

УДК 621.9.01

**М.П. МАЗУР**, д-р техн. наук,  
**А.С. ГАЮР**,  
**Ю. БЕНЬ**, Хмельницький, Україна

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ЯВИЩ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ІНСТРУМЕНТОМ З ПОКРИТТЯМ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

У статті наведено стислий опис скінченноелементної моделі процесу вільного ортогонального різання лезовим інструментом із покриттям. Огляд найбільш широко розповсюджених покриттів для лезових інструментів та порівняння впливу покриттів на термічні процеси, що виникають при лезовому обробленні.

В статье приведено краткое описание конечноэлементной модели процесса свободного ортогонального резания лезвийным инструментом с покрытием. Сделан обзор наиболее распространенных покрытий для лезвийных инструментов и проведено сравнение влияния покрытий на тепловые процессы, возникающие при лезвийной обработке.

A concise description of the finite element model of the process of free orthogonal cutting with edged coated tool is given in the article. A review of the most common coatings for edged tools is shown and the influence of coatings on the heat processes occurring at the edged machining is compared.

### **Вступ.**

Підвищення продуктивності роботи металообробного обладнання за рахунок зміни режимів різання та скорочення часу, пов'язаних зі зміною інструменту являється однією із важливих проблем сучасного машинобудування. У зв'язку з цим доцільно використовувати зносостійкі покриття, що дозволяють значною мірою підвищити ресурс інструменту. Тому напрямок розроблення нових інструментальних покриттів у даний час активно розвивається. Метод скінченних елементів (МСЕ) дозволяє попередньо розробити модель механічного оброблення інструментом із покриттям, що у свою чергу дозволяє спрогнозувати доцільність використання покриттів в умовах аналогічних змодельованим.

**Основана частина.** Опис методики моделювання.

Розглядається термомеханічна задача напружено-деформованого стану при обробленні лезовим інструментом. Модель побудована на основі попередньо розробленої моделі механічного оброблення металу в умовах низьких температур [1]. Розрахунок відбувається на основі ітераційного методу обчислення, на базі програмного продукту Deform – 3D. Метод полягає у розбитті всього процесу на малі проміжки часу, під час обрахунку яких обчислюється температурне поле у системі. Одночасно в ході даного розрахунку відбувається перебудова сітки скінчених елементів та оновлення граничних умов. Процес відбувається до завершення встановленого часу розрахунку.

Під час моделювання були прийняті наступні умови: інструмент абсолютно однорідний та абсолютно твердий, покриття на інструменті має однорідну структуру, покриття абсолютно тверде та має сталу товщину на всій поверхні леза. Заготовка – прямокутне тіло, переміщення якого обмежене по осі Y. Різання відбувається завдяки переміщенню заготовки вздовж осі X із швидкістю різання  $V = 200$  м/хв. (рис. 1). Товщина зрізаного шару по всій довжині заготовки однакова і дорівнює  $a=0,15$  мм. Процес різання відбувається у повітряному середовищі при  $T_{\text{п}}=20^{\circ}\text{C}$ . Елементи системи контактують із навколишнім середовищем, яке у свою чергу являється охолоджувачем. При цьому відбувається конвективний теплообмін, в умовах вимушеної конвекції, при зовнішньому обтіканні середовища системи. Коефіцієнт тепловіддачі системи в цьому випадку дорівнює  $k = k_0 \Delta T^n$  ( $k_0 = 0,004$  кВт/( $\text{m}^2 \times ^{\circ}\text{C}$ ,  $n = 0,25$ ) [2].

Матеріал заготовки – сталь 45, визначальне рівняння параметрів міцності матеріалу задається рівнянням Мізеса  $\bar{\sigma} = \sigma_n(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ , а визначальне рівняння цих же характеристик інструментальних матеріалів задається формулою Т. Altan [3]  $\bar{\sigma} = c\varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m + y$ . Тепловий потік між стружкою та інструментом, створений джерелами тертя, розподіляється згідно залежності  $\frac{q_{\text{стружки}}}{q_{\text{інструменту}}} = \frac{\sqrt{\theta_c c_c \rho_c}}{\sqrt{\theta_i c_i \rho_i}}$  [4], де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $c$  – питома теплоємність,  $\rho$  – густина матеріалу. У симуляційному моделюванні використовувалось для порівняння три

покриття TiN, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, коефіцієнти теплопровідності яких приведені у таблиці 1.

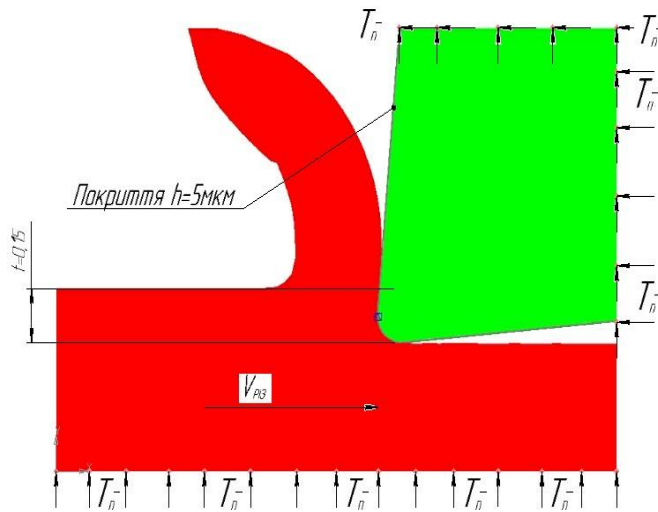


Рисунок 1 – Розрахункова схема та граничні умови

У таблиці 2 приведені залежності теплофізичних властивостей сталі 45 від температури.

Таблиця 1 – Коефіцієнти теплопровідності для матеріалів покриттів ( $\lambda$ , Вт/м\*К) при різних температурах [5]

| T, K | TiN | TiC | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|------|-----|-----|--------------------------------|
| 100  | -   | -   | 400                            |
| 200  | 44  | 33  | 196                            |
| 300  | 34  | 29  | 40                             |
| 400  | 26  | -   | 32                             |
| 500  | 20  | 18  | 28                             |
| 600  | 16  | -   | 21                             |
| 700  | 12  | 11  | 15,7                           |
| 800  | 9   | -   | 12,5                           |
| 1000 | 7   | -   | 10,5                           |
| 1200 | 6   | -   | 7,8                            |

Таблиця 2 – Механічні та теплофізичні характеристики сталі 45 і їх залежність від температури

| Характеристика | T, °C | E 10 <sup>-5</sup> , МПа | $\alpha$ 10 <sup>6</sup> 1/°C | $\lambda$ , Вт/(м·град) | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | C, Дж/(кг·град) |
|----------------|-------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|
| Значення       | 20    | 2                        | -                             | -                       | 7826                       | -               |
|                | 100   | 2,1                      | 11,9                          | 48                      | 7799                       | 473             |
|                | 200   | 1,93                     | 12,7                          | 47                      | 7769                       | 494             |
|                | 300   | 1,9                      | 13,4                          | 44                      | 7735                       | 515             |
|                | 400   | 1,72                     | 14,1                          | 41                      | 7698                       | 536             |
|                | 500   | -                        | 14,6                          | 39                      | 7662                       | 583             |
|                | 600   | -                        | 14,9                          | 36                      | 7625                       | 578             |
|                | 700   | -                        | 15,2                          | 31                      | 7587                       | 611             |
|                | 800   | -                        | -                             | 27                      | 7595                       | 720             |
|                | 900   | -                        | -                             | -                       | 26                         | -               |

### Результати моделювання.

У ході симуляційного моделювання, вирішувалась термомеханічна задача, яка дозволяє проаналізувати розподіл температурних полів у системі заготовка – інструмент із покриттям (рис. 2...4), а на рисунках 5-7 при тих же умовах, але у тілі різального інструменту із покриттями.

Оброблення проводилося інструментом із геометричними параметрами  $\gamma = 5^\circ$ ,  $\alpha = 5^\circ$ , радіус заокруглення різальної кромки  $R=0,05$  мм. Коефіцієнт тертя на передній поверхні інструменту при моделюванні приймався у першому наближенні постійним: для інструментів із покриттями TiN та TiC  $\mu = 0,4$ , а із для інструменту із покриттям Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -  $\mu = 0,45$  [6].

За результатами даного етапу досліджень можна зробити наступні висновки. При порівнянні покриттів трьох типів (TiC, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (рис. 8) напруження в зоні різання майже незмінні,  $\sigma_{\text{TiN max}} = 1240$  МПа,  $\sigma_{\text{TiC max}} = 1250$  МПа,  $\sigma_{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ max}} = 1240$  МПа, характер розподілу напружень однаковий. Проте найбільше вираженою є різниця температур на ріжучому лезі. При використанні Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> температура на вершині різця суттєво знизилась. Різниця температур в порівнянні з TiC

склала  $260^{\circ}\text{C}$ . Цей фактор можна пояснити різницею коефіцієнтів теплопровідності матеріалів, що використовувалися при моделюванні, і дозволяє більш теплопровідному покриттю на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  збільшувати відвід тепла у інструмент, тоді як інші покриття працюють як термобар'єри.

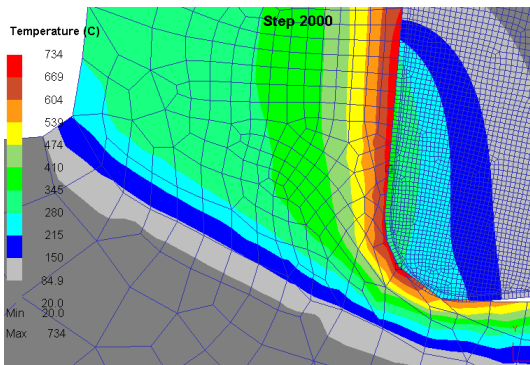


Рисунок 2 – Розподіл температурних полів у системі заготовка – інструмент, при обробленні сталі 45 інструментом із покриттям TiC

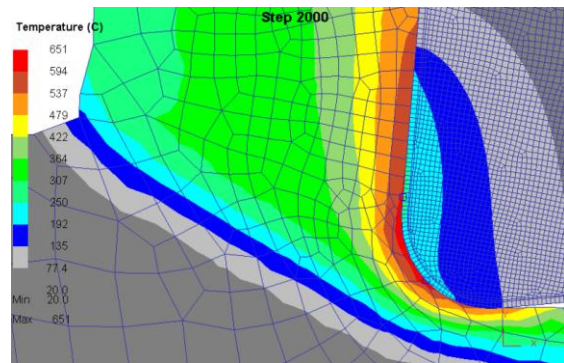


Рисунок 3 – Розподіл температурних полів у системі заготовка – інструмент, при обробленні сталі 45 інструментом із покриттям TiN

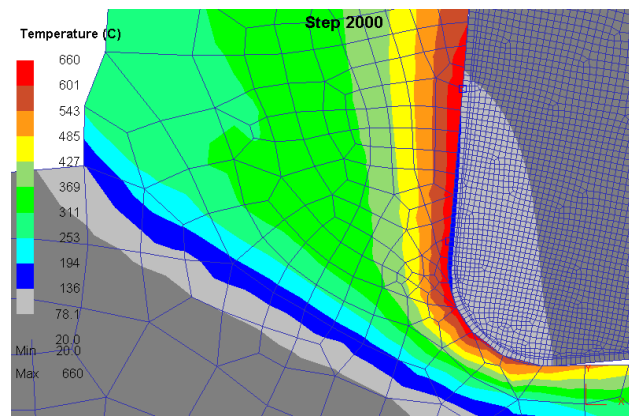


Рисунок 4 – Розподіл температурних полів у системі заготовка – інструмент, при обробленні сталі 45 інструментом із покриттям  $\text{Al}_2\text{O}_3$

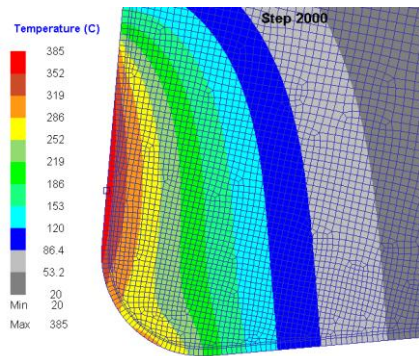


Рисунок 5 – Розподіл температурних полів у лезі інструменту із покриттям TiN

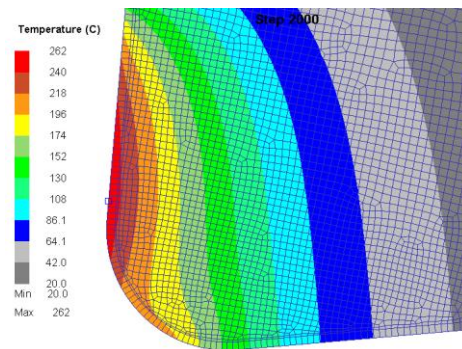


Рисунок 6 – Розподіл температурних полів у лезі інструменту із покриттям TiC

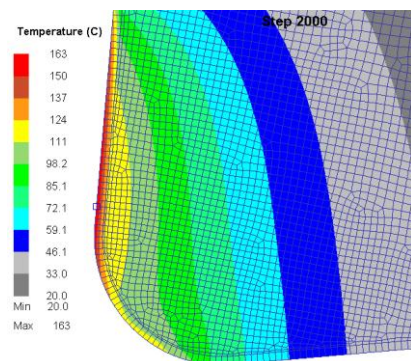


Рисунок 7 – Розподіл температурних полів у лезі інструмента із покриттям Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

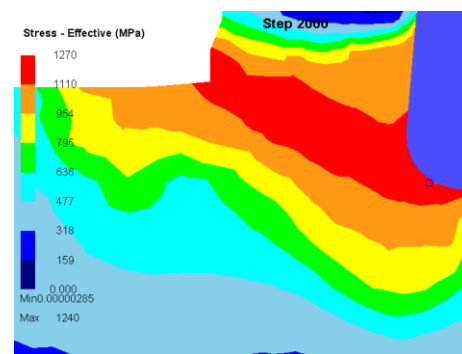


Рисунок 8 – Розподіл нормальних напружень у тілі заготовки при моделюванні (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Розроблена скінченно-елементна модель дозволяє попередньо дослідити вплив покриттів на параметри процесу різання, оцінити ефективність їх використання у заданих умовах моделювання, виходячи із найбільш впливаючого на працездатність інструмента фактору – температури в зоні різання і у різальному лезі інструмента.

**Список використаних джерел:** 1. Мазур М.П. Комп'ютерне моделювання процесу обточування процесу обточування труб великого діаметра / М.П. Мазур, Л.В. Присяжний, А.С. Гаюр // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická konference «Vědecký pokrok na přelomu tisyachalety – 2013» Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science», 2013. – 96 с. 2. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности

режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1979 – 168 с. **3.** Grzesik W., Nieslony P., Bartoszek M. Comparative Assessment of the Tool Temperature Prediction using Analytical and Simulation Models//Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. -Chemnitz, 2005. -С. 659 - 666. **4.** Криворучко Д.В. Основи 3D моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів : навч. посіб. / Д.В. Криворучко. – Суми : СумДУ, 2010. – 209 с **5.** Відкрита міжнародна база матеріалів. Доступ до ресурсу: <http://www.matweb.com/> **6.** Cenk KILIÇASLAN Modeling and simulation of metal cutting by finite element metod. – Izmir, 2009 – С. 73.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Mazur M.P. Komp'juterne modeljuvanja procesu obtochuvannja procesu obtochuvannja trub velikogo diametra / М.Р. Mazur, L.V. Prisjazhnij, A.S. Gajur // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická konference «Vědecký pokrok na přelomu tisyachalety – 2013» Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science», 2013. – 96 p. **2.** Ostaf'ev V.A. Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushhego instrumenta. – М.: Mashinostroenie, 1979 – 168 s. **3.** Grzesik W., Nieslony P., Bartoszek M. Comparative Assessment of the Tool Temperature Prediction using Analytical and Simulation Models//Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. -Chemnitz, 2005. -С. 659- 666. **4.** Krivoruchko D.V. Osnovi 3D modeljuvanja procesiv mehanichnoï obrobki metodom skinchennih elementiv: navch. posib. / D.V. Krivoruchko. – Sumi : SumDU, 2010. – 209 s **5.** Vidkrita mizhnarodna baza materialiv. Dostup do resursu: <http://www.matweb.com/> **6.** Cenk KILIÇASLAN Modeling and simulation of metal cutting by finite element metod. – Izmir, 2009 – С. 73.