

5. Zhang D., Zhang X.-M., Nie G.-C., et al. (2021). Characterization of material strain and thermal softening effects in the cutting process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160, 103672.
6. Poljanskyi, V.I. & Novikov, F.V. (2021). Rozroblennja i vprovadzennja u vyrobnitstvo efektyvnyh tehnologichnyh procesiv mehanichnoi obrobky skladnoprofilnoi formujuchoi osnastki dla charchovji promyslovosti [Development and introduction into production of effective technological processes of mechanical processing of complex-profile forming equipment for the food industry] *Novye i traditsionnye tehnologii v resurso- i energosberezenii*. (s. 141–147). ONPU [in Ukrainian].
7. Rao X., Zhang F., Lu Y., et al. (2020). Surface and subsurface damage of reaction-bonded silicon carbide induced by electrical discharge diamond grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 154, 103564.
8. Lavrinenko, V.I., Sytnyk, B.V., Pasichnyi, O.O., et al. (2022). *Utility model patent of Ukraine № 150123. МПК (2022.01) B24B 1/00, B24B 7/00. Sposib almazno-abrazyvnoho shlifuvannia [Diamond abrasive grinding method]*. (Patent Ukrainy na korysnu model № 150123) [in Ukrainian].

УДК 621.791

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-295-305

**В. А. Дутка**, канд. техн. наук; **А. Л. Майстренко**, член-кор. НАН України;  
**С. Д. Заболотний**; **А. М. Степанець**, канд. техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074 м. Київ, email: vadutka@ukr.net*

### **ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ІНСТРУМЕНТУ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ**

*Розроблено комп'ютерну модель температурного поля при зварюванні тертям з перемішуванням (ЗТП) інструментом із надтвердих матеріалів деталей із жаростійких сплавів. Реалізацію моделі виконано на базі методу скінченних елементів. Проведено обчислення температурного поля в інструменті і зварюваних деталях. Результати обчислень добре узгоджуються з результатами експериментів при ЗТП пластин зі сталі AISI 304. Показано, що за результатами комп'ютерних експериментів можна визначати параметри процесу ЗТП, при яких забезпечується термостійкість інструменту з кибориту при зварюванні пластин з цієї сталі.*

**Ключові слова:** зварювання тертям з перемішуванням, жаростійкі сплави, киборит, моделювання, термостійкість інструменту.

#### **Вступ**

Для якісного з'єднання листових деталей методом зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) [1–4] важливо забезпечити термомеханічну стійкість інструменту в процесі роботи. Матеріал інструменту для процесу ЗТП вибирають міцнішим і твердішим від матеріалу деталей на підставі його міцнісних характеристик. Так, для ЗТП м'яких і легкоплавких матеріалів використовують інструмент зі сталі [3–]; для ЗТП мідних деталей –

із твердих сплавів або кераміки [3, 6]; для ЗТП жаростійких сплавів – інструмент із твердих сплавів та полікристалічних надтвердих матеріалів [2, 3, 6–8].

Схема процесу ЗТП двох деталей (пластин) подана на рис. 1. ЗТП – це твердофазний процес гарячого зсувного з'єднання двох пластин [1–3], які щільно притиснуті одна до другої і жорстко закріплені на опорній плиті (рис. 1, а). Зварювання відбувається за допомогою обертового інструменту, котрий після повного занурення штиря в зону контакту пластин рухається вздовж поверхні їх контакту. Буртик щільно контактує з верхньою поверхнею деталей. На поверхні контакту буртика і штиря з деталями в результаті тертя відбувається розігрівання і розм'ягчення матеріалу деталей. В об'ємі пластин біля буртика та штиря відбувається пластичне деформування матеріалу пластин та течія їх пластифікованого матеріалу вздовж напрямку зварювання. Матеріал транспортується від переднього краю інструменту до його задньої кромки, де формується в з'єднання пластин. При завершенні процесу ЗТП інструмент виводиться з об'єму зварюваних пластин.

В даній роботі для ЗТП жароміцних сплавів використовується інструмент із кибориту [6] (рис. 1, б). Рис. 1, в ілюструє вигляд зварного шва після зварювання пластин зі сталі AISI 304. Метою роботи є чисельне моделювання і дослідження температурного поля в інструменті для забезпечення його термостійкості в процесі ЗТП.

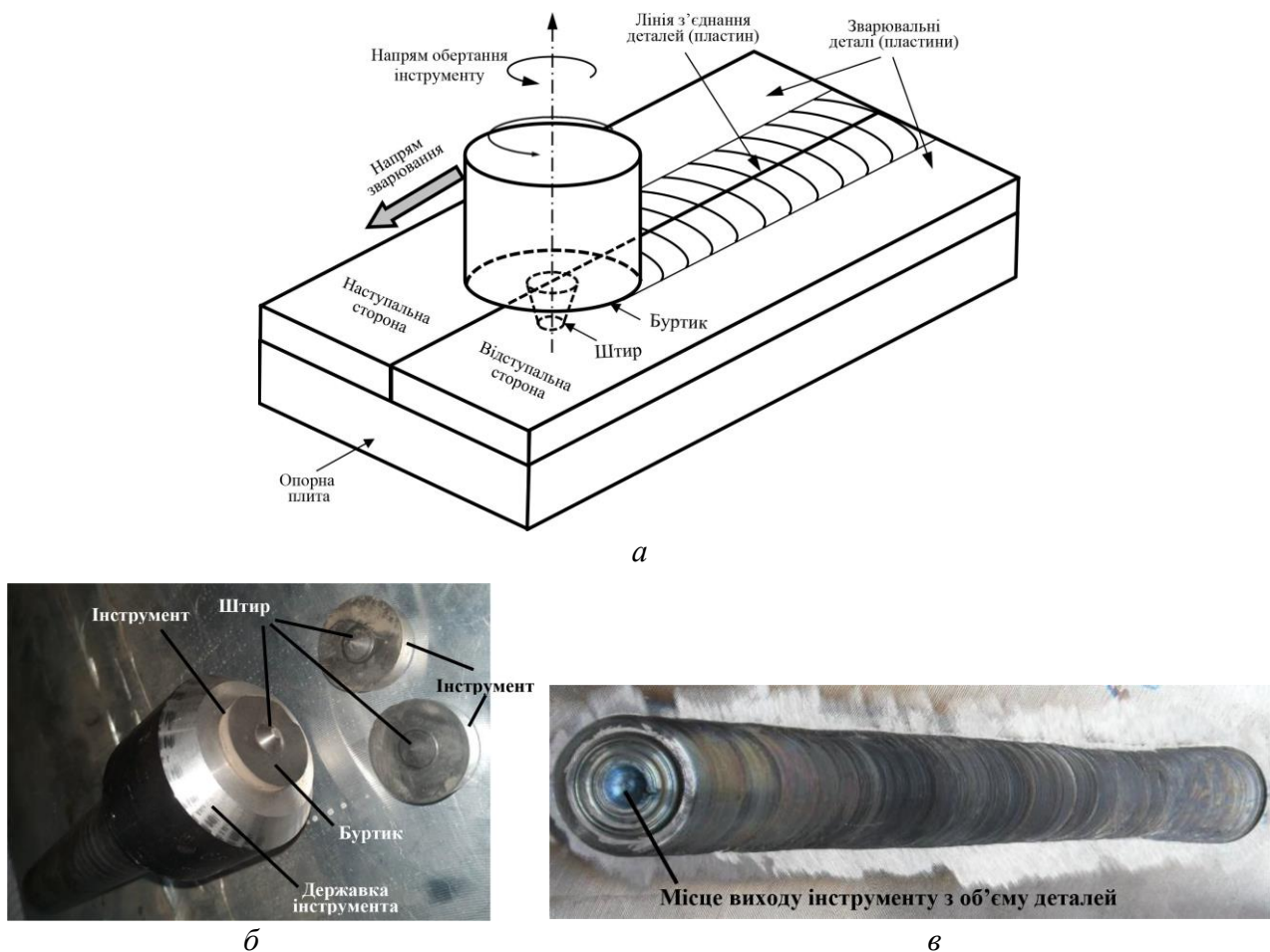


Рис. 1. Схематична ілюстрація процесу ЗТП (а); розроблений інструмент із кибориту (б) [6]; вигляд зварного шва в результаті зварювання двох пластин зі сталі AISI 304 (в)

### Моделювання температурного поля

При моделюванні температурного поля вибрано область, яка містить зварювані деталі, інструмент, його кріплення, опорну плиту і опори (рис. 2). Температурне поле описується рівнянням стаціонарної теплопровідності з конвективним членом, що враховує поступальний рух зварюваних деталей відносно інструменту

$$C_p \rho (\vec{u} \cdot \text{grad } T) = \text{div}(\lambda \text{grad } T), \quad (1)$$

де  $T = T(x, y, z)$  – температура;  $C_p = C_p(\vec{r}, T)$ ,  $\rho = \rho(\vec{r}, T)$ ,  $\lambda = \lambda(\vec{r}, T)$  – відповідно питома теплоємність, густина і коефіцієнт теплопровідності,  $\vec{u}$  – вектор швидкості поступального руху деталей відносно інструменту,  $\vec{r}$  – радіус-вектор досліджуваної точки області  $V$ ,  $\vec{r} \in V$ . Рівняння (1) доповнюється відповідними граничними умовами.

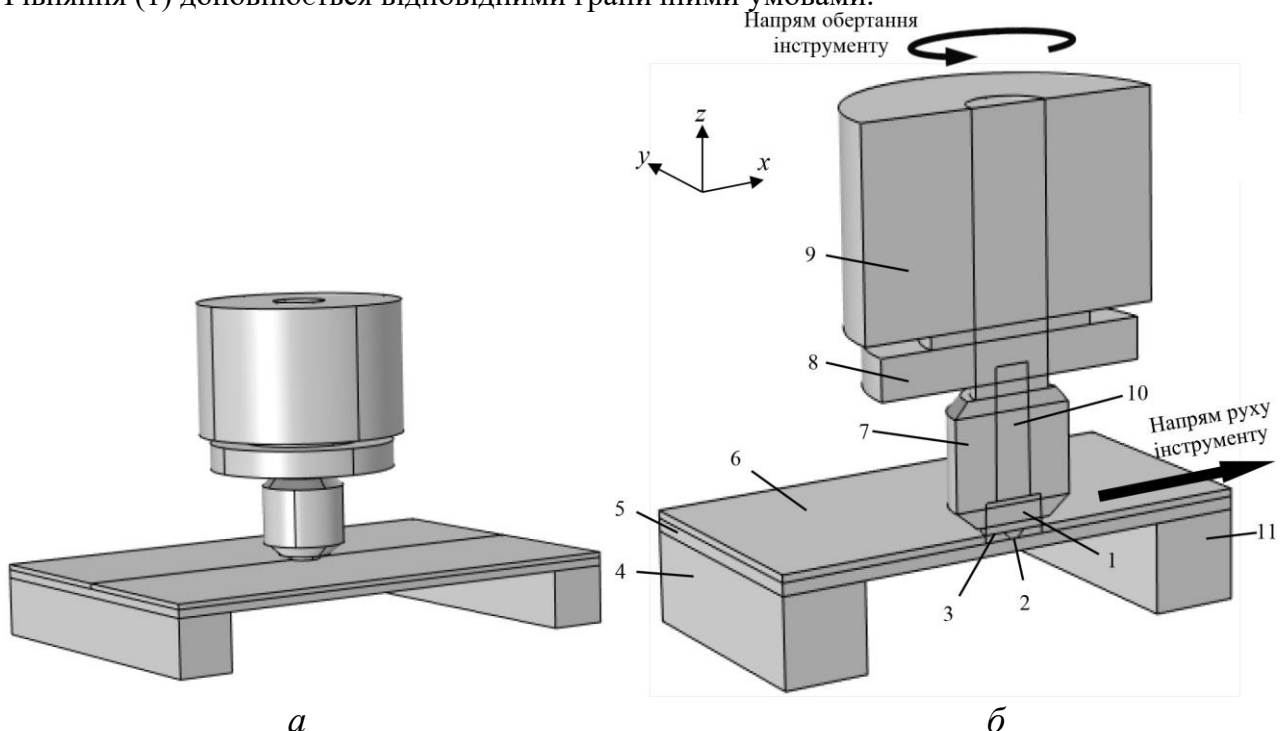


Рис. 2. Розрахункова просторова область: а – загальний вигляд, б – половина області з площиною поздовжнього перетину, що проходить через лінію з'єднання пластин перпендикулярно до їх поверхні: 1 – основа інструмента, 2 – штир, 3 – буртик, 4 і 11 – опори, 5 – опорна плита, 6 – зварювальна пластина, 7 – державка, 8 – фланець, 9 – шпindelь верстату, 10 – повітряна порожнина (початок координат  $O$  співпадає з центром нижньої основи штиря, вісь  $Ox$  спрямована в напрямі поступального руху інструменту, вісь  $Oy$  перпендикулярна до площини поздовжнього перетину, а вісь  $Oz$  перпендикулярна до площини пластин)

Відомо, що основний обсяг тепла генерується на поверхнях контакту інструменту з деталями та в об'ємі деталей поблизу цих поверхонь [9, 10], причому остання величина складає  $\approx 4\%$  від загального обсягу. Аналогічно [11] вважаємо, що на поверхні контакту буртика з деталлю тепло генерується внаслідок дії сил тертя, а на поверхні контакту штиря і деталі – за рахунок пластичного деформування деталей. Тоді, згідно з [11, 12], потужності джерел тепла на цих поверхнях обчислюються відповідно за формулами

$$q_s = \gamma C_1 \begin{cases} \frac{\mu V F_n}{A_s}, & \text{при } T < T_{nl}, \\ 0, & \text{при } T \geq T_{nl}, \end{cases} \quad q_p = \gamma C_2 \begin{cases} \frac{\mu Y(T)}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} V, & \text{при } T < T_{nl}, \\ 0, & \text{при } T \geq T_{nl}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $V$  – абсолютна величина вектора швидкості  $\vec{V} = (V_x, V_y, 0)$  точки поверхні буртика відносно деталі,  $\mu = \mu(T)$  – коефіцієнт тертя,  $F_n$  – осьове зусилля, що діє на інструмент,  $A_s$  – площа проекції поверхні контакту інструменту з деталями на площину  $XOY$ ,  $T_{nl}$  – температура плавлення матеріалу пластин,  $Y(T)$  – межа текучості матеріалу деталі,  $C_1$  і  $C_2$  – коефіцієнти пропорційності. Використання коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$  дає змогу врахувати той факт, що певна частина тепла в процесі ЗТП генерується в об’ємі деталей поблизу зони контакту інструменту з деталями.  $V_x$ ,  $V_y$  та  $V$  визначаються за формулами [7, 9]

$$V_x = U - v \sin \theta, \quad V_y = \pm v \cos \theta,$$

$$v = \omega r, \quad \omega = 2\pi n, \quad \theta = \arcsin \frac{y}{r}.$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{v^2 - 2Uv \sin \theta + U^2}.$$

де  $r$  – віддаль від точки поверхні контакту до осі обертання інструменту  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $(x, y)$  – координати точки;  $\theta$  – кут, який відкладається проти ходу годинникової стрілки від напрямку зварювання до радіус-вектора точки,  $U$  – величина швидкості зварювання (швидкості руху інструменту вздовж поверхні з’єднання деталей),  $n$  – кількість обертів інструменту за хвилину. Для моделювання реальної асиметрії температурного поля відносно поверхні з’єднання деталей у формулу для  $V$  вводиться параметр  $\psi$  [7]

$$V = \sqrt{v^2 - 2\psi U v \sin \theta + U^2}.$$

В [7]  $\psi \approx 20$ . З метою уникнення впливу цього множника на надмірне зниження швидкості, у формули (2) введено параметр  $\gamma$ , який вибирається близьким до 1. На поверхнях контакту буртика з деталями і на бічній і нижній поверхнях штиря, які контактують зі зварюваними деталями, задаються відповідно граничні умови:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_s, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_p. \quad (3)$$

На зовнішній поверхні, яка контактує із зовнішнім повітряним середовищем, задаються умови конвективного теплообміну

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_c), \quad (4)$$

а на поверхнях із зонами передбачуваних високих температур задаються також умови теплового випромінювання

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_c^4), \quad (5)$$

де  $T$  – температура в досліджуваній точці поверхні,  $T_c$  – температура зовнішнього середовища,  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана,  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність. На зовнішніх поверхнях розрахункової схеми, які контактують із реальними елементами устаткування, задається аналог умови конвективного теплообміну

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{еф}}(T - T_c), \quad (6)$$

з відповідною величиною ефективного коефіцієнта тепловіддачі  $h_{\text{еф}}$ .

### Результати обчислень та їх обговорення

Задачу (1)–(6) розв'язували методом скінченних елементів (МСЕ). Просторова область розбивалась на тетраедральні елементи з квадратичною апроксимацією температури по об'єму елемента зі згущенням елементів у місцях прогнозованих великих градієнтів температури. Виконано моделювання температурного поля при ЗТП двох пластин зі сталі AISI 304 за допомогою інструмента з кибориту. Розміри пластини –  $210 \times 100,6 \times 3$  мм; діаметр буртика – 25 мм, штир – зрізаний конус висотою 3 мм і з діаметрами основ 9 і 3 мм; кругова швидкість інструменту – 630 об/хв., швидкість зварювання – 40 мм/хв., вертикальне зусилля на інструмент – 11992 Н. Матеріал опорної пластини, опор, державки інструменту, фланця і шпинделя верстату – сталь 35ХГСА.

Дані для теплофізичних властивостей матеріалів пластин вибрано з [13], межі текучості сталі AISI 304 – з [14], коефіцієнта тертя – з [7]; для кибориту: густина –  $3365 \text{ кг/м}^3$ , коефіцієнт теплопровідності –  $70 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [6], питома теплоємність (як для VN) – із [15]. Величини коефіцієнта тепловіддачі, обчислені згідно з [16]: на верхній поверхні зварюваних пластин  $h = 18,5 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ ; на нижній поверхні опорної пластини  $h = 11,4 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ ; на бічній поверхні основи інструменту  $h = 48,4 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ ; на поверхні державки  $h = 73,4 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ ; на поверхні фланця і бічній поверхні шпинделя  $h = 112,3 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ , на верхній поверхні шпинделя  $h = 500 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ . Значення випромінювальної здатності  $\epsilon$ : 0,4 – на верхній поверхні зварюваних пластин і на нижній поверхні опорної плити; 0,8 – на бічній поверхні інструмента, 0,6 – на поверхні державки та на нижній і бічній поверхнях фланця.

На рис. 3 наведено розподіл температури на поверхні робочого елемента інструменту, на рис. 4 – на верхній поверхні зварюваних пластин, на рис. 5 – в площині поздовжнього ( $y = 0$ ) і поперечного ( $x = 0$ ) перерізів. Як бачимо з рис. 3–5, зона максимальних температур знаходиться на задній поверхні контакту інструменту з деталями на наступаючій стороні. Отже, і найбільше зношування інструмента відбуватиметься також саме в цьому місці його поверхні. З цих рисунків видно, що максимальна температура при швидкості зварювання в лабораторних умовах 40 мм/хв сягає 1290 К, що є меншим від величини термостійкості кибориту 1400 К [6]. Отже, при даних параметрах процесу ЗТП забезпечується термостійкість інструменту із надтвердого матеріалу. Таким чином, за допомогою комп'ютерного експерименту можна

З рис. 3–5 видно незначну асиметрію температурного поля відносно площини  $y = 0$  з'єднання пластин: найбільше асиметрія проявляється в зоні максимальних температур – перетини  $CC$  і  $BB$  (рис. 4, б і 4, в). Причому при віддаленні від цієї зони асиметрія швидко зникає (рис. 4 і 5).

На рис. 6 подано розподіл температури вздовж лінії  $y = 0$  на верхній поверхні зварюваних пластин (суцільна лінія) і вздовж лінії  $y = 0$  на нижній поверхні пластин (пунктирна лінія). Видно, що під передньою стороною інструменту перепад температури дорівнює 300 градусів, а під задньою – втричі менший і складає 100 градусів. Під переднім краєм інструменту температура дорівнює близько 1100 К, що відповідає яскраво-червоному кольору розігрітого металу – саме такий колір спостерігався при ЗТП. Це свідчить про адекватність розробленої моделі.

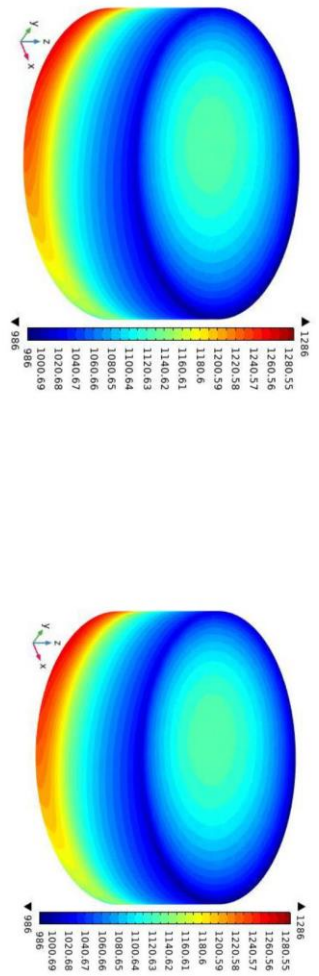


Рис. 3. Розрахований розподіл температури на поверхні робочого елемента інструменту при швидкості  $U$  зварювання 40 мм/хв

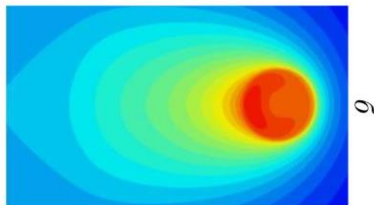
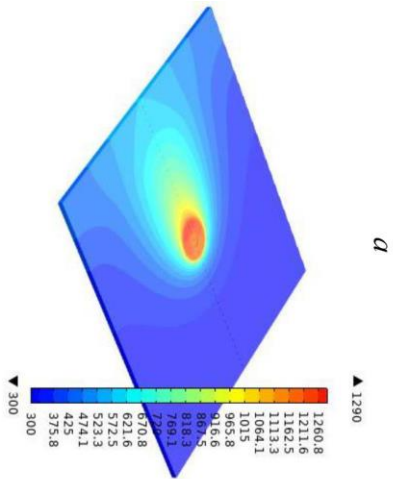


Рис. 4. Обчислений розподіл температури на поверхні пластин (в площині  $z = 3$  мм): а – вигляд у просторі, б – вигляд зверху, в – вздовж ліній поперечних перерізів АА, ВВ, СС і DD

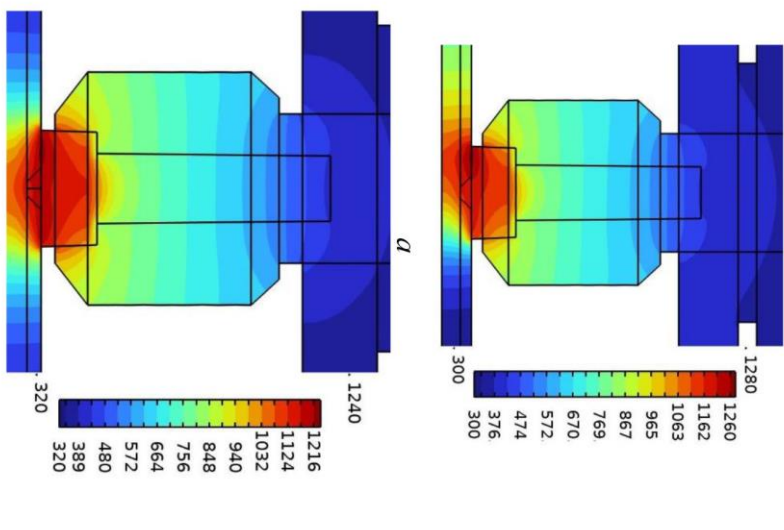
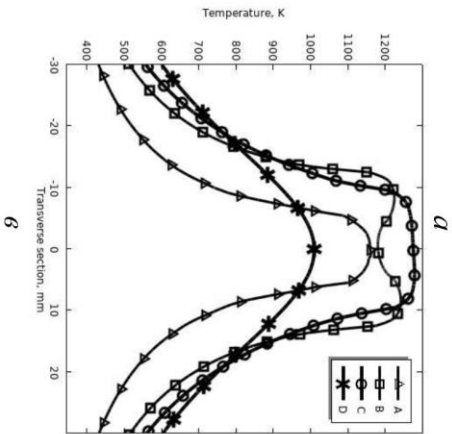


Рис. 5. Обчислений розподіл температури: а – в площині поздовжнього перерізу ХОZ ( $y = 0$ ), б – в площині поперечного перерізу YOZ ( $x = 0$ )

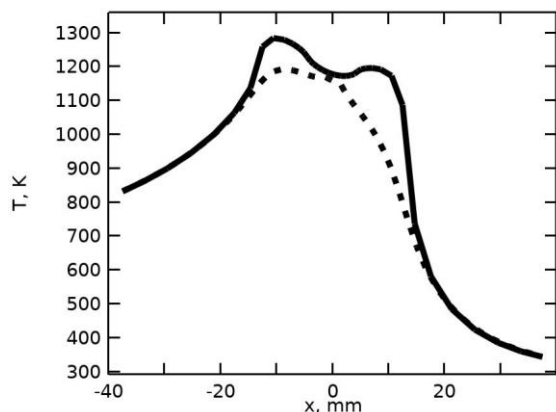


Рис. 6. Розподіл температури вздовж лінії зварювання  $y = 0$  на верхній поверхні пластин (суцільна лінія) і вздовж лінії  $y = 0$  на нижній поверхні пластин (пунктирна лінія): 1 – навпроти інструменту (буртика і штиря), 2 – позаду інструменту, 3 – попереду інструменту

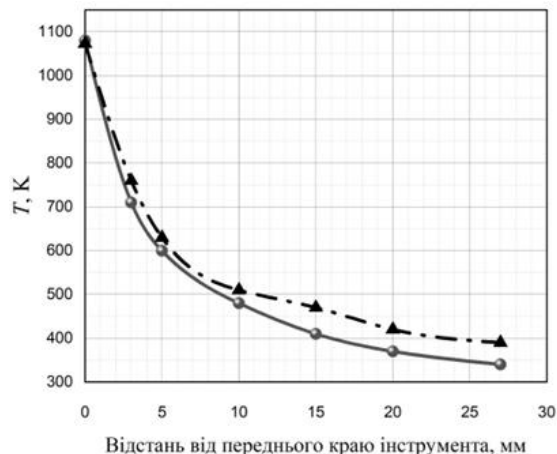


Рис. 7. Розподіл температури перед інструментом: лінія з трикутниками – результати вимірювання, лінія з кружечками – результати обчислень

На рис. 7 подано порівняння результатів обчислень і вимірювання температури на верхній стороні пластин попереду інструменту. Вимірювання проводились за допомогою тепловізора ULIRvision Ti160 з діапазоном виміру температур від 253 K до 873 K, похибка вимірів становить  $\pm 2.0\%$ . Виміряні значення температури автоматично екстраполювалися на кінцях інтервалу вимірювання. З рис. 7 видно, що результати обчислень добре узгоджуються з результатами вимірювання. Проте, виміряні значення температури трохи більші від обчислених, причому по мірі віддалення від переднього краю інструменту різниця між виміряними і обчисленими значеннями збільшується. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що в реальному процесі ЗТП зварювані пластини нещільно контактують з опорною плитою, тоді як в розрахунковій схемі (рис. 2) між зварюваними пластинами і опорною плитою моделюється щільний контакт, що призводить до більшої тепловіддачі з нижньої поверхні зварюваних пластин і, як наслідок, до більшого відтоку тепла із всього об'єму цих пластин.

Було виконано чисельне дослідження впливу величини швидкості зварювання  $U$  та швидкості обертання  $n$  (об/хв) на рівень максимальної температури в інструменті. В обчисленнях було враховано зміну осьового зусилля на інструмент при зміні  $U$  та  $n$  [17], а саме, що при збільшенні швидкості  $U$  (при незмінній швидкості обертання) зростає осьове зусилля на інструмент, а при збільшенні швидкості обертання (при фіксованій швидкості зварювання) осьове зусилля на інструмент зменшується. Графік залежності максимальної температури в інструменті від швидкості зварювання та швидкості обертання інструменту наведено на рис. 8.

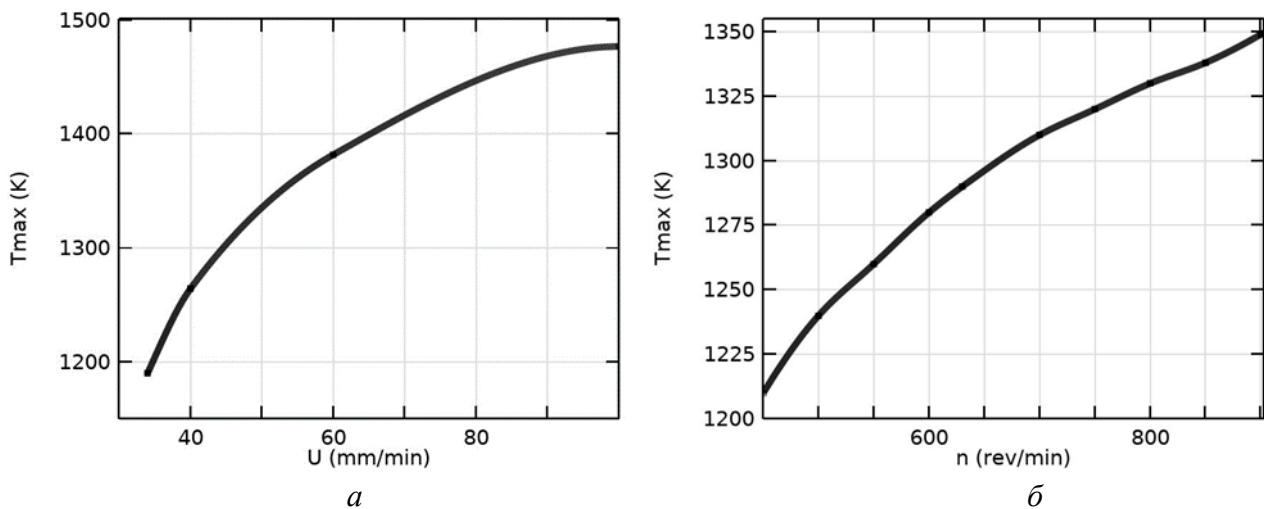


Рис. 8. Залежність максимальної температури в робочому елементі від швидкості зварювання  $U$  ( $n = 600$  об/хв) (а) та від швидкості обертання інструмента (при  $U = 40$  мм/хв) (б)

За цими графіками можна приблизно визначити параметри процесу ЗТП, при яких забезпечується термостійкість інструменту з кибориту. Так, із рис. 8, а знаходимо, що при швидкостях зварювання, менших від 63 мм/хв, та при швидкості обертання 600 об/хв. ( $T < 1400$  К) можна забезпечити термостійкість інструменту. А з рис. 8, б випливає, що при швидкості зварювання 40 мм/хв та при швидкостях обертання, менших від 1000 об/хв, інструмент із кибориту також зберігатиме термічну стійкість. Очевидно, що такі висновки остаточно можна підтвердити лише експериментально. Проте, комп'ютерний експеримент дає можливість зменшити витрати ресурсів при виборі параметрів процесу ЗТП. Слід зазначити, що характер поведінки графіка на рис. 8, б добре узгоджується з таким же у [18].

### Висновки

Розроблено комп'ютерну модель температурного поля при ЗТП, яка дає змогу чисельно прогнозувати та досліджувати тепловий стан інструменту.

Показано, що за результатами комп'ютерного моделювання температурного поля в інструменті з кибориту при ЗТП нержавіючої сталі AISI 304 можна визначити параметри процесу ЗТП, при яких забезпечується термостійкість інструменту, що є важливим для прогнозування надійності його роботи.

V. Dutka, A. Maystrenko, S. Zabolotnyi, A. Stepanets

<sup>1</sup>V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine

### PROGNOSTICATION OF THE THERMAL STATE OF THE SUPERHARD MATERIALS TOOL DURING FRICTION STIR WELDING OF HEAT-RESISTANT ALLOYS

A computer model of the temperature field during friction stir welding (FSW) with a superhard materials tool made of heat-resistant alloys has been developed. The model was implemented on the basis of the finite element method. The temperature field in the tool and welded parts was calculated. The results of the calculations are in good agreement with the results of experiments during FSW of AISI 304 steel plates. It is shown that, based on the results of computer experiments, it is possible to determine the parameters of the FSW process, which ensure the heat resistance of the kyborite tool during FSW of plates made of this steel.

**Key words:** friction stir welding, heat-resistant alloys, kyborite, modeling, tool heat resistance.

## Література

1. Thomas W. M., Threadgill P. L., Nicholas E. D. Feasibility of friction stir welding steel. *Science and Technology of Welding and Joining*. 1999. Vol. 4. N 6. P. 365–372.
2. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. K. D. H. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2008. Vol 53. P. 980–1023.
3. *Welding Technology* /ed. by Davim J. P. Springer. Nature Switzerland, AG, 2021. 422 p.
4. Wang H., Colegrove P. A., Dos Santos G. F. Numerical investigation of the tool contact condition during friction stir welding of aerospace aluminium alloy. *Computational Materials Science*. 2013. Vol. 71. P. 101–108.
5. Biswas P., Mandal N. R. Effect of Tool Geometries on Thermal History of FSW of AA1100. *Welding Journal*. 2011. Vol. 90. P. 129–135.
6. Беженар Н. П., Романенко Я. М., Коновал С. М., Гарбуз Т. А., Зеленин В. И., Полещук М. А., Лукаш В. А., Зеленин Е. В., Никитюк Ю. А. Киборит: новые материалы и новые области применения. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*: Сб. науч. тр. Вып. 19. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. 2016. С. 184–193.
7. Darvazi A. R., Iranmanesh M. Thermal modeling of friction stir welding of stainless steel 304L. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Springer. 2014. 9 p.
8. Smith A., Cater S., Faraji M., Young A. Modelling of Friction Stir Welding of 304 Stainless Steel. *European Simulation and Modelling Conference*, Univ. of Las Palmas, 26-28th October 2016. (In Press). 6 p. URL: <http://shura.shu.ac.uk/13906/>.
9. Nandan R., Roy G. G., Lienert T. J., DebRoy T. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. P. 883–889.
10. Bastier A., Maitournam M.H., Dang Van K., Roger F. Steady state thermomechanical modeling of friction stir welding. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*. 2006. Vol. 11. P. 278–288.
11. Song M., Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *Int. J. of Machine Tools & Manuf.* 2003. Vol. 43. P. 605–615.
12. Schmidt H., Hattel J., Wert J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2004. No. 12. P. 143–157.
13. Bentz D. P., Prasad K. Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models. *NISTIR 7401*. U.S. Department of Commerce, 2007. 21 p.
14. Nandan R., Roy G.G., Lienert T.J., DebRoy T. Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. *Science Technology Welding Joining*. 2006. Vol. 11. N 5. P. 526–537.
15. Гурвич Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Спр. Изд-е. Т. 3, кн.2. М.: Наука, 1981. 400 с.
16. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент / под ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
17. Forcellese A., Martarelli M., Simoncini M. Effect of process parameters on vertical forces and temperatures developed during friction stir welding of magnesium alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015. 10 p. DOI 10.1007/s00170-015-7957-6.

18. Sato Y. S., Urata M., Kokawa H. Parameters Controlling Microstructure and Hardness during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002. Vol. 33A, N 3/ P. 625–635.

Надійшла 28.08.23

### References

1. Thomas, W. M., Threadgill, P. L., & Nicholas E. D. (1999). Feasibility of friction stir welding steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(6), 365–372.
2. Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53, 980–1023.
3. Davim J. P. (Ed.), (2021). *Welding Technology*. Springer. Nature Switzerland, AG.
4. Wang, H., Colegrove, P. A., & Dos Santos G. F. (2013). Numerical investigation of the tool contact condition during friction stir welding of aerospace aluminium alloy. *Computational Materials Science*, 71, 101–108.
5. Biswas, P., & Mandal N. R. (2011). Effect of Tool Geometries on Thermal History of FSW of AA1100. *Welding Journal*, 90, 129–135.
6. Bezhenar, N. P., Romanenko, J. M., Konoval, S. M. et al. Kiborit: novye materialy i novye oblasti primeneniia [Kyborit: new materials and new areas of application]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*. (19nd Issue, p. Kyiv: 184–193). ISM V. N. Bakulia, NAS of Ukraine. [In Russian].
7. Darvazi, A. R., & Iranmanesh, M. (2014). Thermal modeling of friction stir welding of stainless steel 304L. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* DOI 10.1007/s00170-014-6203-y.
8. Smith, A., Cater, S., Faraji, M., & Young A. (2016). Modelling of Friction Stir Welding of 304 Stainless Steel. *European Simulation and Modelling Conference*. (6 p.). Univ. of Las Palmas.
9. Nandan, R., Roy, G. G., Lienert, & T. J., Debroy, T. (2007). Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. *Acta Materialia*, 55, 883–889.
10. Bastier, A., Maitournam, M.H., Dang Van, K., & Roger, F. (2006). Steady state thermomechanical modeling of friction stir welding. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, 11(3), 278–288.
11. Song M., Kovacevic R. (2003). Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *Int. J. of Machine Tools & Manuf.*, 43, 605–615. doi:10.1016/S0890-6955(03)00022-1
12. Schmidt, H., Hattel, J., & Wert, J. (2004). An analytical model for the heat generation in friction stir welding. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12, 143–157.
13. Bentz, D. P., & Prasad, K. (2007). Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models. *NISTIR 7401*. U.S. Department of Commerce.
14. Nandan, R., Roy, G.G., Lienert, T.J., & DebRoy T. (2006). Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. *Science Technology Welding Joining*, 11(5), 526–537.

15. Gurvich L. V., Veitz L. V., Medvedev V. A. (1981). *Termodinamicheskie svoistva individualnykh veshchestv [Thermodynamic properties of individual substances]*. Nauka. [in Russian].
16. Grigoriev V. A. & Zorin V. M. (Eds.). (1982). *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskii eksperiment [Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment]*. Energoizdat, 512 [in Russian].
17. Forcellese, A., Martarelli, M., & Simoncini M. (2015). Effect of process parameters on vertical forces and temperatures developed during friction stir welding of magnesium alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, DOI 10.1007/s00170-015-7957-6.
18. Sato, Y. S., Urat, a M., & Kokawa, H. (2002). Parameters Controlling Microstructure and Hardness during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33A, 625–635.

УДК 536.421.1:620.187:661.057.5

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-305-314

**А.С. Манохін, Ю.О. Мельнійчук**, кандидати технічних наук;  
**С.А. Клименко**, член-кор. НАН України<sup>1</sup>, **М.П. Семенько**, д-р фіз.-мат. наук<sup>2</sup>,  
**Г.А. Петасюк**, д-р техн. наук; **А.Г. Филипович**;  
**С.Ан. Клименко, Ю.Е Рижов**, кандидати технічних наук<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, 04074, м. Київ, Україна, e-mail: [dialab@ism.kiev.ua](mailto:dialab@ism.kiev.ua)

<sup>2</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, пр. Академіка Глушкова, 4, 03127, м. Київ, Україна, e-mail: [nbelyavina@bigmir.net](mailto:nbelyavina@bigmir.net)

### **ІНСТРУМЕНТ, ВИГОТОВЛЕНИЙ ІЗ ПОРОШКІВ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ З CVD ПОКРИТТЯМ**

З метою підвищення ефективності різальних інструментів з полікристалічного кубічного нітриду бору ( $PcBN$ ) на вихідні мікропорошки, які використовувались при спіканні композитів, наносилось покриття на основі титану. При використанні CVD методу перенесення металу реалізовано із застосуванням йодотранспортної реакції, яка за високих температур забезпечує утворення на поверхнях зерен  $cBN$  продуктів реакції титану, що осаджується, з азотом  $N$  та бором  $B$ . Результати рентгенівського фазового аналізу вихідних порошків з добавкою алюмінію  $Al$  свідчать про те, що окрім кубічного нітриду бору ( $cBN$ ), ці зразки містять продукти його реакційної взаємодії з титаном (фази  $TiN$  та  $TiB_2$ ), а також інтерметалід  $TiAl$ . Композит, спечений із порошку з покриттям при тиску 7,7 ГПа і температурі 2300 °С в АВТ типу “тороїд”, має практично той самий фазовий склад, але параметр кристалічної ґратки нітриду  $TiN$  збільшується від 0,4244 нм до 0,4253 нм. Порівняльні дослідження ефективності інструментів, виготовлених з використанням порошку із покриттям, продемонстрували зниження інтенсивності їх зношування при високошвидкісному різанні загартованої сталі у порівнянні з інструментом, оснащеним стандартним композитом з  $PcBN$ .

**Ключові слова:** інструмент з  $PcBN$ , CVD покриття, порошки  $cBN$ , інтенсивність зношування, морфометрія.