



УДК 621.91:004.94

ПОРІВНЯННЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОПЕРАЦІЇ СТРУГАННЯ

М. В. Паровченко⁽¹⁾, О. Г. Наріжний⁽²⁾

⁽¹⁾ АТ ФЕД,

*⁽²⁾ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Відомо, що методи різання (прямолінійного стругання, обточування, фрезерування, протягування, розсвердлювання) на машинобудівних підприємствах мають долю 50-70% усього об'єму механічної обробки.

У зв'язку з цим виникає потреба в дослідженнях процесів різання та методах дослідження процесів різання. В наш час дослідження технологічних процесів успішно виконуються за допомогою моделювання, заснованого на чисельних методах розв'язання задач механіки суцільних середовищ. Великий об'єм досліджень виконано за допомогою метода скінченних елементів (МСЕ), який відноситься до так званих сіткових методів. Розрахункова практика визначила суттєві недоліки цього методу: невиконання законів збереження маси, кількості руху та енергії.

В останні роки розроблені безсіткові методи, серед них SPH та SPG, які не мають недоліків, що характерні МСЕ. Крім того вони досить природно відображують процес руйнування та утворення нових поверхонь в результаті дії різця. Наступна доповідь дає порівняння цих методів на прикладі моделювання технологічної операції стругання.

Математична модель процесу різання

В основі моделі лежать три фундаментальні закони механіки деформованого твердого тіла.

Закон балансу маси

$$\rho J = \rho_0, \quad (1)$$

де $J = \det(\mathbf{F}) = \det\left(\frac{\partial x_i}{\partial X_j}\right)$ – якобіан, функціональний визначник, що дорівнює величині відносного об'єму в точці тіла; $x_i, X_i, i = 1, 2, 3$ – лагранжеві та ейлерові координати точки; \mathbf{F} – градієнт руху; ρ, ρ_0 – густина матеріалу тіла в даний момент часу та на початку руху, відповідно.

Закон балансу енергії за умов адіабатичного та ізотермічного деформування

$$\rho_0 \dot{w} = \dot{\mathbf{F}} : \boldsymbol{\sigma}, \quad (2)$$



де \dot{W} – потужність внутрішніх сил (швидкість зміни внутрішньої енергії), $\dot{\mathbf{F}}$ – швидкість градієнт руху, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напружень Коши. Справа позначено подвійна згортка добутку тензорів.

Закон балансу кількості руху в проекціях на осі ортогонального базису

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \rho \mathbf{f} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla, \quad (3)$$

де \mathbf{u} – вектор переміщення, \mathbf{f} – вектор зовнішніх об'ємних сил, ∇ – оператор Гамільтона.

Контактні умови визначають взаємодію тіл механічної системи

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}^+ \cdot \mathbf{n} = \boldsymbol{\sigma}^- \cdot \mathbf{n} \text{ при } (\mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^-) \cdot \mathbf{n} > 0, \\ (\boldsymbol{\sigma}^+ - \boldsymbol{\sigma}^-) \cdot \mathbf{n} \text{ при } (\mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^-) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\boldsymbol{\sigma}^+, \boldsymbol{\sigma}^-$ – тензори напружень на поверхнях двох тіл, $\mathbf{u}^+, \mathbf{u}^-$ – вектори переміщення на поверхні двох взаємодіючих тіл, \mathbf{n} – вектор нормалі.

Граничні умови визначають стан на вільних поверхнях

– в переміщеннях

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}, \quad (5)$$

– в напруженнях

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{P}, \quad (6)$$

де \mathbf{U} – заданий вектор переміщень поверхні як функція координат та часу, \mathbf{P} – заданий вектор поверхневих напружень як функція координат та часу.

Початкові умови для деталі

$$\mathbf{u}|_{t=0} = 0, \quad \dot{\mathbf{u}}|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Закон руху різця

$$\dot{\mathbf{u}} = v_x \mathbf{i}_x = const. \quad (8)$$

Матеріальні моделі елементів технологічної системи:

– різець виконаний з абсолютно твердого матеріалу;

– деталь виконана з лінійно-пружного пластичного матеріалу з лінійним деформаційним зміцненням.

Умова руйнування матеріалу деталі – при досягненні заданої величини пластичної деформації e_{pl} в точці деталі розривається зв'язок між частками тіла.

За методом SPH частинка пориває усі зв'язки та починає вільний рух, а за методом SPG залишаються обхідні зв'язки.

Параметри розрахункової моделі

На рис. 1, а зображено деталь 2 у вигляді прямокутного паралелепіпеда та різець 1 (розміри в мм). На початку процесу різуча кромка різця нижче верхньої грані деталі (на 0,2 або 0,5 мм) і віддалена від деталі на 0,1 мм вздовж осі z .

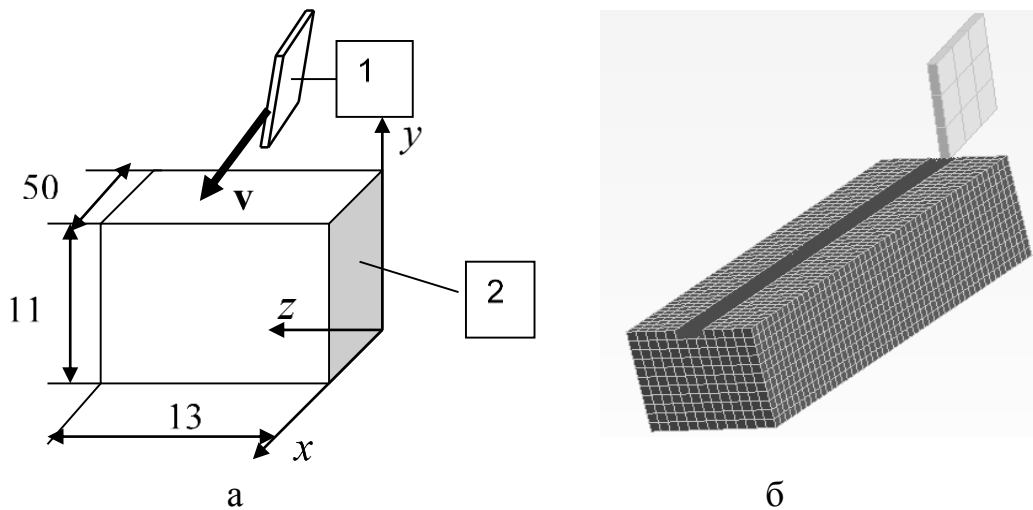


Рис.1. Схема (а) та дискретизація системи (б)

На рис. 1, б зображено множину скінченних елементів та SPH або SPG частинок, які використані для дискретизації елементів технологічної системи. Для дискретизації різця використано 9 шестигранних скінченних елементів. Для дискретизації деталі використано змішаний спосіб. Вздовж лінії різання використана рівномірна мережа SPH або SPG частинок; вздовж осі x 200 рядків, вздовж осі y 10 рядків та вздовж осі z 10 рядків, загалом 20000 частинок.

Для дискретизації та рішення рівнянь математичної моделі (1)-(8) використано пакет LS-DYNA. Для різця використано матеріал RIGID, густина $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 2 \times 10^{11} \text{ Па}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$. Для деталі – матеріал PLASTIC_KINEMATIC, густина $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 2 \times 10^{11} \text{ Па}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, початкова межа пластичності $\sigma_0 = 2 \times 10^8 \text{ Па}$, модуль зміцнення $\eta = 2 \times 10^9 \text{ Па}$, критерій руйнування $e_{pl} = 0,3$ або 1,5.

Контактний інтерфейс між різцем та SPH або SPG частинками – CONTACT AUTOMATIC NODE TO SURFACE. Контактний інтерфейс зчеплення між скінченними елементами та SPH частинками – CONTACT TIED NODES TO SURFACE OFFSET. Контактний інтерфейс зчеплення між скінченними елементами та SPG частинками за рахунок ототожнення вузлів.

Вузли на нижній поверхні деталі нерухомі, різець рухається поступово вздовж осі x із постійною швидкістю $v = 10 \text{ м/с}$.

Початкові умови На початку процесу усі елементи нерухомі, їхній стан зображений на рис. 1, а.

Розглянуті результати руйнування деталі та утворення стружки. Використання SPG методу дає більш природну картину різання з утворенням канавки, стружки та задирок.

В подальшому SPG метод буде використаний для моделювання фрезерування верстатного паза за допомогою фрезерування.