

УДК 621.91 : 004.9

**Мироненко Є. В., Гончаров О. А., Юнда А. М., Васильєва Л. В.,
Коваль С. В., Білоус Д. О.****ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ
ПЛАСТИН З БАГАТОШАРОВИМ ПОКРИТТЯМ**

Одним із сучасних напрямків металообробки є розробка та створення покриттів для ріжучого інструменту, які витримують достатньо великі теплові та механічні навантаження з малим коефіцієнтом зносу та деформації. Такі покриття забезпечують значну термічну стабільність при високих швидкостях різання та достатню зносостійкість інструменту, що значно підвищує робочий ресурс ріжучої насадки [1]. Робочі характеристики таких конструкційних елементів залежать від впливу температури [2–4]. Величина і закон розподілу температурних напружень в матеріалі обумовлені характером температурного поля. Тому вдосконалення методів його розрахунку у багатокомпонентних системах є актуальною задачею і має великий практичний інтерес. Побудова та реалізація математичних моделей нестационарних процесів теплопровідності в пластинах з багатошаровим покриттям дозволяє врахувати розподіл температур, вивчити процес теплоперенесення, спрогнозувати теплофізичний характер змін механічних характеристик матеріалів. Моделюванню процесу теплопровідності в пластинах з багатошаровим покриттям присвячено багато наукових праць [5–7].

Задача розробки математичної моделі для ріжучої пластини із одношаровим та двошаровим покриттям та її реалізація одним з чисельних методів в двовимірному випадку постійно залишається в полі зору науковців [8–12]. Не зважаючи на значний інтерес вчених до цієї проблеми, питання впливу модифікованої поверхні на фізико-термічні властивості різального інструменту є актуальним на даний час. Чисельне моделювання процесів теплообміну в даний час набуває великого значення тому, що для сучасної науки і техніки необхідний достовірний прогноз таких процесів. Експериментальне вивчення теплових процесів в лабораторних або натурних умовах дуже складне і потребує багато грошових ресурсів, а в деяких випадках це є просто неможливим. Чисельне моделювання процесів теплопереносу все успішніше входить в практику роботи різних науково-дослідних, проектно-конструкторських і виробничих установ.

Метою даного дослідження є розробка математичної моделі теплового поля твердосплавних пластин без покриття, і з багатошаровим покриттям при точінні валків прокатних станів на основі забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки при знятті великих претинів зрізу.

Відомо, що в процесі обробки, максимальна температура генерується на поверхні ріжучого інструменту. Передача тепла в процесі різання є дуже складним процесом, оскільки зі збільшенням температури змінюються фізичні та механічні характеристики металевих конструкцій. Температура, що діє на робочу поверхню безпосередньо впливає на знос інструменту, обмежує застосування більш швидкісних режимів різання, тобто обмежує максимальні умови продуктивності і строк служби інструменту. Приблизно 85–90 % тепла, що утворюється при різанні, є результатом перетворення роботи різання в теплоту. Решта роботи витрачається на деформацію кристалічної решітки. Температура у зоні різання, яка є основним фактором, що визначає процес різання, зростає завдяки збільшенню кількості підведеної теплоти. Від неї залежить сила тертя, усадка стружки, сила різання, знос інструменту.

Змоделюємо тепловий процес, який протікає у різці (рис. 1).

Область рішення D розділена внутрішньою границею Γ_4 на дві підобласті D_1 (ріжуча пластина) та D_2 (державка різця). Зовнішня границя Γ , розділена на три ділянки $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$. На границі Γ_1 відбувається конвективний теплообмін із нагрітою стружкою.

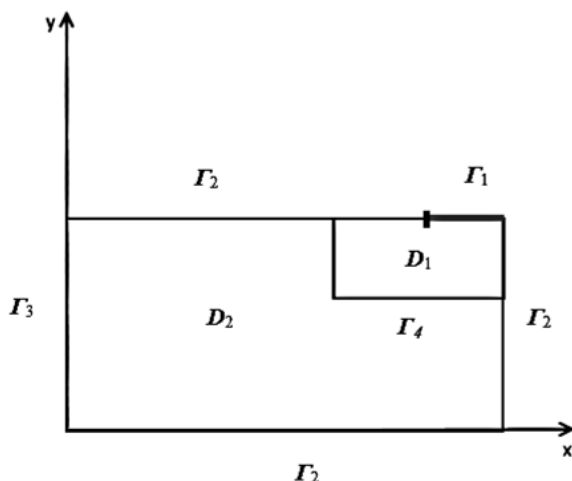


Рис. 1. Область рішення

На границі Γ_2 задані умови конвективного теплообміну із зовнішнім середовищем (повітрям), тобто задані граничні умови 3-го роду. На границі Γ_3 задані граничні умови 1-го роду, так як там знаходиться державка різця і можна вважати температуру сталою.

Теплове поле у області рішення описується системою рівнянь теплопровідності:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} T_1, \quad x, y \in D_1;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} T_2, \quad x, y \in D_2,$$

у сукупності із граничними умовами:

$$t = 0, \quad x, y \in D : T_{1,2} x, y, 0 = T_0 ;$$

$$t > 0, \quad x, y \in \Gamma_1: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{n}} = -h_1 T_1 - T_0 ;$$

$$t > 0, \quad x, y \in \Gamma_2: \lambda_{1,2} \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{n}} = -h_{1,2} T_{1,2} - \theta ;$$

$$t > 0, \quad x, y \in \Gamma_3: T_2 x, y, t = T_0,$$

де \mathbf{n} – нормаль зовнішня до Γ , h – коефіцієнт конвективного теплообміну із зовнішнім середовищем, T_0 – температура зовнішнього середовища, θ – температура в зоні різання; та умовами спряження на границі Γ_4 :

$$T_1 x, y, t = T_2 x, y, t, \quad x, y \in \Gamma_4 ;$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}_{\Gamma_4} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}_{\Gamma_4} .$$

Температура в зоні різання θ залежить від багатьох параметрів, таких як: вид матеріалу заготовки; стан знімаемого шару; геометричні параметри різального інструменту та режими різання, а саме – швидкість різання v , подача s , глибина різання t .

Для отримання фактичних даних на базі ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ) були проведені стійкісні випробування токарних різців з твердосплавними різальними пластинами відомих фірм-виробників («Sandvik Coromant», «Pramet», «Stellram», «Iscar», «Toshiba Tungaloy», «Mitsubishi») при поздовжньому напівчистовому точінні валків прокатних станів з діаметром бочки 1254 мм (матеріал валків – легована сталь 90ХФ) (основні результати проведених випробувань були систематизовані у роботі [13]). Випробувані різці оснащувались

різальними пластинами форми CNMG 190616 різних конструктивних виконань (CNMG 190616-PR GC4225 («Sandvik Coromant»), CNMG 190616-PM GC4025 («Sandvik Coromant»), CNMG 190616-QM GC4005 («Sandvik Coromant»), CNMG 190616E-M 6630 («Pramet»), CNMG 190616E-M 6610 («Pramet»), CNMG 190616-TH T9025 «Toshiba Tungaloy»), CNMG 190616-TH T5020 («Toshiba Tungaloy»), CNMG 190616-4T NL25 («Stellram»)); тримач різця – PCBNL 3232 R19. Склад зносостійкого покриття, властивості та належність твердого сплаву до груп використання за стандартом ISO 513 для досліджуваних марок твердих сплавів визначались за інформацією каталогів фірм – виробників. Режими різання відповідали напівчистовій обробці валків прокатних станів заданого розмірного діапазону: $t = 2,0\text{--}4,0$ мм, $s = 0,4$ мм/об, $n = 35$ об/хв, $v = 150$ м/хв. Використовувалась загальноприйнята методика випробувань. Випробування припинялись при досягненні часу роботи різця, що дорівнює 15 хвилинам, або ж при досягненні критичного зносу різальної пластини, якщо він настає менш ніж за 15 хвилин роботи різця.

Аналіз результатів стійкісних випробувань показав, що найменша інтенсивність зношування інструменту при напівчистовому точінні прокатного валка зі сталі 90XФ з діаметром бочки валка $\varnothing 1254$ мм спостерігається у різальній пластині CNMG 190616-QM GC4005 (виробник – «Sandvik Coromant»), знос якої за підсумками 15 хвилин роботи різця склав 0,25 мм, і у пластині CNMG 190616 – PR GC4225 того ж виробника, знос якої за підсумками 15 хвилин роботи різця склав 0,3 мм. Інтенсивніше зношувалась різальна пластина CNMG 190616E-M 6610 (виробник – «Pramet»); величина її зносу за 15 хвилин роботи склала 0,34 мм. Інші досліджувані різальні пластини досягли критичного зносу менш ніж за 15 хвилин роботи різця; їхні стійкісні характеристики на даному етапі досліджень не можуть бути визнані задовільними.

На сьогоднішній час розроблено ряд методів моделювання для теплових процесів, серед яких метод скінченних елементів (МСЕ) має особливе місце. У даному дослідженні розподіл температури в інструменті моделюється саме за допомогою методу скінченних елементів. Створено оригінальну програму для проведення чисельних розрахунків, яка здатна розв'язувати СЛАУ з великою кількістю невідомих за мінімальних системних вимог до ЕОМ. Елементи створеної програми можуть бути використані для чисельних розрахунків при розв'язанні подібних задач.

Спираючись на приведені математичні співвідношення та відповідні схеми реалізації, була розроблена оригінальна комп'ютерна програма, написана мовою Pascal.

Досліджувалось температурне поле плоскої пластини в двох варіантах. По-перше, встановлено температурне поле пластини ріжучого інструменту без покриття. Отримане температурне поле представлено на рис. 2, а.

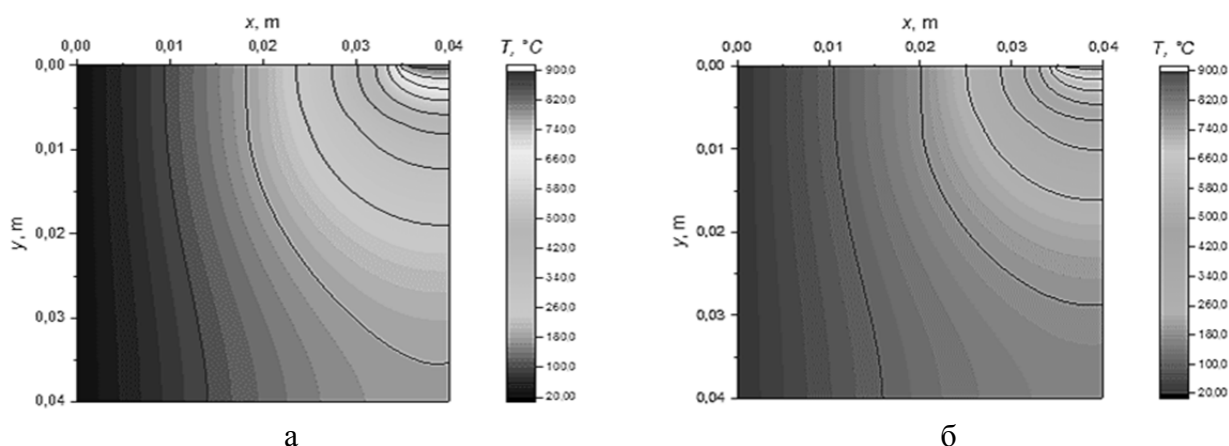


Рис. 2. Температурне поле в області рішення:

а – ріжуча пластина без покриття; б – ріжуча пластина з тришаровим покриттям

Другий етап дослідження складався з отримання температурного поля пластини із зносостійкими покриттями: Ti5K6, TiCN, Al₂O₃, TiN. Крім зменшення теплового навантаження, покриття ріжучих інструментів даними сплавами значно знижує абразивний знос інструменту. При розрахунку відповідних параметрів спиралися на термофізичні властивості матеріалів основи та покриття.

Покриття TiCN знизило коефіцієнт тертя в порівнянні зі зразком без покриття. Це може бути викликано дифузією графіту в підкладку, яка в кінцевому підсумку уменшає коефіцієнт тертя в результаті твердого (графіт) на поверхні. Якщо шар покриття був пошкоджений, поверхня без покриття буде відкрита; показання коефіцієнта тертя буде близько 0,45, що є показання коефіцієнта тертя зразка без покриття. Це вказує на те, що покриття TiCN має гарну адгезію між покриттям / підкладкою і в той же час зменшує коефіцієнт тертя [14]. Хімічна інертність цього неметалевого покриття знижує ймовірність виникнення мікроадгезії між металевою деталлю і резцом, що знижує, в тому числі, і адгезійний знос інструменту.

Порівняння графіків поширення теплового фронту на рис. 2, а–б показує меншення теплового потоку, що проходить в середину пластини у моделі із захисним покриттям.

Розподіл температури вздовж ріжучого інструменту представлений на рис. 3.

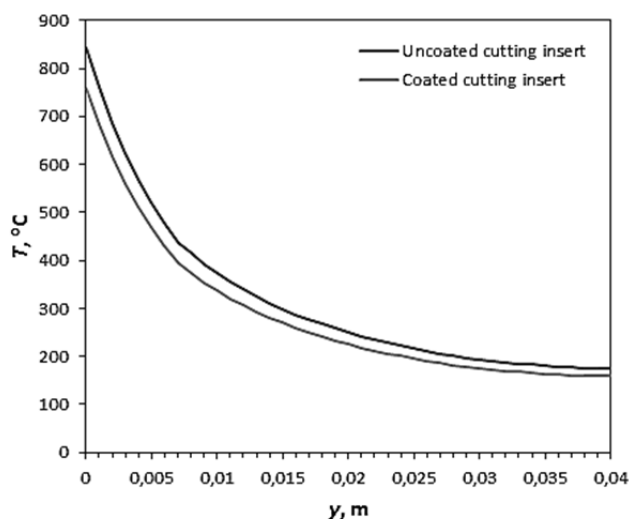


Рис. 3. Теплові профілі в різці з ріжучою пластинною без покриття та з покриттям, в перерізі, що відповідає $x = 0,037$ м

Так в пластині без покриття спостерігається поступове зменшення температурного показника із віддаленням від лінії теплового навантаження. В той же час, крива, що описує відповідну залежність для пластини із покриттями складається із чотирьох елементів. На першому з них, в розмірних рамках нанесеного шару, в інтервалі температур 758,5–758 °C спостерігається не значне зниження температури поверхні, що обумовлено фізико-термічними показниками шару покриття. На другому з них, в інтервалі температур 758–757 °C спостерігається значне зниження температури поверхні. На третій частині, в інтервалі температур 757,5–756,5°C спостерігається також значне зниження температури поверхні. Далі, із збільшенням відстані від ріжучої кромки пластини, відбувається повільне зменшення температури деталі

ВИСНОВКИ

У даній роботі основна увага приділяється розрахунку теплових профілів в різці з багатошаровим покриттям і без шару покриття. Побудована математична модель теплового поля методом скінченних елементів на прикладі ріжучого інструменту. Деякі необхідні дані

складені з літератури. Виміряні дані і експеримент, представлені в цій роботі, дозволили провести детальний аналіз температури в інструменті під навантаженням. Створено оригінальну програму для проведення чисельного розрахунку, елементи якої можуть бути використані для чисельних розрахунків при розв'язанні подібних завдань. Розрахунки показують, що покриття з низькою теплопровідністю служать в якості теплового екрана. Це, зокрема, призводить до більш високих температур на поверхні інструменту, в той час як температури в підкладці зменшена. Зменшення пластичної деформації в підкладці вважається важливим фактором більш тривалого терміну служби інструменту.

Можна зробити висновок, що нова розроблена модель дозволяє не тільки докладне і кількісне дослідження покриття, але також забезпечує докладну фізичну температуру в інструменті. Дана робота дозволяє частково знизити витрати на проведення експериментальних досліджень при вивченні питання розподілу температури в ріжучому інструменті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Плахотник В. А. *Определение температурного поля в поверхностном слое заготовки при термодфрикционном резании [Электронный ресурс] / В. А. Плахотник, А. А. Конская // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 4(2). – С. 150–152. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2013_4%282%29_33.*
2. Вакуумно-плазменные покрытия на основе многоэлементных нитридов / Азаренков Н. А. [и др.] // *Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – № 35, № 8. – С. 1061–1084.*
3. Влияние подложки на ориентацию и структуру тонких пленок, полученных высокочастотным магнетронным распылением мишени диборида тантала / Гончаров А. А. [и др.] // *Металлофизика и новейшие технологии. – 2006. – Т. 28. – № 12. – С. 1621.*
4. Grzesik W. *Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools / W. Grzesik, M. Bartoszek, P. Nieslony // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Т. 164. – С. 1204–1211.*
5. *Simulation of the Chip Formation and Temperature Distribution by the Fem / Guemmour M. B. [et al.] // Journal of Applied Sciences. – 2015. – Т. 15. – № 9. – С. 1138–1148.*
6. Grzesik W. *Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique / W. Grzesik // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2006. – Т. 46. – № 6. – С. 651–658.*
7. *Finite Element Study of the Influence of Hard Coatings on Hard Metal Tool Loading During Milling / Krajinović I., Daves W., Tkadletz M., Teppernegg T., Klünsner T., Schalk N., Mitterer Ch., Tritremmel Ch., Ecker W., Czettel Ch. // Surf. Coat. Technol. – 2016. – Vol. 304. – Pp. 134–141. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.041.*
8. Grzesik W. *Modelling of the Cutting Process Analytical and Simulation Methods / W. Grzesik, P. Nieslony, M. Bartoszek // Adv. Manuf. Sci. Technol. – 2009. – Vol. 33, no. 1. – Pp. 5–29.*
9. *Thermal Analysis in Coated Cutting Tools / Brito R. F., Carvalho S. R. de, Lima e Silva, S. M. M. de, Ferreira J. R. // Int. Commun. Heat Mass. – 2009. – Vol. 36, no. 4. – Pp. 314–321. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.01.009.*
10. *Dependence of the thermal field in the coated cutting insert on the cutting conditions / Goncharov A. A., Yunda A. N., Goncharova S. A., Belous D. A., Koval S. V., Vasilyeva L. V. // In Nanomaterials: Application & Properties (NAP), 2017 IEEE 7th International Conference. – September, 2017. – Pp. 1FNC19. – IEEE DOI: 10.1109/NAP.2017.8190209.*
11. *Modelling of thermal processes in the cutting insert with a protective coating / Goncharov A. A., Yunda A. N., Bondarenko R. Y., Goncharova S. A., Vasilyeva L. V., Agulov A. V. // In Nanomaterials: Application & Properties (NAP), International Conference on. – 2016, September. – Pp. 02NEA06-1). – IEEE DOI: 10.1109/NAP.2016.7757301.*
12. Оптимізація режимів різання при обробці на важелых токарных станках с учетом энергозатрат / Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко, Л. В. Васильева, О. Е. Мироненко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 40. – С. 62–70.*
13. *Применение резов с твердосплавными режущими пластинами с износостойкими покрытиями при лучистой обработке валков прокатных станов / Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко, В. В. Калиниченко, В. В. Носков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – Вип. 37. – С. 32–39.*
14. *Friction and Wear characteristics of WC and TiCN-coated Insert in Turning Carbon Steel Workpiece / R. J. Talib, A. M. Zaharah, M. A. Selamat, A. A. Mahaidin, M. F. Fazira // Procedia Engineering. – 2013. – № 68. – P. 716–722.*