

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗОНИ РІЗАННЯ В СИСТЕМІ SOLIDWORKS SIMULATION

Цілеспрямоване управління теплофізичними процесами зони різання шляхом зміни параметрів режиму різання, геометрії інструмента, застосування ЗОР дозволяє досягнути більш високого рівня продуктивності обробки. Прогнозування теплових процесів при різанні металів характеризується багатофакторністю моделі та нелінійністю зв'язку температурного поля зони різання і параметрів обробки. Тому є важливим реалістичне моделювання цих процесів з врахуванням максимальної кількості факторів впливу, яке дозволить мінімізувати час та вартість експериментальних досліджень.

У статті розглянуто застосування автоматизованої системи проектування та розрахунків SolidWorks Simulation для аналізу теплофізичних процесів, що відбуваються в зоні різання при чистовому точінні загатованої сталі круглою різальною пластиною з надтвердого матеріалу (НТМ).

При моделюванні розглянуто розподілення утвореного під час різання тепла (в зоні пластичної деформації заготовки та на поверхнях тертя різального леза з стружкою та обробленою поверхнею) чотирма потоками: в інструмент, стружку, заготовку та зовнішнє середовище.

Визначено межові умови існування розробленої моделі – геометричні, фізичні, часові та граничні. Моделювання виконано в двох режимах – стаціонарному та перехідного процесу. Проведено перевірку адекватності результатів моделювання.

У висновках виконано аналіз використання можливостей системи САПР SolidWorks Simulation для досліджень теплових процесів зони різання.

Ключові слова: *теплофізичні процеси; надтвердий матеріал; температура різання; точіння; продуктивність.*

Постановка проблеми. Внаслідок інтенсифікації виробничих процесів та зростання їх енергонапруженості за рахунок застосування висококонцентрованих джерел енергії зростає роль максимально точної оцінки та прогнозування теплових та фізичних процесів, що відбуваються у різних технологічних системах. Теплофізичні процеси зони різання характеризуються особливою екстремальністю за рахунок зростаючих вимог до продуктивності виробництва та підвищення міцності, в'язкості, твердості, інших властивостей конструкційних матеріалів.

Складність прогнозування теплових процесів при різанні металів характеризується багатофакторністю моделі та неоднозначністю зв'язку температурного поля зони різання і параметрів обробки. Додатковими умовами є необхідність підтримання оптимальної для заданої пари матеріалів інструмента та заготовки температури різання [1], яка відповідає максимальній продуктивності процесу обробки при заданих умовах, дотримання вимог до кінцевих параметрів оброблюваної поверхні, як геометричних так і фізико-механічних, жорсткість заготовки та інструменту, стійкість процесу обробки, спосіб застосування та вид ЗОР тощо. Значні нелінійності теплофізичних процесів при різанні металів призводять до неоднозначності в залежності між температурним полем та параметрами обробки [2]. Наприклад, підвищення стійкості різального інструмента забезпечується, в одному випадку, шляхом попереднього нагріву оброблюваної заготовки, а в інших – за рахунок використання ЗОР, яка знижує температуру в зоні різання.

Проте можливість цілеспрямованого управління тепловими процесами зони різання шляхом зміни певних параметрів режиму різання, геометрії інструмента, застосування ЗОР дозволить досягнути більш високого рівня продуктивності обробки. І в цьому напрямку важливим є реалістичне моделювання теплових процесів з врахуванням максимальної кількості факторів впливу, яке дозволить мінімізувати час та вартість експериментальних досліджень.

Залежність продуктивності обробки від температури різання характерна для більшості інструментальних матеріалів і має екстремальний характер [1]: навіть при незначному відхиленні температури (особливо у область більш високих значень) продуктивність процесу різко знижується. Тому можливість максимально точного прогнозування температур зони різання, їх змін в залежності від умов обробки дозволить підвищити продуктивність процесів обробки різанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як теоретичні так і експериментальні дослідження теплофізичних процесів, що відбуваються в зоні різання виконували А.Н. Резніков, Л.А. Резніков,

С.Г. Редько, С.С. Силін, [2, 4, 5]. Зв'язок стійкості та продуктивності обробки з рівнем температур зони різання розглядався у роботах [1, 2]. У роботі [2] на основі узагальнення експериментальних даних визначено зв'язок зміни термічних напружень у різальному клині інструмента з коливаннями температури різання. Слід відмітити також роботи [6, 7, 8], в яких розглядалися особливості використання різних інструментальних матеріалів, теплоутворення та тепловідвід при обробці матеріалів високої твердості, сталей та чавунів.

Серед факторів впливу слід відмітити залежність стійкості інструмента та продуктивності обробки від неперервності самого процесу різання. Для випадку переривчастого різання, яке характерне для різних видів обробки при однакових умовах досягається нижча температура різання, ніж при безперервному процесі [3, 4, 9]. Проте однозначного впливу на стійкість не простежується завдяки більш високій частоті коливань термонапружень, що виникають в різальному клині при періодичному нагріванні та охолодженні інструменту в кожному циклі робочого (з різанням) та допоміжного (без різання) рухів різального леза. Значний вплив на стійкість інструмента при переривчастому різанні має здатність інструментального матеріалу опиратися руйнуванню від коливань знакозмінних напружень. Позитивний вплив характерний для різних інструментальних (в тому числі і швидкорізальних) сталей та у значно меншій мірі – для крихких твердих сплавів, НТМ та мінералокераміки [2, 10].

Відповідно, важливим є вирішення питання максимально точного прогнозування температур зони різання, їх змін в залежності від умов обробки, що дозволить підвищити продуктивність процесів обробки різанням.

Мета дослідження. Оцінка застосування можливостей автоматизованої системи проектування та розрахунків *SolidWorks Simulation 2016* для аналізу теплофізичних процесів, що відбуваються в зоні різання.

Викладення основного матеріалу. Аналіз різних методів аналітичного розрахунку температури зони різання та термонапружень доводить, що тільки чисельний розрахунок надає можливість врахувати складні граничні умови зони різання і забезпечити необхідну точність вирішення, як для усталеного процесу різання так і в динаміці [1]. Схема утворення температурного поля базується на розв'язку диференціального рівняння теплопровідності для кожної точки зони різання (перш за все різального елемента) в будь-який момент часу за умов, що теплота деформації утворюється у площині зсуву, а теплота тертя – на площинах контакту різального інструмента зі стружкою та виробом [2, 4]. Вирішення цієї задачі для випадків обробки без застосування ЗОР було розглянуто раніше у [9].

В подальшій роботі передбачається при моделюванні температурних полів чистового фрезерування розглянути варіанти обробки (з підтримкою оптимальної температури різання [1]):

1. Без додаткових ускладнюючих умов (використання ЗОР, підігріву або охолодження інструмента чи заготовки) при переривчастому різанні з різними співвідношеннями часу різання та руху різального леза без різання.

2. З застосуванням змащувально-охолоджувальної рідини (з різними способами її подачі) з моделюванням температурних полів переривчастого різання з метою оцінки зростання продуктивності обробки за рахунок зростання параметрів режиму різання.

3. З підігрівом заготовки, з метою зменшення параметрів міцності та твердості оброблюваного матеріалу, і забезпеченням зниження силової та енергонавантаженої зони різання.

4. З підігрівом різальних елементів на ділянці їх руху «без різання» з метою зменшення діапазону коливань температур під час нагріву та охолодження різальної пластини з гексаніту і відповідно, коливань, термонапружень.

Але попередньо необхідно визначити, для вирішення поставленої мети, можливість використання автоматизованої системи *SolidWorks Simulation* для оцінки теплових процесів, що відбуваються під час чистового поздовжнього точіння.

При моделюванні розглянуто різальний елементі RNMN 05.T3.00F (згідно стандарту *ISO 1832:1991 E*) циліндричної форми ($d = 5,56$ мм, $h = 3,18$ мм) з НТМ для чистового точіння загартованої сталеві заготовки (*HRC 46-52*). Моделювання виконувалося у програмному середовищі *SolidWorks Simulation Premium* з метою визначення динаміки зміни температур в залежності від умов різання.

Переваги застосування наведеного програмного продукту – простота створення твердотільної 3-D моделі будь-якої деталі або збірки, автоматизація теплового розрахунку моделі як в усталеному режимі так і при перехідному процесі, можливість визначення теплових деформацій та напружень, врахування особливостей теплофізичних якостей матеріалів і середовищ. До відносних недоліків прикладного використання середовища *SolidWorks* слід віднести необхідність точного попереднього визначення всіх межових умов існування розробленої моделі – геометричних, фізичних, часових та граничних і відповідно максимально точної перевірки адекватності результатів (наприклад, шляхом порівняння з дослідними даними найбільш близькими за умовами до змодельованих).

Параметри режиму різання були прийняті однаковими з метою мінімізації їх впливу на інші характеристики процесу обробки: $V = 2$ м/с ($n = 200$ хв⁻¹), $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,3$ мм.

Конструкція токарного різця для чистового точіння загартованих сталей круглою різальною пластиною з НТМ представлено на рис. 1, а.

Враховуючи, що в роботі розглядалися в першу чергу теплові процеси зони різання, 3-D моделі різця та елементів кріплення були створені спрощено з забезпеченням тільки геометричної точності поверхонь контакту з різальним елементом (рис. 2).

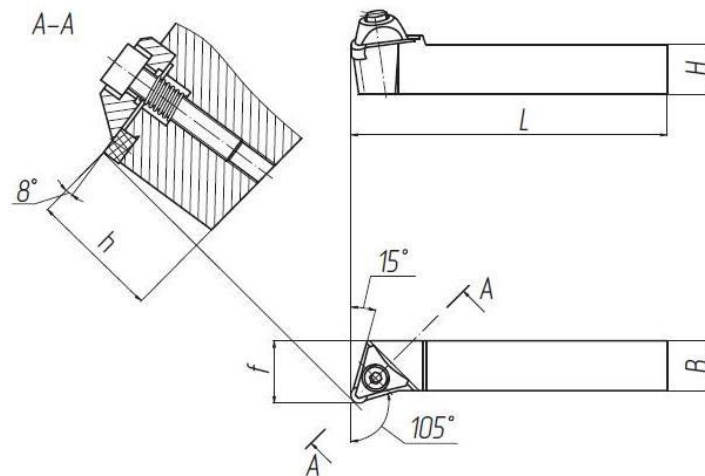


Рис. 1. Різець токарний збірний прохідний з непереточуваною круглою пластиною з СТМ: $L = 125$ мм, $H=B=h=20$ мм, $f = 24$ мм;

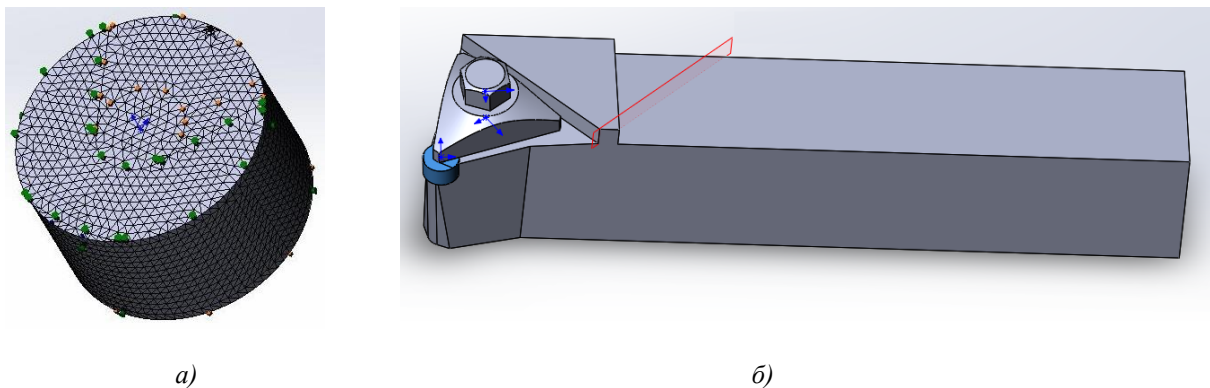


Рис. 2: а – 3-D модель круглої різальної пластини з сіткою розбиття для використання методу скінченних елементів, б – 3-D модель різця токарного (рис. 1)

Загальна теплова потужність процесу різання за [2, 4, 11] з врахуванням розмірності Дж/с визначається за формулою:

$$Q = 0,0164 \cdot F_z \cdot V, \quad (1)$$

де F_z – тангенційна складова сили різання, Н; V – швидкість різання, м/хв.

Значення F_z для моделювання було розраховано за методиками [11, 12] та уточнено за експериментальними даними, наведеними у [11, 12]. З врахуванням наведених вище параметрів режиму різання та оброблюваного матеріалу, геометрії різального леза тангенційна складова сили різання $F_z = 112$ Н. Відповідно $Q = 220$ Дж/с.

Утворене при різанні тепло (в зоні пластичної деформації заготовки та на поверхнях тертя різального леза з стружкою та обробленої поверхнею) розподіляється нерівномірно чотирма потоками: в інструмент, стружку, заготовку та зовнішнє середовище. Кількість теплоти Q_r , що надходить в різальний елемент залежить в першу чергу від швидкості різання і становить від 3 до 8% загальної кількості утвореної теплоти [2, 4].

Для вибраних умов моделювання та $V = 120$ м/хв приймаємо $Q_r = 0,05Q$.

Теплоту, що надходить в інструмент, в свою чергу, можна розділити на дві частини, перша, що надходить через передню поверхню (в зоні контакту інструмента зі стружкою), друга – через задню поверхню (в зоні контакту інструмента з заготовкою). Інтенсивність джерела тепловиділення, яке діє на ділянці контакту між задньою поверхнею інструмента та поверхнею різання є можливість визначити за методикою з [4] за формулою, Дж/м²с:

$$q_2 = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{F_2 \cdot V}{b \cdot l_2}, \quad (2)$$

де F_2 – сила тертя по задній поверхні, Н; b – ширина перерізу зрізу, мм; l_2 – довжина контакту заготовки і інструмента по задній поверхні, мм.

$$F_2 = 0,252 \cdot \sigma_{-6} \cdot \mu_2 \cdot b \cdot l_2, \quad (3)$$

де σ_{-6} – часовий опір оброблюваного матеріалу, МПа; μ_2 – коефіцієнт тертя по задній поверхні.

Втрати теплоти з різального елемента відбуваються за рахунок теплового випромінювання з відкритих поверхонь, теплопровідності через поверхні контакту різального елемента з корпусом різця та деталями кріплення та конвективного теплообміну усіх нагрітих елементів інструмента з зовнішнім рухомим середовищем (повітрям).

Втрати теплоти за рахунок теплового випромінювання визначаються за законом Стефана-Больцмана і безпосередньо враховуються у додатку *Simulation* при моделюванні введенням коефіцієнтів випромінюючої здатності для кожної поверхні.

Теплообмін контактуючих поверхонь різального елемента та деталей різця суттєво залежить від їх термічного опору: величина термічного опору між вуглецевими сталями та металокерамічними матеріалами в зоні пружного контакту (нормальні напруження в контакт менші 50 МПа) за даними [2] становить $(6 \dots 8) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі від нагрітих деталей різця до повітря необхідні, як умови моделювання і визначаються окремо для випадків охолодження:

1. Горизонтальних поверхонь державки різця (верхніх), елементів кріплення та самого різального елемента.

2. Вертикальних бічних поверхонь державки різця і елементів кріплення.

3. Горизонтальних поверхонь державки різця (нижніх).

У першому випадку значення коефіцієнта тепловіддачі α_{cp1} є можливість розрахувати за критеріальними рівняннями теорії В. Нуссельса [2] для випадку примусового руху газу (повітря). Для ламінарного руху газу (що відповідає швидкості його руху $V < 5 \text{ м/с}$):

$$Nu_{cp} = 0,146 \cdot Re^{0,33} \cdot Gr^{0,1}, \quad (4)$$

де $Nu_{cp} = \frac{\alpha_{cp} R_0}{\lambda_{нов}}$ – критерій Нуссельса; $Re = \frac{V_0 R_0}{\nu_{нов}}$ – критерій Рейнольдса; $Gr = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu_{нов}^2} \beta \cdot \Delta T_0$ – критерій

Грасгофа; $V_0 = 2 \text{ м/с}$ – швидкість руху повітря в щилині між фрезою і заготовкою; R_0 – визначальний розмір щилини, що залежить від її ширини та діаметра фрези; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; $\lambda_{нов}, \nu_{нов}, \beta$ – характеристики повітря при температурі зовнішнього середовища: коефіцієнти теплопровідності, кінематичної в'язкості та об'ємного розширення відповідно.

У другому випадку значення коефіцієнта тепловіддачі α_{cp2} теж розраховується за рівняннями теорії В. Нуссельса але для випадку вільної конвекції в необмеженому просторі:

$$Nu_{cp} = 0,151 \cdot Pr^{0,25} \cdot Gr^{0,25} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

де $Pr = \frac{\nu_{нов} c_p}{\lambda_{нов}}$ – критерій Прандтля; c_p – теплоємність повітря при постійному тиску;

$\left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}$ – поправковий коефіцієнт; враховуючи, що температура бокових зовнішніх поверхонь

фрези відносно невелика, прийнятий рівним одиниці.

У третьому випадку значення коефіцієнта тепловіддачі α_{cp3} також розраховується за рівняннями теорії В.Нуссельса для випадку вільної конвекції в необмеженому просторі за спрощеною формулою [2] (за умови, що визначальний розмір R_0 поверхні однаковий):

$$\alpha_{cp3} = 0,7 \cdot \alpha_{cp2} \quad (5)$$

Оцінку відповідності моделювання реальним тепловим процесам у зоні різання було виконано термічними «дослідженнями» з визначенням температур різальної пластини (розглянутої окремо та зібраної з різцем) при чистовому зовнішньому точінні. Результати моделювання для випадку застосування різальної пластини з гексаніту-Р ($\lambda = 70 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) представлені на рисунку 3.

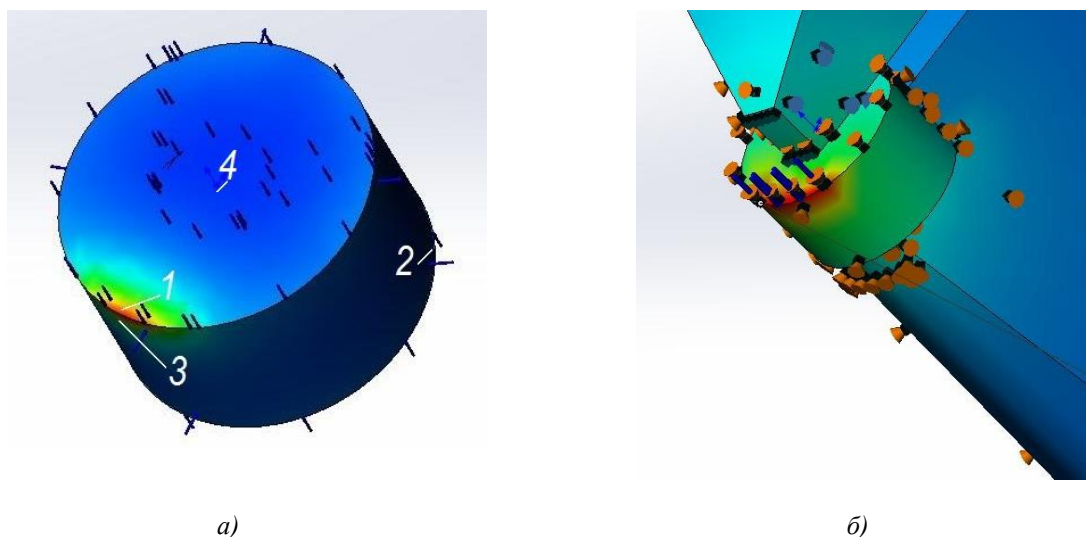


Рис. 3. Результати моделювання в SolidWorks Simulation розподілення температур в різальній пластині з гексаніту (тип вирішення – сталый стан): а – пластинка розглянута окремо, б – в зібраному з різцем стані

При розгляді тільки різальної пластини:

- у зоні контакту передньої поверхні різальної пластини зі стружкою (1, рис. 3, а) отримано найвищу температуру – близько 1150 °С;
- найменше значення температури – 928 °С відповідає точці 2 (рис. 3, а), найвіддаленішої від зони контакту різальної пластини зі стружкою;
- температура на задній поверхні різальної пластини в зоні контакту її з оброблюваною деталлю близька до максимальної (найвище значення – 1094 °С).

При розгляді різця в зборі з різальною пластиною значення отриманих при моделюванні температур дещо нижчі, але їх розподілення аналогічне: точка 1 – 1043 °С, точка 2 – 770 °С, точка 3 – 965 °С (рис. 3, б, положення точок відповідає вказаним на рис. 3, а).

Розбіжність отриманих результатів можна пояснити неточністю задання потоків теплоти з різальної пластини без врахування реального контакту пластини, різця і елементів кріплення. Загалом отримані у другому варіанті дослідження результати відповідають реальним температурам зони різання при точінні НТМ загартованих конструкційних сталей [3, 7, 13].

Важливим параметром НТМ, який безпосередньо впливає на значення температури зони різання є їх теплопровідність. Моделювання надає можливість швидко оцінити вплив будь-якого змінного параметра на кінцевий результат (наприклад, температуру) при фіксованих інших чинниках.

Так, при застосуванні в якості інструментальних матеріалів для різальних пластин різних НТМ в моделюванні статичних процесів були отримані температури (табл. 1), безпосередньо залежні від їх теплопровідності.

Таблиця 1

Залежність отриманих в моделюванні температур різальної пластини від параметрів інструментального НТМ [13]

№ з/п	Марка НТМ	Теплопровідність, Вт/м·К	Термо-стійкість, °С	Температура °С, у точках різальної пластини (рис. 3)			
				1	2	3	4
1.	Гексаніт	70	1100-1300	1043	770	965	890
2.	Кіборит	100	1300	1015	658	950	862
3.	Композит 05	30	1000-1100	1125	920	1077	934
4.	Amborite	120	1000-1200	999	641	936	849

У подальшому дослідженні було виконано моделювання в режимі перехідного процесу з встановленням його часу протікання та інкременту. Час процесу змінювався від 0,1 с до 100 с, а інкремент – від 0,01 до 1 с відповідно.

При моделюванні в режимі перехідного процесу (практично незалежно від вибраних параметрів) була виявлена суттєва невідповідність результатів моделювання прогнозованому розподіленню температур [2, 3, 4], як у різальній пластині, так і в різці загалом. Збільшення часу перехідного процесу не наближало кінцеві температури характерних точок до результатів моделювання у сталому стані. Відхилення значень

температур на контактних поверхнях різальної пластини в сторону зменшення відносно прогнозного становило 200...600°C, що є неприйнятним.

Виконавши аналіз використання можливостей системи САПР *SolidWorks Simulation* для досліджень теплових процесів зони різання при чистовому точінні загартованої сталі циліндричною різальною пластиною з НТМ є можливість зробити висновки:

1. Використання даної системи для моделювання теплових процесів зони різання є допустимим і достатньо точним при розгляді стаціонарних процесів (тип рішення – сталий стан).

З метою підвищення точності отриманих результатів необхідно:

- забезпечити точне відтворення межових умов існування розробленої моделі – геометричних розмірів елементів, фізичних властивостей матеріалів та середовищ, граничних умов контакту та теплообміну між елементами моделі та з зовнішнім середовищем;

- при створенні сітки для застосування методу скінченних елементів вибирати максимальний режим точності;

- зона інтенсивного теплообміну (для різання – ділянки контакту різальної пластини зі стружкою та заготовкою) при моделюванні повинна бути одного порядку розмірів з іншими задіяними у моделі поверхнями теплообміну – з метою зменшення впливу на точність результатів.

3. При моделюванні у режимі перехідного процесу отримати, навіть наближені до експериментальних даних, результати не вдалося, що можна пояснити складністю межових умов існування системи, що розглядалася у роботі.

У подальших дослідженнях необхідно розглянути можливості моделювання теплофізичних процесів зони різання при застосуванні ЗОР та різних методів охолодження (підігріву) оброблюваної деталі та інструмента.

Список використаної літератури:

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. – М. : Машгиз, 1956. – 367 с.
2. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В.А. Остафьев. – М. : Машиностроение, 1979. – 168 с.
3. Остафьев В.А. Расчет нестационарных температурных полей при резании металлов / В.А. Остафьев, А.А. Чернявская. – М. : ЦНИИТЭ Стройдормаш, 1970. – 16 с.
4. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах : учебник / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
5. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С.Г. Редько. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1962. – 231 с.
6. Thomason P.F. Steady-State thermal stresses in wedge-shape cutting tools / P.F. Thomason // Trans ASME. – 1975. – Vol. 97. – No. 3. – Pp. 1060–1066.
7. Лецинер Я.А. Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов / Я.А. Лецинер, Р.М. Свиринский, В.В. Ильин. – Киев : Техніка, 1981. – 120 с.
8. Нощенко О.М. Підвищення ефективності використання твердосплавних різців на основі об'ємного моделювання їх термоміцності : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / О.М. Нощенко ; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – К., 2003. – 20 с.
9. Степчин Я.А. Визначення нестационарних температурних полів зони різання при торцевому фрезеруванні за математичною моделлю / Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2013. – № 4 (67). – С. 37–42.
10. Яцерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах : учебник / П.И. Яцерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Мн. : Выш. шк., 1990. – 512 с.
11. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – К. : Наук. Думка, 1990. – 320 с.
12. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова ; 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
13. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова. – Киев : ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.

References:

1. Zorev, N.N. (1956), *Voprosy mehaniki processa rezanija metallov*, Mashgiz, Moskva, 367 p.
2. Ostaf'ev, V.A. (1979), *Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushhego instrumenta*, Mashinostroenie, Moskva, 168 p.
3. Ostaf'ev, V.A. and Chernjavskaja, A.A. (1970), *Raschet nestacionarnykh temperaturnykh polej pri rezanii metallov*, ЦНИИТЭ Стройдормаш, Moskva, 16 p.
4. Reznikov, A.N. and Reznikov, L.A. (1990), *Teplovye processy v tehnologicheskikh sistemah*, Mashinostroenie, Moskva, 288 p.
5. Red'ko, S.G. (1962), *Processy teploobrazovaniya pri shlifovanii metallov*, Izd-vo Sarat. un-ta, Saratov, 231 p.
6. Thomason, P.F. (1975), «Steady-State thermal stresses in wedge-shape cutting tools», *Trans ASME*, Vol. 97, No. 3, pp. 1060–1066.

7. Leshhiner, Ja.A., Svirinskij, R.M. and Il'in, V.V. (1981), *Lezviyjnyj instrument iz sverhtverdyh materialov*, Tehnika, Kiev, 120 p.
8. Noshhenko, O.M. (2003), *Pidvishhennja efektyvnosti vikoristannja tverdosplyvnyh rizciv na osnovi ob'emnogo modeljuvannja ih termomicnosti*, avtoref. dis. kand. tehn. nauk, 05.03.01, Nac. tehn. un-t Ukraïni «Kiïv. politehn. in-t», Kiïv, 20 p.
9. Stepchin, Ja.A. (2013), «Viznachennja nestacionarnih temperaturnih poliv zoni rizannja pri torcevomu frezeruvanni za matematichnoju modellju», *Visnik ZhDTU, Serija Tehnichni nauki*, No. 4 (67), pp. 37–42.
10. Jashhericyn, P.I., Eremenko, M.L. and Fel'dshtejn, E.Je. (1990), *Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovyje processy v tehnologicheskijh sistemah*, Vysh. shk., Minsk, 512 p.
11. Rozenberg, A.M. and Rozenberg, O.A. (1990), *Mehanika plasticheskogo deformirovanija v processah rezanija i deformirujushhego protjagivanija*, Nauk. Dumka, Kiïv, 320 p.
12. Kosilova, A.G. and Meshherjakov, R.K. (ed.) (1985), *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja*, in 2 volumes, Volume 2, 4th ed., pererab., dop., Mashinostroenie, Moskva, 496 p.
13. Novikov, N.V. (ed.) (2001), *Instrumenty iz sverhtverdyh materialov*, ISM NANU, Kiev, 528 p.

СТЕПЧИН Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металорізальних верстатів і систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання.

E-mail: stepchiny@gmail.com.

СТЕПЧИН Олег Анатолійович – інженер кафедри галузевого машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- теорія різання;
- верстати з ЧПУ.

E-mail: tmkts_soa@ztu.edu.ua.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2017.