

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ

1.1 Основи теорії явного методу динаміки

Явними (Explicit) методами називають методи розв'язування рівнянь динаміки, не пов'язані з розв'язуванням систем рівнянь, але такі, що використовують рекурентні співвідношення, які виражають переміщення, швидкості та прискорення на даному кроці через їхні значення на попередніх кроках. У разі використання діагональної матриці мас (замість стандартної узгодженої розрядженої) вдається її «обернути», спростивши тим самим розрахунок і багаторазово зменшивши час однієї ітерації (за допомогою заміни триангуляції матриць із розв'язаннями за умови змінних врівноважувальних навантажень на матричні множення). Така методика передбачає малі кроки і досить дрібну розбивку, щоб правильно описати діагональній матриці розподіл мас. Як компенсація, малий крок дає змогу відстежити всі зміни в характеристиках конструкції і в її поведінці. Усі нелінійності (включно з контактом) враховуються у векторі внутрішніх сил. Основний час займає не формування та обертання матриць, а обчислення цього вектора. Через дуже малий розмір кроку (на практиці $10^{-7} \dots 10^{-6}$) явні методи зазвичай застосовуються тільки для розрахунку короткочасних процесів.

Найважливішою проблемою чисельної реалізації є забезпечення стійкого розв'язку, що осцилює в прийнятних межах. Зазначимо, що стійким називають рішення, коли мала зміна початкових умов не спричинятиме великих змін результатів. У цьому разі помилки (похибки) округлення абсолютні або відносні у вихідних даних і під час розрахунку не спричиняють наростаючого ефекту. Вирішальне значення тут має вибір кроку інтегрування за часом. Практика обчислень дала змогу виробити досить надійні критерії.

Явні розв'язувачі LS-DYNA через накопичення помилок округлення малоефективні для тривалих або статичних задач. LS-DYNA використовує спеціальні технології, оптимізовані для розв'язання високошвидкісних короткочасних процесів. Явний метод розв'язання, який використовує LS-DYNA, забезпечує найефективніший розрахунок швидкоплинних процесів, високошвидкісних процесів із великими динамічними деформаціями, квазістатичних задач із великими деформаціями та високою нелінійністю, а також складних задач контакту.

1.2 Функціональні можливості програмного комплексу LS-DYNA для реалізації чисельного моделювання процесів різання

LS-DYNA (LSTC Corp.) – багатоцільова програма, що використовує явне формулювання методу скінченних елементів (explicit finite element method). Вона призначена для аналізу високо нелінійних і швидкоплинних процесів, а також динамічного відгуку тривимірних непружних структур. Першу версію програми LS-DYNA було випущено 1976 року.

Особливістю LS-DYNA є явна схема дискретизації за часом. Вибір кроку інтегрування за часом у явних методах визначається стійкістю процесу інтегрування. У загальному випадку мінімальний крок інтегрування прямо пропорційний розмірам скінченних елементів і обернено пропорційний швидкості руху елементів моделі.

Програмний комплекс LS-DYNA – це насамперед вискоефективний «вирішувач». Як пре- і постпроцесор для цього комплексу використовуються різні програми.

Для розв'язання задач механічного оброблення різанням, листового штампування можна застосовувати як оболонкові, так і об'ємні скінченні елементи. Вважається, що об'ємні скінченні елементи за значної кількості елементів за товщиною матеріалу дають точніші результати. З іншого боку, оболонкові елементи дають значну економію в кількості елементів, а, отже, і в швидкості розв'язання задачі. Зокрема, для розв'язання задачі удару автомобіля об перешкоду використовують оболонкові елементи.

Однією з особливостей комплексу є необхідність розбивати на скінченні елементи навіть абсолютно жорсткі тіла. Для скорочення кількості елементів такі жорсткі тіла зручно представити у вигляді оболонки. Кожна оболонка має товщину, а, за замовчуванням, усі розрахунки проводяться щодо серединної поверхні оболонки.

Контактний алгоритм комплексу LS-DYNA працює стійкіше, якщо в початковий момент відсутнє зіткнення різних деталей одна з одною.

Конструктивно оформлені частини моделі в комплексі LS-DYNA зручно об'єднувати в єдині компоненти (Part). Кожному такому компоненту відповідає певна геометрія, матеріал, константи і скінченний елемент (KE). За допомогою компонент легко задавати граничні умови та контакт.

1.2.1 Чисельні методи розрахунку

У LS-DYNA реалізовано такі методи:

- явний метод скінченних елементів з можливістю побудови лагранжевої, ейлерової та гібридної сітки;
- неявний (прямий з урахуванням розрідженості матриць, ітераційний – превизначених спряжених градієнтів);
- багатоконпонентна гідродинаміка;
- безсітковий метод згладжених частинок Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH);
- безсітковий метод, заснований на методі Галеркіна Element Free Galerkin method (EFG).

Програма має вбудовані процедури автоматичної перебудови і згладжування скінченно-елементної сітки в разі виродження елементів, високоефективні алгоритми розв'язання контактних задач, широкий набір моделей матеріалів, можливості користувацького програмування.

Для розв'язання динамічних задач багатоконпонентної гідродинаміки в LS-DYNA реалізовано ейлерові та довільні лагранжево-ейлерові сітки (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), що лежать в основі використовуваного для розв'язання подібних задач методу Mulimaterial Eulerian Hydrodynamics (MEH). Для розв'язання динамічних задач багатоконпонентної гідродинаміки може бути використано метод SPH.

Для розв'язання нелінійних квазістатичних і статичних задач механіки тіла, що деформується, можна використовувати неявний розв'язувач.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ РІЗАЛЬНОГО КЛИНА ІНСТРУМЕНТА ІЗ ЗАГОТІВКОЮ

2.1. Методика моделювання з використанням методу скінченних елементів і явної схеми розв'язання



Першим етапом будь-якого завдання є створення геометричної моделі. В LS-DYNA геометрію можна створювати за допомогою спеціальних команд на інструментальній панелі в препроцесорі LSPrePost, а можна й імпортувати з таких відомих CAD-систем, як Компас3D, SolidWorks, ProEngineer, Unigraphics, Catia та безлічі інших. У цій методиці буде описано побудову геометрії, створення скінченно-елементної моделі та налаштування розв'язувача в препроцесорі LSPrePost. Для розрахункових моделей простої геометричної форми (циліндр, сфера, прямокутний паралелепіпед та ін.) немає необхідності будувати геометричну модель, а можна одразу перейти до побудови скінченно-елементної моделі. Наприклад, для заготовки в цьому завданні, яка має просту форму, етап побудови геометрії буде пропущено.

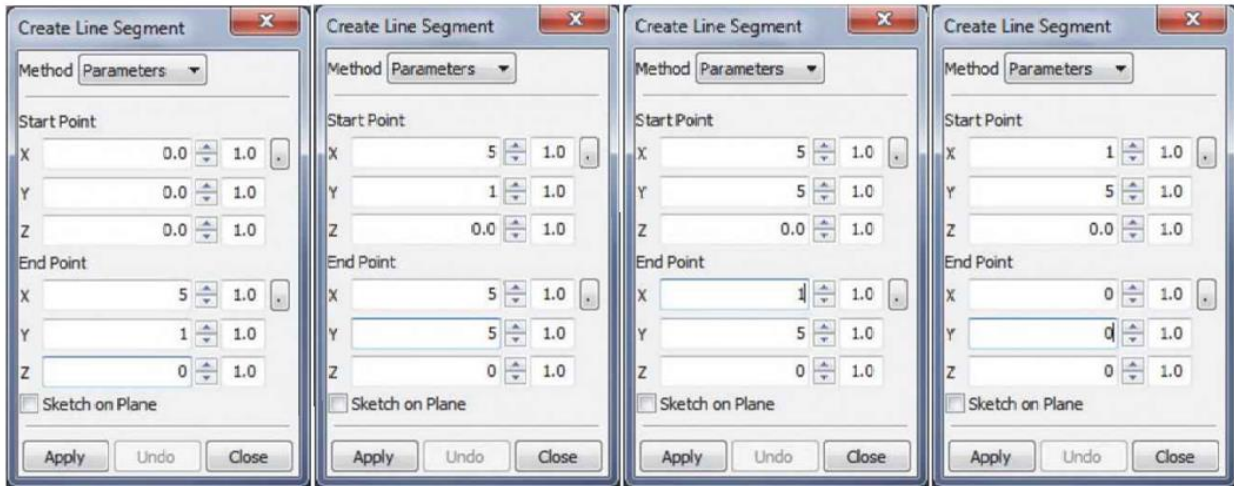
На другому етапі створюється розрахункова сітка для побудованої геометрії, від якості якої безпосередньо залежить точність розрахунків, що надає більшої важливості цьому етапу.

На третьому етапі здійснюється налаштування розрахункової моделі. Вказуються типи елементів, які використовуються під час моделювання, визначаються моделі матеріалів, які зв'язуються під час визначення частин. Задаються алгоритми контактної взаємодії заготовки та інструменту, а також самоконтакту для унеможливлення проникнення шару матеріалу, що знімається, у заготовку. Визначаються параметри руху різальної частини інструменту і обмежуються переміщення заготовки. Далі налаштовуються контрольні карти, в яких вказуються необхідні параметри розв'язання і контролюється стан елементів і контакту в процесі розв'язання. Для перегляду результату розрахунку необхідно вибрати формати файлів і параметри, що цікавлять, які будуть записуватися.

2.1.1. Побудова геометрії різальної частини інструменту

Інструмент буде зображено частково і спрощено – тільки різальний клин. Для побудови геометрії інструменту необхідно запустити препроцесор LSPrePost версії не нижче 4.2. На

панелі інструментів, розташованій праворуч, натисніть кнопку «Curve» , після цього відкриється додаткова інструментальна вкладка з набором кнопок побудови плоских і просторових кривих. У вкладці, що розкрилася, натисніть кнопку «Line» . З'явиться два вікна, у вікні «Create Line Segment», у випадаючому меню «Method» виберіть «Parameters», у полі «Start Point» і «End Point» вводяться координати X, Y, Z початку і кінця відрізка відповідно. Створимо перший відрізок із координатами 0, 0, 0, 0 – 5, 1, 0 (див. рис. 2.1, а), для цього в поле «Start Point» введемо координати: за віссю X – 0, за віссю Y – 0, за віссю Z – 0; у полі «End Point» введемо координати: за віссю X – 5, за віссю Y – 1, за віссю Z – 0, і для підтвердження натиснемо кнопку «Apply». У графічному вікні має з'явитися відрізок. Аналогічним чином будуюмо три відрізки, що залишилися.




a

б

в

г

Рис. 2.1. Координати відрізків: а – перший відрізок; б – другий відрізок; в – третій відрізок; г – четвертий відрізок

Для більш наочного представлення отриманого ескізу на панелі «ISO View» (рис. 2.2) натисніть на площину XY (перша кнопка), а на нижньому кнопковому меню натисніть кнопку «Auto Center»  . Кінцевий ескіз представлено на рис. 2.3.

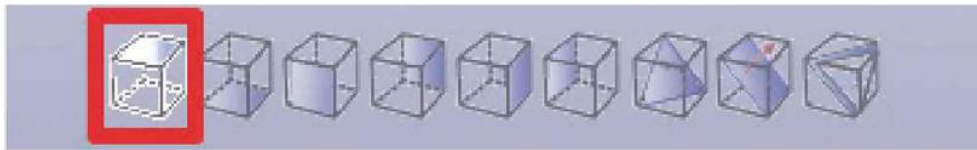




Рис. 2.2. Панель «ISO View»

Далі необхідно створити площину за створеним ескізом. Для цього на панелі інструментів, розташованій праворуч, натисніть кнопку «Surface»  , після цього відкриється додаткова інструментальна вкладка з набором кнопок побудови різних поверхонь. У вкладці, що розкрилася, натисніть кнопку «Fill Plane»  . Відкриється два вікна. Потім, послідовно, оберіть вказівником миші три відрізки ескізу, у результаті у вікні «Fill Plane» у полі «Shape List» мають з'явитися три вибрані відрізки, а ділянка, обмежена лініями ескізу, буде зафарбована рожевим кольором (рис. 2.4). Завершуємо створення площини кнопкою «Apply», при цьому область ескізу має змінити колір на зелений (рис. 2.5). Закриваємо вікно «Fill Plane» кнопкою «Close».

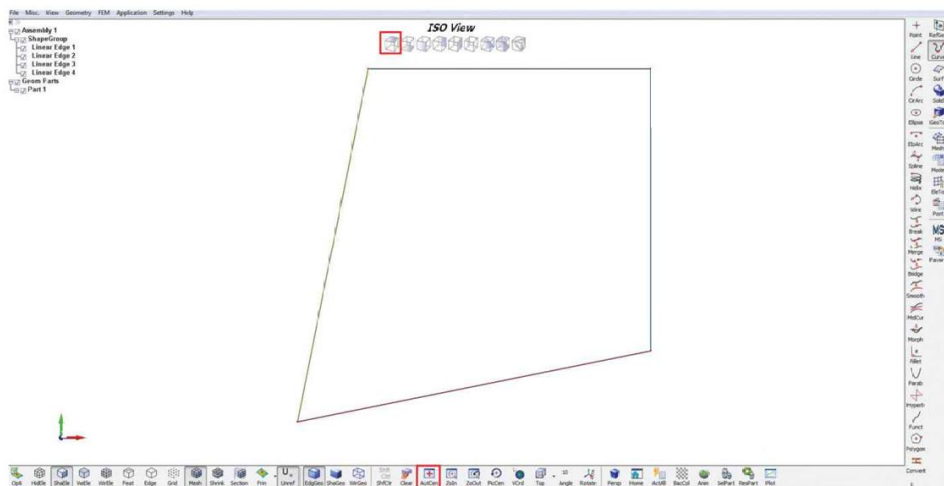


Рис. 2.3. Ескіз різальної частини інструменту

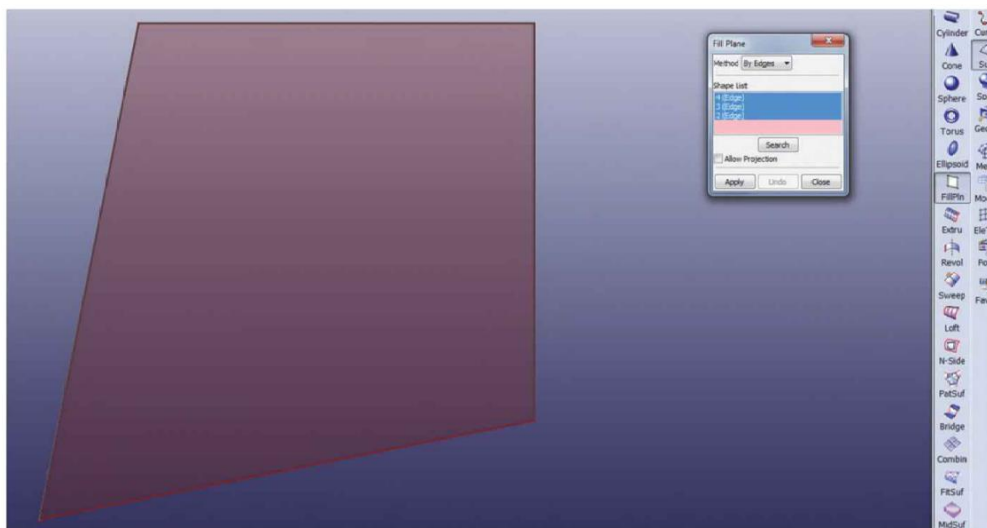


Рис. 2.4. Створення площини

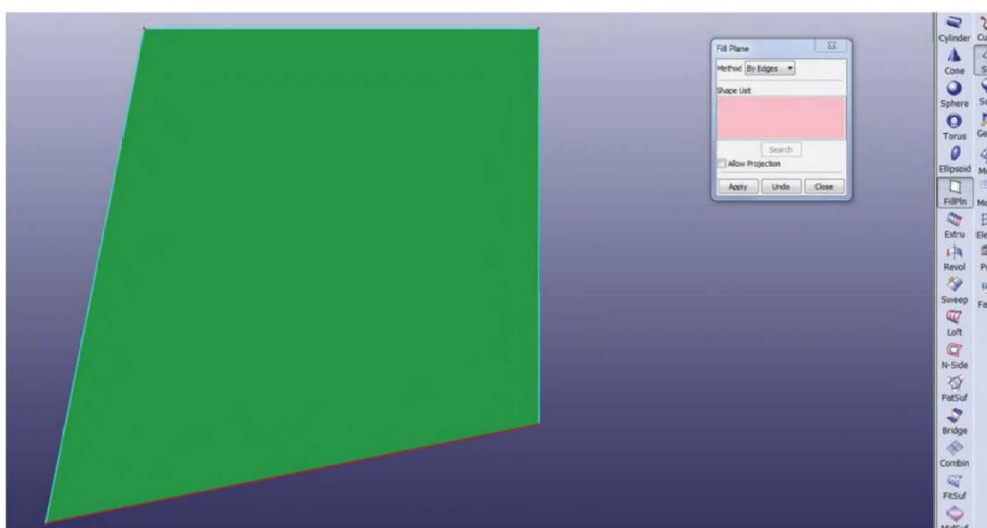


Рис. 2.5. Створена площина

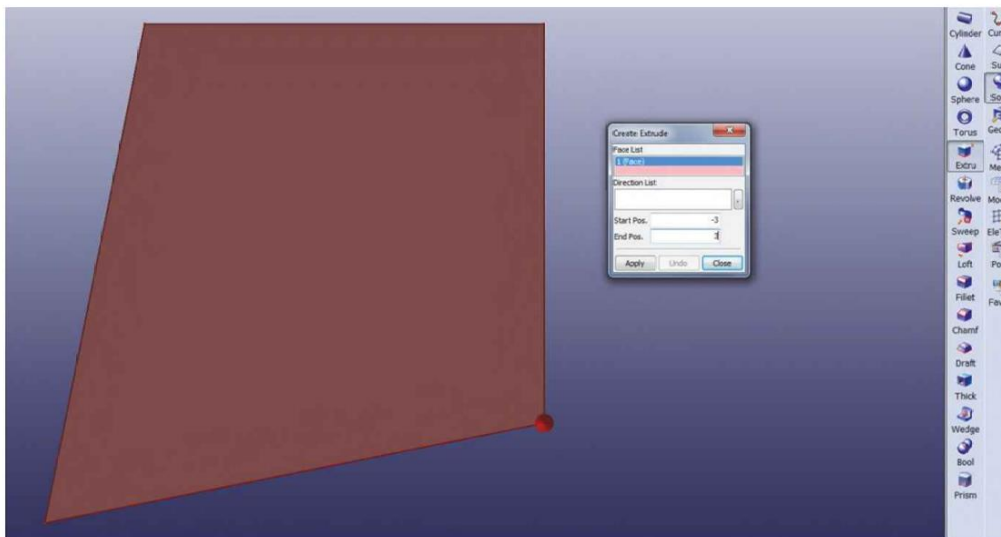




Рис. 2.6. Створення операції видавлювання

Для створення 3D-моделі різальної частини інструмента необхідно видавити побудовану площину в обидва напрямки, по 3 мм у кожен. Для цього на панелі інструментів, розташованій праворуч, натисніть кнопку «Solid» , після цього відкриється додаткова вкладка з набором кнопок побудови і редагування геометричних об'єктів. У вкладці, що розкрилася, натисніть кнопку «Extrude» , з'явиться два вікна. Клацанням лівої кнопки миші (ЛКМ) обираємо зелену ділянку ескізу, унаслідок чого у вікні «Create Extrude» у полі «Face List» має з'явитися обрана площина. У полі «Start Pos.» вводимо значення «-3», а в полі «End Pos.» вводимо значення «3» і натискаємо кнопку «Apply» (рис. 2.6). Закриваємо вікно «Create Extrude» кнопкою «Close».

2.1.2. Створення скінченно-елементної моделі заготовки та інструменту

2.1.2.1. Створення скінченно-елементної моделі інструменту

Для побудови скінченно-елементної моделі різальної частини інструменту за вже створеною геометричною моделлю натисніть на панелі інструментів, розміщеній праворуч, кнопку «Element and Mesh», після цього відкриється додаткова вкладка з набором кнопок побудови та редагування вузлів і елементів. У вкладці, що розкрилася, натисніть кнопку «Solid Mesher». Відкриється вікно «Solid Meshing» (рис. 2.7). Виберіть у графічному вікні геометрію різальної частини інструмента, клацнувши лівою кнопкою миші на геометрії різця, у результаті вона має змінити колір на сірий. У полі «Operation» має бути виділено пункт «Meshing», у полі розмір елемента «Elem Size» введіть значення – «1» і натисніть кнопку. У результаті буде створено попередню скінченно-елементну модель (рис. 2.8). Якщо отримана скінченно-елементна сітка влаштовує, то натискаємо кнопку «Accept», якщо ні, то необхідно натиснути кнопку «Reject» і скоригувати налаштування.

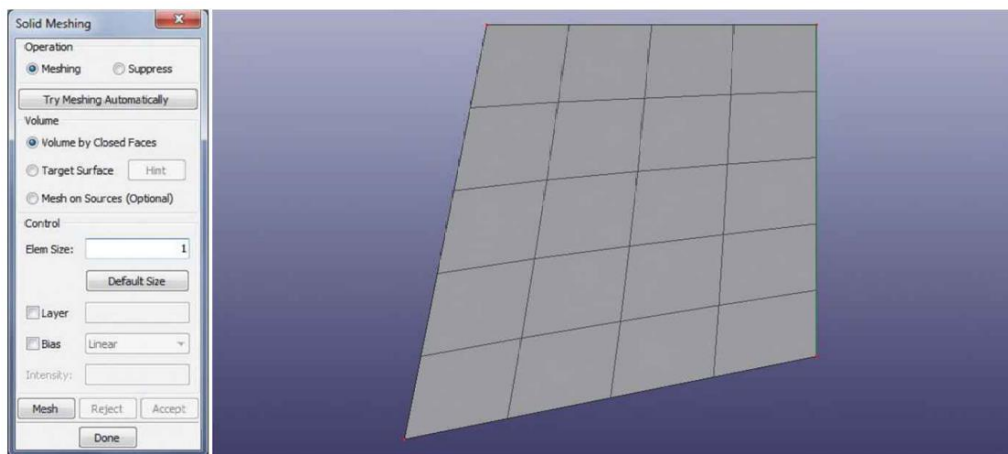


Рис. 2.7. Вікно «Solid Meshing»

Рис. 2.8. Попередня скінченно-елементна модель

Далі в дереві моделі (ліва частина графічного вікна) потрібно видалити пункт «ShapeGroup», оскільки далі працюватимемо тільки зі скінченно-елементною моделлю, представленою на рис. 2.9.

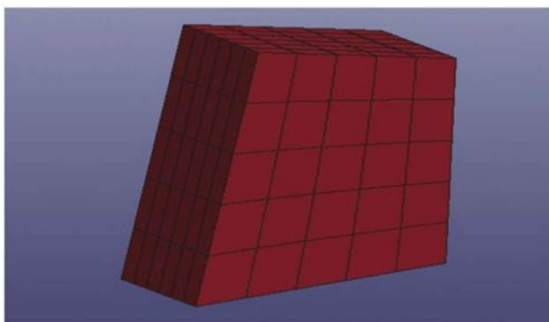


Рис. 2.9. Скінченно-елементна модель різальної частини інструменту

2.1.2.2. Створення скінченно-елементної моделі заготовки

В якості заготовки буде прямокутний паралелепіпед з розмірами сторін 10*5*5 мм. Для побудови скінченно-елементної моделі заготовки натисніть на панелі інструментів, розташованій праворуч, кнопку «Element and Mesh», після цього відкриється додаткова вкладка з набором кнопок побудови та редагування вузлів і елементів. У вкладці, що розкрилася, натисніть кнопку «Shape Mesher», з'явиться два вікна. У вікні «Shape Mesher», у випадаючому меню «Entity» виберіть «Box_Solid», у наступному рядку позначте опцію «Region», після цього залишиться ввести мінімальні та максимальні координати за трьома осями для побудови паралелепіпеда, а також число (опція «number») або розмір (опція «size») елементів для ребер паралелепіпеда відповідно до осей. Заповніть виділені поля вікна «Shape Mesher», як показано на рис. 2.10.

Для поділу цілої та дробової частини числа необхідно використовувати крапку, а не кому!

Натисніть кнопку «Create» і в графічному вікні відобразиться модель заготовки з побудованою сіткою (на даному етапі можна змінити кількість елементів, причому зміни відобразатимуться у вікні побудови) див. рис. 2.11. Для збереження введених даних та побудови скінченно-елементної моделі заготовки натисніть кнопку «Accept».

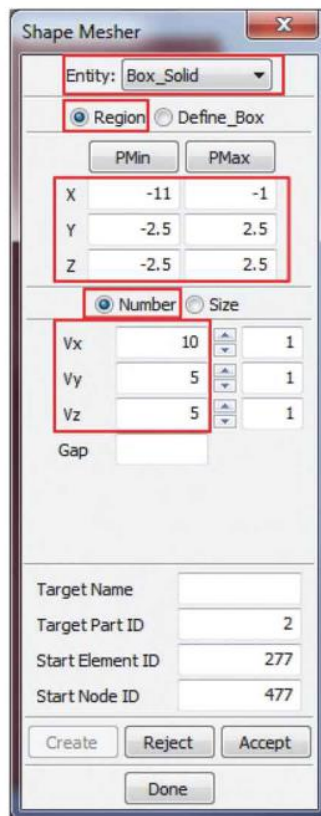


Рис. 2.10. Вікно «Shape Mesher»

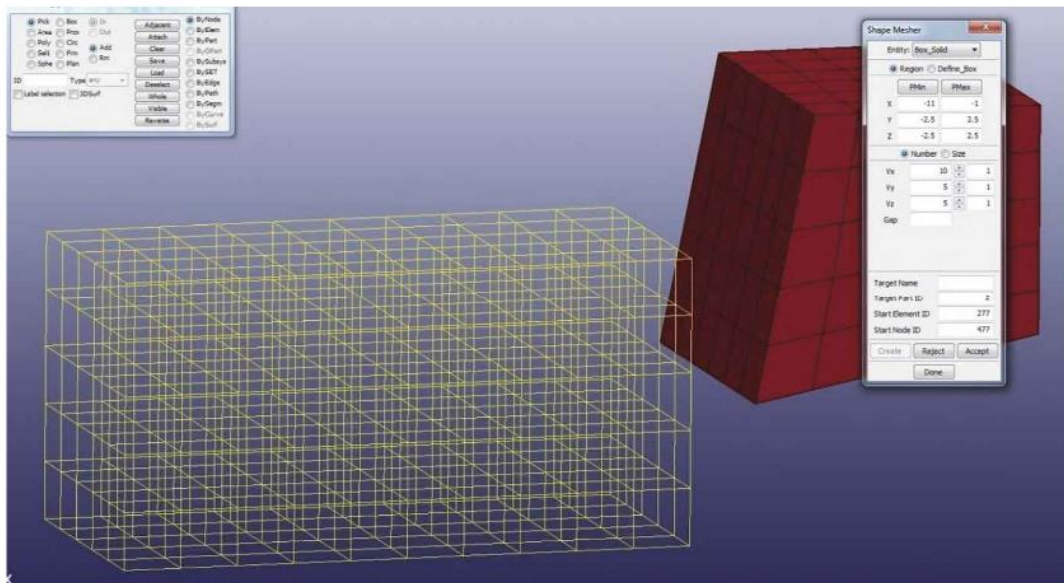


Рис. 2.11. Побудова скінченно-елементної моделі заготовки

Якщо допущено помилку або потрібно змінити розміри заготовки після попереднього перегляду (після натискання кнопки «Create»), то на цьому етапі це можна виправити, натиснувши на кнопку «Reject», далі ввести нові дані та знову натиснути кнопку «Create».

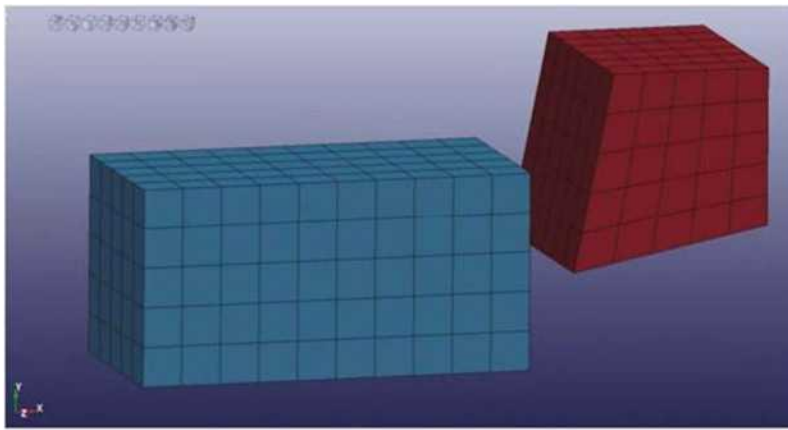


Рис. 2.12. Готова скінченно-елементна модель заготовки та інструменту

На рис. 2.12 представлено готову скінченно-елементну модель заготовки та інструменту.

2.1.3. Налаштування розрахункової моделі

Після створення скінченно-елементної моделі необхідно визначити: тип елемента, матеріал, частини, контакт, навантаження, обмеження та ін., – за допомогою введення ключових слів і карт. Подивитися опис ключових слів і карт можна в керівництві користувача (Keyword user's manual).

На панелі інструментів, розташованій праворуч, натисніть кнопку «Model and Part», після цього відкриється додаткова вкладка з набором кнопок різних операцій з моделлю і частинами моделі.

У вкладці, що розкрилася, натисніть кнопку «Keyword Managen і відкриється відповідне вікно (рис. 2.13). У вікні, що відкрилося, встановіть перемикач на «All» (рис. 2.13).

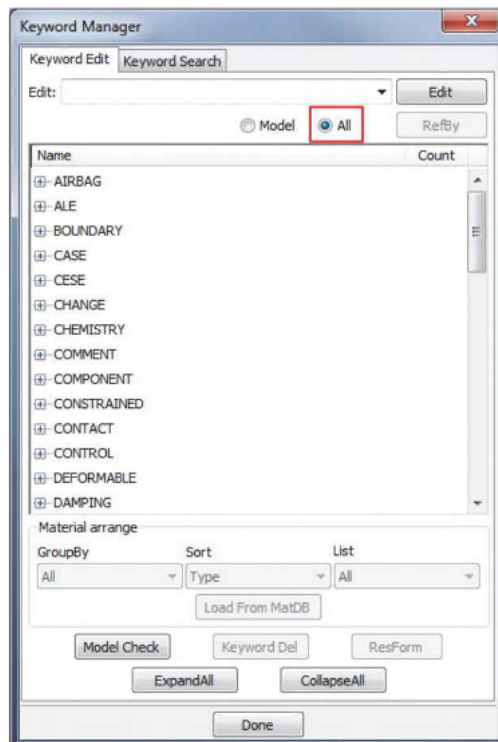


Рис. 2.13. Вікно «Keyword Manager»

2.1.3.1. Визначення типу використовуваних елементів

Для визначення типу елемента потрібно задати секцію, що використовує ключове слово, яке починається з «SECTION», воно необхідне для формулювання кінцевих елементів, визначення правила інтегрування та характеристики поперечного перерізу.

У вікні «Keyword Manager» розкрийте гілку «SECTION». Для об'ємного восьмивузлового елемента використовується ключове слово «SECTION_SOLID» (рис. 2.14), що дає змогу задавати характеристики поперечного перерізу для елемента суцільного середовища, для нього задається одна карта, в якій зазначено номер секції «1», опція формулювання елемента «2» (об'ємний S/R елемент з повною інтеграцією), тип елемента для задавання навколишнього середовища «0» (залишаємо значення за замовчуванням). Для збереження введених даних натисніть кнопку «Accept» і кнопкою «Done» закрийте вікно.



Рис. 2.14. Вікно «SECTION_SOLID»

2.1.3.2. Визначення використовуваних моделей матеріалів

Для додавання моделі матеріалу використовується ключове слово MAT, яке дозволяє додавати різні моделі матеріалів. У цьому завданні інструмент приймається абсолютно твердим тілом і буде описуватися моделлю матеріалу – RIGID. Для заготовки вибирається модель матеріалу – JOHNSON_COOK.

Модель матеріалу MATRIGID застосовується для опису твердих тіл, деформації яких незначні і (або) ними можна знехтувати. Для даного матеріалу вказується:

- ідентифікатор матеріалу. Повинен бути обраний унікальний номер;
- масова густина матеріалу;
- модуль Юнга;
- коефіцієнт Пуассона.

А також вказуються додаткові обмеження:

- обмежується переміщення по осях Y, Z;
- обмежується обертання навколо осей X, Y, Z.

Заповнені карти ключового слова MAT RIGID із виділеними введеними вихідними даними представлені на рис. 2.15.

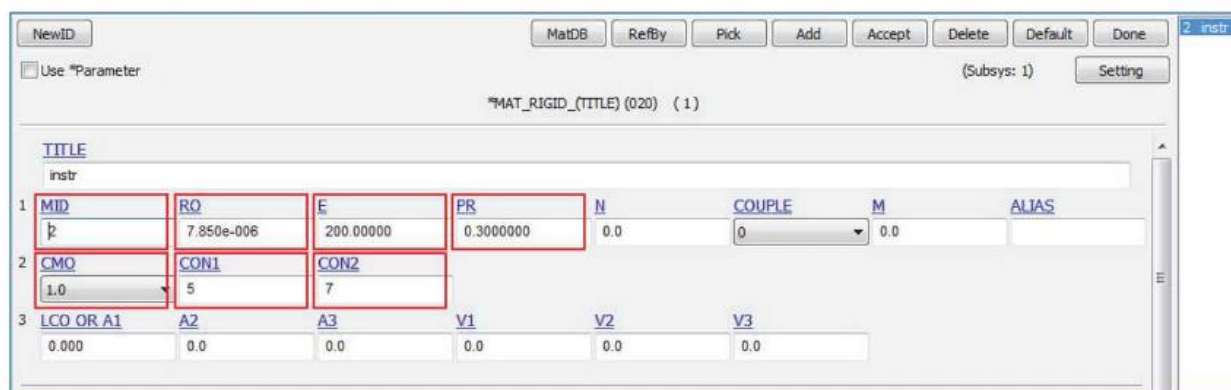


Рис. 2.15. Вікно «MAT RIGID»

Модель матеріалу MAT_JOHNSON_COOK.

Модель пластичності Джонсона-Кука, що залежить від деформації і температури, іноді використовують у задачах, у яких швидкості деформації змінюються у великому діапазоні, а адіабатичне зростання температури через нагрівання під час пластичної деформації спричиняє зниження міцності матеріалу. У разі використання об'ємних елементів ця модель потребує рівняння стану.

У карту 1 матеріалу вводиться:

- ідентифікатор матеріалу у вигляді унікального номера;
- масова щільність матеріалу;
- модуль зсуву;
- модуль Юнга;
- коефіцієнт Пуассона.

У карти 2, 3, 4 вводяться компоненти виразу Джонсона (Johnson) і Кука (Cook), а також параметри руйнування, отримані експериментальним шляхом. Заповнені карти ключового слова MAT_JOHNSON_COOK представлені на рис. 2.16.

TITLE	MID	RO	G	E	PR	DTF	VP	RATEOP
zagot		7.810e-006	78.500000	204.00000	0.3000000	1.800e-007	0.0	0.0
A	B	N	C	M	TM	TR	EPSQ	
0.5530000	0.6010000	0.2340000	0.0134000	1.0000000	1480.0000	20.000000	0.0010000	
CP	PC	SPALL	II	D1	D2	D3	D4	
642.00000	0.0	2.0	1.0	1.2000000	0.0	0.0	0.0	
DS	C2/P	EROD	EFMIN					
0.0	0.0	0	1.000e-006					

Рис. 2.16. Вікно «MAT_JOHNSON_COOK»

Модель матеріалу MAT_THERMAL застосовують, щоб задавати теплофізичні параметри матеріалів під час спільного міцність/тепло аналізу та під час суто теплового аналізу. Теплофізичні параметри потрібно задавати для всіх об'ємних і оболонкових елементів. Для балкових або дискретних елементів такі параметри задавати не потрібно, оскільки ці елементи не враховуються на тепловій стадії розрахунку.

На теплофізичні властивості посилаються за допомогою ідентифікаційного номера TMID, який ніяк не пов'язаний з номерами інших матеріалів MID, заданими в інших картах *MAT_.... В одному розрахунку номери TMID і MID можуть збігатися. Ці номери (TMID і MID) пов'язані через карту *PART.

MAT_THERMAL_ISOTROPIC дозволяє задавати ізотропні теплофізичні властивості матеріалу.

У карту 1 матеріалу вводиться ідентифікатор матеріалу у вигляді унікального номера, інші налаштування залишаємо за замовчуванням.

У карту 2 матеріалу вводиться:

- HC - Теплоємність;
- TC - Теплопровідність.



Рис. 2.17. Вікно «MAT_THERMAL_ISOTROPIC»

Заповнені карти ключового слова MAT_THERMAL_ISOTROPIC подано на рис. 2.17.

2.1.3.3. Додавання рівняння стану

Під час використання моделі матеріалу MAT_JOHNSON_COOK потрібне рівняння стану.

Для додавання рівняння стану, яке може бути використано разом із підмножиною матеріалів, доступних для об'ємних елементів, використовується ключове слово EOS.

Додаємо ключове слово EOS_LINEAR_POLYNOMIAL, щоб задавати коефіцієнти для рівнянь стану у вигляді полінома. Заповнені карти ключового слова EOS_LINEAR_POLYNOMIAL представлено на рис. 2.18.

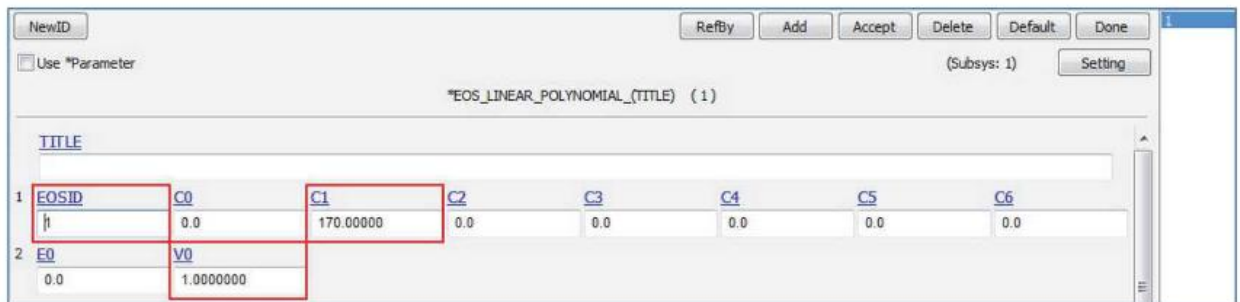


Рис. 2.18. Вікно «EOS_LINEAR_POLYNOMIAL»

2.1.3.4. Додавання параметрів контролю спотворення

Ключове слово HOURGLASS призначене для задавання параметрів придушення спотворень форми елементів і об'ємної в'язкості. Використовується в ключовому слові PART. Заповнену карту ключового слова HOURGLASS представлено на рис. 2.19.

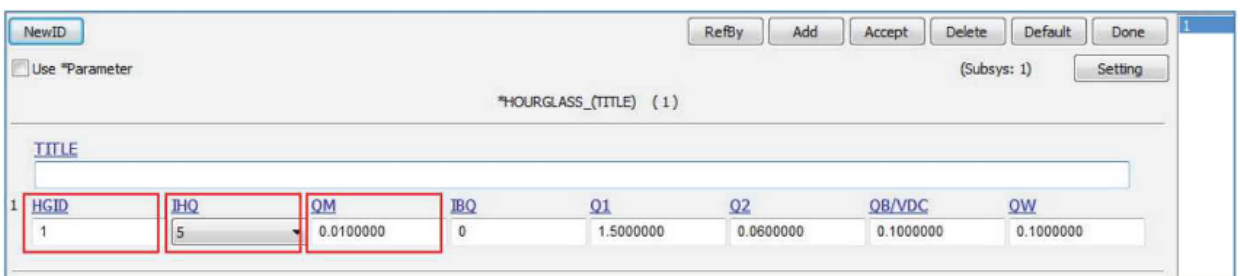


Рис. 2.19. Вікно «HOURGLASS»

2.1.3.5. Визначення частин розрахункової моделі

Ключове слово PART дає змогу задавати так звані частини розрахункової моделі, тобто об'єднувати інформацію про матеріал, характеристики перерізу, вид контролю спотворення елементів на кшталт пісочного годинника, теплофізичні властивості та прапор-ознаку адаптивності частини.

Для інструмента вводимо (рис. 2.20):

- у полі «TITLE» назву частини – «Інструмент»;
- у полі PID – ідентифікатор частини – 1;
- у полі SECID – ідентифікатор розділу, що визначається в розділі «SECTION» – 1;
- у полі MID – ідентифікатор матеріалу, що визначається в розділі «MAT» – 2;
- у полі TMID – ідентифікатор теплофізичних властивостей матеріалу, що задається в розділі «MAT_TERMAL» – 1.



Рис. 2.20. Вікно «PART» для інструменту

Для заготовки вводимо (рис. 2.21):

- у полі «TITLE» назву частини – «Заготовка»;
- у полі PID – ідентифікатор частини – 2;
- у полі SECID – ідентифікатор розділу, що визначається в розділі «SECTION» – 1;
- у полі MID – ідентифікатор матеріалу, що визначається в розділі «MAT» – 1;
- у полі EOSID – ідентифікатор рівняння стану, що визначається в розділі «EOS» – 1;
- у полі HGID – ідентифікатор контролю спотворення елементів за типом пісочного годинника за рахунок об'ємної в'язкості, який визначається в розділі «HOURLGLASS» – 1;
- у полі TMID – ідентифікатор теплофізичних властивостей матеріалу, що задається в розділі «MATTERMAL» – 1.



Рис. 2.21. Вікно «PART» для заготовки

2.1.3.6. Створення вузлових наборів

Вузловий набір – це список вузлів, об'єднаних за певною ознакою або таких, що мають одне призначення. Вузлові набори використовують під час визначення алгоритму контактної взаємодії, для завдання навантаження, швидкості, переміщення, а також для накладення обмежень на розрахункову модель. Для створення набору вузлів використовується ключове слово SET_NODE_LIST. Заповнити карти цього ключового слова можна в ручному режимі, заповнюючи відповідні поля вікна «SET_NODE_LIST» (рис. 2.22). Під час заповнення

необхідно знати номери вузлів, які мають одне призначення, що є дуже трудомістким процесом, тому в цій роботі заповнювати поля вікна «SET_NODE_LIST» вручну не потрібно.

Більш ефективно заповнити ці поля можна в автоматизованому режимі. У цій роботі заповнювати ключове слово будемо в автоматизованому режимі з використанням команди «Create Entity» (рис. 2.23–2.29).

На панелі інструментів, розташованій праворуч, натисніть кнопку «Model and Part», після цього відкриється додаткова вкладка з набором кнопок різних операцій із моделлю та частинами моделі. У вкладці, що розкрилася, натисніть кнопку «Create Entity», з'явиться два вікна «Entity Selection» і «Entity Creation». У вікні «Entity Creation» (рис. 2.23) розкрийте гілку «Set Data» і виберіть пункт «*SET_NODE», при цьому права частина вікна змінить структуру. У правій верхній частині вікна «Entity Creation» переключіть перемикач із «Show» на «Cre» (рис. 2.23), при цьому вікно «Entity Selection» зміниться на вікно «Sel. Nodes», у якому встановіть перемикачі так, як показано на рис. 2.24. Клацніть ЛКМ по заготівці – усі вузли заготовки мають виділитися. Натисніть кнопку «Apply» у вікні «Entity Creation», у результаті буде створено набір із 396 вузлів з ідентифікатором «1» (рис. 2.25).

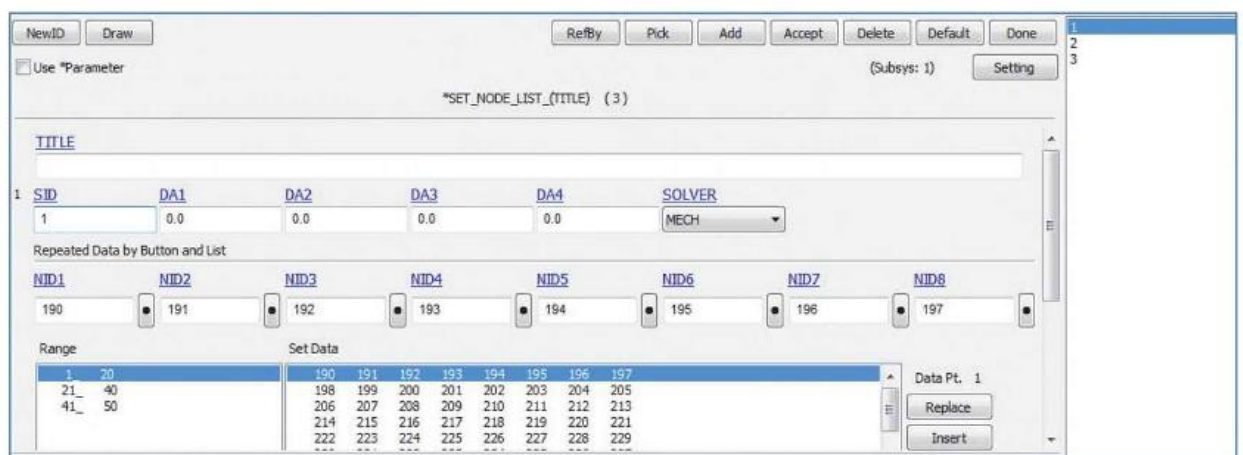


Рис. 2.22. Вікно « SET_NODE_LIST »

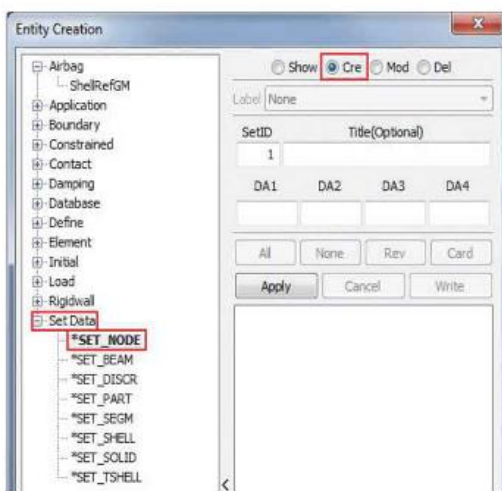


Рис. 2.23. Вікно «Create Entity»

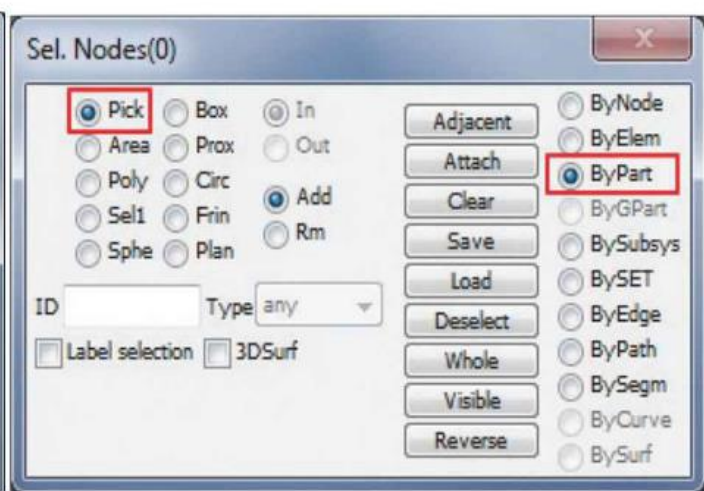


Рис. 2.24. Вікно «Sel. Nodes»

Для створення другого набору вузлів у вікні «Sel. Nodes» встановіть перемикачі, як показано на рис. 2.26, і оберіть курсором ділянку нижніх вузлів заготовки, клацнувши ЛКМ у точки 1 і 2, як показано на рис. 2.27. Вузли, що потрапили в обрану ділянку, будуть

підсвічені. Натисніть кнопку «Apply» у вікні «Entity Creation», у результаті буде створено набір із 66 вузлів з ідентифікатором «2» (рис. 2.28).

Для створення третього набору вузлів у вікні «Sel. Nodes» встановіть перемикачі так, як показано на рис. 2.24. Клацніть ЛКМ на інструменті – усі вузли інструменту мають виділитися. Натисніть кнопку «Apply» у вікні «Entity Creation», у результаті буде створено набір із 256 вузлів з ідентифікатором «3» (рис. 2.29).

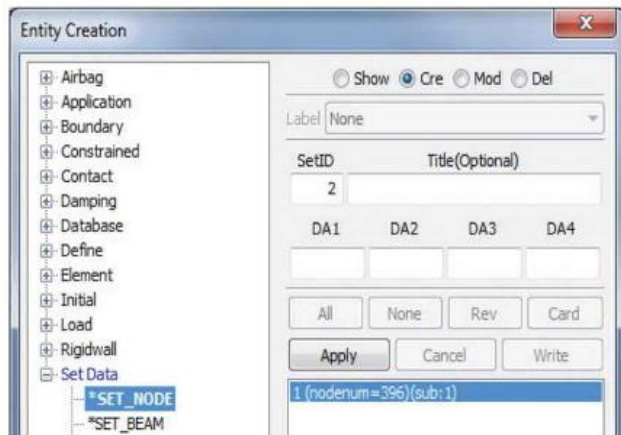


Рис. 2.25. Вікно «Create Entity»



Рис. 2.26. Вікно «Sel. Nodes»

Щоб закрити вікно «Entity Creation», натисніть кнопку «Done» у нижній частині вікна.

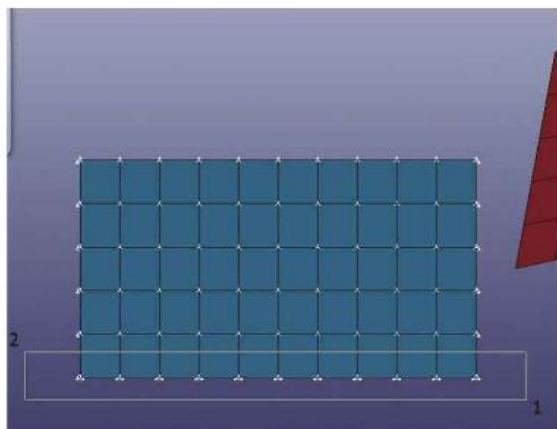


Рис. 2.27. Вибір нижніх вузлів заготовки

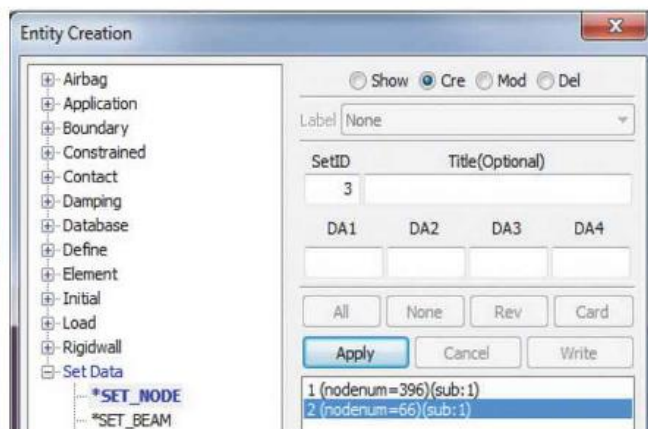


Рис. 2.28. Вікно «Create Entity»

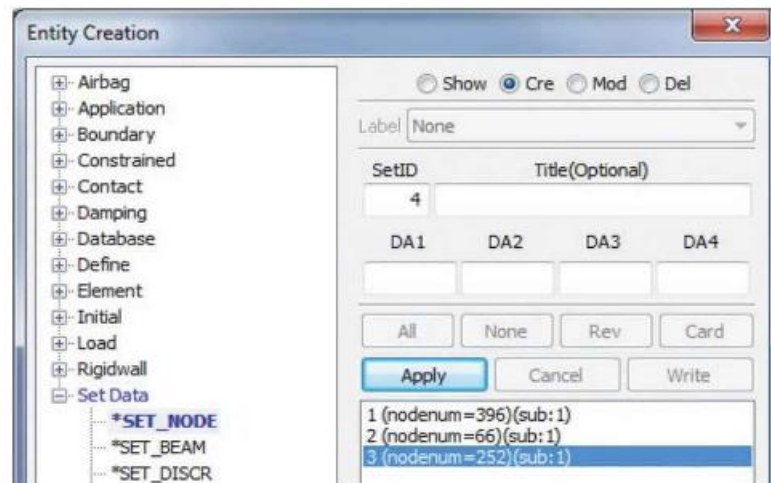


Рис. 2.29. Вікно «Create Entity»

2.1.3.7. Завдання алгоритму контактної взаємодії

Ключове слово «CONTACT» призначене для задання способу обробки контактної взаємодії між частинами розрахункової моделі, що роз'єднуються, задається алгоритм контактної взаємодії між заготівкою та інструментом, а також самоконтакт для заготівки з метою унеможливити проникнення стружки в заготівку.

Створимо контакт заготовки та інструменту типу «вузли до поверхні» з можливістю видалення елементів. Для цього в гілці «CONTACT» виберіть ключове слово ERODING NODES TO SURFACE, ця опція вимикає перевірку взаємного впровадження на початку моделювання і призводить до появи контактних сил, що усувають взаємне проникнення, і подвійним клацанням ЛКМ відкрийте вікно налаштувань. У вікні, що відкрилося, насамперед потрібно заповнити поля, виділені червоним прямокутником (рис. 2.30). У карті 4 заповніть поля:

- SSID ідентифікатор підлеглого сегмента, набору вузлів, набору частин моделі, ставимо «1»;
- MSID ідентифікатор набору головних сегментів, набору частин, однієї частини або набору оболонкових елементів, ставимо «1»;
- SSTYP підлеглий сегмент («Slave segment») або тип набору вузлів, ставимо «4» – ідентифікатор набору вузлів;
- MSTYP тип набору головних сегментів («Master segment»), ставимо «3» – ідентифікатор частини.

Як «Master segment» вказується частина моделі, що належить інструменту; як «Slave segment» ідентифікатор набору вузлів, що належать заготівці.

У карті 5 вказується коефіцієнт статичного тертя і коефіцієнт в'язкого демпфірування.

Карта 6 залишається за замовчуванням.

У карті 7 вказується:

- опція симетрії площини ISYM = 0 вимкнена;
- опція зникнення/внутрішній вузол EROSOP = 1: збереження інформації здійснюється таким чином, що може статися зникнення контакту;
- обробка сусіднього матеріалу для об'ємних елементів IADJ = 1: грані об'ємного елемента враховуються, якщо вони розташовані на межі різних матеріалів.

Додаємо карту «Termal» і вводимо зазначені на рис. 2.30 дані.

Для збереження введених даних натискається кнопка «Асерт» і кнопкою «Done» закривається вікно.



Рис. 2.30. Вікно «CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE»

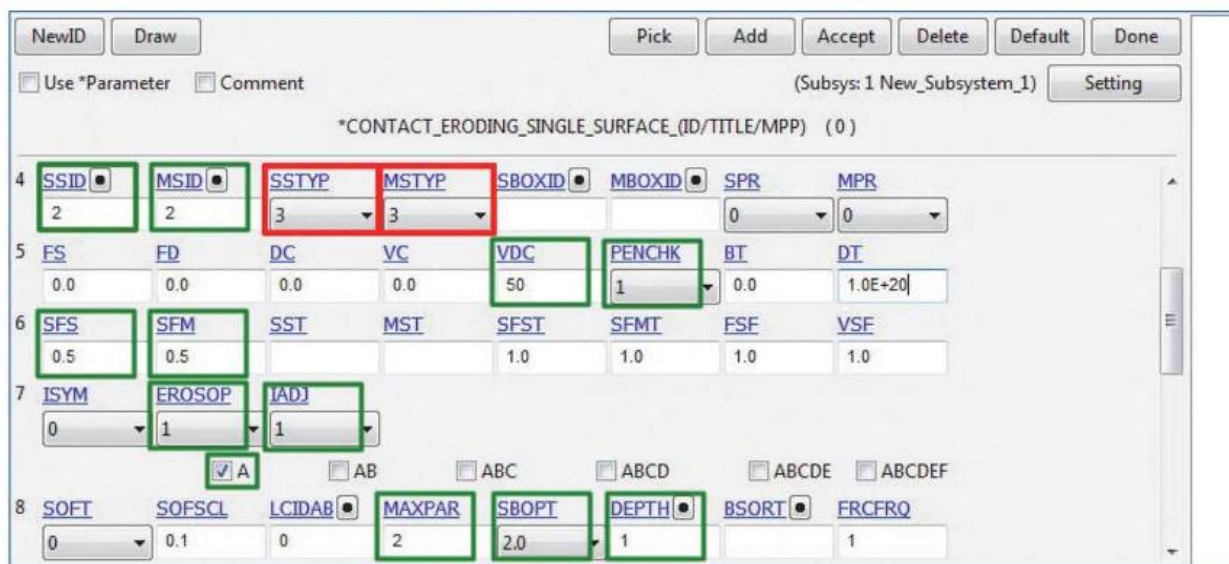


Рис. 2.31. Вікно «CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE»

Для визначення самоконтакту додаємо картку CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE та заповнюємо як представлено на рис. 2.31. Зберігаємо введені дані кнопкою «Accept» та кнопкою «Done» закриваємо вікно.

2.1.3.8. Завдання параметрів руху та обмежень

Завдання кривої навантаження

Ключове слово «DEFINE» – дозволяє задати прямокутні області, координатні системи, що задають криві, таблиці та орієнтуючі вектори для різних цілей.

Для визначення кривої навантаження у галузі «DEFINE» вибираємо ключове слово «DEFINE_CURVE» і створимо криву залежності швидкості руху від часу згідно з табл. 2.1.

Вихідні дані для кривої навантаження

Номер точки кривої	Час, мс (поле «A1»)	Швидкість, мм/мс (поле «O1»)
1	0	0
2	0,02	-5
3	5	-5

У першій карті в полі «LCID» (ідентифікатор кривої, що задає) ставимо – «1» (рис. 2.32), далі задається крива, за даними таблиці 1, заповненням полів «A1» (значення по осі абсцис) і «O1» (значення по осі ординат).

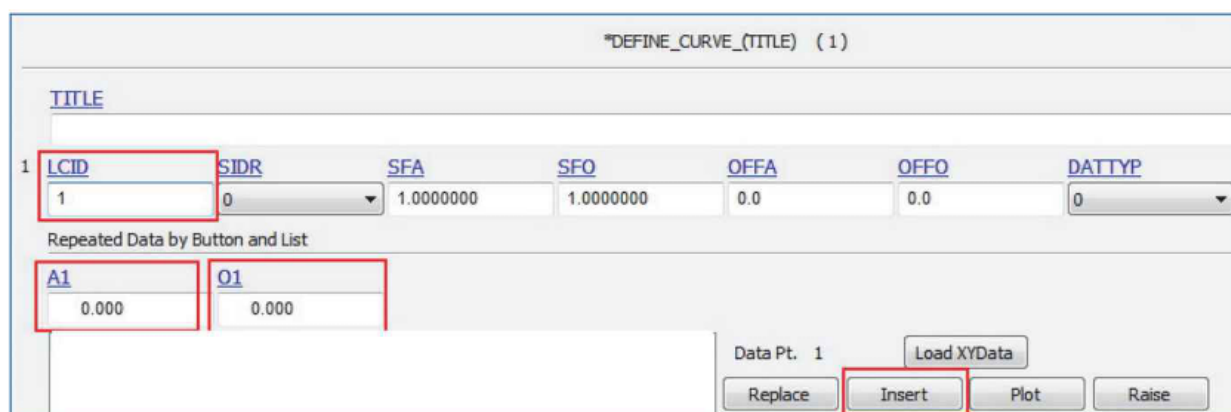


Рис. 2.32. Вікно «DEFINE_CURVE»

Задамо точку 1: у полі «A1» вводимо значення «0», у поле «O1» вводимо значення «0» і натискаємо кнопку (рис. 2.32), у полі, розташованому під полями «A1» та «O1», з'явиться запис із координатами введеної точки.

Задамо точку 2: у полі "A1" вводимо значення "0,02", у поле "O1" вводимо значення "-5" і натискаємо кнопку (рис. 2.33).

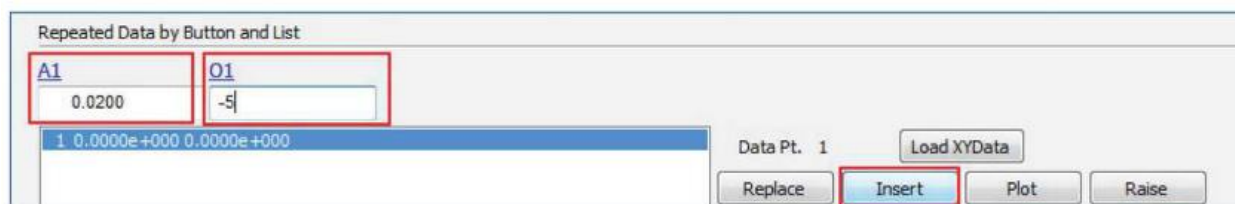


Рис. 2.33. Створення другої точки

Задамо точку 3: у полі «A1» вводимо значення «5», у полі «O1» вводимо значення «-5» та натискаємо кнопку «Insert» (рис. 2.34).

Зберігаємо введені дані кнопкою «Асепт». На рис. 2.35 представлена заповнена карта DEFINE_CURVE.

Закриваємо вікно кнопкою Done.

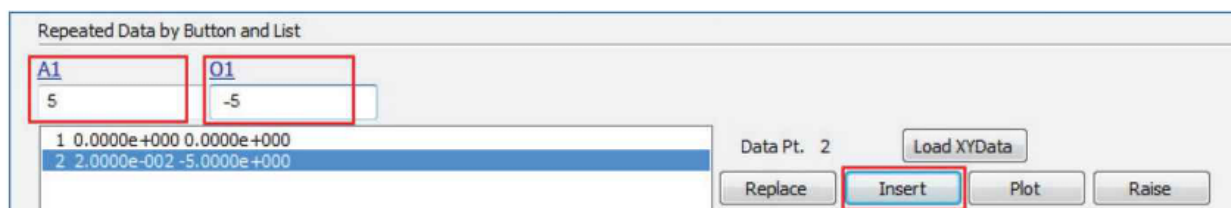


Рис. 2.34. Створення третьої точки



Рис. 2.35. Заповнене вікно «DEFINE_CURVE»

Завдання параметрів руху інструменту

Різальний клин інструмента повинен переміщатися по осі X зі певною швидкістю. Для завдання руху інструмента використовується ключове слово «BOUNDARY».

Розкриваємо гілку «BOUNDARY», подвійним натисканням ЛКМ вибираємо ключове слово «PRESCRIBED_MOTION_RIGID», у вікні, що з'явилося, зазначаємо такі значення, що наведені на рис. 2.36:

- PID – ідентифікатор частини розрахункової моделі;
- DOF – ступінь свободи, що застосовується, 1 – поступальний рух по осі X;
- VAD – прапор-ознака завдання швидкості/прискорення/переміщення, 0 – швидкість (тверді тіла і вузли);
- LCID – ідентифікатор задавальної кривої, для опису руху залежно від часу;
- SF – коефіцієнт перерахунку задавальної кривої;
- VID – ідентифікатор вектора, для значення DOF;
- DEATH – час, коли знімається задане обмеження/рух;
- BIRTH – час, коли задається рух/обмеження.



Рис. 2.36. Вікно «BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID»

Зберігаємо введені дані кнопкою «Асерт» та кнопкою «Done» закриваємо вікно.

Додаток обмежень на заготівку

Далі необхідно обмежити переміщення заготівки, наклавши обмеження на набір вузлів №2. У вкладці "BOUNDARY", подвійним натисканням ЛКМ вибираємо ключове слово "SPC_SET", у вікні вказуємо наступні значення, які наведені на рис. 2.37:

- NID/NSID. Ідентифікатор вузла чи набору вузлів, ставимо «2».
- DOFX. Ввести значення «1» для обмеження поступального руху у напрямку осі x;
- DOFY. Ввести значення «1» для обмеження поступального руху у напрямку осі y;
- DOFZ. Ввести значення «1» для обмеження поступального руху у напрямку осі z;

- DOFRX. Ввести значення "1" для обмеження обертального руху навколо осі x;
- DOFRY. Ввести значення «1» для обмеження обертального руху навколо осі y;
- DOFRZ. Ввести значення "1" для обмеження обертального руху навколо осі z.

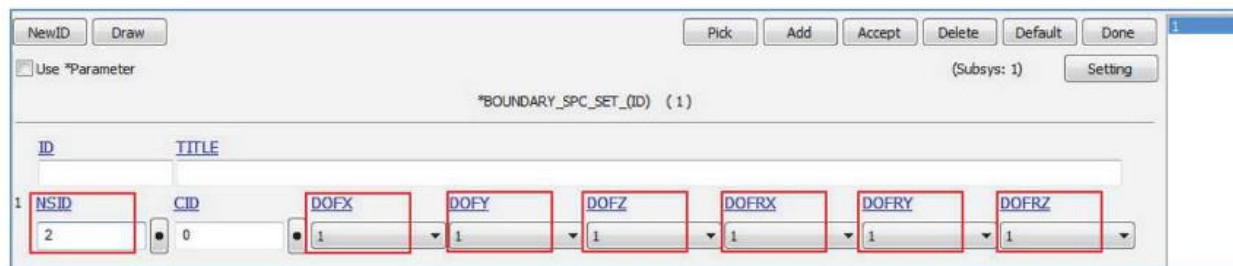


Рис. 2.37. Вікно «BOUNDARY_SPC_SET»

Зберігаємо введені дані кнопкою «Accept» та кнопкою «Done» закриваємо вікно. Приховуємо вкладку "BOUNDARY".

2.1.3.9. Завдання початкової температури для теплового аналізу

Для зазначення початкової температури розкриваємо гілку «INITIAL» і обираємо ключове слово «INITIAL_TEMPERATURE_SET», яке застосовується для завдання початкової температури у вузлах за допомогою ідентифікаторів вузлового набору або номерів вузлів. Ці початкові температури використовуються під час теплового аналізу або під час пов'язаного теплового аналізу та аналізу міцності. Вводимо значення температури в поле «TEMP», що дорівнює 20 °C, як показано на рис. 2.38.



Рис. 2.38. Вікно «INITIAL TEMPERATURE SET»

2.1.3.10. Завдання контрольних карт

На вкладці ключового слова «CONTROL» вказуються карти для зміни значень за замовчуванням, наприклад, активувати такі опції розв'язання, як перерахунок маси елемента, адаптивна перебудова сітки та використання неявних методів розв'язання.

Ключове слово ENERGY призначене для того, щоб забезпечувати керуючі параметри для опцій розсіювання енергії:

- NIGEN – опція розрахунку енергії для процедури опрацювання спотворень елементів на кшталт пісочного годинника, ставимо значення «2» – енергію розраховуємо і включаємо в загальний баланс;

- RWEN – опція дисипації енергії, ставимо значення «2» – енергію розраховують і включають у загальний баланс;

- SLNTEN – опція дисипації енергії по межі ковзання контактів, ставимо значення «2» – енергію розраховують і включають у загальний баланс;

- RYLEN – опція релеєвського розсіювання енергії, ставимо значення «2» – розсіювання енергії розраховують і включають у загальний баланс.

Заповнені поля ключового слова «CONTROL_ENERGY» представлено на рис. 2.39.

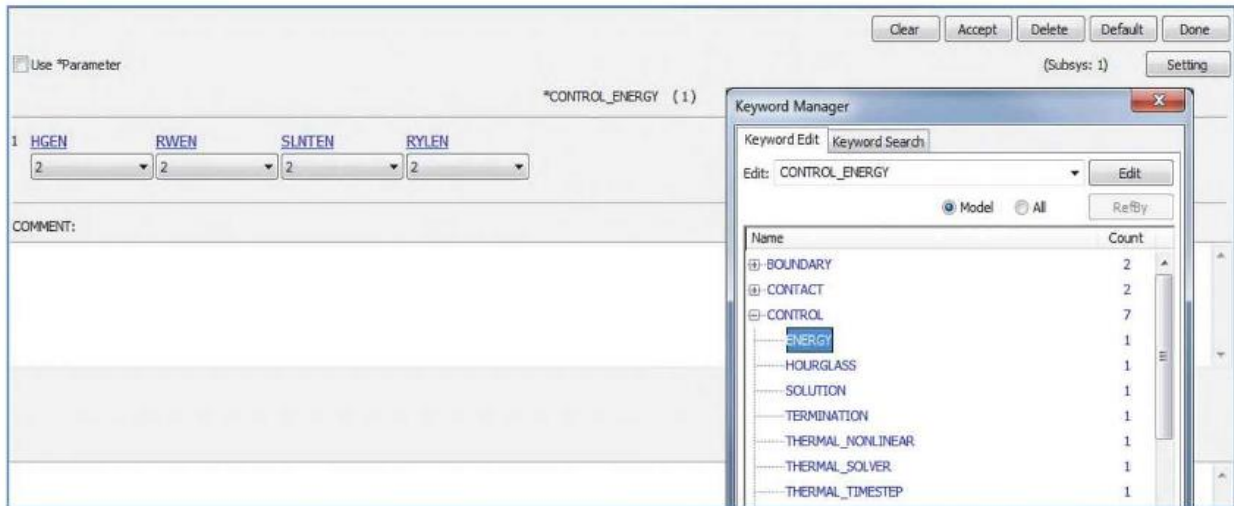


Рис. 2.39. Вікно «CONTROL_ENERGY»

Ключове слово HOURGLASS дає змогу задавати параметри, які використовуються процедурою опрацювання спотворень форми елементів за типом піщного годинника, для перевизначення значень за замовчуванням. Вводимо значення як на рис. 2.40:

- IHQ – тип в'язкості ставимо значення «5» – форма жорсткості перерізу за типом 3 (Фланаган-Беличко).
- QH – коефіцієнт за замовчуванням, ставимо значення «0.1».



Рис. 2.40. Вікно «CONTROL_HOURGLASS»

Ключове слово SOLUTION задає процедуру виконання аналізу, якщо виконується тільки тепловий розрахунок або пов'язаний тепловий аналіз. У поле «SOLN» вводимо значення «2» – пов'язаний міцнісний і тепловий аналіз, інші поля залишаємо за замовчуванням (рис. 2.41).



Рис. 2.41. Вікно «CONTROL_SOLUTION»

Ключове слово TERMINATION використовується для зазначення умов завершення виконання завдання, задаємо налаштування, показані на рис. 2.42. У полі «ENDTIM» вказуємо час завершення – 3 мілісекунди.



Рис. 2.42. Вікно «CONTROL_TERMINATION»

Ключове слово «THERMAL_SOLVER» дає змогу задавати параметри для нелінійного теплового або пов'язаного міцнісного і теплового аналізу. Задаємо налаштування, показані на рис. 2.43. REFMAX – максимальне число матричних перетворень на один крок за часом, ставимо значення «100», решта налаштувань залишаються за замовчуванням.



Рис. 2.43. Вікно «CONTROL_THERMAL_NONLINEAR»

Ключове слово «THERMAL_SOLVER» призначене задавати опції для теплового розрахунку або для пов'язаного міцнісного/теплового аналізу.

Вводимо значення (рис. 2.44):

- ATYPE – тип теплового аналізу, ставимо значення «1» – аналіз перехідного режиму;
- PTYPE – тип теплової задачі, ставимо значення «2» – нелінійна задача з властивостями матеріалу, що відповідають середній температурі елемента;
- SOLVER – тип розв'язувача теплового аналізу, ставимо значення «3» – dscg – ітеративний метод сполучених градієнтів, діагонально масштабований;
- CGTOL – похибка збіжності для вирішувачів типу 3 і 4, ставимо значення «1.0e⁻⁶»;
- GPT – кількість точок Гауса, використовуваних в об'ємних елементах, ставимо значення «1» – використовується одноточкова квадратура;
- FWORK – частка механічної роботи, перетвореної в теплоту, ставимо значення «0.9».

Інші налаштування залишаються за замовчуванням.



Рис. 2.44. Вікно «CONTROL_THERMAL_SOLVER»

- Ключове слово «THERMAL_TIMESTEP» використовується, щоб задавати параметри керування кроком рішення за часом для теплового розрахунку або для пов'язаного міцнісного/теплового аналізу.

- Задаємо налаштування, показані на рис. 2.45:

- ITS – початковий крок теплового розрахунку, ставимо значення «0.001»;
- TMIN – мінімальний крок теплового розрахунку, ставимо значення «1.0e⁻⁷»;
- TMAX – максимальний крок теплового розрахунку, ставимо значення «0.0139»;
- DTEMP – максимальна зміна температури під час кожного кроку за часом, заданим, як зазначено вище, що зменшуватиме крок теплового розрахунку, ставимо значення «100».



Рис. 2.45. Вікно «CONTPOL_THERMAL_TIMESTEP»

2.1.3.11. Завдання вихідних файлів з інформацією про результати розрахунку

Ключове слово "DATABASE" (БАЗА ДАНИХ) не є обов'язковим, проте завдання баз даних необхідне для отримання вихідних файлів з інформацією про результати розрахунку.

У Карті ASCII_option (рис. 2.47) вибираються файли у форматі ASCII (якщо файл не заданий, він записуватися не буде), в які записуватиметься відповідна інформація, а також вказується інтервал запису даних.

Вибрані файли у форматі ASCII для цієї задачі:

- GLSTAT – запис глобальних даних (рис. 2.46, а);
- MATSUM – запис даних про енергію системи (рис. 2.46, б);
- RCFORC – запис даних про рівнодіючі сили на поверхні розділу (рис. 2.46, в).

GLSTAT		
кінетична енергія		
внутрішня енергія		
повна енергія		
відношення		
енергія сітки-перешкоди		
енергія пружини та демпфера	MATSUM	
енергія при спотвореннях форми елемента	кінетична енергія	
енергія демпфування	внутрішня енергія	
енергія ковзної поверхні розділу	енергія при спотвореннях форми елемента	
робота зовнішніх сил	імпульс z, y, z	
швидкість z, y, z	швидкість z, y, z жорсткого тіла	
крок рахунку за часом	повна кінетична енергія	RCFORC
ідентифікатор елемента, що визначає крок за часом	повна енергія при спотвореннях форми елемента	сила z, y, z

Рис. 2.46. Вихідні дані для файлів у форматі ASCII

Use *Parameter

*DATABASE_OPTION (3)

<input checked="" type="checkbox"/> GLSTAT	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.003	0	0	1		
<input type="checkbox"/> GLSTAT_MASS_PROPERTIES	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.0	0	0	1		
<input type="checkbox"/> JNTFORC	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.0	0	0	1		
<input checked="" type="checkbox"/> MATSUM	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.003	0	0	1		
<input type="checkbox"/> MOVIE	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.0	0	0	1		
<input type="checkbox"/> MPGS	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.0	0	0	1		
<input type="checkbox"/> NCFORC	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>	<u>OPTION1</u>	<u>OPTION2</u>
	0.0	0	0	1	0	0
<input type="checkbox"/> NODFOR	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.0	0	0	1		
<input type="checkbox"/> NODOUT	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.0	0	0	1		
<input type="checkbox"/> RBDOUT	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.0	0	0	1		
<input checked="" type="checkbox"/> RCFORC	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>		
	0.003	0	0	1		

Рис. 2.47. Вікно «DATABASE _ ASCII _ option»

Для перегляду результатів розрахунку необхідно задати ім'я файлу двійкових вихідних даних, у який записуватиметься відповідна інформація із заданим користувачем інтервалом запису.

Для розглянутої задачі обираються два файли – D3PLOT і D3THDT, які за замовчуванням матимуть імена D3PLOT і D3THDT відповідно.

Файл D3PLOT містить інформацію, необхідну для видачі даних на графік по всій тривимірній геометрії моделі. Ці дані можна видати на графік за допомогою постпроцесора LS-POST. Файл D3THDT містить дані про динаміку змін і для підмножини елементів, а також глобальні дані. Ці дані можна видати на графік за допомогою постпроцесора LS-POST.

Карти DATABASE_BINARY_D3PLOT і DATABASE_BINARY_D3THDT з усіма необхідними налаштуваннями наведено на рис. 2.48 і рис. 2.49 відповідно.

Use *Parameter

*DATABASE_BINARY_D3PLOT (1)

Pick Accept Delete Default Done

Setting

1	<u>DT</u>	<u>LCDT</u>	<u>BEAM</u>	<u>NPLTC</u>	<u>PSETID</u>
	0.0	0	0	150	0
2	<u>IOOPT</u>				
	0				

Рис. 2.48. Вікно «DATABASE_BINARY_D3PLOT»



Рис. 2.49. Вікно «DATABASE_BINARY_D3THDT»

Після вказівки всіх налаштувань необхідно зберегти проект і запустити його на розрахунок.

2.1.4. Збереження моделі

Для збереження моделі необхідно на стандартній панелі (у верхній частині робочого вікна) натиснути кнопку «File», потім навести курсор на пункт «Save» і в списку, що розкривається, вибрати рядок «Save Keyword», як показано на рис. 2.50. У вікні «Save Keyword» (див. мал. 2.51), що відкрилося, вкажіть шлях до робочої папки, в якій буде збережено файл моделі, введіть назву файлу «Cutting1.k» і натисніть кнопку «Save».

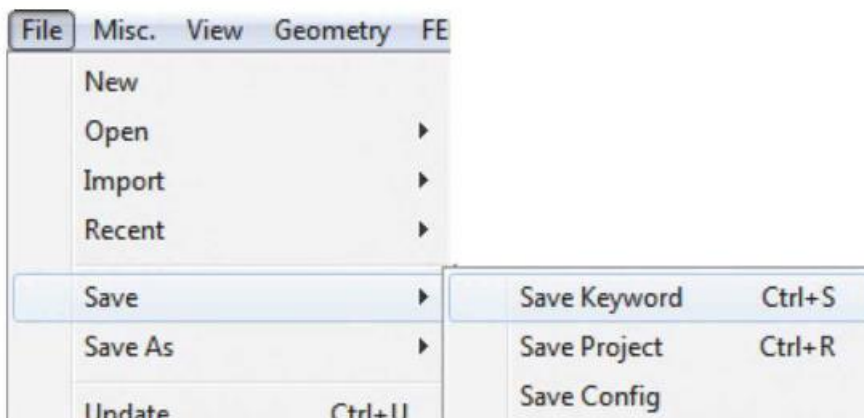


Рис. 2.50. Збереження моделі



Рис. 2.51. Вікно «Save Keyword»

2.1.5. Запуск завдання на розрахунок

Для запуску задачі на розрахунок необхідно розкрити в меню «Пуск» гілку «ANSYS 15.0» і запустити додаток «Mechanical APDL Product Launcher 15.0» (рис. 2.52). У вікні, що відкрилося (рис. 2.53), виконуються такі налаштування:

- у полі «Simulation Environment» оберіть пункт «LS-DYNA Solver»;
- у полі «Working Directory» необхідно вказати адресу робочої папки, в яку будуть записуватися файли, що містять результати розрахунку, задані за допомогою ключового слова «DATABASE»;
- у полі «Keyword Input File» необхідно вказати адресу збереженого в п. 2.1.4 к-файлу з ім'ям «Cuttingl.k».

Після завдання зазначених налаштувань необхідно натиснути кнопку «Run» у нижній частині вікна, у результаті відкриється вікно, у якому відобразатиметься хід розв'язання.

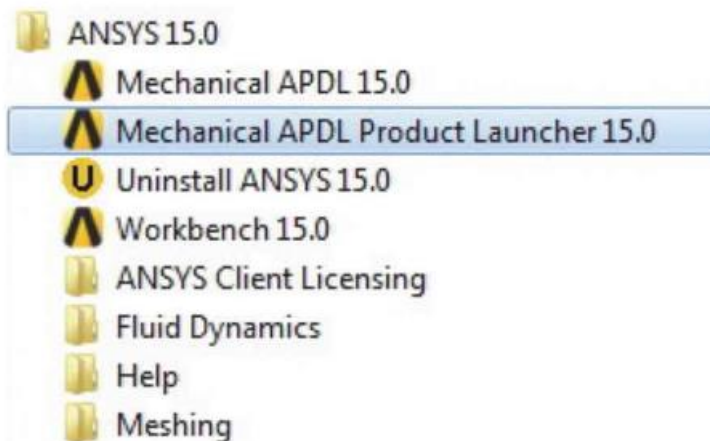


Рис. 2.52. Запуск програми «Mechanical APDL Product Launcher 15.0»

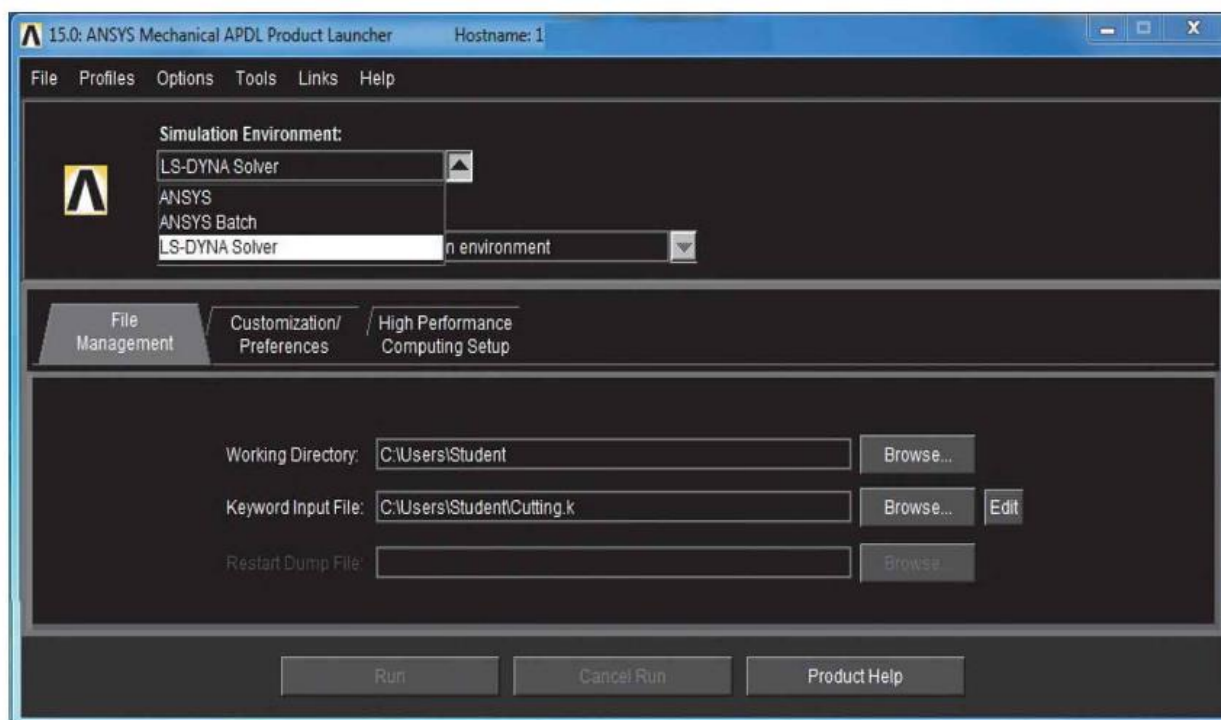


Рис. 2.53. Вікно «Mechanical APDL Product Launcher 15.0»

2.1.6. Перегляд результатів розрахунку

Для перегляду результату розрахунку необхідно запустити програму LS-PrePost, далі на стандартній панелі натиснути кнопку «File», потім навести курсор на пункт «Open» і в списку, що розкривається, вибрати рядок «LS-DYNA Binary Plot» (див. рис. 2.54).

У вікні «Open File» (див. рис. 2.55), що відкрилося, вкажіть шлях до робочої папки, в яку записувалися результати розрахунку, потім виберіть файл «d3plot» і натисніть кнопку «Відкрити».

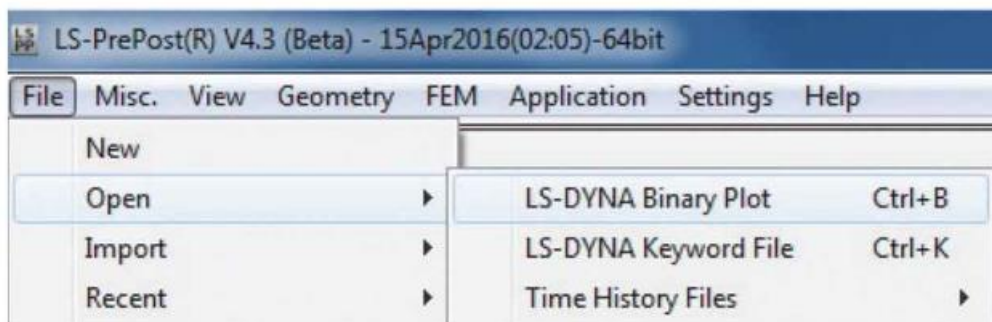


Рис. 2.54. Вибір типу файлу для відкриття

В результаті відкриється побудована раніше модель з можливістю анімації результату за допомогою вікна Animate (див. рис. 2.56). У цьому вікні є такі можливості:

- запуск анімації процесу;
- перемотування вперед і назад;
- зупинка анімації на потрібному етапі.

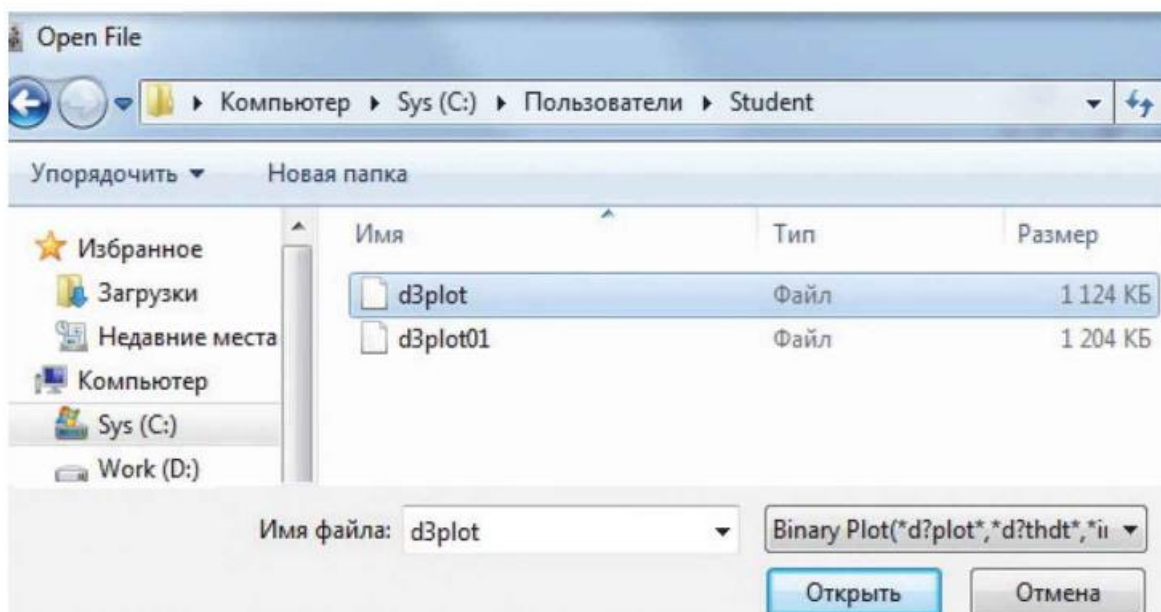


Рис. 2.55. Вікно «Open File»



Рис. 2.56. Вікно «Animate»

Для відображення результатів розрахунку в потрібному вигляді необхідно натиснути кнопку «Post» на панелі інструментів, розташованій праворуч, після цього відкриється додаткова інструментальна вкладка з набором кнопок для отримання різних епюр, графіків та інших варіантів перегляду результату розрахунку.

Для перегляду полів розподілу необхідно натиснути кнопку «Fringe Component», у результаті відкриється відповідне вікно (див. рис. 2.57, а, б, в), яке дає змогу відображати розподіл напружень, деформацій, температури тощо. Після вибору відповідного пункту модель стане різнобарвною, де кожному кольору відповідає певне значення обраного параметра.

На рис. 2.57, а, б, в представлено необхідні установки для перегляду розподілу ефективної пластичної деформації, еквівалентної напруги за фон Мізесом і температури відповідно, а на рис. 2.58, а, б, в представлено результати розподілу полів зазначених величин. Для більшої наочності й точності розрахунку представлені результати було виконано на моделі з розміром елемента 0,1 мм.

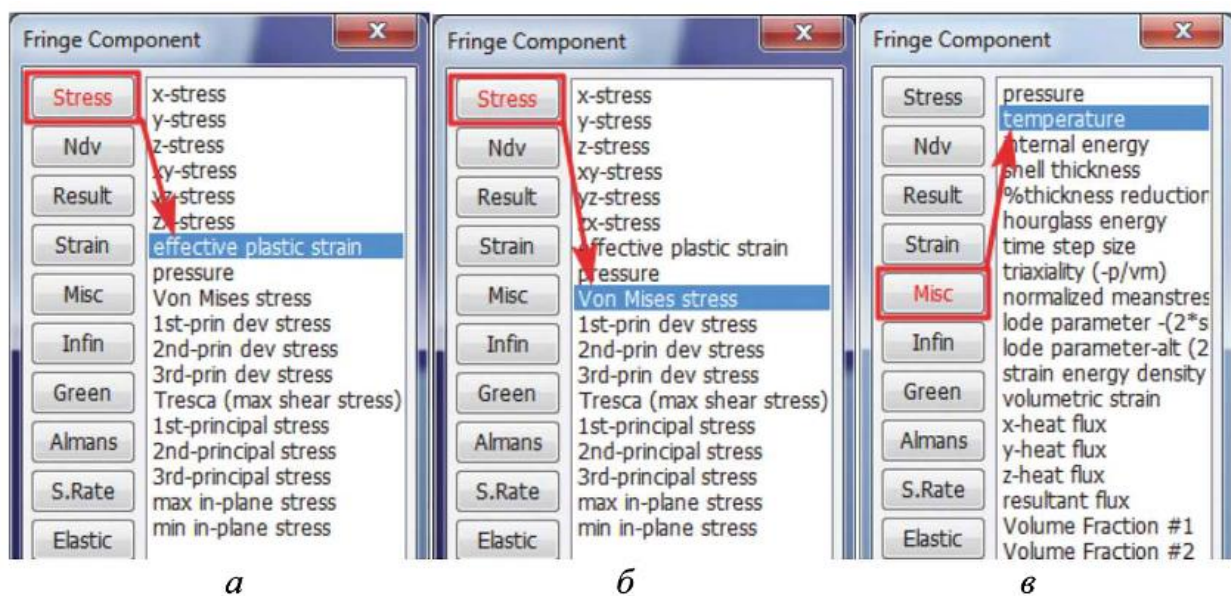


Рис. 2.57. Налаштування для перегляду результатів розподілу полів: а – ефективної пластичної деформації; б – еквівалентної напруги по Мізесу; в – температури

Найбільше значення полів пластичних деформацій $\epsilon_{\max} = 1,27$ (див. рис. 2.58 а). Розподіл полів напруг показує, що максимальне напруження $\sigma_{\max} = 400$ МПа (рис. 2.58, б). Найбільші напруження зосереджені у області утворення стружки. Найбільша температура спостерігається на лінії контакту різальної кромки інструменту із заготівкою і становить у середньому 110 °С (рис. 2.58, в).

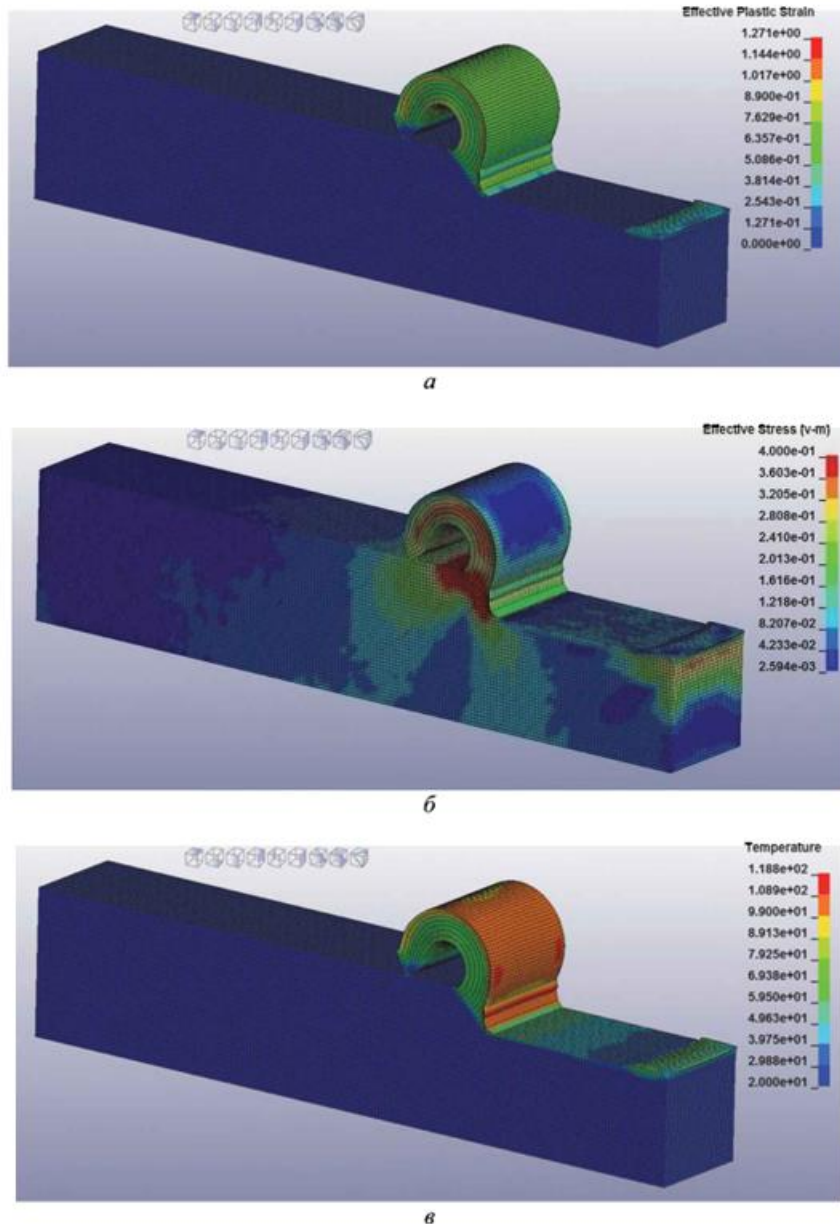


Рис. 2.58. Перегляд результатів розподілу полів: а – ефективної пластичної деформації; б – еквівалентної напруги за Мізесом; в – температури

Для побудови графіка результуючої сили різання натисніть кнопку «ASCII» на панелі інструментів, розташованій праворуч, у результаті відкриється вікно, представлене на рис. 2.59, а. У верхній частині вікна необхідно вибрати пункт «rforce», у результаті у вікні з'являться додаткові поля, потім натисніть кнопку «Load», що дасть змогу завантажити дані про сили, що діють у моделі (див. рис. 2.59, б). Поруч із пунктом «rforce» має з'явитися значок «[1]». У другому полі виберіть пункт «MA-1», а в полі нижче – результуючу силу і натисніть кнопку «Plot» (див. рис. 2.59, в). У результаті з'явиться графік результуючої сили різання (див. рис. 2.60).

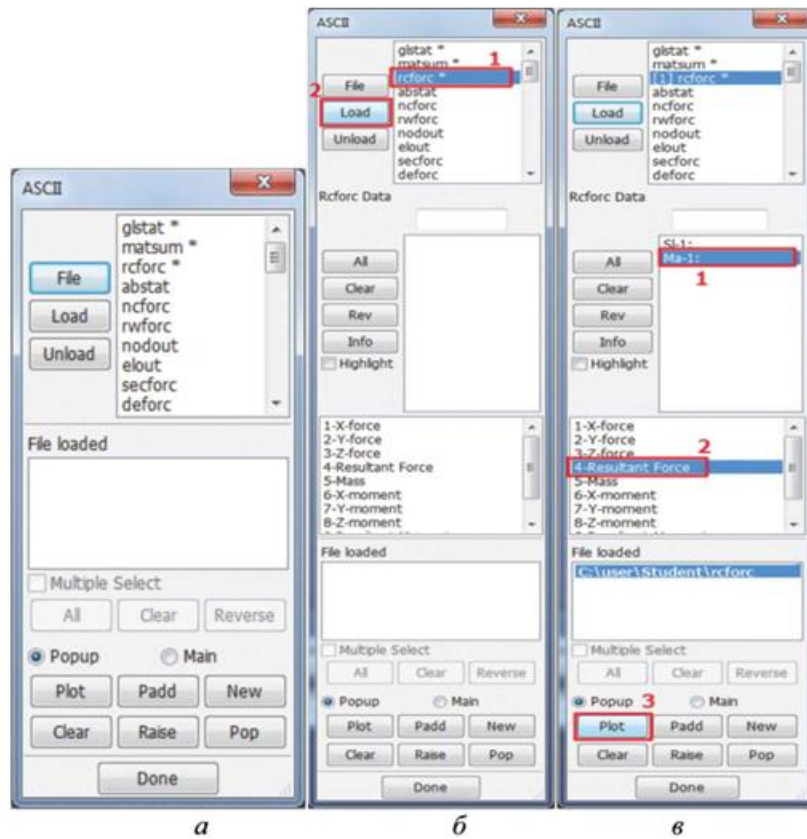


Рис. 2.59. Вікно "ASCII": а – загальний вигляд вікна; б – вибір та завантаження результатів розрахунку; в – побудова графіка

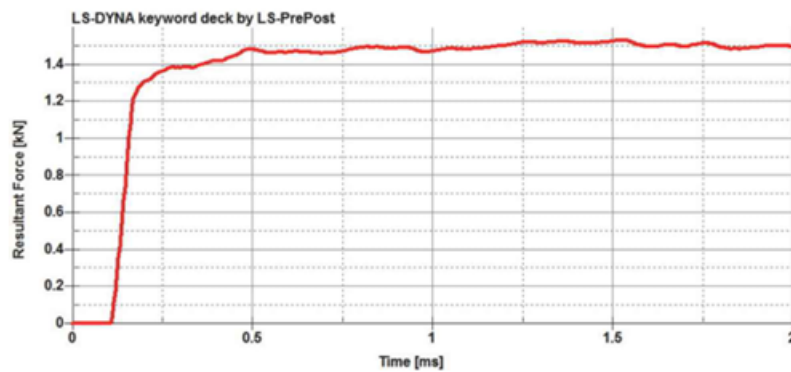


Рис. 2.60. Результуюча сила різання

Розрахункове значення результуючої сили різання F (рис. 2.60) становило 1,5 кН.