

© В.А. Дербаба¹, О.О. Богданов¹, В.М. Рубан¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЯВИЩ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛЕЙ ТА ЧАВУНІВ

© V. Derbaba¹, O. Bohdanov¹, V. Ruban¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

RESEARCH OF TEMPERATURE PHENOMENA DURING THE MECHANICAL PROCESSING OF STEELS AND IRON

Мета. Дослідження температурних явищ в зоні різання сталевих й чавунних заготовок в умовах промислового виробництва методами комп'ютерного моделювання нестационарних процесів теплообміну при механічній обробці та пошук оптимального матеріалу для різального інструменту.

Методика. Методи проведення досліджень базувалися на основах теорії різання та різального інструменту, теорії теплопровідності щодо контактних поверхонь різального інструменту та заготовки в зоні різання. Використання прикладної програми для моделювання теплових явищ при механічній обробці металів та сплавів. Визначення оптимальних режимів різання з урахуванням зміни температури.

Результати. Комп'ютерний експеримент підтвердив, що оптимальними матеріалами різця при обробці сталі 30X є інструмент з матеріалу Р6М5, а для обробки чавуну СЧ20 краще використовувати інструмент з матеріалу ВК8. При однакових параметрах різання (глибина різання, подача, швидкість різання) та геометрії інструменту контактні поверхні нагріваються менше, а отже інструмент буде втрачати свої різальні якості повільніше і прослужить довше, при належній якості кінцевого продукту. При нестачі різців із оптимальних матеріалів в умовах обмежених можливостей підприємства, можливе застосування неоптимального інструментального матеріалу для механічної обробки сталей та чавунів з малими глибинами різання до 1 мм та на низькій подачі – 0,2 мм/об. При більших глибинах різання й подачі ($t > 1$ мм, $S > 0,2$ мм/об), температури в зоні різання стрімко підвищуються, збільшуючись на 20-40°C, що негативно впливає процес обробки та зменшує стійкість різального інструменту.

Наукова новизна. Встановлено оптимальні режими різання та марки матеріалів деталі та заготовки, при яких буде забезпечено високу якість обробки. Дослідження теплових процесів системи інструмент-заготовка з визначенням температури в будь-якій точці на контактних поверхнях.

Практична значимість. Використання прикладної програми дозволяє визначати температуру відповідної точки різального клина, моделювати розподіл теплового поля для різних режимів різання (глибина різання, подача, швидкість різання) та геометрії інструменту, встановити їх оптимальні значення з урахуванням матеріалу різця та заготовки. Це суттєво прискорить підготовку технологічного процесу механічної обробки, забезпечить потрібну якість та мінімізує витрати.

Ключові слова: теорія різання, різальний інструмент, температура зони різання, тепловий баланс, оптимальні режими різання.

Вступ. Сучасна металургійна і металообробна галузі є надважливими рушіями розвитку глобальної й регіональних економік, а сфера металообробки –

рушій прогресу всього людства. Серед сучасних технологій металообробки, обробка металів та сплавів різанням, на машинобудівних та інших профільних виробництвах вже довгі роки займає 50-70% в питомій вазі всієї металообробки. Тому пошук нових технологічних рішень в рамках виробничого циклу, удосконалення й оптимізація існуючих, є ключовим запитом в усьому світі. Актуальним є дослідження температурних явищ при різанні металів, що дозволить віднайти найкращі поєднання інструментального матеріалу, оброблюваного матеріалу та параметрів процесу різання, що забезпечать мінімізацію виробничих витрат при високій якості продукції, що виробляється.

Під час механічної обробки інструмент піддається інтенсивному впливу значних силових навантажень і температур, а також на його різальні властивості суттєво впливають прояви хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом [1]. Тому до інструментальних матеріалів, що використовують у виробничому процесі висувається ряд таких вимог як:

- висока твердість, щоб лезо могло проникнути в оброблювану заготовку. Твердість інструментального матеріалу має бути вище твердості оброблюваного у 1,4–1,7 рази;

- висока міцність. Якщо твердість не забезпечується необхідною міцністю, матеріал стає крихким і це приводить до викришування різальних кромки інструмента або його поломки;

- висока теплостійкість, що означає здатність матеріалу зберігати високу твердість і міцність при температурах різання;

- висока зносостійкість при підвищеній температурі, тобто опір зношуванню оброблюваним матеріалом;

- низька фізико-хімічна активність інструментального матеріалу по відношенню до оброблюваного;

- технологічність. Конструкція інструменту повинна забезпечити оптимальні умови виготовлення інструментів;

- економічність. Вартість інструментального матеріалу, що припадає на одиницю продукції, повинна бути мінімальною [1, 2].

Завданням кожного підприємства є мінімізація витрат й оптимального використання наявних верстатів, обладнання й витратного матеріалу при належній якості продукції, що виробляється. Задача підбору оптимального інструментального матеріалу для різців, що використовуються при металообробці, є надзвичайно важливим, адже тоді буде забезпечено високу якість обробки заготовки, менше спрацювання інструменту та відповідно зниження вартості кінцевого продукту, зменшення відсотку браку й підвищення продуктивності виробництва.

За розвитку теорії різання основною оцінкою термонапруженості при різанні металів і сплавів є максимальна температура на поверхні контакту інструменту з заготовкою та стружкою. Вимірювальна техніка дає можливість виміряти температуру в зоні різання. Але експериментально ще не вдається отримати розподіл температур безпосередньо на контактній поверхні [2–5]. На це впливає недосконалість та складність вимірювальних пристроїв, тепловідведення в навколишнє середовище, високі швидкості різання, малі розміри контактної поверхні інструменту та ін.

Таким чином, для визначення температури в зоні різання перспективними залишаються чисельні методи та методи комп'ютерного моделювання в прикладних програмах. В даній роботі розглянуто один з таких прикладів використання прикладної програми.

Основна частина. В умовах промислового виробництва, в технологічному процесі металообробки, в якості сировини переважно використовують сталі і чавуни різних марок, наприклад сталь 30X та чавун СЧ20.

Сталь 30X – сталь конструкційна легована, використовується для виготовлення осей, валиків, важелів, болтів, гайок та інших дрібних деталей.

СЧ20 – чавун сірий, використовується для виготовлення блоків циліндрів, гальмівних барабанів, зубчастих коліс, шестерень, муфт зчеплення та інших деталей машин [6].

Для лезових інструментів використовуються різні групи матеріалів: інструментальні сталі (вуглецеві, леговані і швидкорізальні), металокерамічні тверді сплави, різальна (мінеральна) кераміка (мінералокерамічні тверді сплави) і надтверді матеріали (НТМ). Серед швидкорізальних найчастіше застосовується сталь звичайної продуктивності марки Р6М5 (вольфрамомолібденова сталь). Переважно вона використовується для оброблення вуглецевих і низьколегованих сталей, чавуну та кольорових металів при швидкостях різання до 40-50 м/хв.

Також популярними інструментальними матеріалами для виготовлення різального інструменту є різноманітні однокарбідні та двокарбідні тверді сплави, наприклад ВК8, Т15К6, Т14К8 [1, 7].

При обробці різанням до технологічної обробної системи підводиться енергія, більша частина якої витрачається на утворення тепла, що призводить до зміни температури всіх компонентів, особливо ріжучого інструменту та заготовки. Підвищення температури інструменту провокує втрату ріжучої здатності, зношування, зменшення стійкості [1, 2, 5].

Зміна температури заготовки, особливо поверхневого шару, який належить деталі, призводить до перерозподілу напруг і може викликати структурні зміни фазового стану. Тому теплофізичний аналіз процесу обробки різанням має значення для вдосконалення процесу, підвищення його продуктивності, забезпечення якості обробленої поверхні. Температура в зоні різання істотно впливає не тільки на зношування та стійкість різального інструменту, але і на якість та точність обробки, а також продуктивність процесу. Тому її можна використовувати як критерій регулювання для оптимізації процесу різання при застосуванні систем автоматичного регулювання [1, 8].

Оптимальний режим різання можна забезпечити підтримуючи на постійному рівні температуру в зоні різання для відповідної пари матеріалів інструмент-заготовка. Тепло, що виділяється в процесі різання, поширюється по всій технологічній обробній системі і провокує нагрівання всіх складових системи: стружки, інструменту, заготовки.

При цьому тепловий баланс виглядає наступним чином:

$$Q = Q_c + Q_i + Q_z + Q_n,$$

де Q_c – тепло стружки; Q_i – тепло інструмента; Q_z – тепло заготовки; Q_n – тепло навколишнього середовища.

Для режиму різання практично можна вважати всі теплові джерела такими, які рухаються швидко. Тому можна прийняти, що тепло, що генерується ними, попереду джерел тепла не поширюється [1, 9].

При розв'язанні задач із визначенням температурного поля спираються на диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними припущеннями:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

де t – температура тіла в точці з координатами y та z ; τ – час; a – коефіцієнт температуропровідності.

Таке диференціальне рівняння з урахуванням залежностей теплових потоків вирішується чисельним методом. Ця математична модель є базою прикладної програми, за допомогою якої проводяться дослідження теплового поля в різучому клині інструмента та деталі [9].

На рисунку 1 наведено осцилограму зміни температури вказаної точки інструменту, де встановлено значок термометра.

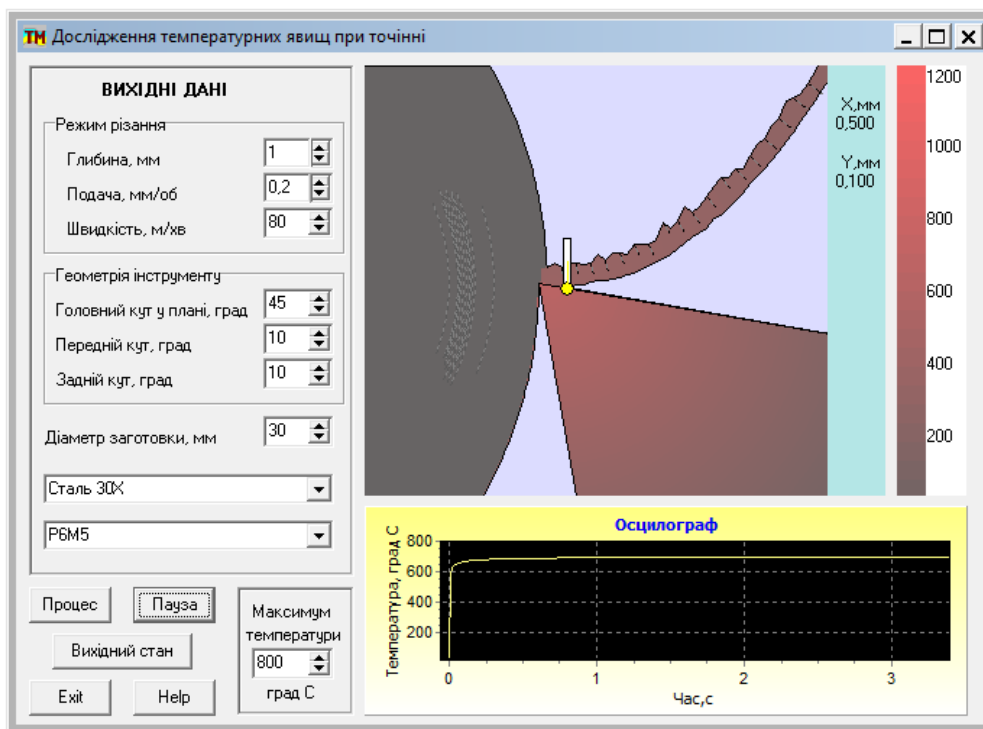


Рис. 1. Інтерфейс програми у процесі моделювання

Математична модель, за якою функціонує прикладна програма, дозволяє моделювати теплові процеси під час різання. За допомогою цієї програми були проведені дослідження щодо зміни температури різального інструменту на передній поверхні різця у точці з координатами $x = 0,5$ мм, $y = 0,1$ мм. Матеріал заготовки – сталь 30X та чавун СЧ20, інструментальний матеріал – P6M5, BK8.

Швидкість різання – 80 м/хв. Діаметр заготовки – 30 мм. Характеристика різця – різець прохідний, задній кут – 10°, передній кут – 10°, головний кут у плані – 45°. Змінювані параметри під час експерименту:

1) глибина різання $t = 1, 1,5, 2$ мм; 2) подача $S = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ мм/об.

Дані експериментів занесені до таблиць 1–4.

Таблиця 1

Дані експериментів для матеріалів деталі – сталь 30Х, інструменту – Р6М5

t , мм	1			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	690	770	820	850
t , мм	1,5			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	750	830	890	920
t , мм	2			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	790	880	930	970

Таблиця 2

Дані експериментів для матеріалів деталі – СЧ20, інструменту – ВК8

t , мм	1			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	590	650	700	730
t , мм	1,5			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	640	700	750	780
t , мм	2			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	670	750	790	830

Таблиця 3

Дані експериментів для матеріалів деталі – сталь 30Х, інструменту – ВК8

t , мм	1			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	710	790	840	880
t , мм	1,5			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	770	860	910	950
t , мм	2			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	810	900	960	1000

Таблиця 4

Дані експериментів для матеріалів деталі – СЧ20, інструменту – Р6М5

t , мм	1			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	610	670	710	740
t , мм	1,5			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	660	730	770	810
t , мм	2			
S , мм/об	0,2	0,4	0,6	0,8
T , °С	690	770	820	850

За результатами досліджень побудовано графіки залежностей температури на передній поверхні різця від величини подачі для глибини різання 1, 1,5, 2 мм. Графіки наведені на рисунках 2–5.

Діаграми на рисунках 2–5 демонструють залежність температури від подачі в процесі різання $T = f(S)$ для трьох глибин різання при обробці сталі та чавуну оптимальним інструментальним матеріалом Р6М5 та ВК8 відповідно. Видно, що зі збільшенням подачі температура у зоні різання збільшується у всіх випадках.

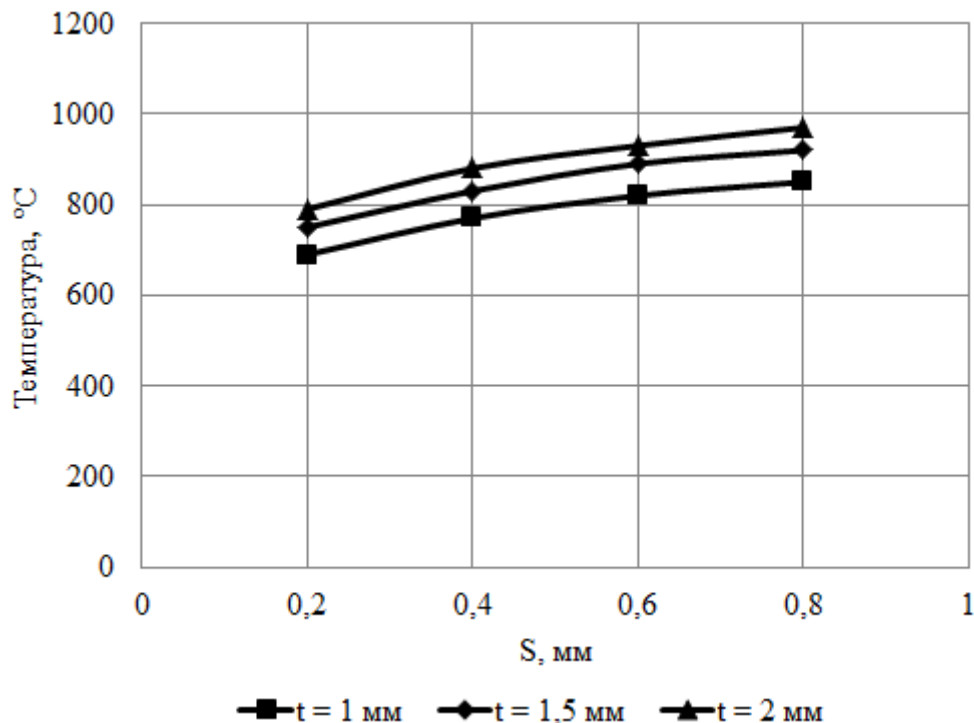


Рис. 2. Залежність температури від подачі для сталі 30Х, матеріалу інструменту Р6М5

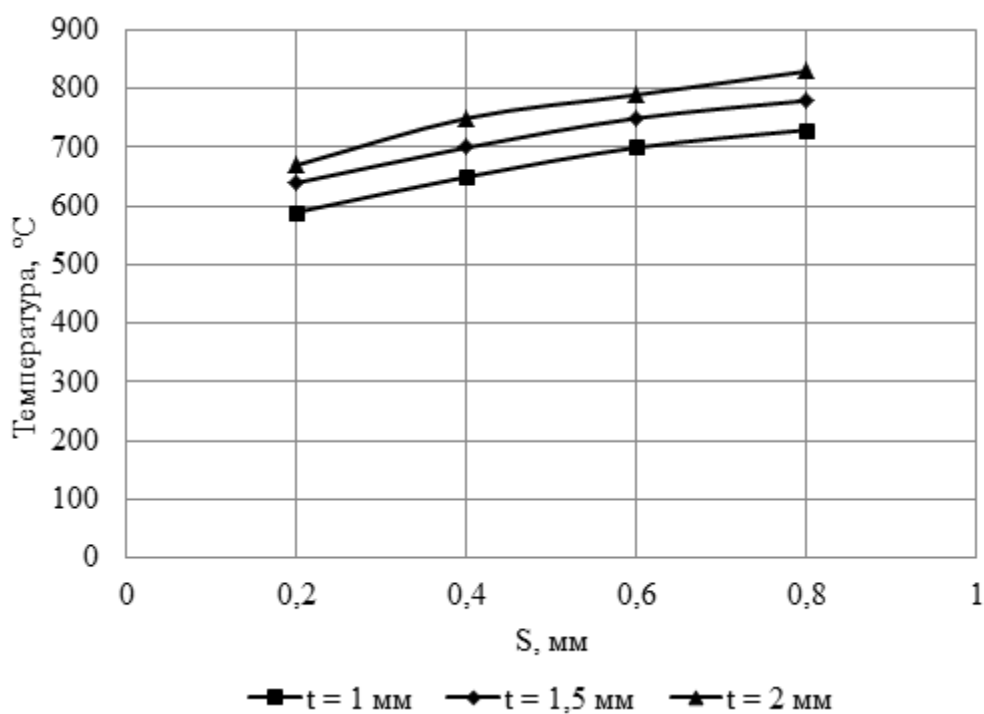


Рис. 3. Залежність температури від подачі для чавуну СЧ20, матеріал інструменту ВК8

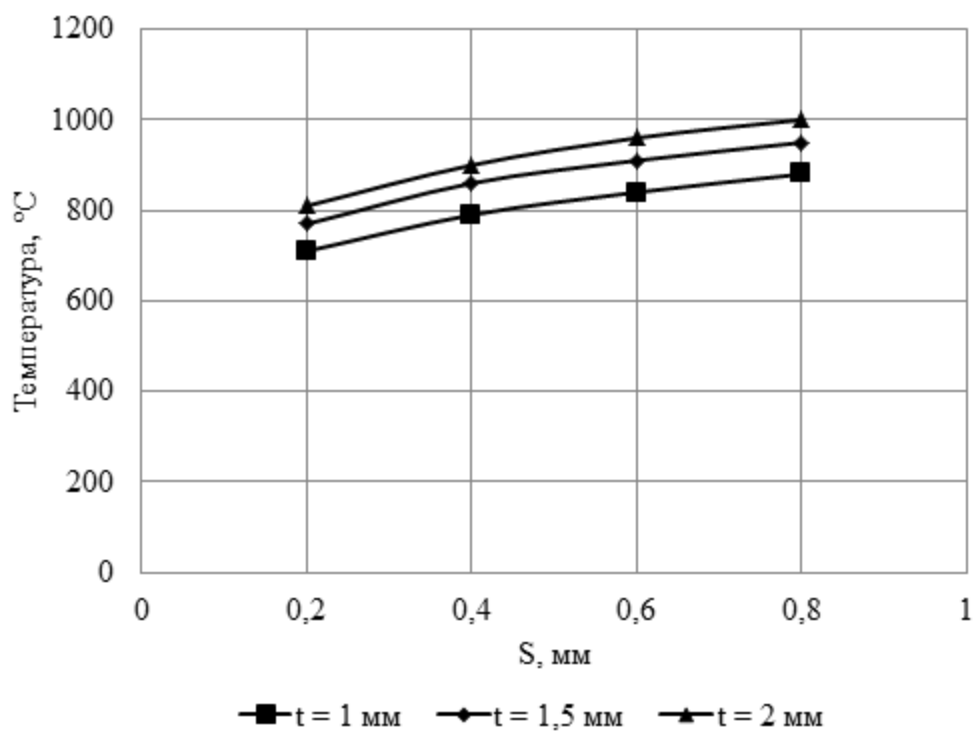


Рис. 4. Залежність температури від подачі для сталі 30X, матеріал інструменту ВК8

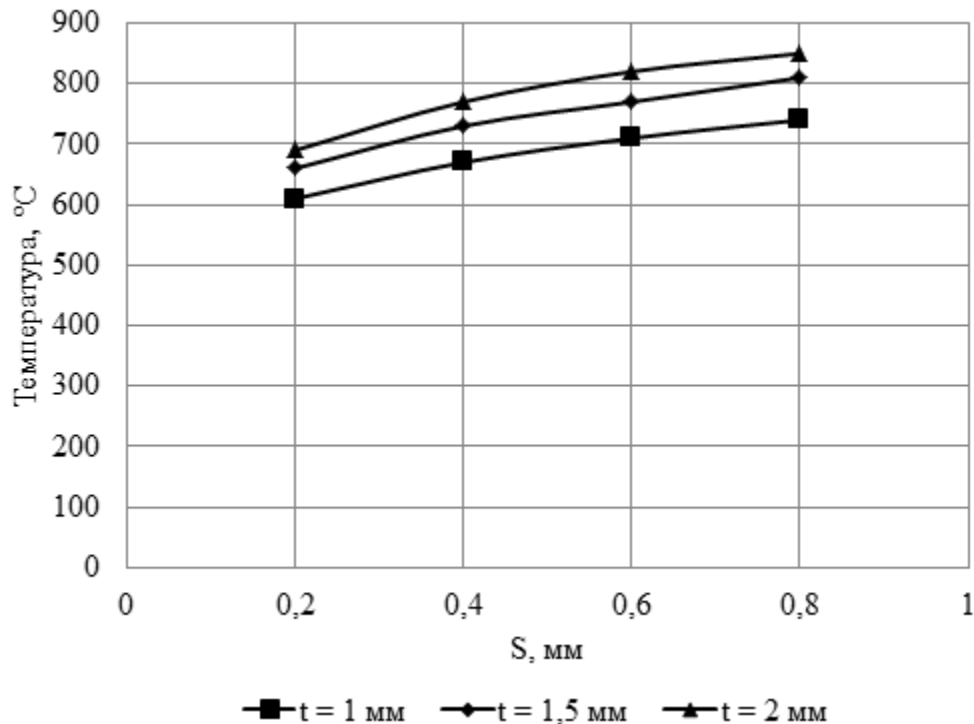


Рис. 5. Залежність температури від подачі для чавуну СЧ20, матеріал інструменту Р6М5

Аналогічні графіки $T = f(S)$, але для процесу обробки сталі і чавуну інструментальним матеріалом ВК8 і Р6М5 відповідно, показують також зростання температури. У цьому випадку інструментальний матеріал не є оптимальним для процесу різання і практично не застосовується для механічної обробки.

Проте, з графіків (див. рис. 4–5) видно, що температура в зоні різання підвищується на 20–40°C. Це може призвести до передчасного зношування інструменту, знизить його стійкість і ріжучі характеристики, що негативно позначиться на продуктивності обробки.

У разі обмежених можливостей підприємства, коли немає потрібного інструменту, можливе застосування неоптимального інструментального матеріалу. При цьому необхідно працювати з малими глибинами різання до 1 мм та на низькій подачі ($S = 0,2$ мм/об).

Проведені дослідження щодо зміни температури в зоні різання показали, що збільшення подачі та глибини різання призводить до зростання температури (див. рис. 2–5).

Висновки. В ході експерименту, виконуваного методами комп'ютерного моделювання, з використанням програми, в алгоритм якої покладено математичну модель, що з відповідними припущеннями моделює температурні явища при точінні металів, були проведені дослідження щодо зміни температури ріжучого інструменту на передній поверхні різця при обробці заготовок (сталь 30Х, чавун СЧ20) різцями з інструментальних матеріалів Р6М5, ВК8. При цьому було виявлено, що оптимальними матеріалами різця при обробці сталі 30Х є інструмент з матеріалу Р6М5, а для обробки чавуну СЧ20 краще використовувати інструмент з матеріалу ВК8. Адже при однакових параметрах різання (глибина різання, подача,

швидкість, геометрія інструменту) заготовки нагріваються менше, а отже інструмент буде втрачати свої різальні якості повільніше і прослужить довше, при належній якості кінцевого продукту.

Також проведені дослідження щодо зміни температури в зоні різання показали, що при нестачі різців із оптимальних матеріалів в умовах обмежених можливостей підприємства, можливе застосування неоптимального інструментального матеріалу для механічної обробки сталей та чавунів з малими глибинами різання до 1 мм та на низькій подачі (0,2 мм/об). Це не призведе до передчасного зношування інструменту та не знизить його стійкість і ріжучі характеристики, на відміну від ситуації використання інструментів з неоптимального матеріалу, при більших глибинах різання й подачі (глибина різання більше за 1 мм, подача більша за 0,2 мм/об), температури в зоні різання стрімко підвищуються, збільшуючись на 20-40°C, що негативно впливає на продуктивність обробки й забезпечує передчасне спрацювання різального інструменту.

Отже, в процесі дослідження було сформульовано рекомендації щодо вибору оптимального різального інструменту при обробці металевих заготовок, що сприятимуть підвищенню показників якості й продуктивності роботи підприємств, що спеціалізуються на металообробці і виготовленні металевих деталей.

Перелік посилань

1. Мазур, М.П., Внуков, Ю.М., Грабченко, А.І., Доброскок, В.Л., Залога, В.О., Новосьолов, Ю.К., & Якубов, Ф.Я. (2020). *Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів]*. Новий Світ-2000.
2. Щербина, Є.Ю., Дербаба, В.А. & Козечко, В.А. (2022). Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки. *Збірник наукових праць НГУ*, 67, 77-95.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077>
3. Кравченко, Ю.Г., Дербаба, В.А. & Смагін, Д.В. (2020). Визначення і взаємозв'язок кутів зсуву і тертя при стружкоутворенні. *Збірник наукових праць НГУ*, 61, 193-201.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.193>
4. Алтухов, В.М., & Руднєв, Є.С. (2022). Дослідження теплових явищ при різанні важкооброблюваних матеріалів в умовах точіння. *Наукові вісті Далівського університету*, 23.
<https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-8>
5. Артеменко, Ю.А., Любименко, О.М., & Штепа, О.А. (2020). Моделювання теплових процесів в технологічних системах з використанням методу джерел. *Наукові праці ДонНТУ*, 1(22), 27-29.
<https://doi.org/10.31474/2074-2630-2020-1-27-29>
6. Шишков, М.М. (2000). *Марочник сталей і сплавів: Довідник*. Донецьк.
7. Дербаба, В.А., Пацера, С.Т. & Григоренко, В.У. (2022). Особливості механічної обробки зносостійких чавунів. *Збірник наукових праць НГУ*, 71, 217-230.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217>
8. Ступницький, В.В., & Долиняк, Я.В. (2016). Аналіз результатів імітаційного моделювання щодо впливу температурних чинників на стан поверхонь у процесі їх формоутворення. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*, 50, 108-117.
9. Петраков, Ю.В., & Драчев, О.І. (2011). *Моделирование процессов резания: учебное пособие*. ТНТ.

ABSTRACT

Purpose. Research of temperature phenomena in the cutting zone of steel and cast iron blanks in the conditions of industrial production by methods of computer modeling of non-stationary processes of heat exchange during mechanical processing and the search for the optimal material for a cutting tool.

The methods. Research methods were based on the basics of the theory of cutting and cutting tools, the theory of heat conduction in relation to the contact surfaces of the cutting tool and the workpiece in the cutting zone. Use of an application program for modeling thermal phenomena during mechanical processing of metals and alloys. Determination of optimal cutting modes taking into account temperature changes.

Findings. A computer experiment confirmed that the optimal cutter materials when processing 30X steel is a tool made of P6M5 material, and it is better to use a tool made of VK8 material for processing ChCh20 cast iron. With the same cutting parameters (cutting depth, feed, cutting speed, tool geometry), the contact surfaces heat up less, and therefore the tool will lose its cutting qualities more slowly and will last longer, with the proper quality of the final product. If there is a lack of cutters made of optimal materials in the conditions of limited capabilities of the enterprise, it is possible to use a non-optimal tool material for mechanical processing of steels and cast irons with small cutting depths of up to 1 mm and at low feed - 0.2 mm/rev. At greater depths of cutting and feeding ($t > 1$ mm, $S > 0.2$ mm/rev), temperatures in the cutting zone rise rapidly, increasing by 20-40°C, which negatively affects the processing process and reduces the stability of the cutting tool.

The originality. Optimum modes of cutting and brands of materials of parts and workpieces, which will ensure high quality of processing, have been established. Research of thermal processes of the tool-workpiece system with determination of the temperature at any point on the contact surfaces.

Practical implementation. Using the application program allows you to determine the temperature of the appropriate point of the cutting wedge, simulate the distribution of the thermal field for different cutting modes (cutting depth, feed, cutting speed, tool geometry) and set their optimal values, taking into account the material of the cutter and the workpiece. This will significantly speed up the preparation of the technological process of mechanical processing, ensure the required quality and minimize costs.

Keywords: *cutting theory, cutting tool, cutting zone temperature, thermal balance, optimal cutting modes.*