

**КЛИМЕНКО С.А., МАНОХІН А.С., ЧУМАК А.О., КЛИМЕНКО С.Ан.,
КОПЕЙКІНА М.Ю., САЛЕНКО О.Ф.**

МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ЗОНИ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ

У статті розглядаються результати моделювання напружено-деформованого та теплового стану зони різання при торцевому фрезеруванні загартованої сталі інструментом, оснащеним полікристалічним надтвердим композитом на основі кубічного нітриду бору. Показано вплив зміцнення поверхневого шару обробленого матеріалу, характерний для різних проходів різального інструменту, на сили різання, усадку стружки, довжину контакту стружки з передньою поверхнею інструменту. Досліджено зв'язок нестационарного характеру обробки з врізаннями кожного з лез інструменту та виходом з зони різання з наявністю періодів наростання температури різання та охолодження різального інструменту.

Ключеві слова: торцеве фрезерування, PcBN, загартована сталь, напружено-деформований та тепловий стан зони різання.

**KLIMENKO S.A., MANOKHIN A.S., CHUMAK A.O., KLIMENKO S.An., KOPEIKINA M.YU., SALENKO O.F.
SIMULATION OF THE STATE OF THE CHIP FORMATION ZONE DURING FACE MILLING OF HARDENED STEEL**

The article considers the results of modeling the stress-strain and thermal state of the cutting zone during face milling of hardened steel with a tool equipped with polycrystalline superhard composite based on cubic boron nitride. The influence of strengthening the surface layer of the processed material, characteristic for different passes of different tools, on the cutting forces, shrinkage of chips, the length of contact of chips with the front surface of the tool is shown. The connection of non-stationary nature of machining with incisions of each of the tool blades and exit from the cutting zone with the presence of periods of increase in cutting temperature and cooling of the cutting tool has been studied.

Keywords: face milling, PcBN, hardened steel, stress-strain and thermal state of the cutting zone.

Вступ. Фрези з різальними елементами з [1] є другим за вживаності типом інструменту, який ефективно використовується для обробки сталей високої твердості [2].

Кінематика процесу фрезерування обумовлює особливості контактної взаємодії в зоні різання між робочими ділянками передньої та задньої поверхонь інструменту, стружкою та поверхнею різання на виробі, що оброблюється.

В зоні різання має місце циклічне термобаричне навантаження інструменту, що обумовлює досить значний термін часу до виходу системи на стабільну роботу.

Це пов'язане зі зміною механічних властивостей оброблюваного матеріалу під дією термобаричного навантаження, яке циклічно їх змінює, що обумовлює поступове зростання як сил різання, так і температури різання при переході від робочого елемента фрези, який працює

у конкретний момент часу, до наступного робочого елемента інструменту. Відмічене обумовлює відмінності у напружено-деформованому та тепловому стані зони різання та інструменту, його працездатності та вихідних показниках процесу обробки.

При цьому, потрібно відмітити, що значний вплив на кількісні показники, що характеризують контактні процеси у зоні обробки, мають властивості матеріалу, яким оснащений різальний інструмент.

Метою даної роботи було дослідження стану зони стружкоутворення при фрезеруванні загартованої сталі інструментом, оснащеним PcBN, з різними умовами тертя між матеріалами оброблюваного виробу та інструменту.

Методика досліджень. Дослідження виконувались шляхом кінцево-елементного моделювання з використанням багатопільового кінцево-елементного розрахункового пакету Deform-2D.

При моделюванні використана поширена модель Джонсона-Кука, яка описує поведінку матеріалу, що деформується:

$$\sigma_s = (A + B \cdot (\dot{\epsilon}^p)^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^p) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]$$

де σ_s – поточна величина межі плинності; $\dot{\epsilon}^p$ – величина інтенсивності пластичних деформацій; $\dot{\epsilon}^p$ – інтенсивність швидкості пластичних деформацій; T , T_m , T_r – поточна температура, температура плавлення і температур навколишнього середовища відповідно; A , B , C , n , m – емпіричні коефіцієнти.

Для завдання коефіцієнтів визначального рівняння використано дані роботи [3] для сталі AISI 52100 (53 HRC), яка за хімічним складом і твердості відповідає загартованій сталі ШХ15: $A = 821,9$ МПа; $B = -72,1$ МПа; $C = 0,13$; $n = -0,419$; $m = 1,13$ (коефіцієнти отримані інтерполяцією даних, що надані в базі матеріалів Deform-2D).

При вирішенні пов'язаної термомеханічної завдання граничні умови склалися в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки і переміщенні абсолютно-жорсткого інструменту уздовж осі X заготовки з постійною швидкістю v , глибиною різання (в даному випадку дорівнює товщині зрізу) і шириною зрізу.

В ході розрахунку вирішується термомеханическая завдання з урахуванням теплопровідності матеріалів інструменту і заготовки. Довжина шляху різання – 0,75 мм.

Умови обробки, теплофізичні та механічні характеристики матеріалів представлені в табл. 1, 2. Схема процесу різання та адаптивна розбивка моделі оброблюваного зразка та інструменту на елементи в зоні контакту наведено на рис. 1.

Моделювання здійснюється при умові припущення про плоско-деформований стан, умовна ширина моделі (ширина зрізу) є одиничною і дорівнює 1 мм.

Геометричні розміри модельованих тел вибиралися пропорційно товщині зрізу. Моделювання виконувалося в 2D постановці з абсолютно жорстким інструментом, довжина моделі заготовки – 0,13 мм; висота – 0,15 мм;

Табл. 1 – Умови обробки

Інструмент	v , м/мин	a , мм	t , мм	γ	α	r , мкм	К-т тертя з обр. матеріалом
PcBN	200	0,02	1	0°	10°	10	0,5

Табл. 2 – Теплофізичні та механічні властивості матеріалів

Матеріал	$T_{пл}$, °C	C_m , Дж/кг·K	λ , Вт/м·K	E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³
PcBN	–	720	100	780	0,17	3400
Сталь ШХ15	1480	642	40	204	0,3	7800

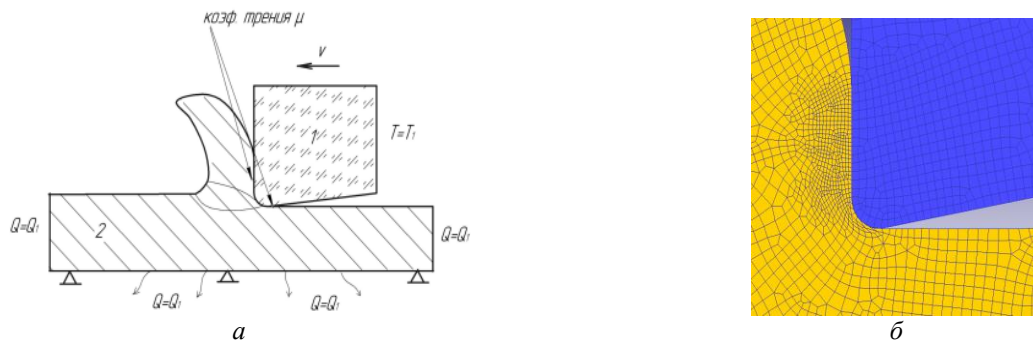


Рис. 1 – Схема процесу різання (а), розбивка моделі оброблюваного зразка та інструменту на елементи в зоні контакту (б)

Параметри моделі різця: довжина – 1,0 мм; висота – 0,24 мм; характерний розмір мінімальних елементів моделі різця 0,024 мм (в області різальної кромці розбивка дрібніша – 0,0038 мм); характерний розмір мінімальних елементів моделі заготовки: 0,022 мм (0,0012 в зоні контакту) (рис. 1, б).

Результати досліджень. На першому етапі досліджень вивчався вплив попередньої деформації зрізуваного шару оброблюваного матеріалу на характеристики пластичної деформації, напруження в поверхневому шарі оброблюваного зразка та сили різання. Вказане обумовлено тим, що середня товщина зрізуваного шару при випадку фрезерування, що розглядається, мала (10–20 мкм) і глибина, на яку розповсюджуються залишкові напруження при великих силах різання суттєво вище (до 100 мкм). Для урахування даного фактору модель передбачає реалізацію трьох послідовних проходів, на кожному з яких зрізується шар товщиною 20 мкм і після кожного проходу інструмент переміщується на товщину зрізу по осі Y. Для імітації імпульсного навантаження з наявністю проміжку часу Δt між врізаннями леза при фрезеруванні, довжина кожного проходу дорівнює подвоєній довжині заготовки.

При опису процесу різання прийнята модель тертя $f_s = \min(\mu \cdot p, k \cdot m)$ (где k – межа плинності матеріалу на зсув; p – тиск; m – довільний коефіцієнт, для врахування інтенсивності фікційної взаємодії), яка найбільш наближена до реальності, і використовувалась в запропонованій серії чисельних експериментів при $m = 0,6$ та $\mu = 0,5$, що пов'язано з необхідністю порівняння результатів розрахунку та експериментальних даних, а також оцінкою впливу на контактні характеристики моделі коефіцієнту тертя, як окремого фактору, трактуючи його в якості усередненої величини коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя на ділянках пластичного та пружного контакту.

Як видно, границя плинності оброблюваного матеріалу σ_T інтенсивно зростає при збільшенні ступеню деформації оброблюваної сталі в межах від 0 до 1 при подальшій стабілізації цієї залежності. Температура різання і відповідно, розігріву зрізуваного шару зменшує границю плинності. Цей вплив найбільш помітний при високих температурах (700–1000 °C).

Границя плинності оброблюваного матеріалу з ростом ступеня його деформації, відповідно до моделі, що описує криву плинності, зростає. Найбільш інтенсивне зростання характерне для низьких температур. При підвищених температурах це проявляється в значно меншій мірі. Характерне зменшення межі плинності в діапазоні температур від 20 до 600 °С складає для ступеню деформації I від 1700 до 1150 МПа. Зростання цього параметру для температури 600 °С, що спостерігається при збільшенні ступеню деформації від 0 до 0,5, знаходиться в межах 740–1100 МПа.

Параметром який демонструє зміну умов різання, стан інструменту або при постійності цих параметрів, зміну властивостей оброблюваного матеріалу є величина складових сили різання. Визначимо дані показники в залежності від часу. З рис. 2 видно, що при врізанні інструменту спостерігається всплеск сили різання на рівні 10–11%, що відповідає перехідному процесу стружкоутворення з наростанням довжини контакту стружки з інструментом, на етапі, коли переміщення стружки вздовж передньої поверхні ще відсутнє.

В перші мілісекунди різання довжина контакту та усадка стружки вища у порівнянні зі квазісталім процесом обробки. Така закономірність спостерігається на кожному з проходів, при цьому на першому проході величини складових сили різання відрізняються від цих параметрів, визначених для проходів 2 та 3. Середнє значення P_z на першому проході складає 78 Н, на подальших – 68 Н; P_y – 38 Н та 40 Н відповідно. Пояснення причин цього явища буде надано нижче при розгляді інших параметрів контактних явищ та характеристик деформації оброблюваного матеріалу.

Розглянемо такий параметр контактної взаємодії як усадка стружки ζ , який характеризує деформацію в зоні зсуву та є одним з показників впливу коефіцієнту тертя на процес різання. На рис. 3 зображено корні стружок, які мають місце для різних проходів. Як і в попередньому випадку, дана контактна характеристика на першому проході ($\zeta = 2,12$) суттєво відрізняється від подальших ітерацій процесу ($\zeta = 1,78$) при товщині стружок відповідно 0,042 мм та 0,035 мм. Кут зсуву при цьому змінюється з $25^\circ 10'$ до $29^\circ 15'$.

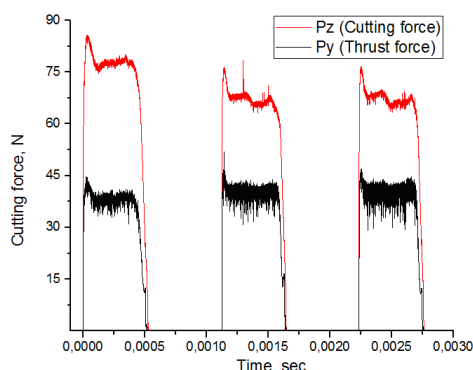


Рис. 2 – Складові сили різання, отримані у дослідженнях

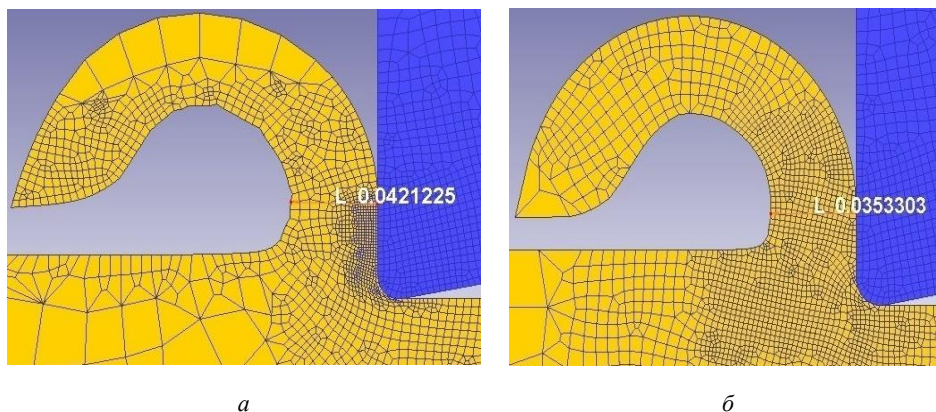


Рис. 3 – Корні стружок для першого (а) та третього (б) проходів

Довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця змінюється при цьому дуже суттєво – від 0,034 мм до 0,023 мм після першого проходів інструменту. Розподіл величин контактних напружень вздовж робочої ділянки на передній поверхні за межами округленої частини різальної кромки приведено на рис. 4.

По відношенню нормальних та тангенційних напружень визначено залежність коефіцієнту тертя від відстані від різальної кромки. Як видно з аналізу графіків, коефіцієнт тертя не змінюється суттєво, хоча спостерігається зростання величин нормальних та тангенційних контактних напружень з 1,9 до 2,15 та з 0,8 до 1,06 ГПа відповідно.

Ступінь зміцнення оброблюваної поверхні будемо характеризувати ефективною деформацією матеріалу, яку визначимо в вертикальному перетині на відстані 0,1 мм за різальною кромкою різця на кожному з проходів. Вихідна деформація відсутня. Після першого та другого проходів ступінь деформації на поверхні (максимальній) дорівнює 0,36, збільшуючись до 0,48 після третього проходу. Зона, на яку розповсюджуюється суттєве зміцнення по глибині, зростає з кожним проходом, досягаючи на третьому проході величини 0,2 мм. При встановленні для моделювання товщини зрізу 20 мкм, для першого проходу глибина, що відповідає $\varepsilon = 0,2$ складає 36 мкм, після другого та третього – 42 та 60 мкм. Зміцнення поверхневого шару обробленого матеріалу є причиною зміни величин сил різання, як це показано на рис. 5.

Оскільки глибина зміцнення достатньо висока, весь шар матеріалу, що зрізується після першого проходу вже має механічні властивості, що відрізняються від вихідних механічних характеристик поверхневого шару оброблюваної сталі. Так при ступені ефективної деформації 0,5, границя міцності сталі зростає з 770 до 1100 МПа. Вказане приводить до зростання ефективних напружень в матеріалі, що деформується в зоні різання, що вочевидь повинно було б збільшувати сили різання. На практиці, як вже відмічалось, спостерігається зниження величин даного параметру. Пояснення цього факту полягає в тому, що при зміцненні та зменшенні пластичності оброблюваного матеріалу зростає кут зсуву та суттєво зменшується усадка стружки, при цьому вплив зміцнення менш інтенсивний у порівнянні з впливом збільшення кута зсуву, що супроводжується зменшенням довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструменту.

Надати характеристику зміцненню можна також у горизонтальному перетині на рівні 10 мкм від поверхні (середина товщини зрізу) (рис. 6). Наростання ступеню деформації відбувається в зоні опережающей волни деформації на відстані 60 мкм, на відстані 30 мкм ε вже дорівнює 0,35, досягаючи 1,2 та 1,8 в зоні зсуву та в приконтактній зоні (рис. 6, а). Характеристика деформації підповерхневого шару після третього проходу на цій глибині складає $\varepsilon = 0,27$ (рис. 6, б). Нестационарний характер обробки з врізаннями кожного з лез інструменту та виходом з зони різання обумовлює наявність періодів наростання температури різання та охолодження різального інструменту. Характер імпульсів температурного навантаження на лезо інструменту, які характеризують термічні удари, зображено на рис. 7.

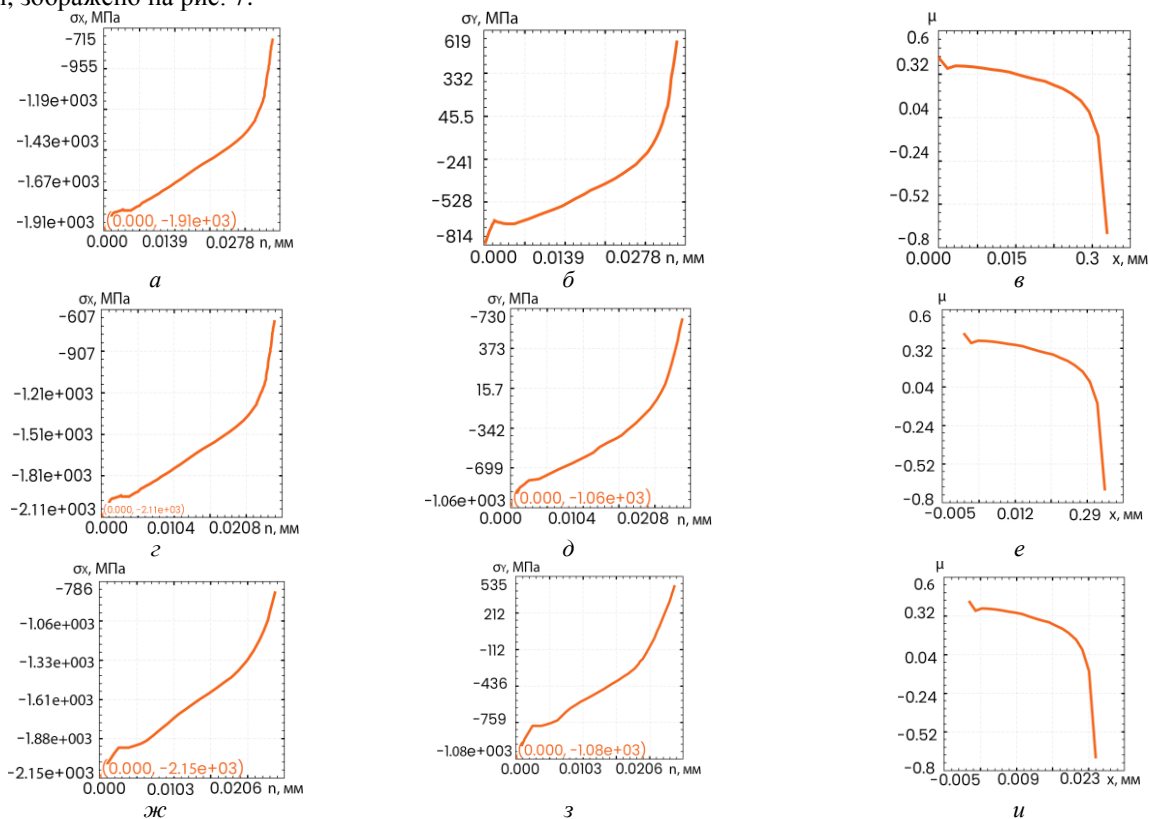


Рис. 4 – Контактні нормальні (а, г, ж) та тангенційні (б, д, з) напруження, коефіцієнт тертя (в, е, u) в залежності від координати на передній поверхні різця на кожному з проходів

Точка вимірювання температури на вершині різального інструменту позначена на рис. 7, а. Порівняно низькі для умов обробки загартованої сталі температури (300–380 °С) пов'язані з тим, що у процесі моделювання враховано лише початковий етап різання, а точка виміру температури розташована на інструменті, який прогрівається за більший період часу у порівнянні з оброблюваним матеріалом, що обумовлено наявністю термічного опору на границі розділу стружка-передня поверхня різального інструменту.

Розподіл контактної температура вздовж лінії контакту зі сторони передньої поверхні зображено на рис. 8. Як можна бачити величина температури в даному випадку значно вища і досягає 600 °С. При наростанні часу обробки величина температури різання буде збільшуватися, а значення температури, виміряне в інструменті, буде наближатися до максимальної температури в оброблюваному матеріалі.

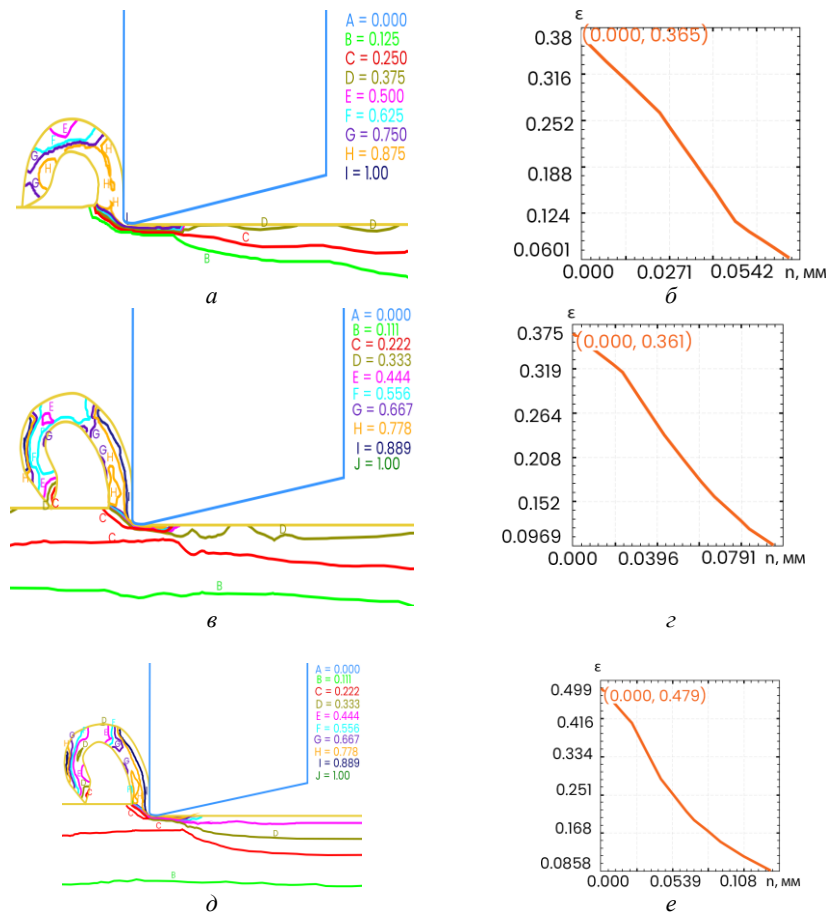


Рис. 5 – Ступінь деформації оброблюваного матеріалу в залежності від глибини вимірювання на кожному з проходів

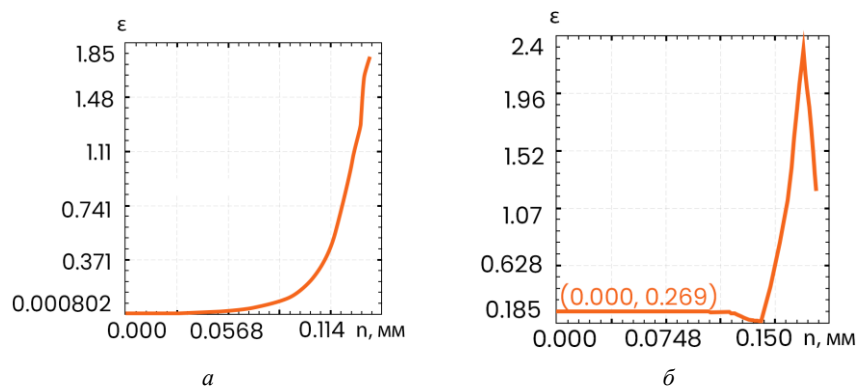


Рис. 6 – Залежність ступеня деформації від відстані від різальної кромки у напрямку швидкості різання

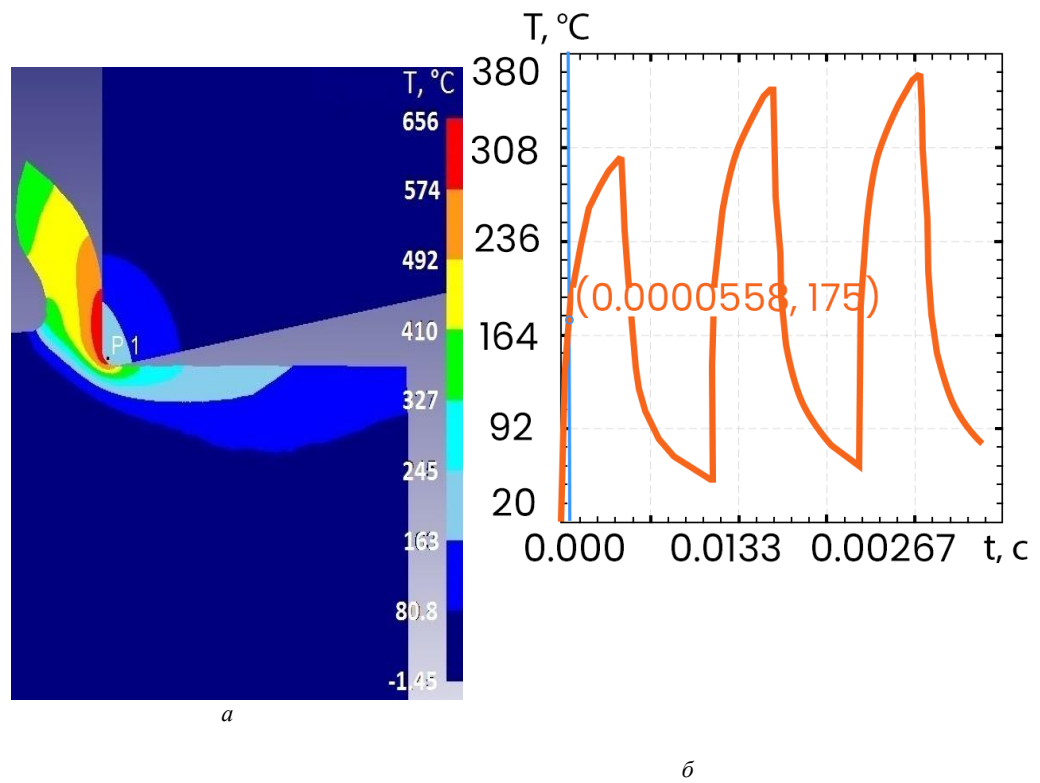


Рис. 7 – Точка виміру температури в інструменті та динаміка наростання температури на кожному з проходів

Висновки. Встановлено, що для умов торцевого фрезерування сталі високої твердості інструментом, робоча частина якого оснащена PcBN, характерно наступне:

– границя плинності оброблюваного матеріалу інтенсивно зростає при збільшенні ступеню деформації оброблюваної сталі (при подальшій стабілізації цієї залежності);

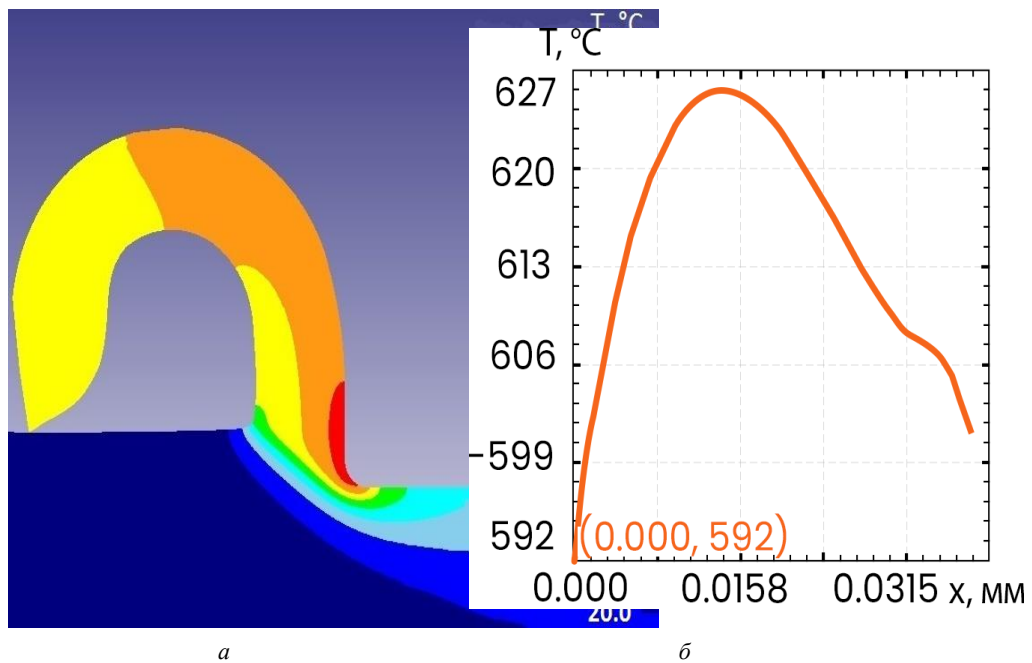


Рис. 8 – Розподіл температурних полів в оброблюваному матеріалі (а) та епо́ра температурного навантаження на передній поверхні інструменту на першому проході (б)

- при врізанні інструменту в оброблюваний матеріал спостерігається всплеск сили різання, що відповідає перехідному процесу стружкоутворення з наростанням довжини контакту стружки з інструментом;
- в перші мілісекунди різання довжина контакту та усадка стружки вища у порівнянні зі квазісталом процесом обробки;
- усадка стружки на першому проході є більшою у порівнянні з отриманою при подальших проходах інструменту;
- коефіцієнт тертя суттєво не змінюється, хоча спостерігається зростання величин нормальних та тангенціальних контактних напружень на поверхнях інструменту;
- ефективна деформація матеріалу в зоні різання після наступних проходів інструменту збільшується, що обумовлює зростання ефективних напружень;
- нестационарний характер обробки з врізаннями кожного з лез інструменту та виходом з зони різання обумовлює наявність періодів наростання температури різання та охолодження різального інструменту.

Список літератури:

1. Синтез и спекание сверхтвердых материалов для производства инструментов / под общ. ред. П. А. Витязя, В. З. Туркевича – Минск : Беларуская навука, 2021. – 337, [1] с.;
2. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. – Москва : Машиностроение, 2014. – 608 с.;
3. Huang, Y. Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning : PhD Dissertation / Y. Huang. – Georgia : Georgia Institute of Technology, 2002.

References (transliterated)

1. *Sintez i spekanie sverkhтверdy`kh materialov dlya proizvodstva instrumentov* / pod obshh. red. P. A. Vityazy, V. Z. Turkevicha – Minsk : Belapuskava navuka, 2021. – 337, [1] s.;
2. *Instrumenty iz sverkhтверdy`kh ma-terialov* / pod red. N. V. Novikova, S. A. Klivenko. – Moskva : Mashinostroenie, 2014. – 608 s.;
3. *Huang, Y. Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning* : PhD Dissertation / Y. Huang. – Georgia : Georgia Institute of Technology, 2002.

Поступила (received) 10.03.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клименко Сергій Анатолійович (Klivenko Sergiy Anatoliyovich) – заступник директора з наукової роботи, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, чл.-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22 <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>

Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andriy Sergiyovich) – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший дослідник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22 <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>

Чумак Анатолій Олександрович (Chumak Anatoly Oleksandrovich) – мл. наук. співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22 <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>

Клименко Сергій Анатолійович (Klivenko Sergiy Anatoliyovich) – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22 <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>

Копейкіна Марина Юрїївна (Kopyikina Marina Yuriivna) – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22 <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>

Саленко Олександр Федорович (Salenko Oleksandr Fedorovich) – професор, доктор технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», 03056, м. Київ, пр.Т. Перемоги, 37. +38068 659-47-95, <https://orcid.org/0000-0002-5685-6225>