакту).

У секції "Time Activation" (активація часу) є такі опції:

• "Birth Time" – час створення контакту;

• "Death Time" – час закінчення ("смерті") контакту (якщо це значення дорівнює часу створення, то контакт ігнорується).

У секції "Rigid Target Contact Algorithm" є такі опції:

• "Normal Modulus" – нормальний модуль контакту. За замовчанням = 10¹¹:

• "Penetration Tolerance" – максимальне значення для проникнення у тіло (за замовчан- $H_{\rm MM} = 10^{-8}$):

• "Tangential Modulus" – дотичний модуль контакту (за замовчанням =0.0);

• "Min Tensile Freeing Force" – мінімальна сила розтягу для розриву контактної пари (за замовчанням =0.001);

• "Max Total Freeing Force" – максимальне значення суми сил розтягу у вузлах, що змінюють свій статус, зі всієї зони контакту (за замовчанням =1.0). При перевищенні цього значення алгоритм зменшує поточний приріст часу, тобто розділяє приріст навантажень на декілька частин.

У секції "Standard Contact Algorithm" є такі опції:

• "Disp Formulation" – формулювання переміщень. Варіанти зі списку: "0..Use NXSTRAT CTDISP" (за замовчанням, тобто як визначено змінною CTDISP у NXSTRAT), "1..Small Disp Formulation" (малі переміщення, умови контакту не оновлюються) та "2..Large Disp Formulation" (великі переміщення, умови контакту оновлюються);

• "Consistent Stiffness" – використовувати (чи ні) погоджену жорсткість контакту;

• "Tied Tolerance" – точність зв'язування регіонів в кожній парі контакту. У NX Nastran 5.0 при ініціації цієї опції вважається, що регіони контакту мають малі повороти;

• "Init Penetration Duration" – тривалість ліквідації початкового проникнення. Якщо задати 0.0, то початкове проникнення буде ліквідовано на першому часовому кроці, але це може викликати проблеми зі збіжністю;

• "Surface Extension Factor" – фактор продовження поверхні, позначимо як δl . Довжина поверхні L збільшується, дорівнює $(1.0 + \delta l) \cdot L$. Діапазон значень: від 10^{-6} до 0.1: за замовчанням = 0.001;

• "Friction Model" – модель тертя. Варіанти зі списку: "0..Default (Param 1)" (постійний коефіцієнт тертя, визначений на вкладці "NX Linear" у секції "Contact Pair (BCTSET)" у полі "Friction"); "1..Constant (Param 1)" (постійний коефіцієнт тертя, визначений у полі "Friction Param 1"); "2..Model 1 (1,2)" (модель 1); "3..Model 2 (1,2,3)" (модель 2); "12..Modified Model 1(1,2)" (модифікована модель 1); "13.. Modified Model 2(1,2,3)" (модифікована модель 2); "4..Static/Dynamic (1,2,3)" (різні коефіцієнти тертя статичного та динамічного); "5..vs Sliding Velocity (1,2,3)" (коефіцієнт тертя залежить від швидкості взаємного проковзування); "6.. Anisotropic (1-5)" (анізотропна модель); "7..vs Contact Force (1,2)" (коефіцієнт тертя залежить від контактного зусилля); "8..vs Time (1,2,3)" (коефіцієнт тертя залежить від часу) та "9..vs Coordinate (1-5)" (коефіцієнт тертя залежить від координат). У лобках вказуються номери параметрів, що використовуються для завдання коефіцієнта. Формули – у табл.Д5.1 Додатка 8;

• "Friction Param 1", "Friction Param 2", "Friction Param 3", "Friction Param 4" та "Friction Param 5" – значення параметрів моделей тертя.

У секції "Constraint Function Contact Algorithm" (обмеження функції контактного алгоритму, тільки для варіанта алгоритму контакту "**0..Constraint Function**") є такі опції:

• "Normal Constraint" – параметр ε_N (нормальне обмеження) функції $w(g, \lambda)$: див. формулу (Д5. 16-б) Додатка 8. За замовчанням =10⁻¹² ;

• "Frictional Constraint" – обмеження тертя. Потрібно задавати значення, що >0.0. За замовчанням =0.001;

• "Compliance Factor" – фактор компіляції. За замовчанням =0.0.

Додаткові відомості див. у Додатку 8.

8.2.3.3. Вкладка "NX Implicit" діалогової панелі "Define Connection Property"

Третя вкладка "NX Implicit" (див. рис.8.4) призначена для настроювання аналізу типу 701 – прямого нелінійного динамічного (див. табл..4.2). Нагадаємо, що для NX Nastran у полі "Connect Туре" можна застосовувати лише варіант "0..Contact". Деякі опції – такі ж, як і на другій вкладці.

У секції "General" є такі опції:

• "Contact Type" – тип контакту. Варіанти зі списку: "0..Constraint Function" (обмежені функції), "1.. Penalty Method" (метод штрафу) та "3.. Rigid Target" (жорсткий цільовий);

• "Double Sided" – використовувати для контакту обидві боки поверхні;

"Initial Penetration" – початкове проникнення. Варіанти зі списку: "0..Eliminate" (ліквідувати), "1..Eliminate/Print" (ліквідувати та створити відповідний список вузлів) та "2..Ignored" (ігнорувати);

• "Penetration Depth" – глибина проникнення для однобічного контакту;

• "Segment Normal" – чи використовувати інтерпольований сегмент для визначення нормалі до поверхні. Варіанти зі списку: "0..Default" (за замовчанням), "1..Used" (використовувати безперервний (інтерпольований) сегмент) та "-1..Not Used" (не використовувати);

Define Connection P	roperty	×			
ID 1 Iile Connect Type					
Color 110 Palette Layer 1					
NX Linear NX Adv Nonlin NX Explicit ABAQUS ANSYS MARC DYNA NEiNastran					
General		Standard Contact Algorithm			
Contact Type 0Co	onstraint Function 🛛 👻	Surface Extension Factor 0,			
Double-Sided		Init Penetration Duration 0,			
Initial Penetration	0Eliminate 💌	- Penalty Contact Algorithm			
Penetration Depth	0,	Penalty Stiffness Criteria D. Brogram Calculated			
Segment Normal	0Default 🔽				
Offset Type	0Single Sided 💉	Tangential Stiff Criteria 0. Program Calculated as			
Offset Distance	0,				
Friction	0,	D O (Multure O)			
Time Activation		Damp Loef Method UNot Used			
Birth Time	0,	Damping Coefficient U,			
Death Time	0,				
Rigid Contact Algorith	n				
Penetration Tolerance	0,				
Tangential Modulus	0,				
Defaults	Load Save	Copy OK Cancel			

Рис.8.4. Діалогова панель настроювання "Connection Property" для аналізу типу 701

• "Offset Type" – тип відступу. Варіанти зі списку: "0..Single Sided" (тільки для однобічних оболонок), "1..Single/Double-Sided" (для однобічних та двобічних) та "2..Half Shell Thick" (половина товстої оболонки);

• "Offset Distance" – розмір відступу;

• "Friction" – статичний коефіцієнт тертя.

У секції "**Time Activation**" є такі опції:

• "Birth Time" – час створення контакту;

• "Death Time" – час закінчення ("смерті") контакту (якщо це значення дорівнює часу створення, то контакт ігнорується).

У секції "**Rigid Contact Algorithm**" (жорсткий контактний алгоритм) є такі опції:

• "Penetration Tolerance" – максимальне значення для проникнення у тіло (за замовчанням = 10^{-8});

• "Tangential Modulus" – дотичний (тангенційний) модуль контакту.

У секції "Standard Contact Algorithm" (стандартний контактний алгоритм) є такі опції:

• "Surface Extension Factor" – фактор продовження поверхні, позначимо як δl . Довжина поверхні L збільшується, дорівнює $(1.0 + \delta l) \cdot L$. Діапазон значень: від 10^{-6} до 0.1; за замовчанням = 0.001;

• "Init Penetration Duration" – тривалість ліквідації початкового проникнення. Якщо задати 0.0, то початкове проникнення буде ліквідовано на першому часовому кроці, але це може викликати проблеми зі збіжністю.

У секції "Penalty Contact Algorithm" (контактний алгоритм штрафу) є такі опції:

• "Penalty Stiffness Criteria" – критерій для оцінювання нормальної жорсткості штрафу. Варіанти зі списку: "0..Program Calculated" (величина "Normal Stiffness" обчислюється програмою), "1..User Defined" (визначається користувачем);

• "Normal Stiffness" – нормальна жорсткість;

• "Tangential Stiff Criteria" – критерій для оцінювання жорсткості штрафу у тангенціальному напрямку. Варіанти зі списку: "0..Program Calculated" (Tangential Stiffness обчислюється програмою), "1..User Defined" (визначається користувачем);

• "Tangential Stiffness" – жорсткість у тангенціальному напрямку;

• "Damp Coefficient Method" – метод завдання коефіцієнта демпфування. Варіанти зі списку: "0..Not Used" (демпфування не використовується), "1..As Crit Damping Factor" (демпфування використовується та є критичним фактором), "2..Directly Defined" (безпосередньо визначений);

• "Damping Coefficient" – коефіцієнт демпфування. Відносне для варіанта "1..As Crit Damping Factor" та абсолютне значення.

Додаткові відомості див. у Додатку 8, а також у книзі "Nonlinear Analysis Theory and Modeling guide", яка ϵ у "Help".

8.2.4. Команди створення/редагування об'єктів контактного регіону

Після створення хоча б одного контактного регіону в розділі "Connections" інформаційнонавігаційної панелі "Model Info" з'являються об'єкти моделі у полях Properties, Regions та Connectors. Їх назви можна змінити (див. рис.8.5-а).



Рис.8.5. Зміст панелей для Connections

Якщо навести курсор миші на ці об'єкти "Model Info" та клацнути правою кнопкою миші, з'явиться динамічна діалогова панель, набір команд якої відповідає об'єкту. Для Connections→Properties панель зображена на рис.8.5-б, для Connections→Regions – на рис.8.5-в, для Connections→Connectors – на рис.8.5-г.

Команда **Connect**->**Connection Property...**, а також команда "**Edit**" на панелі, що зображена на рис.8.5-б, викликають вже описану діалогову панель "**Connection Property**" (див. рис.8.2).

Команда **Connect→Connection Region...**, а також команда "**Edit**" на панелі, що зображена на рис.8.5-в, викликає діалогову панель "**Connection Region**" (див. рис.8.6-а). Призначення панелі – створення/редагування контактного регіону.

Connection Region			×
ID 1 Color 20	488 Palette Layer 1 Defined By ⊙ Surfaces ○ Elements	Title Surf_07 Surface 7, Positive	<< Add
O Rigid Ref Node	Curves Nodes		Multiple Delete Reset
 ○ Nodes ○ Curves ⊙ Elements 	Surrace ✓ Positive Side	Region Options	Cancel
	a)		



Головна задача – за допомогою радіокнопок, опцій та кнопок "<<Add", "Multiple…", "Delete" та "Reset" сформувати у великому полі список об'єктів, які створюють контактний регіон.

У секції "**Туре**" обирається тип контактного регіону: "**Deformable**" (той, що деформується) або "**Rigid**" (жорсткий). У останньому випадку (для аналізу типів **601** та **701**) стає активним поле "**Ref Node**", в яке потрібно ввести номер вузла, в якому (будуть) задані обмеження (**Constraint**), зміщення (**Displacement**), швидкість переміщення (**Velocity**) тощо, які будуть перенесені на весь контактний регіон жорсткого типу.

У секції "Define By" радіокнопками "Surfaces", "Elements", "Curves", "Nodes" та "Property / Part Contact" обирається тип об'єкта, який буде входити в контактний регіон, причому в залежності від типу об'єкта у нижній частині секції з'являються додаткові поля, опції та кнопки, а саме:

• для "Surfaces" – поле "Surface" для введення номера поверхні та опція "Positive Side" – для зміни боку поверхні (позитивний чи ні). Якщо поверхня асоційована із CE типу Solid, то бік поверхні не має значення;

• для "Elements" – поля "Element" та "Face" для введення номерів CE та поверхні CE;

• для "Curves" – поле "Curve" для введення номера лінії та опція "Positive Side" – для зміни боку лінії (позитивний чи ні, але ця опція у UGS.F93 реально не використовується) або список "CSys" координатних систем проекту;

• для "Nodes" – поле "Node" для введення номера вузла;

• для "Property / Part Contact" – поле "Property" для введення номера "Property" CE, причому для обмеження кількості CE, які мають таку "Property" та будуть включені у список, є кнопка "Contact Box…", яка викликає стандартну панель для створення точки у просторі. Таких точок буде створено дві. Ці точки – протилежні кутові точки чотирикутного "боксу". Всі CE, що мають вказану "Property" та геометричні центри яких лежать у рамках "боксу", будуть включені в контактний регіон. Для видалення призначень границь "боксу" є кнопка "Delete".

Крім того, у секції "Define By" є кнопка "Region Options…", яка викликає панель "Connection Region Options" (див. рис.8.6-б), де у полі "Offset Distance" можна встановити величину відступу від об'єкта контактного регіону.

У секції "Output" радіокнопками "Nodes", "Curves" та "Elements" обирається той тип об'єкта моделі, до якого всі призначення будуть перепризначатися програмою FEMAP при створенні файлу для передання моделі до програми-аналізатора (NX Nastran або іншої).

Ця панель – універсальна, як і середовище FEMAP. Тому варіантів – багато, причому для NX Nastran потрібні не всі варіанти, а лише декілька.

Деякі додаткові відомості про умови використання різних варіантів можна отримати у "Help", а саме у FEMAP→Commands→4. Finite Element Modeling→4.4 Creating Connections and Regions→4.4.4 Connect, Connection Region....

Команда **Connect**—**Connector...**, а також команда "**Edit**" на панелі, що зображена на рис.8.5-г, викликає діалогову панель "**Define Contact Connector** – **Select Connection Region**" (див. рис.8.7). Призначення панелі – створення нового контактного з'єднання (з раніше створених контактних регіонів) або редагування існуючого контактного з'єднання.

Define Contact Connector - Select Connection Regions					
ID Itel Region 1-2 Property 1Contact Surf-Surf ✓ Color 14 Palette Layer 1					
Master Slave	1Surf_07 2Surf_08	Edit Master Define Region Edit Slave <u>D</u> K			

Рис.8.7. Діалогова панель для створення/редагування списку контактних регіонів, що створюють контакт

На цій панелі потрібно у полі "Property" обрати одну із створених раніше "Connection Property" (або за допомогою кнопки I створити нову); у списках "Master" (головний) та "Slave" (ведений) – по одному з контактних регіонів, що будуть створювати контакт, причому за допомогою кнопок "Edit Master"

та "Edit Slave" можна викликати діалогову панель "Connection Region" (див. рис.8.6-а) для редагування обраних контактних регіонів, а кнопки "Define Region" – таку же панель для створення нового контактного регіону.

8.3. Додаткові пояснення про контактні алгоритми

У випадках, коли програма об'єднує значення, що задані на панелях для різних контактних регіонів, вона використовує значення, задані для контактного регіону з найбільшим **ID**. Тому потрібно мати на увазі, які дані – загальні, а які – індивідуальні. Коли у полі "Eval Order" (див. рис.8.2) встановлюється різний порядок оцінювання взаємного проникнення, то алгоритм використовує різну кількість точок на контактуючої поверхні CE, в залежності від кількості вузлів, яку містять поверхні CE – див. табл.8.1. З підвищенням порядку оцінювання контактні сили та напруження отримують більш гладкі розподіли.

Таблиця 8.1. Залежність кількості точок на фронтальній поверхні двовимірного СЕ та бокової поверхні тривимірного СЕ від порядку оцінювання взаємного проникнення тіл, порядку наближення у СЕ та геометрії контактуючої грані СЕ

Порядок наближення /	Встановлений порядок оцінювання взаємного проникнення			
геометрія поверхні	1	2	3	
Лінійний / трикутна	1	3	7	
Параболічний / трикутна	3	7	12	
Лінійний / чотирикутна	1	4	9	
Параболічний / чотирикутна	4	9	16	

У вузлах контактної поверхні не бажано задавати переміщення та інші граничні умови, оскільки в контактному алгоритмі такі вузли будуть проігноровані.

8.4. Створення завдання для проведення розрахунку крайової контактної задачі

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:

• "1..Static" (статика), "10..Nonlinear Static" (нелінійна статика) або "22..Advanced Nonlinear Static" (нелінійна статика, "передовий" аналіз, див. Розділ 6.3.8 та Розділ Д5) – статичні контактні задачі;

• "23..Advanced Nonlinear Transient" (неявний метод Ньюмарка, див. Розділ Д7.3.1.1) або "24..Advanced Nonlinear Explicit" (явний центрально-різницевий алгоритм, CDM; див. Розділ Д7.3.1.2) – динамічні контактні задачі (перехідний, еволюційний аналіз).

У випадку призначення типів задач 22.. , 23.. та 24.. ще потрібно настроїти деякі опції. Про це – див. Розділ 6.4.

Оскільки зони контакту можуть бути визначені з точністю відстані між вузлами контактної поверхні тіла, то точність розв'язку контактної задачі не може бути дуже високою. У отриманому розв'язку зміщення у зоні контакту завжди розраховуються точніше, ніж контактні зусилля. Тому значення (за замовчанням) точності для контактних зусиль (поле "Contact Force Tol" – див. рис.6.16) у 0.05, тобто у 5% є нормальним явищем. Увага: надмірні вимоги щодо точності розв'язку контактної задачі приведуть до вичерпання заданої на панелі "NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters" (див. рис.6.16) максимальної кількості ітерацій та до фатальної помилки.

Якщо при створенні "Connection Property" застосовувався метод "1..Segment Method" (див. рис.8.3 та рис.8.4), то:

• всі тіла моделі повинні мати окремі (свої) умови закріплення;

• не можна призначати у полі "Convergence" (див. рис.6.16) такі методи оцінки збіжності: "0..Energy" (енергія) та "1..Energy and Force" (енергія та сила).