Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

В. С. Антонюк
С. Ан. Клименко
С. А. Клименко

Теплові явища при обробці матеріалів різанням

Навчальний посібник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
вищих технічних навчальних закладів

Київ
НТУУ «КПІ»
2014

УДК 621.91.016(075.8)
ББК 34.63я73
А72

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(Лист № 1/11-11470 від 22.07.2014 р.)

Рецензенти:
В. А. Пасічник, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

О. Г. Татьянченко, д-р техн. наук, проф.,
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»

А. В. Усов, д-р техн. наук, проф.,
лауреат Державної премії України,
Одеський національний політехнічний університет

Відповідальний редактор
М. В. Філіппова, канд. техн. наук, доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Антонюк В. С.

А72 Теплові явища при обробці матеріалів різанням : навч. посіб. / В. С. Антонюк, С. Ан. Клименко, С. А. Клименко. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 156 с. – Бібліогр. : с. 149–155. – 300 пр.

ISBN 978-966-622-655-9

Систематизовано і викладено теплові явища, які супроводжують процес різання матеріалів. Наведено основні методи реєстрації, моделювання та аналітичного розрахунку теплофізичних процесів під час різання матеріалів. Проаналізовано основні методи зниження температури різання, розглянуто вплив зносостійких покриттів та мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ на теплові явища. Подано приклади розрахунку та завдання для самостійної роботи студентів.

Для студентів, магістрів та аспірантів технологічних спеціальностей вищих навчальних закладів освіти України, які вивчають застосування методів обробки матеріалів різанням в інженерно-технологічних задачах, а також для фахівців у машинобудівній галузі.

УДК 621.91.016(075.8)
ББК 34.63я73

ISBN 978-966-622-655-9

© В. С. Антонюк, С. Ан. Клименко,
С. А. Клименко, 2014
© НТУУ «КПІ» (ПБФ), 2014

Навчальне видання

Антонюк Віктор Степанович
Клименко Сергій Анатолійович
Клименко Сергій Анатолійович

Теплові явища при обробці матеріалів різанням

Навчальний посібник

В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника

Темплан 2014 р., поз. 1-2-032

Підп. до друку 14.11.2014. Формат 60×84 1/16. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 9,07. Обл.-вид. арк. 15,08. Зам. № 14-218. Наклад 300 пр.

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.
03056, м. Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15
тел. (044) 406-81-78

ЗМІСТ

	Передмова……..	5
Розділ 1	**Теплові явища в процесі різання матеріалів** ……..……	7
1.1	Теплові явища, що виникають в процесі різання матеріалів…..	8
1.2	Схема розподілу температури в системі «стружка-різець»…….	16
1.3	Основний закон теплопровідності……..….	20
1.4	*Контрольні питання*…….	27
	Розділ ІІ. Моделювання теплофізичних процесів та методи вимірювання їх параметрів при різанні матеріалів ……..	28
2.1	Методи вимірювання температури в процесі різання металів….	28
2.2	Контактні методи вимірювання температури різання……..	30
2.3	Безконтактні методи вимірювання температури різання……..	39
2.4	Аналітичні методи оцінки температури різання……	48
2.4.1	Метод Фур’є (метод розділення змінних)……...	49
2.4.2	Метод функцій Гріна…….	56
2.4.3	Метод інтегральних перетворень…….	59
2.5	Чисельні методи оцінки температури різання……	67
2.5.1	Метод скінчених елементів……...	67
2.5.2	Метод скінчених різниць……..	74
	Контрольні питання……..	83
	Розділ ІІІ. Особливості високотемпературних процесів при різанні матеріалів…….….	84
3.1	Вплив умов обробки інструментами із ПНТМ на температуру різання…….....	84
3.2	Високотемпературні явища при обробці матеріалів різанням.….	91
3.3	Аналітична оцінка температури в контактній зоні….....	96
3.4	Теплові явища при обробці композиційних матеріалів різанням.	101
3.4.1	Особливості розподілу тепла при обробці композитів з	

металевою матрицею……..... 102
3.4.2 Температура при різанні композитів на полімерній основі…….. 107
Контрольні питання…….. 112
Розділ IV. Шляхи зниження температури різання при лезовій обробці… 113
4.1 Вплив факторів процесу обробки на температуру різання…… 113
4.2 Спеціальні конструкції різальних інструментів…….. 118
4.3 Застосування зносостійких покриттів…….. 122
4.4 Мастильно-охолоджуючі технологічні середовища……... 130
Контрольні питання…….. 139
Розділ V. Алгоритм і приклад розрахунку температури різання..... 140
5.1 Послідовність розрахунку температури різання..... 140
5.2 Завдання на самостійну роботу..... 142
Предметний покажчик..... 143
Глосарій..... 145
Список літератури..... 149
Додаток..... 156

ПЕРЕДМОВА

Основне завдання вітчизняного машино- та приладобудування – на базі новітніх досягнень науки і техніки, сучасних технологій випускати високоякісні прилади, машини та знаряддя виробництва, що відповідають вимогам і рівню світових стандартів. При цьому більшість деталей сучасних приладів та машин отримують методами механічної обробки, що стимулює розвиток металообробних галузей промисловості шляхом вдосконалення технологій оброблення та створення нових інструментальних матеріалів.

Удосконалення технологічних процесів в металообробній галузі потребує вивчення теплових явищ, що виникають в процесі механічної обробки матеріалів. Підвищення міцності, твердості і деяких інших властивостей конструкційних матеріалів, характерних для деталей сучасних приладів та машин, інтенсифікація режимів обробки, приводить до того, що температура різання є одним із факторів, що обмежує продуктивність операцій і суттєво впливає на точність і якість виробів. В зв'язку з цим виникає необхідність керування тепловими процесами при механічній обробці. Таке керування особливо необхідне в масовому автоматизованому виробництві з метою підтримання стабільності технологічного процесу і забезпечення заданої точності та якості виготовлених деталей.

Сучасні інструментальні матеріали, до яких відносяться полікристалічні надтверді матеріали (ПНТМ) на основі нітриду бору, можуть оброблювати сталі твердістю до 60…65 HRC при швидкості різання до 3 м/с. При таких швидкостях різання виникають високі середні температури, які істотно впливають на стійкість різального інструмента, якість отриманої поверхні та працездатність вузлів верстата. Тому керування тепловим станом в зоні різання є одним з резервів підвищення якості обробленої поверхні та продуктивності обробки матеріалів різанням.

Задача керування температурою є досить складною, оскільки фізичні і фізико–хімічні процеси що протікають в зоні різання взаємопов'язані та

взаємозумовлені, які ускладнює інтерпретацію природних експериментів, їх теоретичне тлумачення. Тому важливо враховувати фактори, що впливають на тепловиділення, поширення теплоти та розподіл температури при різанні в інструменті, стружці та на поверхнях обробленої деталі. Проведення такого аналізу вимагає знання фізичних основ теплообміну, методів аналітичного та експериментального дослідження теплових явищ, а також умінь виконувати розрахунки оптимальних теплових умов процесу різання матеріалів. Опис основних закономірностей теплопередачі і розробка на їх основі рекомендацій з керування тепловими явищами в процесі різання і складають основу теплофізики механічної обробки матеріалів.

Тому, в навчальному посібнику, в першій його частині (розділи 1-2) послідовно та лаконічно викладаються теоретичні основи теплопередачі при обробці матеріалів різанням, загальні дані про теплові явища, які виникають в процесі металообробки, приведено тепловий баланс при різанні та схеми розподілу температури в системі «стружка-різець», дана постановка крайових задач теплопередачі, аналітичні та чисельні методи їх розв’язку, а також методи експериментального визначення та аналітичного розрахунку температур різання та розподілу температурних полів.

В другій його частині (розділи 3-5) розглядаються питання застосування викладених вище методів теорії теплопередачі для розрахунку процесів обробки матеріалів різанням: описується сутність високотемпературних процесів при різанні матеріалів, при обробці інструментами із ПНТМ, приводяться моделі та розрахунки теплофізичних процесів при різанні металевих, композиційних та полімерних матеріалів, а також показані шляхи зниження температури різання при лезовій обробці конструкційних матеріалів та методи управління тепловим станом в зоні різання.

Посібник написано для студентів приладо- та машинобудівних факультетів технічних університетів. Він також буде цікавий широкому колу читачів різного профілю, включаючи магістрантів та аспірантів, а також наукових

співробітників, які спеціалізуються в галузі машинобудування, металорізальних верстатів та інструментів.

Розділ 1. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА В ПРОЦЕСІ РІЗАННЯ МАТЕРІАЛІВ

У процесі різання конструкційних матеріалів майже 80 % роботи витрачається на пластичне та пружне деформування шару, що зрізається і шару, який прилягає до обробленої поверхні і поверхні різання, і близько 20 % роботи – на подолання тертя по передній і задній поверхнях різця. Основна робота різання перетворюється на теплову енергію, кількість якої (в зоні різання) істотно впливає на зношення і стійкість різального інструмента та шорсткість обробленої поверхні. Встановлено [1], що понад 70 % цієї теплоти виноситься стружкою, 15…20 % поглинається інструментом, 5…10 % – деталлю і близько 1 % випромінюється в навколишній простір.

Температура в зоні різання залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалу, режимів різання, геометричних параметрів різального інструмента і застосовування мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС).

Зі збільшенням міцності і твердості оброблюваного матеріалу температура в зоні різання підвищується і при важких умовах роботи її середнє значення може досягти 1000...1100 °С.

Використання надтвердих матеріалів, які мають більш високу теплопровідність в порівнянні із твердосплавними інструментами, дає змогу зменшити температуру контакту різального леза із оброблюваною деталлю, виключаючи появу значних температурних напружень в поверхневому шарі оброблюваної деталі.

При збільшенні подачі температура в зоні різання підвищується, але менш інтенсивно, ніж при збільшенні швидкості різання. Глибина різання найменше (у порівнянні зі швидкістю і подачею) впливає на температуру в зоні різання. Зі збільшенням головного заднього кута α і головного кута в плані φ температура

в зоні різання зростає, а зі збільшенням радіуса r заокруглення різця – зменшується.

Вивчення фізичної сутності теплових явищ процесу різання має велике практичне значення, так як дає можливість керувати процесом обробки деталей, забезпечуючи задану якість поверхонь і максимальну продуктивність.

1.1. Теплові явища, що виникають в процесі різання матеріалів

Теплові явища в процесі різання відіграють дуже важливу роль, вони визначають температуру в зоні різання, яка впливає на характер утворення стружки, наросту, усадки стружки, величину складових сил різання, стан поверхневого шару обробленої деталі. Істотно впливає температура різання $\theta_{\text{різ}}$ на інтенсивність зношування інструмента та його стійкість [1].

Теплота Q в процесі різання утворюється в результаті:

- внутрішнього тертя між частинками оброблюваного матеріалу в процесі деформації $Q_{\text{деф}}$;
- зовнішнього тертя стружки по передній поверхні різця $Q_{\text{п.т.}}$;
- зовнішнього тертя поверхні різання і обробленої поверхні по задній поверхні різця $Q_{\text{з.т.}}$;
- відриву стружки, диспергуванні матеріалу, що обробляється $Q_{\text{дисп}}$.

Теплота $Q_{\text{деф}}$ є результатом силового впливу леза різця, при якому матеріал зрізаного шару у зоні стружкоутворення піддається пластичній деформації і руйнуванню, характерним для металів, що утворюють зливну стружку, стружку сколювання, або стружка надлому, яка утворюється при крихкому руйнуванні.

Область генерування цієї теплоти охоплює зону найбільших пластичних деформацій – зону в якій утворюється стружка, а в найбільш спрощеному варіанті – у площині зсуву.

Зрізана стружка ковзає по передній поверхні леза різця зі швидкістю:

$$v_{\text{F}} = \frac{v}{\xi},$$

де v – швидкість різання, м/хв; ζ – усадка стружки.

Остання визначає механічну роботу сили тертя, розподілену по контактній площадці на передній поверхні інструмента, яка визначається як:

$$A_{\text{тр.п}} = P_{\text{т.п}} v_F t ,$$

де $P_{\text{т.п}}$ – сила тертя по передній поверхні, Н; v_F – швидкість стружки по передній поверхні леза різця, м/хв.; t – час здійснення процесу різання, хв.

Саме робота сил тертя на передній поверхні різця є джерелом тепла $Q_{\text{п.т.}}$ Область генерування цієї теплоти – зона контактування стружки і передньої поверхні інструмента.

Задня поверхня різця в процесі різання ковзає по поверхні різання зі швидкістю v, долаючи силу тертя $P_{\text{т.з}}$.

Робота сил тертя на задній поверхні інструмента:

$$A_{\text{т.з}} = P_{\text{т.з}} v\text{t} .$$

де $P_{\text{т.п}}$ – сила тертя по задній поверхні, Н; v – швидкість різання, м/хв.; t – час здійснення процесу різання, хв.

Ця робота сил тертя і є джерелом тепла – $Q_{\text{з.т}}$.

Виділення тепла при знятті стружки пояснюється тим, що механічна робота, витрачена на процес зрізання стружки перетворюється в тепло.

Цю роботу можна представити як суму:

$$A = A_{\text{деф.}} + A_{\text{т.п.п.}} + A_{\text{т.з.п}} \qquad (1.1)$$

де $A_{\text{деф.}}$, $A_{\text{т.п.п.}}$, $A_{\text{т.з.п}}$ – робота, яка витрачається відповідно на пружну і пластичну деформації зрізаного шару, на подолання сил тертя на передній і задній поверхнях.

Робота різання:

$$A = P_{z.} L \text{ , Дж} \qquad (1.2)$$

де P_z – сила різання, що діє в напрямку швидкості різання, Н; L – шлях, пройдений різальним інструментом, м.

На долю частин загальної роботи різання припадає приблизно:

$$A_{\text{деф}} = 55\ \%;\ A_{\text{т.п.п}} = 35\ \%;\ A_{\text{т.з.п}} = 10\ \%.$$

Якщо візьмемо шлях, пройдений інструментом за одну хвилину, то отримуємо хвилинну роботу:

$$A = P_z v = P_s v_s + F v_F + F_1 v_{F_1},\ \text{Дж} \qquad (1.3)$$

де v – швидкість різання, м/хв.; P_s – сила зсуву, або сила, що діє в площині зсуву, Н; v_s – швидкість зсуву, м/хв.; F – сила тертя по передній поверхні різального інструмента, Н; v_F – швидкість стружки по передній поверхні леза різця, м/хв.; F_1 – сила тертя по задній поверхні різального інструмента, Н; $v_{F_1} = v$ – швидкість руху обробленої поверхні відносно задньої поверхні інструмента, м/хв.

Практично в теплоту переходить вся робота різання (понад 90 %). Отже, кількість тепла, що виділяється при різанні, становить:

$$Q \approx A = P_z v,\ \text{Дж} \qquad (1.4)$$

Оскільки утворене тепло пропорційно виконаній роботі, кількість тепла залежить від виду і механічних властивостей матеріалу оброблюваної деталі, геометричних параметрів інструмента і режимів різання.

Утворена при різанні теплота поширюється від точок з вищою температурою до менш нагрітих точок [2, 3].

Вона головним чином виділяється внаслідок роботи, витраченої на пластичну деформацію, і в основному видаляється зі стружкою, а також частково залишається в деталі та інструменті.

Схема теплових потоків при різанні показана на рисунку 1.1.

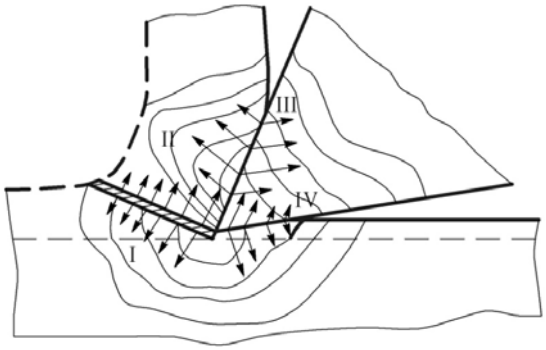


Рис. 1.1. Схема утворення і поширення тепла в зоні різання

Теплота від тертя по передній *III* і задній *IV* поверхням інструмента переходить відповідно в передню і задню його поверхні, в стружку *II* і деталь *I*. Незначна її частина переходить в навколишнє середовище. На розподіл тепла між стружкою, деталлю й інструментом головним чином впливають механічні і теплофізичні властивості матеріалу деталі і швидкість різання.

Найбільша кількість тепла переходить в стружку (для сталі 60…80 % від загальної кількості тепла) [4].

Зі збільшенням швидкості різання частка тепла, що переходить в стружку, збільшується, а її середня температура зростає.

З таблиці 1.1 видно, що розподіл тепла між стружкою, деталлю і різцем залежить від коефіцієнта теплопровідності λ оброблюваного матеріалу.

Таблиця 1.1 Загальна кількість тепла, середня температура стружки и розподіл тепла між стружкою, деталлю і інструментом при точінні (t = 1,5 мм; S = 0,12 мм/об; v = 100 м/хв.)

Матеріал деталі	λ, Вт/(м·К)	Загальна кількість тепла, кДж/хв.	Середня температура стружки, °С	Кількість тепла, %		
				в стружці	в деталі	в різці
Сталь 40Х	33,9	52	420	71	26	1,9
Чавун	39,8	52	290	42	50	1,5
Алюміній	209	36	140	21	73	2,2

Як видно з таблиці 1.2 збільшення швидкості різання призводить до зростання частки тепла, що відводиться в стружку [5]

Таблиця 1.2 Питома кількість тепла, що переходить в стружку в залежності від швидкості різання при обробці сталі 40Х (t = 1,5 мм; S = 0,126 мм/об)

v, м/хв.	10,2	20,4	50,1	240	390
q, кДж/хв.	0,8	1,1	1,3	2,4	2,7

Знаючи кількість теплоти, яка виділяється в процесі різання та поширюваної між стружкою, оброблюваною деталлю й інструментом, можна визначити тепловий баланс при різанні.

Тепловий баланс при різанні:

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{т.п.п.}} + Q_{\text{т.п.з.}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{ін}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{н.с}} \qquad (1.3)$$

де $Q_{\text{с}}$,, $Q_{\text{ін}}$,, $Q_{\text{д}}$,, $Q_{\text{н.с}}$ – відповідно теплота, що переходить в стружку, інструмент, деталь і навколишнє середовище.

Експерименти показують [6], що при обробці з невеликою швидкістю різання (до 30…40 м/хв.) відносна частка теплоти складає:

$$Q_{\text{с}} \approx 60\text{–}70\ \%;\ Q_{\text{ін}} \approx 3\ \%;\ Q_{\text{д}} \approx 30\text{–}40\ \%;\ Q_{\text{н.с}} \approx 1\text{–}2\ \%.$$

Встановлено, що чим нижча теплопровідність деталі, тим більше теплоти переходить в інструмент. У міру збільшення швидкості різання значно зростає відносна кількість теплоти, що переходить в стружку.

Встановлено [7], що при швидкостях різання v = 400…500 м/хв., тепло розподіляється так:

$$Q_{\text{с}} \approx 97\text{–}98\ \%, \text{ а } Q_{\text{ін}} \approx 1\%.$$

Кількість тепла, яке переходить в інструмент, незначна при різанні будь-яких матеріалів при будь-яких режимах обробки й становить набагато менше кількості тепла, що переходить в стружку і деталь. При обробці крихких матеріалів спостерігається значне зменшення кількості тепла, що відводиться інструментом. Даний ефект пов'язаний з елементним видом стружки, при утворенні якої відсутній постійний контакт між стружкою і передньою поверхнею інструмента.

При збільшенні швидкості різання кількість тепла, що переходить в стружку, зростає, а в деталь і інструмент – зменшується. Зменшення долі тепла, що переходить у деталь при збільшенні швидкості різання, викликане зміною співвідношення між швидкістю різання і швидкістю розподілу тепла із зони деформації. Якщо швидкості різання малі, то тепло від умовної площини зсуву безперешкодно переходить в деталь.

У міру збільшення швидкості різання клин інструмента все швидше перетинає тепловий потік, внаслідок чого в деталь переходить менша кількість тепла, а все більша кількість тепла залишається в стружці. Зменшення частки тепла, що переходить в інструмент, при збільшенні швидкості різання пов'язане також зі зменшенням ширини площадки контакту на передній поверхні.

На кількість тепла в стружці і її середню температуру суттєво впливають глибина різання та подача. За даними [8] при збільшенні глибини різання і подачі питома кількість тепла в стружці зменшується, що супроводжується зменшенням середньої температури стружки.

У процесі різання при збільшенні швидкості різання середня температура стружки спочатку інтенсивно зростає, а потім після досягнення певного значення, зростання температури практично припиняється, і вона не залежить від подальшого збільшення швидкості. При цьому середня температура стружки наближається до деякої межі, величина якої визначається механічними властивостями оброблюваного матеріалу, геометричними параметрами інструмента, глибиною різання і подачею.

При високошвидкісному різанні має місце інша картина. Дослідженнями німецького інженера К. Золомона показано, що залежність $T = f(v)$ при зростанні швидкості різання має максимум, тобто температура різання, досягаючи деякої максимальної величини, з подальшим підвищенням швидкості різання, знижується [9].

У роботі [10] теоретично доведено, що такий ефект можливий за умови, коли з підвищенням швидкості різання в діапазоні високих її значень істотно зменшується коефіцієнт тертя, що обумовлює зростання кута зсуву до величини, після якої градієнт зростання температури різання із зростанням швидкості різання сповільнюється, а при подальшому зростанні його, аж до 45°, буде зменшуватись. Даний ефект необхідно враховувати в сучасних технологіях високошвидкісного різання.

Незважаючи на те, що частка тепла, яка переходить в інструмент, відносно мала, середня температура θ на передній поверхні інструмента (рис. 1.2) в кілька разів перевершує середню температуру стружки [6].

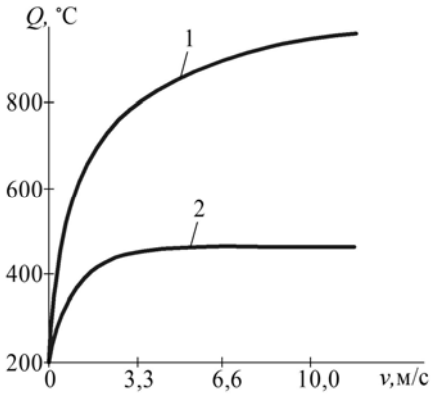


Рис. 1.2. Вплив швидкості різання v на температуру різання (1) і середню температуру стружки (2)

Оскільки температура контакту на передній поверхні приблизно дорівнює температурі контактної поверхні стружки, то це свідчить про те, що температура різних шарів стружки по її товщині неоднакова, зменшуючись по мірі наближення до вільної сторони стружки.

При обробці пластичних матеріалів стружка біля передньої поверхні інструмента нагрівається більше, ніж зовнішня її сторона.

Нерівномірність нагрівання стружки по її перерізу відносно велика. Концентрація тепла в прирізцевих областях стружки і їх високотемпературне нагрівання в умовах високих тисків при різанні є причиною того, що тонкі шари оброблюваного металу можуть знаходитись в стані оплавлення, утворюючи рідкий шар.

У прирізцевому шарі максимальна температура виникає на відстані (0,4…0,5)l (l – довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента).

При v = 10 м/хв. максимальна температура θ_{max} на передній поверхні інструмента із твердого сплаву приблизно становить 540 °С, а на відстані 0,2 мм в глиб передньої поверхні ~ 450 °С; при v = 200 м/хв. – відповідно 1265 °С і 400 °С.

При обробці матеріалів низької теплопровідності, таких як титановий сплав ВТ2, в різець переходить значно більше тепла, ніж при точінні звичайних конструкційних матеріалів [1].

Необхідно відзначити, що температура різання в різних точках зони різання відмінна за величиною. Окремі точки поверхонь інструмента і стружки мають

неоднакову температуру. Крім того, в кожній даній точці температура може змінюватися з плином часу.

Найбільш висока температура спостерігається в центрі тиску стружки на різець і на плямі контакту різального леза. Остання може досягати значних величин, наприклад, як наведено в роботі [11], при обробці алюмінієвого сплаву інструментом з полікристалічного алмазу вона може досягати 800 °С, титанового сплаву – 2000 °С.

Тобто температура на плямі спалаху може перевищувати температуру плавлення оброблюваного матеріалу.

Розподіл температур у всіх точках ділянки матеріалу в даний момент часу прийнято називати температурним полем.

Його рівняння в загальному представлені має вигляд:

$$\theta = f(x, y, z, \tau) , \qquad (1.6)$$

де x, y, z – координати досліджуваної точки; τ – термін дії джерела тепла.

Якщо процес різання здійснюється з постійним режимом, температура різних точок зони різання зростає, лише в перший момент, а потім температуру кожної точки можна вважати приблизно незмінною.

Такий температурний режим називається стаціонарним і для нього рівняння температурного поля має вигляд:

$$\theta = f(x, y, z) \qquad (1.7)$$

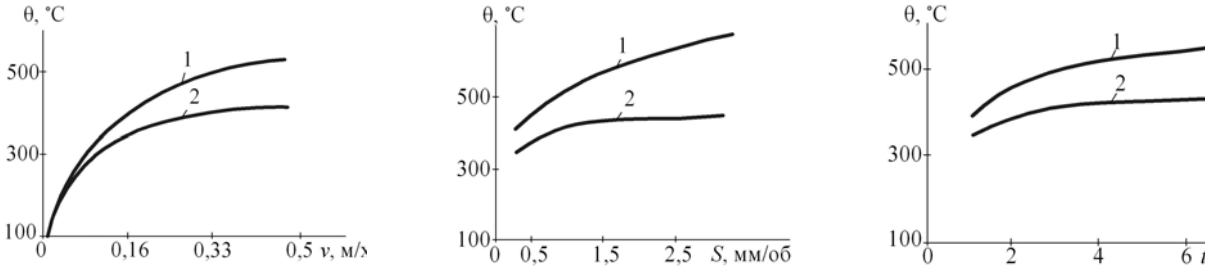
Рішення задачі температурного поля в зоні різання теоретичним шляхом на основі теорії теплопередачі є досить складним.

В результаті, для визначення теплових явищ, що виникають в процесі різання матеріалів, отримують надзвичайно громіздкі та складні рівняння, що включають в себе коефіцієнти, які залежать від фізичних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів і оточуючого середовища.

1.2. Схема розподілу температури в системі «стружка-різець»

Для правильного розуміння питань, пов'язаних з тепловим балансом при різанні металів, поряд з температурою різання, необхідно також знати температуру стружки і співвідношення даних температур. Автори робіт [8, 12], користуючись калориметричним методом, одночасно з температурою різання, також заміряли середню температуру стружки. На рисунку 1.3 представлені результати експериментальних досліджень при обробці швидкорізальним інструментом хромонікелевої сталі (R_m = 770 МПа) та чавуну.

При збільшенні швидкості, подачі і глибини різання середня температура стружки зростає, але дещо повільніше ніж температура на інструменті. Крім того, як видно з графіків, температура на різці (температура різання) вище середньої температури стружки.



а *б* *в*

Рис. 1.3. Залежність температури різання і середньої температури стружки для хромонікелевої сталі від: а) швидкості різання; б) подачі (v = 0,25 м/с; t = 4 мм); в) глибини різання (v = 0,25 м/с; S = 0,5 мм/об); 1 – на різці, 2 – на стружці

Відношення температури на вершині різця до середньої температури стружки коливається в межах:

– при обробці сталі – від 1,1 до 1,5

– при обробці чавуну – від 2,0 до 3,5.

Не дивлячись на те, що більша частина всієї теплоти, що виникає в процесі різання переходить в тіло стружки, її температура нижча ніж температура в зоні

контакту з інструментом. Якщо знехтувати теплотою, що утворюється при терті стружки по передній поверхні інструмента, то основним джерелом утворення теплоти є зона стружкоутворення, при цьому температура на різці може бути рівною або меншою середньої температури стружки.

Найвища температура в зоні різання, очевидно, має місце в площині контакту стружки з передньою поверхнею інструмента. Для визначення цієї температури необхідно знати характер розподілу температури в стружці, що обумовлюється розподілом деформацій в її об'ємі. На температуру, яка виникає в площині контакту стружки з передньою поверхнею інструмента, впливають з одного боку теплота, що виділяється стружкою, і з іншого боку теплота, утворена в результаті тертя стружки о передню поверхню інструмента і тертя задньої поверхні інструмента по поверхні оброблюваної деталі. При цьому переважаючий вплив на різницю між температурою різального інструмента і середньою температурою стружки має теплота тертя.

При обробці пластичних металів теплота переходить в інструмент з боку передньої поверхні, як безпосередньо від стружки, так і в результаті її тертя зі стружкою. Якщо знехтувати теплотою, яка виділяється внаслідок тертя стружки по передній поверхні і вважати, що теплота від деформації рівномірно розподіляється всередині стружки, то розподіл температури між стружкою і різцем відбувається за схемою розподілу температур в системі «стружка-різець», у випадку, коли тертя по передній поверхні відсутнє (Рис. 1.4.).

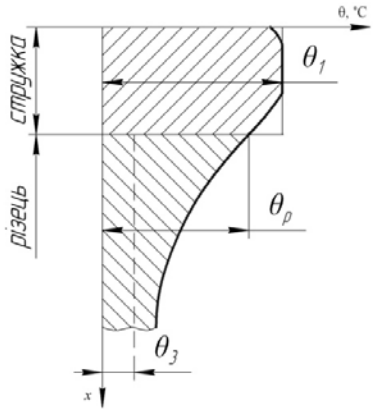


Рис. 1.4. Схема розподілу температури в системі «стружка-різець»: (θ_p – температура в площині дотику різця зі стружкою; θ_1 – температура стружки в момент підходу до передньої поверхні різця; θ_3 – початкова температура різця)

Джерелом теплоти є деформація, а теплоносієм – сама стружка. Стружка віддає тепло різцю тільки від шарів, що лежать в безпосередній близькості до площини контакту, і при цьому значна частина теплоти, одержуваної різцем, відводиться в тіло інструмента та в навколишнє

середовище. Як видно з наведеної схеми температура в площині контакту буде найвищою температурою для різця і найменшою для стружки. Таким чином, при цьому середня температура стружки виявиться більшою ніж температура різця. Вищенаведені міркування базуються на рівномірному розподілі теплоти деформації. Насправді ж температура в різних точках всередині стружки буде різною внаслідок нерівномірності розподілу деформацій. Очевидно, що температура в точках, розташованих на внутрішній поверхні стружки (прилеглої до передньої поверхні інструмента), буде більша, ніж на її зовнішній поверхні.

Дослідження показали [13, 14], що деформація металу на всьому перерізі стружки протікає неоднаково. Чим ближче до передньої поверхні різця, тим більшим деформаціям піддається метал і, навпаки, чим далі від цієї поверхні, тим менша деформація. Тому на внутрішній поверхні стружки буде виділено більше тепла, ніж на зовнішній поверхні.

У попередній схемі, з міркувань зручності, припущено, що тертя стружки о передню поверхню різця відсутня. Насправді ж при різанні сталі стружка ковзає по передній поверхні різця, в результаті чого також виникає тепло.

Очевидно, що наявність цієї теплоти внесе відповідні зміни в схему розподілу теплоти між стружкою і різцем. У випадку деформування стружки і виділення тепла внаслідок тертя по передній поверхні, схема розподілу теплоти між стружкою і різцем матиме вигляд представлений на рисунку 1.5.

Як видно з наведеної схеми, кількість теплоти, що відводиться різцем, буде меншою, ніж кількість теплоти виділеної при терті стружки. Внаслідок цього температура в шарі зіткнення стружки з передньою поверхнею різця буде підвищуватися і мати більшу величину, ніж середня температура стружки.

Таким чином, на температуру різання вирішальний вплив має теплота, що виникає в результаті тертя. При цьому перепад температури від поверхні розділу стружка-різець всередину стружки більш інтенсивний, ніж від цієї поверхні всередину різця.

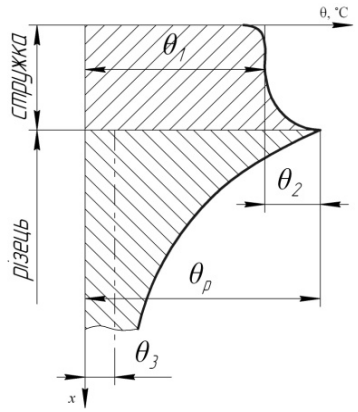


Рис. 1.5. Схема розподілу тепла в системі «стружка-різець» для випадку, коли деформується стружка і виділяється тепло внаслідок тертя по передній поверхні (θ_2 – підвищення температури внаслідок тертя)

Підвищення швидкості різання призводить до збільшення теплоти, яка виноситься стружкою, і зменшується частка її надходження в різець і деталь. При цьому зі збільшенням загальної кількості теплоти нагрівається не тільки стружка, а й підвищується температура різця.

Можна зробити висновок, що на температуру поверхні контакту стружки з передньою поверхнею інструмента значно більше впливають умови різання і оброблюваний матеріал, ніж теплопровідність матеріалу різця.

Показано [8, 12], що при однакових умовах обробки температура різання для чавуну в середньому в 1,4 рази нижче, ніж для сталі. Це пояснюється, по-перше, тим, що чавунна стружка деформується незначно, і тому виділення тепла від пластичної деформації у чавуну менше, ніж у сталі, а по-друге – при обробці чавуну обмежене ковзання стружки по передній поверхні різця.

Таким чином, як теплота від пластичної деформації, так і теплота від тертя по передній поверхні інструмента при різанні чавуну будуть меншими, ніж при різанні сталі.

Розподіл температур між стружкою і різцем при обробці чавуну відбувається за схемою, що зображена на рисунку 1.6.

Зі збільшенням швидкості різання середня температура стружки зростає значно повільніше, ніж температура на різці. Середня температура стружки залежить від швидкості різання настільки, наскільки від швидкості залежить зміна коефіцієнта різання і відсоток збереження теплоти в стружці.

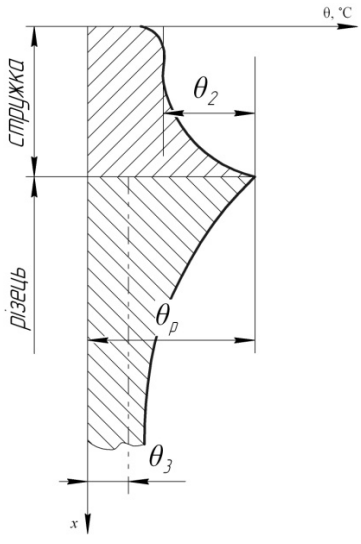


Рис. 1.6. Схема розподілу температури в системі «стружка-різець» при обробці чавуну

Збільшення відсотка збереження теплоти в стружці у зв'язку із збільшенням швидкості різання пояснюється тим, що теплота, яка виникає в процесі різання, поширюється в масу деталі зі швидкістю, що залежить від теплоємності і теплопровідності матеріалу. Різець, переміщуючись, перетинає цей тепловий потік, і чим більша швидкість переміщення різця, тим менше теплоти переходить зі стружки в оброблювану деталь. Якщо швидкість різання більша швидкості розповсюдження теплоти, то вся теплота переходить в стружку та інструмент.

Можна припустити, що середня температура стружки зростає значно повільніше швидкості різання. При дуже низьких швидкостях різання середня температура стружки залишається набагато нижчою деякого теоретичного максимуму, до якого вона наближається зі зростанням швидкості різання.

На підвищення ж температури різання впливає та обставина, що з ростом швидкості різання відповідно зростає температура стружки в місці контакту з передньою поверхнею інструмента, а також і те, що додається частина теплоти від тертя стружки по передній поверхні різця і теплота від тертя задньої поверхні інструмента по оброблюваному матеріалу.

1.3. Основний закон теплопровідності

Французький математик Жан Батист Жозеф Фур'є у 1882 році висловив гіпотезу про те, що кількість теплоти *dQ*, що проходить через елемент поверхні *dF* за час *d*τ (рис. 1.7), пропорційно *grad t*, тобто: де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

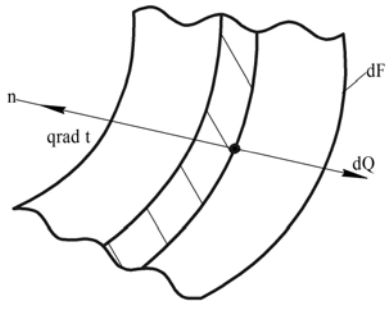


Рис. 1.7. Елементарна ізотермічна поверхня

Відношення:

$$dQ = -\lambda grad \cdot t \cdot \theta d \cdot Fd\tau \tag{1.8}$$

$$q = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau} \tag{1.9}$$

що представляє собою кількість теплоти, що проходить за одиницю часу, через одиницю площі ізотермічної поверхні є не що інше, як щільність потоку.

Підставляючи (1.8) в рівняння (1.9) отримаємо:

$$q = -\lambda \cdot gradt = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \tag{1.10}$$

де q – вектор щільності (інтенсивності) теплового потоку.

Залежність (1.10) є основним законом теплопровідності (закон Фур'є), який стверджує, що щільність теплового потоку пропорційна градієнту температури.

Коефіцієнт теплопровідності λ характеризує фізичні властивості матеріалу.

Його розмірність встановлюється з виразу:

$$\lambda = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau \cdot \left(-\frac{\partial t}{\partial n} \right)} \tag{1.11}$$

Таким чином, коефіцієнт теплопровідності λ – це теплота, передана за одиницю часу через одиницю поверхні при перепаді температури на одиницю довжини нормалі, рівному одному градусу, розмірність якої – Вт/(мК).

Диференційне рівняння теплопровідності. Математичний опис температурних полів в компонентах технологічних систем виконується за допомогою диференціального рівняння теплопровідності.

Виведемо це рівняння при наступних припущеннях [14]:

– тверде тіло однорідне і ізотропне;

– в процесі теплопередачі не відбуваються фазові перетворення;

– деформація, викликана зміною температури відносно мала в порівнянні з розмірами тіла.

Виділимо з нагрітого тіла елементарний об'єм $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ (рис. 1.8), де $\Delta x, \cdot \Delta y, \cdot \Delta z$, – відповідно, координати сторін елементарного тіла

На підставі закону зміни внутрішньої енергії:

$$dU = dQ_1 + dQ_2 \qquad (1.12)$$

де dU – загальна зміна внутрішньої енергії речовини в об'ємі ΔV за час $\Delta\tau$;
dQ_1 – кількість теплоти, що надходить в цей об'єм шляхом теплопровідності;
dQ_2 – кількість теплоти, що виникла в об'ємі ΔV у зв'язку з функціонуванням в ньому внутрішніх джерел.

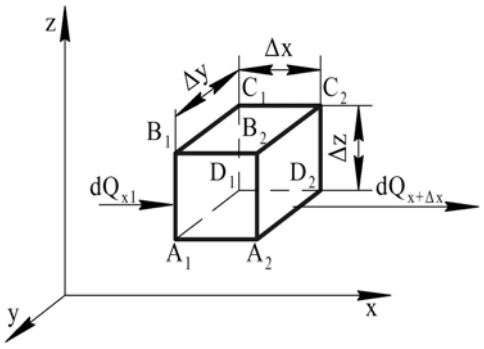


Рис. 1.8. Переміщення тепла в елементарному об'ємі

До внутрішніх відносяться джерела, тепловиділення яких пов'язані з процесами, що відбуваються в матеріалі твердого тіла, наприклад, з об'ємними хімічними реакціями, дією електричного впливу тощо.

Нехай за час $d\tau$ площадки $A_1B_1C_1D_1$ підведена теплота:

$$dQ_x = q_x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot d\tau,$$

де q_x – густина теплового потоку в напрямку осі OX.

Через протилежну площадку $A_2B_2C_2D_2$ за цей же час відводиться $dQ_x+\Delta x$ теплоти, причому:

$$dQ_x+\Delta x = q_x+\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot d\tau.$$

Різниця:

$$dQ_{1x} = dQ_x - dQ_x+\Delta_x = (q_x - q_{x+}\Delta_x) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot d\tau, \qquad (1.13)$$

є кількість теплоти, що надійшла в об'єм ΔV за рахунок теплопередачі в напрямку осі OX.

Функція $q_{x+}\Delta_x$ неперервна в інтервалі Δx, тому вона може бути розкладена в ряд Тейлора:

$$q_{x+\Delta x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x^2}{2} + \ldots \qquad (1.14)$$

Обмежимося першими двома членами ряду, оскільки решта містять малі величини високих порядків.

Тоді рівняння (1.14) матиме вигляд:

$$dQ_{1x} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot d\tau = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot \Delta V \cdot d\tau \qquad (1.15)$$

Аналогічні вирази можна одержати для визначення кількості теплоти, що надійшла в об’єм ΔV за напрямками OY і OZ.

Підсумовуючи величини dQ_{1x}, dQ_{1y}, dQ_{1z}, отримаємо:

$$dQ_1 = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \cdot \Delta V \cdot d\tau \qquad (1.16)$$

Визначимо величину dQ_2.

Якщо об'ємну щільність тепловиділення внутрішніх джерел позначити $q_в$, то за час $d\tau$ в об’ємі ΔV накопичиться теплота:

$$dQ_2 = q_в \cdot \Delta V \cdot d\tau \qquad (1.17)$$

Елементарні кількості теплоти dQ_1 і dQ_2, які викликають зміну температури речовини і величину dU можна знайти із рівняння:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot \Delta V} \cdot \frac{dU}{d\tau} \qquad (1.18)$$

де c – масова теплоємність, Дж/(кг·К), ρ – густина матеріалу, кг/м^3.

Підставляючи значення dQ_1, dQ_2, dU із рівнянь (1.15) – (1.18) в рівняння (1.12), отримаємо:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \frac{q_в}{c \cdot \rho} \qquad (1.19)$$

За законом Фур'є:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}; q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y}; q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z}$$

Тоді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_в}{c \cdot \rho} \qquad (1.20)$$

Оскільки коефіцієнт теплопровідності залежить від температури, то диференціальне рівняння теплопровідності має загальний вигляд (1.20).

Більш простого виду рівняння набуває після прийняття припущень, з яких найбільш часто застосовують:

1. Коефіцієнт теплопровідності не залежить від температури;

2. Щільність внутрішніх джерел тепла дорівнює 0, ($q_в = 0$):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \qquad (1.21)$$

де $\frac{\lambda}{c \cdot \rho} = a$ – коефіцієнт температуропровідності даного матеріалу.

Коефіцієнт температуропровідності характеризує теплову інерцію матеріалу. Чим вище коефіцієнт *a*, тим швидше матеріал прогрівається.

Таким чином, в найбільш простому вигляді диференціальне рівняння теплопровідності виглядає так:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t \qquad (1.22)$$

де ∇^2 – оператор Лапласа.

Вирази (1.21) і (1.22) є нелінійними диференціальними рівняннями в частинних похідних другого порядку.

Аналітичне рішення нелінійних диференціальних рівнянь надзвичайно складне і вони можуть бути вирішені тільки для найпростіших випадків теплообміну.

Набагато легше вирішувати лінійні диференціальні: сума кількох незалежних один від одного розв'язків лінійного диференціального рівняння також є рішенням такого рівняння.

Це дозволяє у випадках, коли на тіло діє декілька незалежних джерел їх вплив можна описати незалежними диференціальними рівняннями, вирішити їх,

а потім загальне рішення представити у вигляді суми частинних (принцип суперпозиції рішень).

Коефіцієнт теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності λ є фізичним параметром матеріалу, що характеризує його здатність проводити теплоту. Коефіцієнт теплопровідності чисельно дорівнює кількості теплоти, що проходить через одиницю ізотермічної поверхні в одиницю часу при температурному градієнті рівному одиниці.

Слід також відмітити, що коефіцієнт теплопровідності залежить від виду та структури речовини, температури та тиску. Часто його знаходять дослідним шляхом за допомогою різноманітних методів – визначаються значення теплового потоку та градієнта температури.

В зв'язку з тим, що коефіцієнт теплопровідності залежить від багатьох факторів, що ускладнює визначення його достовірної величини, доцільно визначати величину λ для кожного конкретного випадку, враховуючи всі змінні фактори.

При здійснені механічної обробки різальна крайка інструмента має різну температуру. Для багатьох інструментальних матеріалів коефіцієнт теплопровідності визначається за лінійною залежністю:

$$\lambda = \lambda_0[1 - b(\theta - \theta_0)] \qquad (1.23)$$

де λ_0 – значення коефіцієнта теплопровідності при температурі 0 °С;

b – постійна, яка визначається дослідним шляхом.

У таблиці 1.3 представлені значення коефіцієнтів теплопровідності деяких інструментальних та оброблюваних матеріалів.

Коефіцієнт теплопровідності оброблюваних металів лежить у межах 20–40 Вт/м·К. У більшості випадків при підвищенні температури коефіцієнт теплопровідності зменшується для чистих металів. Присутність домішок у металах знижує коефіцієнт теплопровідності і, на відміну від чистих металів, при підвищені температури коефіцієнт теплопровідності підвищується.

Таблиця 1.3 Фізико-механічні властивості інструментальних та оброблюваних матеріалів

Марки матеріалів	Θ, К	λ, Вт/м·К	R_m, МПа	HRA
Інструментальні матеріали				
ВК8	293	54,4	1666	87,5
Т15К6	293	12,5	1176	90
ВОК60	293	38	650	93
Ельбор Р	293	42…50	1000	80000 (HV)
Оброблювані матеріали				
Сталь 45	–	40,2	549	145 (HB)
Х18Н10Т	–	22,6	540	187
ЖС6-К	–	16,7	1000	–

Інструментальний композит представляє собою матеріал в структурі якого є робоча зв’язка та дефекти, наприклад, пори. На теплопровідність композитних матеріалів істотний вплив мають пори, оскільки теплопровідність газу, що їх заповнює нижча, ніж у твердих компонентів.

Процес теплопередачі, для композитних матеріалів, супроводжується перенесенням теплоти за допомогою випромінювання через пори між твердими складовими. Тому коефіцієнт теплопровідності для матеріалів утворених спіканням окремих зерен – величина умовна і називається еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності λ_0.

Він має зміст коефіцієнта теплопровідності деякого однорідного тіла, через яке, при однаковій формі, розмірах та температурному градієнті, проходить та ж кількість теплоти, що й через дане пористе тіло.

Чим нижчий коефіцієнт теплопровідності оброблюваного та інструментального матеріалу, тим менша потужність теплових потоків, направлених в заготовку та інструмент, в зв’язку з чим тепло локалізується в зоні різання, в області джерел її утворення. Тому процес різання матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності (жароміцні сталі, титан, полімерні матеріали) характеризується високими значеннями температур на контактних

поверхнях інструменту, що прискорює його зношування і руйнування і являється однією із причин низької продуктивності при обробці різанням деталей з таких матеріалів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Коротко опишіть основні джерела теплоутворення при механічній обробці матеріалів.

2. Як впливають властивості оброблюваного та інструментального матеріалів на температуру різання?

3. Яким чином розподіляється тепло в процесі різання металів?

4. Що головним чином впливає на розподіл тепла між стружкою, інструментом та деталлю?

5. Що таке тепловий баланс при різанні?

6. Чому при збільшені швидкості різання збільшується кількість тепла, що надходить в стружку?

7. Дати визначення терміну температурне поле різця та деталі, чим вони характеризуються?

8. Який температурний режим називається стаціонарним?

9. Що впливає на теплоємність стружки та її середню температуру?

10. Який характер зміни температури різання при високошвидкісному різанні, чому виникає такий ефект?

11. Сформулюйте основний закон теплопровідності.

12. Що таке коефіцієнт теплопровідності та приведіть формулу диференційного рівняння теплопровідності?

Розділ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ РІЗАННІ МАТЕРІАЛІВ

Теплові явища при механічній обробці матеріалів є складним фізичним процесом, тому для його вивчення використовують різноманітні методи, як експериментальні дослідження так і математичного моделювання [2, 3, 5, 8].

Вирішення цих задач потребує глибокого розуміння фізичних особливостей процесів теплопередачі, та вміння їх математичного опису. Цьому в значній мірі сприяє розвиток комп'ютерної техніки, чисельних методів моделювання та створення алгоритмів і пакетів прикладних програм для рішення відповідних задач.

Використання методів прямого вимірювання температури при різанні конструкційних матеріалів пов'язано з великими труднощами, а в деяких випадках є неможливим. Застосування спеціальних комп'ютерних програм і відповідного математичного апарату значно розширюють можливості визначення температури різання.

2.1. Методи вимірювання температури в процесі різання металів

Вимірювання температури, яка виникає на поверхні контакту різального інструмента зі стружкою і оброблюваним матеріалом представляє значний теоретичний інтерес і має велике практичне значення. Знаючи рівень температур на контактних поверхнях інструмента, можна встановити оптимальні умови його експлуатації, а також підвищити стійкість.

Для визначення стійкості інструмента важливим параметром є температура його тонких поверхневих шарів в місцях контакту його зі стружкою і оброблюваним матеріалом.

Існує велика кількість методів вимірювання температури в зоні різання, але всі вони мають як позитивні, так і негативні, сторони. Очевидно, що лише ті методи можуть давати достовірні результати, які забезпечують вимірювання

температури в контактній зоні, де розвивається максимальна температура. Експериментальне визначення цієї температури пов’язано з великими труднощами, зважаючи на неможливість безпосереднього підводу вимірювальної апаратури в зону різання. Вірогідно, саме цим пояснюється розбіжність даних отриманих різними дослідниками, а також те, що ні один із методів вимірювання температури різання не є загально визнаним.

Існуючі методи визначення температури різання можна розділити на три основні групи:

- аналітичні методи;
- непрямі методи вимірювання температури;
- методи безпосереднього вимірювання температури.

Аналітичні методи, які ґрунтуються на основі закону теплопровідності, з урахуванням механічних властивостей оброблюваного матеріалу та швидкості деформації в більшості випадків дають наближені результати, через надзвичайну складність процесу теплообміну при різанні металів При цьому досить важко математично описати процес без великої кількості допущень і спрощень.

Дещо більш точні результати з можливістю візуалізації процесу дають методи комп’ютерного моделювання [14, 15]. Відомі методи чисельного моделювання теплових процесів: метод скінченних різниць (FDM – Finite Difference Method), метод скінченних елементів (FEM – Finite Element Method), метод граничних елементів (BEM – Boundary Element Method).

Вони передбачають дискретизацію простору шляхом накладання сітки. Через проблеми зі спотворенням сітки за великих деформацій у цих методах розроблені і починають активно застосовуватися безсіткові методи (MFM – mesh-free methods): безсітковий метод згладжених часток (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics), безсітковий метод, заснований на підході Гальоркіна (EFG – Element Free Galerkin method) тощо.

Чисельні методи поєднує єдиний принцип: дискретизація області (поділ на окремі частини заздалегідь відомої форми), на якій виконується розв’язання

задачі, аналітичне розв'язання системи диференціальних рівнянь у кожній з цих областей, об'єднання цих розв’язків з урахуванням граничних умов у систему рівнянь, що містять невідомі переміщення і температури в характерних точках області (вузлах), розв'язання цієї системи рівнянь.

До непрямих методів вимірювання температури різання відносяться:

–метод використання легкоплавких матеріалів;

–метод термофарб;

– метод залишкового впливу температури на структуру матеріалу інструмента;

–калориметричний метод та ін.

Дані методи проведення досліджень все більше втрачають актуальність в зв’язку з розвитком методів безпосереднього вимірювання температури.

До безпосередніх методів вимірювання температури різання відносятся:

–метод штучної термопари;

–метод природної термопари;

–метод перерізуваних термопар;

–безконтактні методи вимірювання та ін.

Використання безпосередніх методів вимірювання температури різання дозволяє фіксувати температуру у будь-якій точці різальної частини різця, стружки чи оброблюваної деталі з високою точністю (± 2...5 %) та в широкому діапазоні температур від 150 °С до 2500 °С.

2.2. Контактні методи вимірювання температури різання

Термопари. Термоелектричним перетворювачем (термопарою) називається чутливий елемент, якій складається з двох електрично з’єднаних різнорідних металевих провідників (або напівпровідників) і перетворює значення контрольованої температури в ЕРС. Принцип дії термоелектричних перетворювачів генераторного типу оснований на використанні термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС.), яка виникає в контурі з двох

різнорідних провідників, місця з’єднань (спаї) яких розігріті до різних температур. Знак і величина термо-ЕРС в спаї двох різнорідних металів залежать від природи матеріалів і температур в місцях спаїв.

Для термопар використовують різні метали і їх сплави: платину, іридій, родій, золото, мідь, нікель, ніхром, константант, хромель, алюмель, копель.

Термопари стабільною відтворюваністю залежності термоелектрорушійної сили від температури. За допомогою термопар можна вимірювати температуру у широкому діапазоні від -180 °С до 1300 °С. Похибка вимірювання знаходиться у межах 0,1 % [16, 17].

При механічній обробці матеріалів часто використовують спеціальні термопари, які мають переваги перед «стандартними». За допомогою спеціальних термопар можна визначити середню температуру на контактних поверхнях інструмента зі стружкою та виробом, яку називають температурою різання, або середньою температурою контакту.

Відомі також термопари, які дозволяють встановити розподіл температури на контактних поверхнях та крайках інструмента. Також за допомогою термопар можна виміряти місцеву (локальну) температуру у заданій точці кожного елемента технологічної системи.

Відомо декілька видів термопар [18-20]. Звичайно підбирають такі провідники, які утворюючи термопару, здатні генерувати максимально можливу термоЕРС, відрізняються стабільною відтворюваністю показників і тарувальною кривою, близькою до прямолінійної. Цим вимогам відповідають стандартні хромель-алюмелеві (умовне позначення ХА) та хромель-копелеві (ХК) термопари, які широко використовуються у практиці.

В галузі металообробки ці термопари отримали назву штучних. Термопари, одним з термоелектродів яких є оброблюваний або інструментальний матеріал, називають напівштучними [8].

Також при обробці металів різанням широко застосовується природна термопара, термоелектродами якої служать оброблюваний матеріал та матеріал інструмента [14].

Штучні та напівштучні термопари. За допомогою цих термопар можна виміряти місцеву температуру у різці, виробі, деталях металорізального верстата, а також побудувати температурне поле, як всередині цих елементів, так і на їх поверхні. Як штучні використовують стандартні термопари.

За результатами вимірювань, штучними термопарами можна оцінювати температуру контакту різець-стружка в процесі різання. Причому тепловий стан поверхні контакту можна визначати, як при переривчастому різанні, так і при роботі зношеними інструментами.

При необхідності визначення температурного поля різальних елементів використовується збірна конструкція різця, яка оснащена різальною пластиною товщиною 1,5…2,0 мм. У державці різця формується отвір, через який робочий спай термопари підводиться до різальної пластини (рис. 2.1). При цьому вимірюється температура опорної поверхні пластини.

Термоелектроди термопари ретельно ізолюються один від одного і від стінок отвору. Враховуючи невеликі розміри контактних ділянок різця, робочий спай термопари намагаються розташувати якомога ближче до різальних кромок. Це дозволяє вимірювати температуру поблизу джерел тепловиділення.

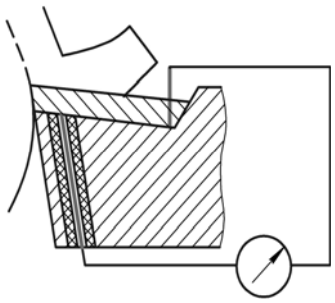


Рис. 2.1. Вимірювання температури різця напівштучною термопарою

Слід підкреслити, що точність вимірювання температури залежить від способу закріплення робочого спаю термопари до досліджуваної поверхні. Тому спай термопари щільно притискають, або приварюють, наприклад, конденсаторним зварюванням, до різальної пластини.

Використовуючи пластини неоднакової товщини та розташовуючи отвори у різних точках передньої та задньої поверхонь різального інструмента, можна за результатами вимірювань побудувати температурне поле в різальній пластині інструмента [2, 3, 14, 21].

Напівштучні термопари відрізняються від стандартних одним з термоелектродів, якими можуть бути вибрані оброблюваний матеріал або матеріал інструмента.

Природна термопара. Термопару можуть утворити два різнорідних провідники. У зв'язку із цим у роботах [2, 3, 22] застосовували заготовку та різальний інструмент як провідники, що складаються з матеріалів з істотно відмінними фізико-механічними властивостями. Ділянки з’єднання таких термопар виникають у процесі різання природним шляхом, без стороннього втручання. Вони є зонами контакту поверхонь інструмента зі стружкою та заготовкою. У зоні контакту виникають високі питомі тиски та температури. До того ж, новоутворені поверхні на заготовці та стружці, позбавлені окисних плівок, є хімічно чистими. Усе це створює умови для цільного, беззазорного контакту двох різнорідних матеріалів та утворення робочої ділянки термопари.

Така термопара отримала назву природної і є окремим випадком термопар, що застосовуються у техніці вимірювання температури. За допомогою природної термопари вимірюється середня температура (температура різання) на контактних поверхнях інструмента. За незначних конструктивних змін різця, використовуючи природну термопару, можна встановити закономірність розподілу температури по його поверхням.

Таким чином, принцип природної термопари може бути використаний не лише для вимірювання температури різання, але й для визначення середньої температури по одній з контактних поверхонь різця, а також для вивчення закону розподілу температури по його поверхням. Але цьому методові притаманний ряд недоліків, що знижує його цінність.

По-перше, різальна частина різця складається з двох різнорідних інструментальних матеріалів, що створює не лише умови тертя, (отже, теплоутворення), а й відведення теплових потоків у різальному клині.

По-друге, вимірювання здійснюються не одночасно, а у різні моменти часу. Усе це порушує нормальний розподіл температури по передній поверхні різця і вносить похибки у результаті вимірювання.

Перерізуванні термопари. За допомогою перерізуванних термопар вивчають закономірність зміни температур уздовж різальних кромок і по контактним поверхням інструмента (рис. 2.2).

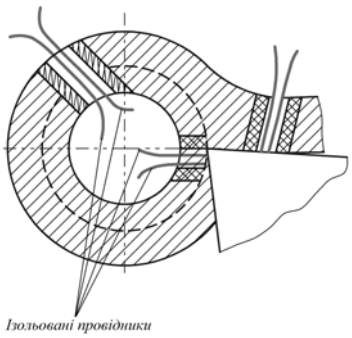


Рис. 2.2. Схема вимірювання температури перерізуваними термопарами

Перерізуванні термопари не вимагають конструктивних змін різальних інструментів. Термоелектроди цих термопар закладаються в заготовку. При цьому зразки з оброблюваного матеріалу часто виконують складеними, утвореними двома половинками.

Половинки ретельно притираються площинами роз’єму. У канавку однієї з половинок поміщають термопару. При цьому особливу увагу приділяють ізолюванню термоелектродів один від одного та від заготовки. Як термоелектрони, використовують, провідники з мідних, нікелевих, ніхромових, константанових та інших сплавів, з яких виготовляються стандартні термопари.

Робочий спай перерізуваної термопари утворюється в процесі різання, в момент перерізання її термоелектродів різальною кромкою. Утворений таким чином спай ковзає по контактній поверхні інструмента. ТермоЕРС, генерована термопарою, залежить від температури в кожній точці контактної поверхні і є змінною величиною. Фіксація термоЕРС здійснюється за допомогою осцилографа або аналого-цифрового перетворювача під’єднаного до комп’ютера, на якому відображається закономірність зміни температури по поверхні різального інструмента [2, 3, 23].

Термоіндикатори. Незважаючи на високу точність та надійність визначення температури за допомогою термопар, цей метод не позбавлений недоліків. Зокрема, не завжди вдається отримати інформацію про температурне поле об'єкта. Пов'язано це з тим, що робочий спай термопари має невеликі, скінченні розміри. Тому термопарою можна виміряти температуру в окремій точці об'єкта або в обмеженій зоні. У зв'язку із цим виникають труднощі із

побудовою температурного поля об'єктів як із достатньо розвиненою, так і з незначною поверхнею.

У першому випадку на поверхні об'єкта необхідно розмістити велику кількість термопар, що спотворює температурне поле.

У другому – неможливо встановити достатнє число термопар і скласти правильне уявлення про температурне поле та градієнти температури.

Виникають труднощі і під час вимірювання температури об'єктів, що обертаються, тонкостінних деталей, а також у важкодоступних зонах. Не слід забувати і те, що для підвищення точності вимірювань спай термопари повинен бути надійно закріплений, що не завжди можливо через наявність дефектів на поверхні об'єкта.

Також суттєвим недоліком застосування термопар є необхідність нового тарування при зміні матеріалу заготовки чи інструмента. У цих випадках привабливим є метод реєстрації температури за допомогою термоіндикаторів (показників температури) – речовин, здатних змінювати свій колір при досягненні певної температури, яка називається критичною або температурою переходу.

За здатністю термоіндикаторів повертатися до початкового стану після виконання реєстрації температури, їх поділяють на оборотні, необоротні та квазізворотні [2].

Оборотні термоіндикатори після досягнення температури переходу або при її перевищенні змінюють своє забарвлення, а потім при охолодженні об'єкта до температури нижче критичної відновлюють свій початковий колір. Ці термоіндикатори можуть використовуватися багаторазово.

Необоротні термоіндикатори відрізняють тим, що за критичної температури або вище її відбуваються необоротні процеси, які змінюють колір індикатора. Під час подальшого охолодження термоіндикатори не набувають початкового забарвлення. Необоротні термоіндикатори – одноразового використання.

Необоротні індикатори отримали значно більше поширення, ніж оборотні, оскільки їх застосування не пов'язане з безперервним спостереганням за зміною

забарвлення. За допомогою цих індикаторів фіксують максимальну температуру, до якої нагрівся об'єкт під час експлуатації.

Квазізворотні індикатори температури – це термоіндикатори зі зниженням температури об'єкта нижче критичної, під дією вологи, що міститься у повітрі, поступово повертаються до початкового стану. Квазізворотні індикатори температури можуть використовуватися багаторазово.

Температура переходу термоіндикаторів, за виключенням індикаторів плавлення, залежить від зовнішніх умов, а саме: від тривалості теплової дії, вологи, що міститься у повітрі, тиску, наявності газів тощо. Такі індикатори прийнято називати залежними.

Температурне поле різальної частини інструмента у залежності від режиму обробки, зносу, наявності МОТС та покриттів досліджували за допомогою багатопозиційних термохімічних термоіндикаторів [2, 24].

Ці термоіндикатори працездатні в досить широкому інтервалі температур (115…1115 °С), що дозволяє оцінювати тепловий стан інструмента як за низької, так і за високої швидкості різання. Окрім цього, кілька кольорових переходів, вузький температурний інтервал між переходами (30…80 °С), висока стабільність кольорової гами, незначний час спрацювання (до 1 с), хороша адгезія з інструментальним матеріалом, нарешті, можливість працювати у різних середовищах вигідно відрізняють ці термоіндикатори від інших типів.

Термоіндикатори плавлення змінюють свій колір у результаті плавлення одного або кількох компонентів. Слід відмітити, що компоненти індикаторів мають строго визначену температуру плавлення. Індикатори відрізняються досить високою точністю фіксування температури. Абсолютна похибка складає 1…2 °С. Вони є перспективними і дозволяють контролювати температуру як під час нагрівання, так і під час охолодження об'єкта. При температурі переходу деякі індикатори стають рідкотекучими. Це їх недолік, так як можливе стікання індикатора під час визначення температури вертикальних та похилих поверхонь об'єкта.

Рідкокристалічні термоіндикатори – складні речовини, що складаються з органічних сполук. Ці речовини у певному температурному інтервалі переходять до рідкокристалічного стану. У цьому стані вони мають особливі властивості – здатність розкладати та відбивати світлові промені зі зміною їх кольору.

Рідким кристалам та їх сумішам за певної температури завжди притаманний один і той же колір. Індикатори відрізняються високою чутливістю, тому їх використовують під час проведення точних експериментів. Зміна іншого кольору може відбутися навіть за незначної зміни температури (іноді на 0,01…0,1 °С). Забарвлення кристалу залежить від його складу та фазового стану. Змішуючи їх у певних пропорціях, можна отримати заздалегідь задану температурно-кольорову комбінацію. Змінюючи склад кристалів, отримують необмежену кількість кольорових переходів. За допомогою цих індикаторів реєструють температуру як під час нагрівання, так і під час охолодження. Рідкокристалічні індикатори дозволяють з високою точністю реєструвати температуру. Відносна похибка при цьому не перевищує 2 % [2].

Волоконно-оптичні термоперетворювачі. Точні вимірювання температури у важкодоступних місцях можуть бути здійснені за допомогою волоконно-оптичних систем [2, 25, 26]. Світловоди, що використаються у цих системах, виконують функції:

1) вимірювальних перетворювачів температури;

2) каналів для дистанційної передачі оптичного сигналу від об'єкта до детектора теплового випромінювання.

У залежності від оптичних ефектів, використовуваних у принциповій схемі волоконних термоперетворювачів, розроблено термометри, які функціонують на основі:

1) залежності оптичних характеристик (показника заломлення, коефіцієнта поглинання) світловолокна від температури. Чутливим елементом у цих термометрах є волоконний світловод, пропускна спроможність якого однозначно залежить від температури. Інтервал вимірюваних температур 20…200 °С;

2) люмінесценції, як час згасання та інтенсивності її випромінювання.

Мініатюрні чутливі елементи цих термометрів виготовляють з люмінофорів. Поширення отримали скло, леговане неодимом (Nd), а також напівпровідникові кристали арсеніду галія (GaAs) [2]. У цих речовин час згасання люмінесценції лінійно зменшується з ростом температури. Так, у датчика з Nd, введеного до матриці фосфатного скла, постійна часу згасання люмінесценції при – 50 °С складає 145 мкс, а при 250 °С – 115 мкс. Діапазон контрольованих температур 50…250 °С, а похибка вимірювання температури визначається точністю фіксування часу згасання і не перевищує ± 3 °С;

3) перехідного типу, принцип дії яких базується на зміні інтенсивності світлових імпульсів після проходження через напівпровідниковий датчик. Спектральна смуга поглинання датчика залежить від його температури. Для датчиків застосовують плівки з Si, GaAs, а також оптично прозорі пластинки з цих речовин. Термометри дозволяють вимірювати температуру до 300 °С;

4) інтерференційного типу, у яких зміна температури впливає на картину інтерференції від двох світлових пучків, що транспортуються волоконними кабелями.

Основними складовими елементами волоконних термометрів є: джерело світла; мініатюрний датчик температури; волоконні світловоди та електронна вимірювальна система. Як джерело світла часто використовують світлодіоди. Для полегшення вимірювання вихідного сигналу на світловоди подають пульсуючі електричні сигнали від генератора імпульсів. Оптичний сигнал від джерела випромінювання проходить по волоконному світловоду і падає на чутливий елемент, встановлений у зоні вимірювання температури.

Оптичні характеристики елемента однозначно залежать від температури. Вимірювальна система забезпечує перетворення оптичного сигналу на електричний, його обробку і вивід інформації про температуру у аналоговій або цифровій формі.

Основною позитивною властивістю волоконних-оптичних термометрів є відсутність впливу на результати вимірювань електромагнітних полів. Окрім цього, використання світловодів замість дротів для дистанційної передачі

сигналів дозволяє розділити ланцюги перетворювача та приймача. Але за допомогою волоконно-оптичних термометрів можна контролювати температуру тільки у вузькому інтервалі, що знижує їх практичну цінність.

Висока точність вимірювання та стабільність параметрів, можливість досить просто подавати дані про температуру у цифровій формі – основні переваги волоконно-оптичних термоперетворювачів.

Разом із тим їм притаманні і деякі недоліки: великі розміри чутливого елемента (наприклад, діаметр трубчатої захисної оболонки досягає 6 мм), порівняно вузький діапазон вимірювань.

2.3. Безконтактні методи вимірювання температури різання

При обробці матеріалів різанням не завжди є можливість скористатись контактними методами вимірювання температури, наприклад, під час визначення температури у важкодоступних, віддалених та рухомих об’єктах, крім того, при температурі тіла, що перевищує 2000 °С, чутливі елементи контактних засобів вимірювання не мають необхідної термостійкості [2, 22].

Також при контактних засобах вимірювання при дотику із поверхнею об'єкта при досліджені температурного поля вносяться спотворення в отримані результати. Тому поряд з контактними методами використовують і безконтактні способи вимірювання [27–31].

Радіаційний метод. Метод є незамінним під час вимірювання високих температур (більше 2000 °С), і при цьому забезпечує досить високу точність та стабільність результатів [27].

Для абсолютно чорного тіла, загальна енергія теплового випромінювання E від температури характеризується законом Стефана-Больцмана:

$$E = \sigma_0 T^4 \tag{2.1}$$

де $\sigma_0 \approx 5{,}670400\ 10^{-8}$ Вт/(м^{2}К^4) – стала Стефана–Больцмана; T – температура, К.

При вимірювані температури реальних тіл, які мають сумарний коефіцієнт випромінювання, відмінний від одиниці, реальну температуру об’єкта можна визначити з достатньою точністю за формулою:

$$T = \frac{T_{\text{р}}}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \tag{2.2}$$

де T – дійсна температура об’єкта, К; $T_{\text{р}}$ – радіаційна температура, К;
ε – коефіцієнт чорноти об’єкта.

Метод безконтактного вимірювання температури реалізований в пірометричних перетворювачах. При таруванні пірометра по моделі абсолютно чорного тіла встановлюється однозначна залежність його показників від температури випромінювача.

За допомогою електронної техніки, ефективних детекторів випромінювання, світловолоконних кабелів вдалося розширити можливості і сферу застосування пірометрів. Робочий інтервал температур збільшився від низьких до надвисоких і знаходиться у межах – 50…3000 °С. Похибка вимірювання не перевищує ±1 %, а інерційність – 0,5 с.

У сучасних пірометрах є можливість передачі інформації про поточні значення температури об'єкта не лише у аналоговій, але й у цифровій формі на екран дисплею. Окрім цього, електронний блок здатний визначити екстремальні та середні значення температури за період проведення циклу вимірювань.

Пірометри мають високу чутливість та стабільність параметрів. Гнучкі скляні світловоди дозволяють досліджувати тепловий режим при металообробці, в місцях недоступних для прямого візування.

В роботі [30] для вимірювання температури різання при фінішному фрезеруванні інструментами із ПНТМ на основі кубічного нітриду бору (КНБ) використано пірометр з двома оптичними волокнами, зв'язаними оптоволоконною муфтою (рис. 2.3).

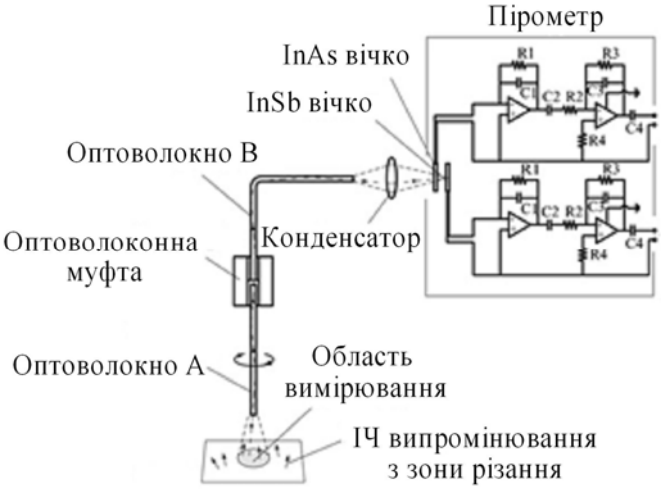


Рис. 2.3. Схема вимірювань температури різання при фінішному фрезеруванні.

Тепло, яке випромінюється з поверхні розподілу інструмент-стружка і проходить через різальну пластину приймають оптичним волокном, яке вставлене в інструмент (рис. 2.4) і обертається разом зі шпинделем верстата. Інфрачервоне випромінювання через волоконну муфту передається до іншого волокна, яке зафіксоване в консолі верстата і з'єднане з двоколірним пірометром.

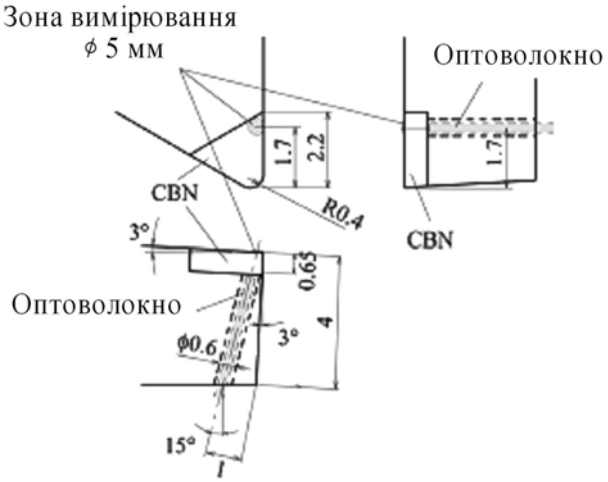


Рис. 2.4. Схема підводу оптоволокна до різальної кромки інструмента

Цей метод можна використовувати при фрезеруванні для вимірювання розподілу температури на поверхні інструмент-стружка. Оптоволоконна муфта

дозволяє підключити два оптичних волокна не торкаючись один одного і забезпечити обертання шпинделя верстата.

Використання оптоволокна в оптичній системі пірометрів повинно відповідати умовам:

– термостійкості;

– передачі достатньої потужності випромінювання;

– мінімальним втратам сигналу при деформаціях.

Тому для проведення температурних досліджень процесів механічної обробки недоцільно використовувати оптоволокно на основі пластмас, так як їх робочий діапазон обмежений температурою 70…80 °С, а внаслідок тонкої серцевини втрати при деформації кабелю є досить великими.

Більш оптимальним є використання оптоволокна з серцевинною і оболонкою із кварцового скла, яке може експлуатуватися при температурах до 600 °С і є набагато стійкішим до механічних деформацій.

Перевагами застосування пірометрів є незалежність показань від освітленості об'єкта, можливість дистанційної передачі показань.

Недоліки: неможливість вимірювання істинної температури; труднощі вимірювання на великих відстанях; вплив атмосфери між джерелом випромінювання і пірометром; порівняно велика температурна похибка.

Метод ІЧ-випромінювання. Описані раніше прилади дозволяють вимірювати температуру в обмеженій зоні, практично у точці. Але оптимізувати технологічний процес або термічний режим об'єкта за температурою в окремій точці досить важко. У цих випадках бажано мати значно більший обсяг інформації, який можна отримувати, маючи теплове зображення об'єкта. З цією метою використовують тепловізори, що дозволяють із досить високою точністю фіксувати температурне поле тіла.

Тепловізор – вимірювально-обчислювальний комплекс, призначений для безконтактного одночасного вимірювання температури усіх точок поверхні об'єкта. Як детектори випромінювання у тепловізорах використовуються термоелектричні, силіконові, сірнисті та піроелектричні термоперетворювачі.

Детектори випромінювання перетворюють оптичний сигнал на електричний, який потім за допомогою електронних блоків посилюється і трансформується у аналоговій або цифровій формі на екрані дисплею. Тепловізори обладнують багатоелементними приймачами випромінювання.

В роботі [31] для визначення розподілу температури в зоні різання при обробці сплаву КО36Ті (v = 147 м/хв.; S = 0,25 мм/об; t = 1 мм) використано тепловізор FLIRT360. Зі зображення 2D (рис. 2.5) видно, що максимальна температура в зоні різання сплаву КО36Ті складає $T_р$ = 548,1 °С.

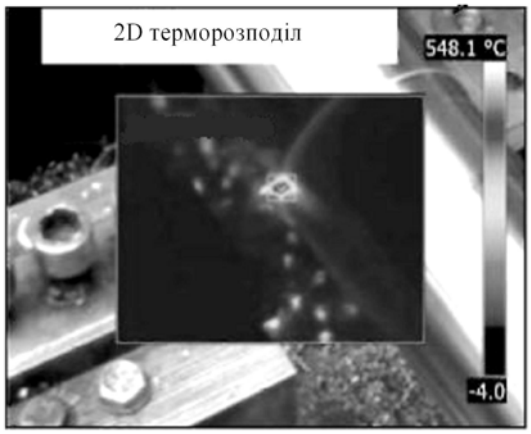
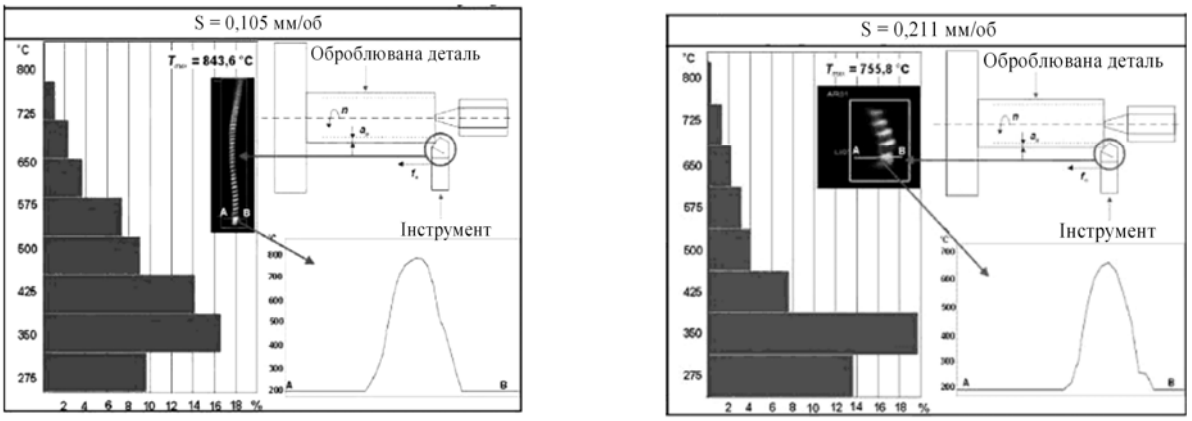


Рис. 2.5. 2D зображення розподілу температури в зоні різання отримане тепловізором.

В роботі [32], за допомогою тепловізора FLIRSC620, проведено дослідження температурного поля стружки при обробці важкооброблюваних сплавів на основі нікелю дослідження показали, що температура стружки при подачі S = 0,105…0,211 мм/об досягає T_{max} = 843…755 °С (рис. 2.6).

В роботі [33] проведена експериментальна перевірка математичних моделей температурних явищ в зоні різання за допомогою тепловізора. Експериментальна установка на базі тепловізора моделі PV-320показана на рисунку 2.7. Основною частиною цієї системи є тепловізор, що має неохолоджуваний детектор, виготовлений з піроелектричного елемента. Камера має характеристики: роздільна здатність 320 × 240 пікселів; спектральна чутливість 2–14 мкм, діапазон вимірювальних температур від -18 °С до 523 °С. Максимальна похибка вимірювання температур становить приблизно 0,2 °С.



а *б*

Рис. 2.6. Температурне поле стружки, отримане за допомогою тепловізора: а – S = 0,105 мм/об; б – S = 0,211 мм/об

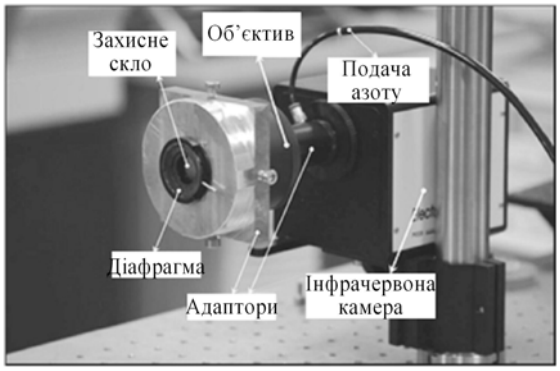


Рис. 2.7. Експериментальна система для проведення температурних досліджень

Для захисту камери від стружки, в ході експерименту, використовували захисне скло на основі ZnSe.

Експериментальну систему встановлювали у вертикально-фрезерний верстат із ЧПК. Дослідження проводили з тонкими трубками товщиною стінки 2 мм з двох різних матеріалів алюмінієвого сплаву 7075 і вуглецевої сталі AISI 1050. Обробку виконували інструментальними різальними пластинами на основі карбіду вольфраму.

В ході експерименту відеозображення, отримане з тепловізора, зберігалось у вигляді окремих зображень. Деякі з цих кадрів затінені стружкою, тому тільки зображення, де передня поверхня добре проглядалась, брали для подальшої оцінки. Зразок зафіксованого ІЧ-зображення показано на рисунку 2.8.

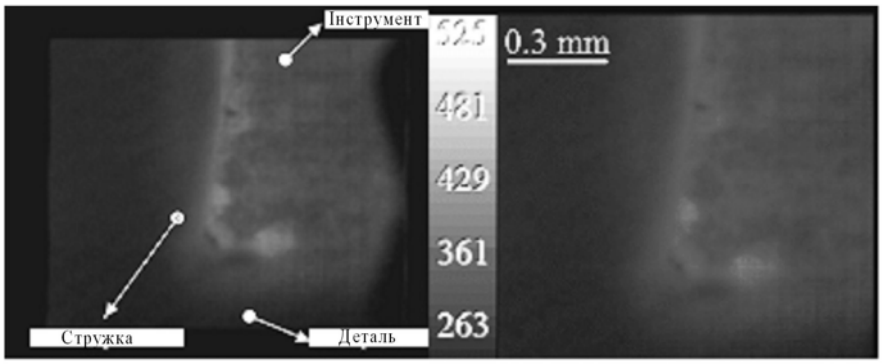


Рис. 2.8. ІЧ зображення, зняте під час різання сплаву Al7075

Розподіл температури на поверхні інструмента забезпечується за допомогою комп'ютерної програми. Причому передня поверхня інструмента розділяється на прямокутники малого розміру і аналізується з метою отримання максимального значення пікселів, що дає можливість визначити максимальну температуру в цій області.

Значення кожного пікселя прямокутної області використовували для визначення середньої температури на передній поверхні. Крім того, кожна невелика ділянка прямокутної області, аналізується окремо для того, щоб перевірити розподіл температури на передній поверхні інструмента.

Використання тепловізійного обладнання при досліджені процесів механічної обробки є досить перспективними:

– по-перше, використання тепловізора дозволяє визначити температуру без фізичного контакту з джерелом тепла;

– по-друге, тепловізори мають високу швидкість відгуку, що дозволяє визначити температуру під час проведення досліджень на високих швидкостях різання.

Недоліком даного методу є необхідність визначення випромінювальної здатності поверхні, для отримання точних значень параметрів розподілу температури.

Визначити точну випромінювальну здатність поверхні при різанні вкрай важко, тому що випромінювальна здатність є функцією температури, шорсткості поверхні, а також можливих фазових переходів.

При цьому стружка також створює перешкоди використання даного метода, внаслідок обмеження оптичного доступу в зону виміру і температура вимірюється, як правило, на вільній поверхні стружки, а не на поверхні контакту інструмента, який є закритим тілом стружки.

Метод прозорого інструмента. Вимірювання температури, що виникає на поверхні контакту різального інструмента зі стружкою і оброблюваною деталлю, пов’язано з багатьма труднощами, так як неможливо підвести вимірювальні пристрої в зону вимірювання.

На рисунку 2.9, представлена схема вимірювання температури в будь-якій точці зони різання. Цей метод полягає в наступному: інфрачервоні промені із зони різання, відбиваються від опорної дзеркальної площини А, фокусуються об’єктивом на приймач інфрачервоного випромінювання. Візуальний нагляд забезпечується окуляром з сіткою і вивідним дзеркалом.

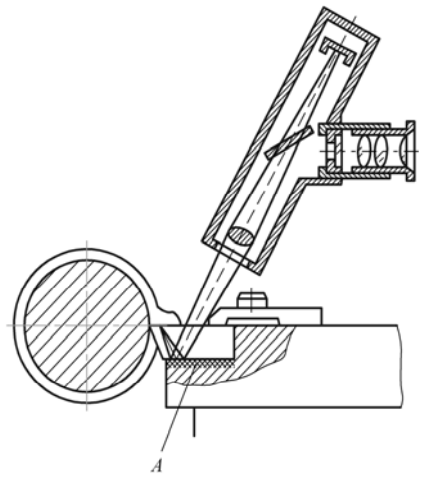


Рис.2.9. Схема вимірювання температури методом прозорого інструмента

Метод прозорого інструмента дозволяє виміряти температуру в будь-якій точці від 150 до 1200 ºС з високою точністю ± 2…3%, що забезпечується спеціально розрахованим для даної області інфрачервоного випромінювання дзеркальним об’єктивом, а також схемою підсилювача. Приймач інфрачервоного випромінювання приймає сигнали з площадки розміром 0,04×0,07 мм. Таким чином можливо виміряти температуру в будь-якій точці зони різання [34].

Метод мікроструктурного аналізу. Контактними методами вимірювання температури важко визначити тепловий стан дуже тонких (до 20…30 мкм) поверхневих шарів інструмента. У цьому випадку доцільно використати метод мікроструктурного аналізу, який дозволяє встановити температурне поле у різальному клині.

Метод оснований на аналізі необоротних фазових та структурних перетворень, що відбуваються у поверхневому шарі інструмента зі сталі внаслідок нагрівання його до температури, що перевищує температуру відпуску [35].

Метод мікроструктурного аналізу реєструє наслідки дії високої температури на інструментальний матеріал. У результаті такого впливу у поверхневому шарі інструмента з'являються нові структури, які за своїм зовнішнім виглядом, механічними властивостями суттєво відрізняються від початкової. Наприклад, під час обробки матеріалів зі швидкістю різання, яка значно перевищує оптимальну, у поверхневому шарі швидкорізальних інструментів виникають структури, зумовлені розпадом мартенситу, утворенням і перетворенням аустеніту, вторинним гартуванням [35].

Утворення нових різноманітних структур пов'язане з різною температурою нагріву робочих ділянок інструмента у процесі різання. За результатами зміни мікроструктури і мікротвердості визначається температура нагріву поверхневих шарів інструмента. Так у роботах Е.М. Трента [4] приведені результати експериментальних досліджень температурних полів у поверхневому шарі різців за структурними змінами.

Нижня температурна межа, починаючи з якої можливе застосування методу мікроструктурного аналізу, обмежена температурою відпуску у інструментальній сталі. Для швидкорізальних сталей ця температура складає біля 600 °С. У зв'язку із цими швидкорізальними різцями можна досліджувати обмежений діапазон температур (600…1000)°С.

Металографічний метод дослідження доповнюється вимірюванням мікротвердості. На мікрошліфах різців, що відпрацювали, виявляли ділянки з однаковою мікротвердістю. Очевидно, у процесі різання ці ділянки зазнавали однакового нагрівання. З'єднуючи їх лінією, отримували ізотерми температурного поля.

Запропонована методика досліджень дозволяє визначити вплив режимів різання, подачі МОТС, геометричних параметрів інструмента на його тепловий

стан. Встановлено [3], що підведення МОТС в зону різання з боку задньої поверхні різця доцільніше, ніж подача його поливом, вільно падаючим струменем. Крім того, зі збільшенням швидкості різання ефективність МОТС знижується.

Дослідження температурного поля в різці за структурними змінами матеріалу вимагає великих затрат. Метод застосовується лише для сталевих інструментів, працюючих за таких режимів, які забезпечують температуру, що перевищує температуру відпуску. Такі режими різання через швидку втрату різальних властивостей інструментів на практиці не застосовуються. До того ж, методові притаманна похибка до ±25 °С. У зв'язку із цим, спосіб визначення температури за структурними перетвореннями інструментального матеріалу в інженерній практиці майже не використовується.

2.4. Аналітичні методи оцінки температури різання

При проведені теплофізичних досліджень процесів механічної обробки використовують методи безпосереднього вимірювання температур, які розділяють на дві великі групи – контактні і безконтактні.

Не дивлячись на те, що сучасні безконтактні методи є досить прогресивними їх широке використання обмежене технічними труднощами, які не дають їм на рівних конкурувати з контактними методами – штучними і природними термопарами.

Контактні методи також мають свої недоліки. Тому в найбільш відповідальних випадках доцільно співставляти дані отримані від різних методів вимірювання. Ще більш трудомісткими є методи визначення температурних полів в твердих тілах.

Так, наприклад, на точність визначення температурного поля за допомогою термоіндикаторів перешкодою є той факт, що вони фіксують найбільшу температуру термічного циклу на даній ділянці, тобто отримані ізотерми відповідають різним моментам часу. Також точність проведення вимірювань

знижується через неможливості проведення повномасштабних експериментів внаслідок технічних чи економічних проблем.

Виходом із становища є застосування поряд з експериментальними методами, аналітичних методів оцінки температур, як засобів контролю експериментальних досліджень, а в деяких випадках і як основних джерел одержання інформації.

2.4.1. Метод Фур'є (метод розділення змінних)

Класичний метод розв'язання диференціального рівняння теплопровідності [2] полягає в тому, що знаходиться сукупність окремих рішень T_n, що задовольняють рівнянню і граничним умовам, а потім за принципом накладення складається ряд цих рішень:

$$T = C_1 T_1 + C_2 T_2 + ... = \sum_{n=1}^{\infty} C_n T_n \qquad (2.3)$$

Коефіцієнти C_n знаходяться із початкових умов.

Ця властивість накладання ряду рішень для нескінченного ряду потребує спеціального обґрунтування, оскільки вона безпосередньо справедлива тільки для кінцевої суми.

Таке обґрунтування полягає в тому, що необхідно довести рівномірну збіжність ряду (2.3), отриманого після його диференціювання, а також законність почленної інтеграції ряду при визначенні коефіцієнтів C_n.

Часткове рішення T визначається у вигляді добутку двох функцій, одна з яких $\theta(\tau)$ залежить тільки від часу τ, а інша $\vartheta(x, y, z)$ залежить тільки від координат, тобто:

$$T = C\theta(\tau)\vartheta(x, y, z) \qquad (2.4)$$

де C – довільна стала.

Якщо підставимо рішення (2.4) в рівняння (2.3), то отримаємо:

$$\theta'(\tau)\vartheta(x,y,z) = a\theta(\tau)\nabla^2\vartheta(x,y,z);$$

цю рівність можна написати у вигляді:

$$\frac{\theta'(\tau)}{\theta(\tau)} = a\frac{\nabla^2\vartheta(x,y,z)}{\vartheta(x,y,z)}. \qquad (2.5)$$

Ліва частина рівності може залежати тільки від τ, або бути постійним числом, але не залежить від координат.

Права частина може залежати тільки від координат або бути постійним числом, але не залежить від часу.

Рівність повинна бути при будь-яких значеннях часу і координат.

Це можливо тільки в тому випадку, якщо права і ліва частини рівності дорівнюють деякій постійній величині *D*, тобто:

$$\frac{\theta'(\tau)}{\theta(\tau)} = D = const; \qquad (2.6)$$

$$\frac{a\nabla^2\vartheta(x,y,z)}{\vartheta(x,y,z)} = D = const. \qquad (2.7)$$

$$\theta(\tau) = e^{D\tau}. \qquad (2.8)$$

Рівняння (2.6) можна проінтегрувати, і тоді отримаємо:

Постійну інтегрування можна віднести до постійної *C*, тому в (2.8) вона не вказується.

Постійна величина *D* вибирається з фізичних міркувань.

Для теплових процесів, що прагнуть до температурної рівноваги, коли по закінченню тривалого проміжку часу $(\tau \to \infty)$ встановлюється певний розподіл температури, величина *D* не може бути додатною величиною, вона буде тільки від'ємною.

Якщо *D* є величина додатна, то при тривалому проміжку часу температура буде більшою наперед заданої величини, тобто прямує до нескінченності, що суперечить сутності процесу.

Розглянемо випадок, коли $D \leq 0$. Так як, величина D довільна стала за числовим значенням, то можна припустити:

$$D = -ak^2, \tag{2.9}$$

де a – коефіцієнт температуропровідності (величина додатна), k – деяка постійна, яка визначається з граничних умов.

Підставляючи ці значення для D, отримаємо:

$$\theta(\tau) = e^{-ak^2\tau}, \tag{2.10}$$

$$\nabla^2 \vartheta(x, y, z) + k^2 \vartheta(x, y, z) = 0. \tag{2.11}$$

Диференціальне рівняння (2.11) часто називають рівнянням Покеля.

Таким чином, застосовуючи метод Фур'є, рівняння теплопровідності зводиться до рівняння типу Покеля, рішення якого визначається геометричною формою тіла, початковим розподілом температури, а також умовами теплообміну тіла з навколишнім середовищем або навколишніми тілами.

Нехай при відповідних заданих умовах відоме рішення рівняння (2.11), тобто знайдена функція $\vartheta(x, y, z)$.

Тоді частковий розв'язок рівняння теплопровідності можна записати:

$$T = Ce^{-ak^2\tau}\vartheta(x, y, z). \tag{2.12}$$

Рішення (2.12) задовольняє диференціальному рівнянню теплопровідності при будь-яких значеннях C і k, тобто є частковим рішенням.

Присвоюючи постійним C і k різні значення, одержимо безліч окремих рішень.

За принципом накладання спільне рішення буде дорівнювати сумі окремих рішень згідно із співвідношенням (2.3).

Постійна k визначається граничними умовами, а постійна C – з початкових умов [5].

У випадках, коли ϑ залежить тільки від однієї координати (одновимірні задачі, пов'язані зі знаходженням симетричного температурного поля в необмеженій пластині, циліндрі, кулі, рішення рівняння (2.11) можна представити як суму двох окремих рішень, $\varphi(\xi)$ і $\psi(\xi)$, тобто:

$$\vartheta(\xi) = \varphi(k\xi) + \psi(k\xi). \tag{2.13}$$

Це обумовлено тим, що спільне рішення будь-якого лінійного однорідного диференціального рівняння другого порядку визначається рівнянням:

$$\vartheta'' + p(\xi)\vartheta' + q(\xi)\vartheta = 0 \tag{2.14}$$

можна записати у вигляді:

$$\vartheta = C_1\vartheta_1 + C_2\vartheta_2, \tag{2.15}$$

де C_1 і C_2 – постійні, а ϑ_1 і ϑ_2 є лінійно незалежними інтегралами рівняння (2.14), тобто такими інтегралами, відношення яких не є постійною величиною: $\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} \neq const$.

Достатньо знати тільки одне лінійне незалежне рішення ϑ_1, тоді ϑ_2 знаходиться за формулою:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \int \vartheta_1^{-2} e^{-\int p d\xi} d\xi. \tag{2.16}$$

Згідно зі співвідношенням (2.13) частковий розв'язок (2.12) можна записати так:

$$T = Ce^{-ak^2\tau}\varphi(k\xi) + De^{-ak^2\tau}\psi(k\xi), \tag{2.17}$$

тобто він є сума або лінійна комбінація двох власних функцій.

У загальному випадку величина k визначається з граничних умов, а постійні C і D – з початкової умови.

Часткове рішення непридатне для розрахунку температурного поля, оскільки з нього не можна визначити постійні C і D.

Припустимо, що в початковий момент часу (τ= 0) температура може бути постійною $T = T_0 = const$, що не відповідає частковому рішенню (2.17) [3].

Якщо припустити, що $\tau = 0\left(e^{-ak^2\tau} = 1\right)$, то отримаємо, що постійна T_0 повинна бути рівна змінній $C\varphi(k\xi) + D\psi(k\xi)$, чого бути не може.

Тому для отримання загального розв'язку рівняння теплопровідності, що задовольняє початковим умовам, беруть суму окремих рішень, в яких постійні C і D мають свої певні значення.

Температура в початковий момент часу може бути задана функцією. Тоді за допомогою сукупності таких часткових рішень можна як завгодно близько підійти до заданого розподілу.

Це здійснюється підбором значень C і D. Такий шлях підбору постійних C і D зазвичай називають рішенням, що задовольняє початковим умовам.

Таким чином, перше часткове рішення можна записати:

$$T_1 = C_1 e^{-ak_1^2\tau}\varphi(k_1\xi) + D_1 e^{-ak_1^2\tau}\psi(k_1\xi), \tag{2.18}$$

друге часткове рішення:

$$T_2 = C_2 e^{-ak_2^2\tau}\varphi(k_2\xi) + D_2 e^{-ak_2^2\tau}\psi(k_2\xi) \tag{2.19}$$

і так далі.

Загальне рішення буде мати вигляд:

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} C_n\varphi(k_n\xi)e^{-ak_n^2\tau} + \sum_{m=1}^{\infty} D_m\psi(k_m\xi)e^{-ak_m^2\tau}. \tag{2.20}$$

При цьому необхідно, щоб функція $T_0(\xi)$, описувала початковий розподіл температури і могла бути розкладена в ряд за власними функціями:

$$T_0(\xi) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n\varphi(k_n\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} D_m\psi(k_m\xi). \tag{2.21}$$

Розглянемо застосування методу Фур’є під час розв’язання задачі теплопровідності для нескінченної пластини [2, 3].

Диференціальне рівняння теплопровідності має вид:

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2}. \tag{2.22}$$

Частинне рішення цього рівняння у вигляді добутку двох функцій:

$$T = C\theta(\tau)\vartheta(x). \tag{2.23}$$

Тоді після підстановки його в диференціальне рівняння отримаємо:

$$\frac{\theta'(\tau)}{\theta(\tau)} = a\frac{\vartheta''(x)}{\vartheta(x)} = -ak^2. \tag{2.24}$$

Інтегрування рівняння:

$$\frac{\theta'(\tau)}{\theta(\tau)} = -ak^2 = const \tag{2.25}$$

дасть значення для функції $\theta(\tau)$, тобто $\theta(\tau) = e^{-ak^2\tau}$.

Диференціальне рівняння для функції $\vartheta(x)$ має вигляд:

$$\vartheta''(x) = -k^2\vartheta(x). \tag{2.26}$$

Отже, функція $\vartheta(x)$ повинна бути така, щоб її друга похідна була рівна самій функції, помножену на деяку величину ($-k^2$). Легко показати, що такими функціями можуть бути sinkx або coskx, а саме:

$$\vartheta_1(x) = \sin kx,\ \vartheta_1'(x) = k\cos kx,\ \vartheta_1''(x) = -k^2\sin kx = -k^2\vartheta_1(x);$$

$$\vartheta_1(x) = \cos kx,\ \vartheta_1'(x) = -k\sin kx,\ \vartheta_1''(x) = -k^2\cos kx = -k^2\vartheta_1(x).$$

Таким чином, sinkx і coskx є частковим рішеннями рівняння (2.26), причому ці рішення лінійно незалежні, оскільки:

$$\frac{\vartheta_1(x)}{\vartheta_2(x)} = \frac{\sin kx}{\cos kx} \neq const.$$

Загальне рішення рівняння (2.26) буде сумою окремих рішень:

$$\vartheta(x) = C\vartheta_1(x) + D\vartheta_2(x) = C\sin kx + D\cos kx, \tag{2.27}$$

де C і D – довільні постійні.

Друге часткове рішення $\vartheta_2(x) = \cos kx$ також можна отримати за формулою (2.16), знаючи перше рішення $\vartheta_1(x) = \sin kx$, а саме:

$$\vartheta_2(x) = \vartheta_1(x)\int \vartheta_1^{-2}(x)e^{-\int pdx}dx = \vartheta_1(x)\int \vartheta_1^{-2}(x)dx =$$
$$= \sin kx \times \int \frac{dx}{\sin^2 kx} = -\frac{1}{k}\sin kx ctgkx = -\frac{1}{k}\cos kx$$

в цьому випадку $p(x) = 0$).

Загальне рішення буде мати той же вигляд:

$$\vartheta(x) = C\vartheta_1(x) + D'(\vartheta_2) = C\sin kx - \frac{D'}{k}\cos kx =$$
$$= C\sin kx + D\cos kx,$$

де $D = -\frac{1}{k}D'$ – довільна стала.

Частковий розв'язок диференціального рівняння теплопровідності буде мати вигляд:

$$T(x,\tau) = C\sin kxe^{-ak^2\tau} + D\cos kxe^{-ak^2\tau}. \qquad (2.28)$$

Постійна k визначається з граничних, а постійні C і D– з початкових умов; вони приймають цілком певні значення в залежності від умов задачі.

Загальне рішення можна написати так:

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin k_n x \exp(-ak_n^2\tau) + \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos k_m x \exp(-ak_m^2\tau). \qquad (2.29)$$

Для розв’язання неоднорідного рівняння теплопровідності та неоднорідних граничних умов метод Фур’є непридатний.

Застосування цього методу стає можливим при перебудові задачі шляхом зведення межових умов до однорідних.

2.4.2. Метод функцій Гріна

Метод функцій Гріна [2] є універсальним, що дає змогу його застосовувати для розв'язання крайових задач теплопровідності при досить загальній постановці у різновимірних випадках, в обмежених, напівобмежених та обмежених областях, за однорідних початкових та граничних умов для неоднорідних рівнянь, як для нестаціонарної, так і для стаціонарної теплопровідності.

Ідея методу Гріна є досить простою – для розв'язання початкової задачі заходиться функція Гріна G (M, P, (τ-τ') і через її інтегральне представлення дається розв'язок крайової задачі теплопровідності.

При розгляді методу функцій Гріна будемо користуватися розв'язанням фундаментального рівняння теплопровідності:

$$G(x, y, z, x', y', z', \tau) = 1/(2\sqrt{\pi a \tau})^3 \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a\tau} \right]. \qquad (2.30)$$

Дане рівняння дає розподіл температури у точці (x, y, z) необмеженої області у момент часу τ, викликане миттєвим точковим джерелом теплоти потужністю $Q = cp$, діючим у точці (x', y', z') у момент часу $\tau = 0$.

Розглянемо точкові джерела теплоти постійної потужності уздовж лінії ($x = x'$, $y = y'$), паралельно осі z. Температуру, отриману від дії усіх цих джерел, визначимо проінтегрувавши за змінною z:

$$G(x, y, z, x', y', z', \tau) = \frac{Q}{c\rho\left(2\sqrt{\pi a \tau}\right)^3} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a\tau} \right]. \qquad (2.31)$$

Проінтегрувавши отримаємо:

$$G(x, y, x', y', \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y, z, x', y', z', \tau) dz = \frac{Q}{c\rho\left(2\sqrt{\pi a \tau}\right)^3} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4a\tau} \right], \qquad (2.32)$$

де Q – кількість теплоти, яка виділяється на одиниці довжини цієї прямої.

Фундаментальне розв'язання рівняння (2.32) для миттєво знайденого джерела потужністю Q в момент часу $\tau = 0$, в площині розташованій паралельно до площини $x = 0$, має вираз:

$$G(x, x', \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y, x', y', \tau)\, dy' = \frac{Q}{c\rho\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left[-\frac{(x - x')^2}{4a\tau}\right], \qquad (2.33)$$

де Q – теплота, яка виділяється на одиниці площі цієї площини.

При цьому розв'язання крайової задачі теплопровідності зводиться до пошуку відповідної функції Гріна.

Нехай $\theta(M, \tau)$ – температура деякого тіла, що займає область G_0, яка повинна бути знайдена у результаті розв'язання крайової задачі теплопровідності виду:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = a\nabla^2\theta(M,\tau) + f(M,\tau); M \in G_0; \tau > 0; \qquad (2.34)$$

$$\theta(M,\tau) = \phi_0(M); M \in G_0; \qquad (2.35)$$

$$\frac{\beta_1\partial\theta(M,\tau)}{\partial\bar{n}} - \beta_2\theta(M,\tau) = -\varphi(M,\tau); M \in S; \tau \geq 0, \qquad (2.36)$$

де $\bar{n}$ – зовнішня нормаль до S; $\beta_1^2 + \beta_2^2 > 0$; $f(M,\tau) \in \overline{G}$.

Розглянемо розподіл температури у деякій області G_0, під дією миттєвого точкового джерела теплоти потужністю $Q = cp$, розміщеного у точці $P(x', y', z')$ області G_0 у момент часу $(\tau\text{-}\tau')$. Температура в точці M області G_0 для часу $(\tau\text{-}\tau')$, описується функцією Гріна $G(M, P, (\tau\text{-}\tau'))$ і має наступний вигляд:

$$G(M,P,(\tau-\tau')) = \frac{1}{\left[2\sqrt{(\tau-\tau')}\right]^3 \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(\tau-\tau')}\right]} + q(M,P,(\tau-\tau')). \qquad (2.37)$$

Припустимо, що функція $G(M, P, (\tau\text{-}\tau'))$ має властивість симетрії відносно точок M, P, тобто $G(M, P, (\tau\text{-}\tau')) = G(P, M, (\tau\text{-}\tau'))$, що означає еквівалентність властивостей цієї функції за координатами точок M, P.

Розглянемо рівність:

$$\frac{\partial}{\partial\tau'}\left[\theta(M,\tau)G(M,P,(\tau-\tau'))\right] = \left(\frac{\partial\theta}{\partial\tau'}\right)G + \left(\frac{\partial G}{\partial\tau'}\right) = a(G\nabla^2\theta - \theta\nabla^2 G) + Gf. \qquad (2.38)$$

Проінтегруємо (2.36) за областю G_0 (координати точки M):

$$\iiint_{G_0}\frac{\partial}{\partial\tau'}[\theta,G]d\upsilon_M = a\iiint_{G_0}(G\nabla^2\theta-\theta\nabla^2 G)d\upsilon_M+\iiint_{G_0}Gfd\upsilon_M. \qquad (2.39)$$

Для оператора Лапласа використаємо формулу Гріна:

$$\iiint_{G_0}\frac{\partial}{\partial\tau'}[\theta,G]d\upsilon_M = -a\iiint_{G_0}\left[\theta(\frac{\partial G}{\partial n_M})-G(\frac{\partial\theta}{\partial n_M})\right]d\sigma_M+\iiint_{G_0}Gfd\upsilon_M. \qquad (2.40)$$

Дана рівність є справедливою для усіх ($\tau' < \tau$), а отже, його можна проінтегрувати за τ':

$$\int_0^\tau\iint_S\left[G(\frac{\partial\theta}{\partial n})-\theta(\frac{\partial G}{\partial n})\right]d\tau'd\sigma+\int_0^\tau\iiint_{G_0}f(P,\tau')G(M,P,(\tau-\tau'))d\tau'd\nu+\int_0^\tau\iiint_{G_0}+\iiint_{G_0}\phi_0(P)G(M,P,\tau)d\nu=\theta(M,\tau). \qquad (2.41)$$

Дана інтегральна формула для функції $\theta(M, \tau)$, дає уявлення про розв'язок довільних рівнянь теплопровідності (2.35) з початковою умовою (2.35).

Формула (2.41) не дає розв'язання крайової задачі (2.34), (2.36), так як для обчислення правої частини потрібно знати значення підінтегральної функції на поверхні S.

Необхідно, щоб функція G ($M, P, (\tau-\tau')$) на поверхні S задовольняла граничним умовам типу (51).

З (2.41) отримаємо формули для розв'язання згідно з видом граничних умов:

$$\theta(M,\tau)=\iiint_{G_0}\phi_0(P)G(M,P,\tau)d\nu+\int_0^\tau\iint_S\left[\theta(M,P,\tau,\tau')d\tau'd\sigma\right]+\int_0^\tau\iiint_{G_0}f(P,\tau')G(M,P,(\tau-\tau'))d\tau'd\nu, \qquad (2.42)$$

де

$$\theta(M,P,\tau,\tau')=\varphi(P,\tau')\partial G(M,P,(\tau-\tau'))/\partial n.$$

На всій або частині межевої поверхні S, на якій у (2.39) мають місце граничні умови I роду:

$$\theta(M,\tau)=\varphi(M,\tau);M\in S;\tau\geq 0;G(M,P,(\tau-\tau'))=0;\tau>\tau';$$

$$\theta(M,P,\tau,\tau')=\pm(1/\lambda)\varphi(M,\tau')\partial G(M,P,(\tau-\tau'));$$

II роду: $$\frac{\theta(M,\tau)}{\partial n} = (1/\lambda)\varphi(M,\tau); M \in S; \tau > 0;$$

$$\partial G(M,P,(\tau-\tau^{'}))/\partial n + (1/\lambda)G(M,P,(\tau-\tau^{'})) = 0;$$

III роду: $$\frac{\theta(M,\tau)}{\partial n} = (\alpha/\lambda)\theta(M,\tau) = (1/\lambda)\varphi(M,\tau); M \in S; \tau \geq 0;$$

$$\partial G(M,P,(\tau-\tau^{'}))/\partial n + (1/\lambda)G(M,P,(\tau-\tau^{'})) = 0,$$

де $G(M,P,(\tau-\tau^{'}))$ – функція Гріна відповідної крайової задачі.

Таким чином, для кожної з крайових задач встановлена інтегральна формула розв'язання і з'ясовано, яким умовам повинна задовольняти функція $\theta(M,P,(\tau-\tau^{'}))$ у вигляді (2.30) для її знаходження.

Фізична суть функції Гріна $G(M,P,(\tau-\tau^{'}))$ полягає у тому, що у кожній із крайових задач вона являє собою температуру у точці M у момент часу τ, яка виникає під дією миттєвого точкового джерела теплоти потужністю $Q = c\rho$, діючого у точці P у момент часу $\tau^{'}$ за умови, що на межі досліджуваного тіла в усі наступні моменти часу $\tau > \tau^{'}$ виконуються однорідні умови, відповідні до нульових значень межових значень межових функцій крайової задачі.

Метод функцій Гріна широко застосовується і для розв'язання крайових задач стаціонарної теплопровідності, у цьому випадку метод є частиною теорії потенціалу [11].

2.4.3. Метод інтегральних перетворень

Рішення, які одержують класичними методами, не завжди зручні для практичного використання. Часто достатньо мати просте наближене рішення, яке отримати з класичних рішень досить важко. На відміну від класичних методів, метод інтегральних перетворень має ряд суттєвих переваг – це можливість безпосереднього застосування методу як до однорідних, так і до неоднорідних крайових задач, єдність методики та значне спрощення викладення у зв'язку із простішою технікою обчислення [3].

Метод перетворення Лапласа полягає в тому, що вивчається не сама функція, а її видозміна. Це перетворення здійснюється за допомогою множення на експотенційну функцію і інтегрування її в певних межах.

Тому перетворення Лапласа є інтегральним перетворенням.

Інтегральне перетворення $f_L(s)$ функції $f(\tau)$ визначається формулою:

$$f_L(s) = \int_0^{\infty} f(\tau) e^{-s\tau} d\tau = L[f(\tau)], \tag{2.43}$$

де $f(\tau)$ є оригіналом функції, а $f_L(s)$ – її видозміною, яка позначається у вигляді $L[f(\tau)]$. Тут s може бути комплексним числом.

Для того що б видозмінена функція існувала, інтеграл (2.43) повинен сходитись. Це накладає певні обмеження на функцію $f(\tau)$.

Якщо задача розв'язана в оберненій функції, то знаходження оригінальної функції за оберненою (зворотне перетворення) в загальному випадку виконується за формулою обернення:

$$f(\tau) = L^{-1}[f_L(s)] = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} f_L(s) e^{s\tau} ds. \tag{2.44}$$

Інтегрування відбувається в комплексній площині $s = \xi + i\eta$ вздовж прямої $\sigma = const$, паралельній умовній осі.

Дійсні числа ξ вибираються так, що б всі точки підінтегрального виразу в (2.44) лежали в лівій півплощині комплексної площини $s \cdot (\mathrm{Re}\, s \geq s_1 > \sigma_0)$.

В більшості випадків зворотне перетворення можна здійснити, не вдаючись до контурного інтегрування, а скориставшись таблицями.

Знаходження оригіналу функції за її оберненням може бути виконане особливо швидко, якщо обернена функція збігається з однією із функцій, що міститься в таблицях.

Замість формули (2.44) для визначення оригінала функції за її оберненням можна скористатись наступною формулою обернення:

$$f(\tau)=\lim_{n\to\infty}\left[\frac{(-1)^n}{n!}\left(\frac{n}{\tau}\right)^{n+1}f_L^{(n)}\left(\frac{n}{\tau}\right)\right]. \tag{2.45}$$

Дана формула дає можливість отримати оригінал функції лише за допомогою операцій диференціювання і переходу до границі:

1. Якщо обернена функція представляє собою дробну функцію s:

$$f_L(s)=\frac{\varphi(s)}{\psi(s)}=\frac{A_0+A_1s+A_2s^2+\ldots}{B_1s+B_2s^2+\ldots}, \tag{2.46}$$

яка є окремим випадком двох цілих трансцендентних функцій, то за теоремою розкладання маємо:

$$f(\tau)=L^{-1}\left[\frac{\varphi(s)}{\psi(s)}\right]=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\varphi(s_n)}{\psi'(s_n)}e^{s_n\tau}. \tag{2.47}$$

де s_n – прості корені функції $\psi(s)$; при цьому знаменник має безліч простих коренів і не містить вільного члена за умови, що $A_0 \neq 0$, для цього необхідно, щоб існував інтеграл (2.44) від функції $f_L(s)$.

2. Якщо обернена функція $f_L(s)$ представляє собою відношення двох поліномів (дробно-раціональна функція), причому ступінь полінома $\varphi(s)$ менше ступіні полінома $\psi(s)$ і поліном $\psi(s)$ має корені кратності k в точках s_m, то:

$$f(\tau)=L^{-1}\left[\frac{\varphi(s)}{\psi(s)}\right]=\sum_m\frac{1}{(k-1)!}\lim_{s\to s_m}\left\{\frac{d^{k-1}}{ds^{k-1}}\left[\frac{\varphi(s)(s-s_m)^k}{\varphi(s)}e^{s\tau}\right]\right\}, \tag{2.48}$$

де сума береться за всіма кореням $f_L(s)$. Якщо корені $\psi(s)$ прості, тобто всі k рівні одиниці, то формула (2.47) переходить в (2.48).

Розглянемо диференціальне рівняння теплопровідності для одномірного потоку тепла в пластині, що має вид:

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial\tau}=a\frac{\partial^2T(x,\tau)}{\partial x^2}. \tag{2.49}$$

Застосуємо перетворення Лапласа щодо змінної τ:

$$L\left[\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau}\right] = aL\left[\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2}\right], \tag{2.50}$$

звідки отримаємо однорідне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами щодо видозмінної функції:

$$a\frac{d^2 T_L(x,s)}{dx^2} - sT_L(x,s) + u(x) = 0, \tag{2.51}$$

де функція $u(x)$ описує початкове розподілення температури:

Розглянемо випадок, коли:

$$T(x,0) = u(x) = 0 \tag{2.52}$$

тобто в початковий момент часу температура у всіх точках була однакова і рівна нулю.

Тоді рівняння (2.51) прийме вид:

$$T''_L(x,s) - \frac{s}{a}T_L(x,s) = 0. \tag{2.53}$$

Рішення диференціального рівняння (2.53) можна написати безпосередньо, а саме:

$$T_L(x,s) = Ach\sqrt{\frac{s}{a}}x + Bsh\sqrt{\frac{s}{a}}x = A_1 e^{\sqrt{\frac{s}{a}}x} + B_1 e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}x}, \tag{2.54}$$

де A, B, $A_1 = \frac{A+B}{2}$ і $B_1 = \frac{A-B}{2}$ – постійні відносно x, що залежать від s величини.

Якщо задані граничні умови, то, визначивши постійні A і B, або A_1 и B_1, за допомогою таблиці видозміненних функцій чи теореми розкладання знаходимо оригінал функції $T(x, \tau)$.

Розглянемо ту ж задачу, але при початковому розподілі температури як деякої функції x, тобто:

$$T(x,0) = u(x) \tag{2.55}$$

Після застосування перетворення Лапласа щодо змінної τ до диференціального рівняння (2.50) отримаємо диференціальне рівняння для видозміненої функції (2.51):

$$aT''_L(x,s) - sT_L(x,s) + u(x) = 0. \tag{2.56}$$

Рішення цього неоднорідного рівняння легко одержати стандартними методами, наприклад методами варіації довільних сталих.

Рівняння має вигляд:

$$T_L(x,s) = Ach\sqrt{\frac{s}{a}}x + Bsh\sqrt{\frac{s}{a}}x + \sqrt{\frac{a}{s}}ch\sqrt{\frac{s}{a}}x\int_0^x u(\xi)sh\sqrt{\frac{s}{a}}\xi d\xi - \sqrt{\frac{a}{s}}sh\sqrt{\frac{s}{a}}x\int_0^x u(\xi)ch\sqrt{\frac{s}{a}}\xi d\xi. \tag{2.57}$$

Після визначення довільних постійних A і B з граничних умов рішення задачі зведеться до визначення оригіналу функції за видозмінною $T_L(x, s)$.

Якщо в початковий момент часу температура у всіх точках однакова і дорівнює T_0, тобто $u(x) = T_0 = const$, то із (2.57) отримаємо:

$$T_L(x,s) - \frac{T_0}{s} = A'ch\sqrt{\frac{s}{a}}x + B'sh\sqrt{\frac{s}{a}}x = A'_1 e^{\sqrt{\frac{s}{a}}x} + B'_1 e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}x}, \tag{2.58}$$

де

$$A' = T_L(0,s) - \frac{T_0}{s} = A - \frac{T_0}{s}; \tag{2.59}$$

$$B' = B, \tag{2.60}$$

$$A'_1 = \frac{A'+B'}{2},\ B'_1 = \frac{A'-B'}{2}. \tag{2.61}$$

До цього ж результату можна було б прийти, якщо в диференціальному рівнянні (2.56) при постійній початковій температурі $u(x) = T_0 = const$ зробити заміну змінної $T_L(x,s) = U(x,s) - \frac{T_0}{s}$, в результаті чого рівняння (2.56) перетворилося б у рівняння (2.53), а рішення останнього відомо.

Оскільки A', B', A'_1, B'_1 – постійні щодо x і визначаються з граничних умов, то верхні індекси можна відкинути і написати рішення диференціального рівняння (2.53) при постійній початковій температурі в такому вигляді:

$$T_L(x,s) - \frac{T_0}{s} = Ach\sqrt{\frac{s}{a}}x + Bsh\sqrt{\frac{s}{a}}x = A_1 e^{\sqrt{\frac{s}{a}}x} + B_1 e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}x}. \qquad (2.62)$$

Постійні A і B кожного разу визначаються з відповідних граничних умов. Найбільша складність в рішенні рівняння теплопровідності для різноманітних крайових умов полягає в знаходженні оригіналу за отриманою видозміненою функцією T_L.

Застосування інтегрального перетворення Лапласа до розв'язування рівняння теплопровідності має ряд переваг перед класичними методами інтегрування диференціальних рівнянь і перед деякими іншими методами інтегральних перетворень.

По-перше, процес застосування інтегрального перетворення Лапласа однотипний для задач різного характеру і різних форм тіла, спосіб вирішення є більш прямим, що не вимагає особливого підходу до вирішення кожного нового типу задач.

По-друге, інтегральні перетворення Лапласа дозволяють однаково добре вирішувати завдання при граничних умовах першого, другого, третього і четвертого родів, без застосування будь-яких нових допущень або перетворень.

По-третє, наявність великого числа простих теорем дозволяє отримати найбільш відповідний розв’язок для конкретного типу задач; зокрема, отримувати рішення у формі, зручній для розрахунку при малих і великих значеннях часу.

По-четверте, цей метод дозволяє особливо легко вирішувати завдання з простими початковими умовами; найбільш ефективно використання перетворення Лапласа за тимчасовою координатою, а також за просторовою координатою для тіл, що мають необмежену або напівобмежену протяжність.

По-п'яте, ефективність вирішення різноманітних завдань методом перетворення Лапласа в значній мірі посилюється наявністю вельми докладних таблиць видозмінених функцій.

Інтегральне перетворення Лапласа має свої недоліки. Зокрема, труднощі виникають при вирішенні завдань, коли початкові умови задані у вигляді функції просторових координат, або при вирішенні деяких багатовимірних задач. У цьому зв'язку було запропоновано ряд методів інтегральних перетворень за просторовими координатами відповідно до геометричної форми тіла. Якщо перетворення береться за просторовою координатою *x*, то інтегральне перетворення функції *f(x)* може бути представлено так:

$$\left[f(p)\right]_{F,H} = \int_0^{\infty} K(p,x)\, f(x)\, dx. \qquad (2.63)$$

Якщо ядро перетворення *K(p, x)* береться у вигляді $\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sin\ \rho x$ чи $\sqrt{\frac{2}{\pi}}\cos \rho x$, то це інтегральне перетворення відповідно називається синус або косинус перетворенням Фур'є.

Якщо ж ядром перетворення обрана функція Бесселя $K(p, x) = xJ_\nu(px)$, то воно носить назву перетворення Ханкеля. В окремому випадку, якщо межі інтегрування змінюються від $-\infty$ до $+\infty$, а ядро має вигляд $K(p,x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(ipx)$, то отримуємо комплексне інтегральне перетворення Фур'є.

Комплексне перетворення Фур'є зручно застосовувати для тіл необмеженої довжини, синус-перетворення Фур'є слід використовувати, коли на поверхні тіла задано значення функції, тобто мають місце граничні умови першого роду, а косинус-перетворення Фур'є – коли вирішуються диференціальні рівняння переносу при граничних умовах другого роду.

Перетворення Ханкеля застосовуються в тому випадку, коли тіло має осьову симетрію. Практичне застосування названих інтегральних перетворень після появи таблиць видозмінених функцій не викликає особливих складностей.

У тих випадках, коли використання перетворень Фур'є виправдано, а табличні значення видозмінених функцій відсутні, оригінали видозмінених функцій можна знайти за наступними досить простими формулами перетворень для:

комплексного перетворення Фур'є

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[f(p)\right]_F \exp(-ipx)dp, \tag{2.64}$$

синус-перетворення Фур’є

$$f(x)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_{0}^{\infty}\left[f_S(p)\right]_{F_S} \sin pxdp, \tag{2.65}$$

косинус-перетворення Фур’є

$$f(x)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_{0}^{\infty}\left[f_C(p)\right]_{F_C} \cos pxdp, \tag{2.66}$$

перетворення Ханкеля

$$f(r)=\int_{0}^{\infty} r\left[f_\nu(p)\right]_H J_\nu(pr)dp. \tag{2.67}$$

Особливістю названих перетворень є те, що верхня межа інтегрування дорівнює нескінченності. Якщо в перетворенні Лапласа (2.43), яке в більшості випадків застосовується по відношенню до тимчасової координати, нескінчена межа інтегрування обумовлена самим ходом нестаціонарного часового процесу, то в перетвореннях Фур'є і Ханкеля (2.64) – (2.67) за просторовими координатами наявність нескінченної межі звужує коло застосування цих методів. Іншими словами, інтегральне перетворення (2.64) – (2.67) успішно можна застосовувати тільки для тіл напівобмеженої області. Крім того, слід зазначити, що при використанні перетворень Фур'є, особливо «синус та косинус-перетворень», необхідно звертати увагу на збіжність інтегралів, так як умови збіжності тут стають більш жорсткими, ніж умови збіжності відповідних інтегралів для перетворення Лапласа [5].

2.5. Чисельні методи оцінки температури різання

Аналітичні методи дозволяють ефективно вирішувати порівняно вузьке коло задач теорії теплопровідності. При розгляді систем диференціальних рівнянь з загальними крайовими умовами точні методи вирішення наштовхуються на великі труднощі, які стають нездоланними при розгляді нелінійних задач.

У цих випадках необхідно звертатися до тих чи інших чисельних методів рішення. Використання чисельних методів часто дозволяє відмовитися від спрощеної трактовки математичної моделі процесу.

2.5.1. Метод скінчених елементів

Основна ідея методу скінчених елементів (МСЕ) полягає в тому, що безперервна функція апроксимується кусково-неперервною функцією, яка визначена на множині скінчених елементів.

Апроксимація задається поліномами, які підбираються з такою умовою, щоб забезпечити неперервність функції в вузлах на границі елементів.

Рішення кінцевої системи рівнянь здійснюється прямими методами, основною проблемою в даному випадку, являється висока розрідженість кінцевої системи алгебраїчних рівнянь.

Тому на практиці МСЕ потребує спеціальних способів зберігання матриці коефіцієнтів, а також методів рішення з врахуванням специфіки її структури [12, 36].

Алгоритм МСЕ в загальному випадку складається із чотирьох етапів:

1. Розбивка базової моделі на кінцеві елементи;

2. Для кожного елемента системи визначається апроксимуюча функція.

На даному етапі значення безперервної функції φ_n у будь-якій точці n-го кінцевого елемента апроксимують поліномом:

$$\varphi_n = A_n R + A_0 \tag{2.68}$$

де A_n – вектор-рядок коефіцієнтів полінома; A_0 – вільний член; $R = (x, y, z)$ – вектор координат в точці, що розглядається.

Для того, щоб визначити невідомий вектор A_n і вільний член A_0, використовується умова безперервності функції у вузлах, через вектор Φ_n виражають коефіцієнт полінома вузлових значень функції і координати вузлів:

$$\varphi_n = N_n \cdot \Phi_n \tag{2.69}$$

де N_n – матриця рядок, елементи якої називаються функціями форми кінцевого елемента.

Функцію форми досить легко обчислити в кожній точці кінцевого елемента через координати самої точки і координати вузлів елемента.

3. Об’єднання скінчених елементів в систему – на даному етапі рівняння (2.69), яке відноситься до окремих елементів, об’єднуються в систему:

$$\varphi_n = N \cdot \Phi,$$

яка є моделлю шуканої безперервної функції.

4. Найбільш складний етап в МСЕ – визначення вектора Ф вузлових значень функції.

Для його реалізації розроблено декілька алгоритмів, один з яких оснований на мінімізації функціоналу, пов’язаного з фізичним сенсом задачі.

Для стаціонарної задачі вибір функціонала χ залежить від шуканої функції φ_i її часткових похідних за просторовими координатами:

$$\chi = \int_V f(\varphi, \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z}) dV, \tag{2.70}$$

де V – об’єм області, що розраховується.

Функціонал χ представляють сумою відповідних функціоналів χ_i, що відносяться до окремих скінчених елементів

$$\chi = \sum_{i=1}^{N} \chi_i = \sum_{i=1}^{N} \int_V f(\varphi_i(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x}), (\frac{\partial \varphi_i}{\partial y}), (\frac{\partial \varphi_i}{\partial z})), \tag{2.71}$$

де N – число елементів.

Для визначення похідних підставимо апроксимуючий вираз (2.69) в (2.71):

$$\frac{\partial \varphi_n}{\partial x} = (\frac{\partial N}{\partial x})\Phi_n. \tag{2.72}$$

Для мінімізації функціоналу χ за вектором Ф складають рівняння виду:

$$\frac{\partial \chi_n}{\partial \Phi_n} = 0, \tag{2.73}$$

додавання яких по кінцевим елементам приводить до системи алгебраїчних рівнянь:

$$K \cdot \Phi = F, \tag{2.74}$$

де K – матриця коефіцієнтів впливу; F – вектор навантаження.

Після чого відбувається рішення системи (2.74) відносно невідомого вектора Ф вузлових значень.

Знайдені значення вектора Φ підставляються в (2.69), після чого значення функції φ легко обчислюються в будь-якій точці заданої області.

Найбільш часто в якості апроксимуючої функції елементів використовують поліноми.

В залежності від цього, кінцеві елементи діляться на симплекс-, комплекс- і мультиплекс елементи.

Розглянемо двовимірний симплекс-елемент (рис. 2.10).

Інтерполяційний поліном, що апроксимує безперервну функцію Φ всередині трикутного симплекс-елемента, має вигляд:

$$\Phi = a_1 + a_2 x + a_3 y \tag{2.75}$$

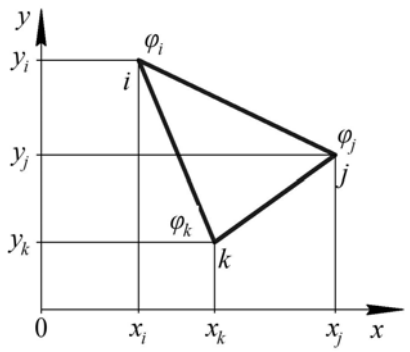


Рис. 2.10. Двовимірний симплекс-елемент у вигляді плоского трикутника з прямолінійними сторонами

Вузлові значення визначаються системою рівнянь на основі умов безперервності шуканої функції:

$$\begin{cases} \Phi = a_1 + a_2 X_i + a_3 Y_i; \\ \Phi = a_1 + a_2 X_j + a_3 Y_j; \\ \Phi = a_1 + a_2 X_k + a_3 Y_k. \end{cases} \tag{2.76}$$

В подальшому вирішуючи систему (2.76) відносно невідомих коефіцієнтів полінома отримаємо:

$$\begin{cases} a_1 = (\dfrac{0{,}5}{S})\begin{bmatrix} (X_j Y_k - X_k Y_j)\Phi_i + (X_k Y_i - X_i Y_k)\Phi_j + \\ + (X_i Y_j - X_j Y_i)\Phi_k \end{bmatrix}; \\ a_2 = (\dfrac{0{,}5}{S})\left[(Y_j - Y_k)\Phi_i + (Y_{ki} - Y_i)\Phi_j + (Y_i - Y_j)\Phi_k\right]; \\ a_3 = (\dfrac{0{,}5}{S})\left[(X_k - X_j)\Phi_i + (X_i - X_k)\Phi_j + (X_i - X_j)\Phi_k\right], \end{cases} \tag{2.77}$$

де S – площа елемента-аналога об’єму в формулах (2.70), (2.71), яка розраховується за формулою:

$$S = 0{,}5\left[X_i(Y_j - Y_k) + X_j(Y_k - Y_i) + X_k(Y_i - Y_j)\right]. \tag{2.78}$$

Підставляючи (2.77) в (2.75), отримаємо:

$$\varphi = N_i\Phi_i + N_j\Phi_j + N_k\Phi_k, \tag{2.79}$$

де:

$$N_i = (\frac{0,5}{S})(a_i + b_i x + c_i y);$$
$$N_j = (\frac{0,5}{S})(a_j + b_j x + c_j y); \qquad (2.80)$$
$$N_k = (\frac{0,5}{S})(a_k + b_k x + c_k y).$$

і

$$a_i = X_j Y_k - X_k Y_j; \qquad b_i = Y_j - Y_k; \qquad c_i = X_k - X_j;$$
$$a_j = X_k Y_i - X_i Y_k; \qquad b_j = Y_k - Y_i; \qquad c_j = X_i - X_k;$$
$$a_k = X_i Y_j - X_j Y_i; \qquad b_k = Y_i - Y_j; \qquad c_k = X_i - X_j.$$

Розраховуючи значення функції форми N_i, N_j, N_k, можемо побачити, що вони рівні одиниці в вузлах з відповідними номерами і нулю в усіх інших елементах вузла.

Аналогічно розраховуються усі інші елементи моделі в залежності від відповідного програмного забезпечення методу.

Головне місце на етапі об'єднання скінчених елементів в єдину систему (рис. 2.11) займає заміна довільних назначених номерів вузлів *i*, *j*, *k* на номери, які присвоюються вузлам в процесі розбиття області моделі.

Дана заміна призводить до появи системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволяє при відомих вузлових значеннях шуканої функції отримати її значення в будь-якій точці моделі [2, 3].

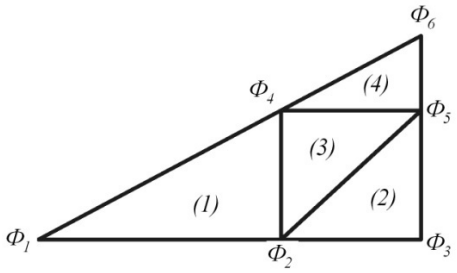


Рис. 2.11. Приклад об'єднання елементів трикутної форми в систему

Розглянемо використання МСЕ для розрахунку нестаціонарного температурного поля.

Двовимірне нестаціонарне лінійне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\lambda_x(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}) + \lambda_y(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + Q = \omega(\frac{\partial T}{\partial t}). \tag{2.81}$$

де величина $\omega = c\rho$, де c – питома теплоємність, Дж/(м^3·К); ρ – густина, (кг/м^3);

Граничні умови:

$$T = T_в \text{ на } S_1; \tag{2.82}$$

$$\lambda_x(\frac{\partial T}{\partial x})l_x + \lambda_y(\frac{\partial T}{\partial y})l_y + \lambda_z(\frac{\partial T}{\partial z})l_z + q + \alpha(T - T_c) = 0 \text{ на } S_2, \tag{2.83}$$

де T – температура; λ_x, λ_y, λ_z, – коефіцієнти теплопровідності в напрямку x, y, z; Q – джерело тепла; α – коефіцієнт конвективного теплообміну; T_c – температура навколишнього середовища; q – тепловий потік; l_x, l_y, l_z – направляючі косинуси нормалі до поверхні.

При використанні методу МСЕ функціонал χ матиме вигляд:

$$\chi = \int_V \frac{1}{2}\left[\lambda_x(\frac{\partial T}{\partial x})^2 + \lambda_y(\frac{\partial T}{\partial y})^2 + \lambda_z(\frac{\partial T}{\partial z})^2 - 2(Q - \omega\frac{\partial T}{\partial t})\cdot T\right]dV + \int_{S_1} qT dS + \int_{S_2}\frac{\alpha}{2}\cdot\left(T^2 - 2TT_c + T_c^2\right)dS \tag{2.84}$$

В результаті мінімізації отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$[C](\frac{\partial\{T\}}{\partial t}) + [K]\{T\} + \{F\} = 0. \tag{2.85}$$

Рівняння (2.85) представляє собою систему диференціальних рівнянь першого порядку.

Вклад кожного елемента в матрицях [K], [C] і {F} виражається формулами:

$$\left[C^{(e)}\right] = \int_V \omega\left[N\right]^T\left[N\right]dV\ ; \tag{2.86}$$

$$\left[k^{(e)}\right] = \int_V [D][B]^T[B]dV + \int_{S_2}\alpha[N]^T[N]dS; \tag{2.87}$$

$$\left[f^{(e)}\right] = -\int_V Q[N]^T dV + \int_{S_1} q[N]^T dS - \int_{S_2}\alpha[N]^T T_c dS. \tag{2.88}$$

Для двовимірного симплекс-елемента [C] визначається наступним чином:

$$\left[C^{(e)}\right]=\frac{\omega A}{12}\begin{bmatrix}2 & 1 & 1\\ 1 & 2 & 1\\ 1 & 1 & 2\end{bmatrix}, \tag{2.89}$$

де A – площа поперечного перерізу елемента.

Щоб отримати значення температури $\{T\}$ в кожній точці часового інтервалу, скористаємось заміною часткової похідної за часом її кінцево-різницевим аналогом.

Для першої похідної в середній точці інтервалу t_1–t_2 отримаємо співвідношення:

$$\frac{d\{T\}}{dt}\left(\frac{1}{\Delta t}\right)\left(\{T\}_1-\{T\}_0\right). \tag{2.90}$$

Для середньої точки часового інтервалу формули для $\{T\}$ і $\{F\}$ запишуться:

$$\{T\}=\left(\frac{1}{2}\right)\left(\{T\}_1+\{T\}_0\right); \tag{2.91}$$

$$\{F\}=\left(\frac{1}{2}\right)\left(\{F\}_1+\{F\}_0\right). \tag{2.92}$$

Підставляючи вирази (2.90)–(2.92) в диференційне рівняння (2.85) отримаємо співвідношення:

$$\left([K]+\left(\frac{2}{\Delta t}\right)[C]\right)\{T\}_1=\left(\left(\frac{2}{\Delta t}\right)[C]-[K]\right)\{T\}_0-2\{F\}. \tag{2.93}$$

Враховуючи, що вузлові значення в момент часу t відомі, то значення для моменту часу $t+\Delta t$ можна отримати вирішуючи рівняння (2.93). Значення комбінацій матриць [C] і [K] залежить від кроку за часом Δt.

2.5.2. Метод скінчених різниць

Метод скінчених різниць заснований на заміні похідних їх наближеним значенням, вираженим через різниці значень функції в окремих дискретних точках – вузлах сітки. Диференціальне рівняння в результаті таких перетворень замінюється еквівалентним співвідношенням в скінчених різницях, рішення якого зводиться до виконання нескладних алгебраїчних операцій.

Остаточний результат рішення подається виразом, відповідно до якого значення «майбутнього» потенціалу (температури) в даній точці (вузлі) є функцією часу, її «справжнього» потенціалу та «справжнього» потенціалу суміжних вузлових точок.

Повторюваність однакових операцій при розрахунку полів температури створює зручності для застосування сучасної обчислювальної техніки, завдяки чому ефективність обчислювання збільшується. Наближену заміну першої та другої похідних через різничні відношення можна провести таким чином.

Нехай дана функція $y = f(x)$, графік якої наведений на рисунку 2.12 [2].

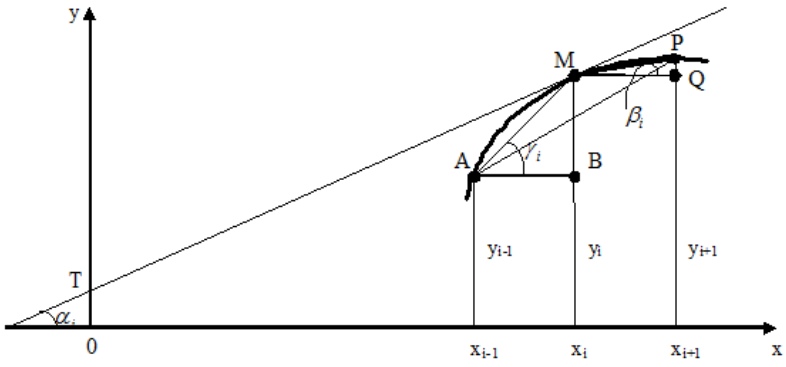


Рис. 2.12. Визначення похідної функції f(x)

Якщо через α_i позначити кут, утворений з позитивним напрямом осі абсцис дотичної до кривої, проведеної в точці $M(x_i, y_i)$, то похідна функція при $x = x_i$ визначається за формулою:

$$y'_i = tg\alpha_i. \qquad (2.94)$$

Візьмемо на кривій дві сусідні точки $A(x_{i-1}, y_{i-1})$ и $P(x_{i+1}, y_{i+1})$ так, щоб різниці $x_i - x_{i-1} = x_{i+1} + x_i = h$ були б досить малі, і наближено замінимо α_i на β_i чи γ_i (або, що те ж саме, розглянемо замість дотичної *MT* одну з січних *MP* або *AM*).

Тоді:

$$y'_i \approx tg\beta_i = \frac{QP}{MQ} = \frac{y_{i+1} - y_i}{h}, \tag{2.95}$$

або

$$y'_i \approx tg\gamma_i = \frac{BM}{AB} = \frac{y_i - y_{i-1}}{h}. \tag{2.96}$$

Якщо кутовий коефіцієнт дотичної *MT* наближено замінити кутовим коефіцієнтом січної *AP*, то:

$$y'_i \cong \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h}. \tag{2.97}$$

Праві частини формул (2.95) – (2.97) називаються відповідно: різницевим відношенням вперед, різницевим відношенням назад і симетричним різницевим відношенням.

Наближене значення другої похідної y''_i функції $y = f(x)$ при $x = x_i$ може бути отримано, якщо замінити криву на ділянці *AP* ламаною лінією *AMP*, яка має в точці *M* два нахили, тобто:

$$y''_i \approx \frac{1}{h}\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h}\right) = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2}. \tag{2.98}$$

Наведені формули (2.96)–(2.98) заміни похідних різницевими відношеннями не є єдино можливими. Іноді буває доцільно проводити інші заміни, однак при чисельному інтегруванні рівнянь теплопровідності найбільш часто застосовують саме ці формули.

Розглянемо, наприклад, одномірне рівняння теплопровідності для ізольованого тонкого стержня довжиною *L*:

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2},\ (0 \le x \le L). \qquad (2.99)$$

Так як функція T (x, τ) залежить від двох змінних x і τ, то використовуємо сітку прямокутного типу (рис. 2.13). На осі абсцис відкладаємо відрізок довжиною L і ділимо його на n рівних частин.

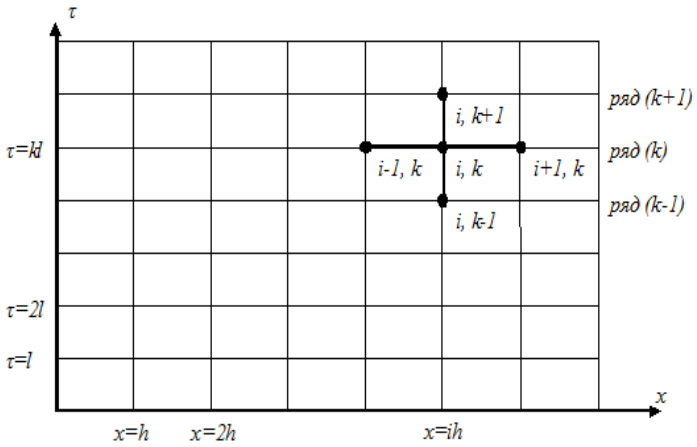


Рис. 2.13. Схема розрахунку за сіткою прямокутного типу

Отриманий крок на осі абсцис позначимо через $h = L/n$. Точки поділу (вузли) на осі x мають абсциси $x = 0$, $x = h$,…, $x = L$.

По осі ординат відкладемо значення часу τ через рівні проміжки l. Проводимо через отримані вузли на осях ординат прямі, паралельні координатним осям, які утворюють прямокутну сітку. Значення T у вузлах, що лежать на осях координат і на прямій, паралельній осі ординат і розташованої від неї на відстані L, знаходиться з початкового і граничних умов.

Чисельне інтегрування рівняння (2.99) за методом сіток полягає в знаходженні наближеного значення функції T в кожному вузлі сітки.

Позначимо через $T_{i,k}$ істинне значення температури в точці стержня $x = ih$ в момент $\tau = kl$, тобто у вузлі, відміченому на рисунку 21, символом i, k.

Замінимо частинні похідні $\partial T/\partial \tau$ і $\partial^2 T/\partial x^2$ в точці (ih, kl) через різницеві відношення за (2.95) (2.98):

$$\frac{\partial T_{i,k}}{\partial \tau} = \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{l} + \varepsilon_1; \qquad (2.100)$$

$$\frac{\partial^2 T_{i,k}}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1,k} - 2T_{i,k} + T_{i+1,k}}{h^2} + \varepsilon_2, \tag{2.101}$$

де ε_1 і ε_2 – залишкові члени, що прямують до нуля l і h. Тоді у вузлі (ih, kl) диференціальне рівняння (2.99) заміниться наступним співвідношенням:

$$\frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{l} + \varepsilon_1 = \frac{T_{i-1,k} - 2T_{i,k} + T_{i+1,k}}{h^2} + \varepsilon_2 \tag{2.102}$$

або

$$T_{i,k+1} = \left(1 - \frac{2la}{h^2}\right) T_{i,k} + \frac{la}{h^2}\left(T_{i-1,k} + T_{i+1,k}\right) + lR, \tag{2.103}$$

де $R = a\varepsilon_2 - \varepsilon_1$.

Відкидаючи в (2.103) залишковий член lR, отримуємо різницеве рівняння:

$$\vartheta_{i,k+1} = \left(1 - \frac{2la}{h^2}\right) \vartheta_{i,k} + \frac{la}{h^2}\left(\vartheta_{i-1,k} + \vartheta_{i+1,k}\right), \tag{2.104}$$

в якому через $\vartheta_{i,k}$ позначено наближене значення величини $T_{i,k}$ в тому ж вузлі (ih, kl).

Формула (2.104) дозволяє обчислити значення ϑ у вузлах горизонтального ряду (k + 1) за значенням ϑ, що знаходяться тільки в одному попередньому ряду (k). Тому за допомогою формули (2.104) можна знайти значення ϑ у вузлах першого горизонтального ряду (при τ = 1) за відомими з крайових умов значенням температури у вузлах самої осі 0x (при τ = 0).

Отримавши таким чином значення ϑ в першому ряду, за тією ж формулою знаходимо значення у вузлах другого горизонтального ряду (при $\tau = 2l$).

Цей процес побудови можна продовжувати як завгодно далеко, так як значення температури у вузлах прямих $x = 0$ і $x = L$ буде відоме з граничних умов.

Розглянута сітка для чисельного інтегрування рівняння (2.99) зручна, коли завдання вирішується при граничних умовах першого роду: у цьому випадку граничні прямі $x = 0$ і $x = L$ належать самій сітці.

Якщо рівняння вирішується при граничних умовах третього роду, практика обчислень показує, що для підвищення точності визначення потенціалу на кордонах, слід вводити додаткові вузлові точки, що лежать поза досліджуваною областю.

Вирішуючи рівняння (2.99) при граничних умовах:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \frac{\alpha}{\lambda}[T(0,\tau) - T_C],\ \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = -\frac{\alpha}{\lambda}[T(L,\tau) - T_C]. \tag{2.105}$$

Сітку треба будувати таким чином, щоб права гранична пряма лежала б посередині між двома прямими $x = x_n$ і $x = x_{n+1}$, а ліва посередині між двома прямими $x = x_0$ і $x = x_1$ (рис. 2.14) ($x = h/2$), тобто вводяться значення $\vartheta_{n+1,k}$ і $\vartheta_{0,k}$ – значення функції для точок, що лежать поза досліджуваною областю.

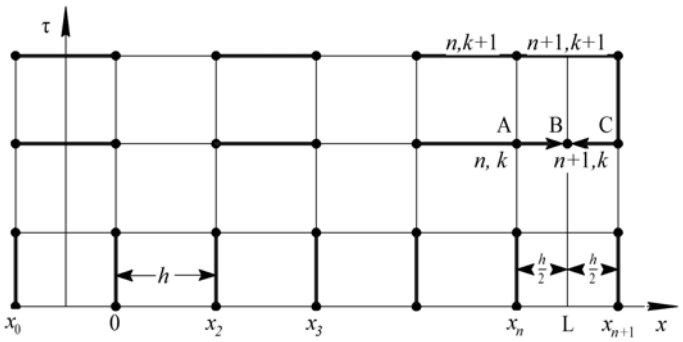


Рис. 2.14. Розрахункова схема для задачі нестаціонарної теплопровідності (граничні умови третього роду)

Похідну $(\partial T/\partial x)_{x=L}$, що входить в другу умову (2.105), тобто в точці $B(L,kl)$, замінюємо симетричним різницевим відношенням:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = \frac{T_{n+1,k} - T_{n,k}}{h/2 + h/2} + \varepsilon', \tag{2.106}$$

а значення температури на самій поверхні, тобто T (L, kl), беремо як середнє арифметичне значення температур у точках A і C:

$$T(L,kl) = \frac{T_{n,k} + T_{n+1,k}}{2}. \tag{2.107}$$

Тоді умова (2.106) запишеться так:

$$\frac{T_{n+1,k}-T_{n,k}}{h}+\varepsilon'=-\frac{\alpha}{\lambda}\left[\frac{T_{n,k}+T_{n+1,k}}{2}-T_C\right] \tag{2.108}$$

або переходячи до наближених значень ϑ, отримаємо після перетворень:

$$\vartheta_{n+1,k}=\frac{\left(1-\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}\right)\vartheta_{n,k}+h\frac{\alpha}{\lambda}T_C}{1+\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}}. \tag{2.109}$$

За цією формулою і знаходиться наближені значення функції у вузлах допоміжної прямої $x = L + h/2$.

Значення ж температури на самій граничній прямій $x = L$ визначається за формулою:

$$\vartheta(L,kl)=\frac{\vartheta_{n,k}+\vartheta_{n+1,k}}{2} \tag{2.110}$$

або після перетворення:

$$\vartheta(L,kl)=\frac{\vartheta_{n,k}+\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}T_C}{1+\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}}=\frac{2S\vartheta_{n,k}+hT_C}{2S+h}, \tag{2.111}$$

де $S = \lambda/2$.

Значення температури у вузлах допоміжної прямої $x = –h/2$ знаходиться за формулою:

$$\vartheta_{0,k}=\frac{\left(1-\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}\right)\vartheta_{1,k}+h\frac{\alpha}{\lambda}T_C}{1+\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}}. \tag{2.112}$$

На лівій поверхні отримаємо:

$$\vartheta(0,kl)=\frac{\vartheta_{1,k}+\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}T_C}{1+\frac{h}{2}\frac{\alpha}{\lambda}}=\frac{2S\vartheta_{1,k}+hT_C}{2S+h}. \tag{2.113}$$

Метод скінчених різниць дозволяє успішно вирішувати одно-, дво- та тривимірні задачі, а також систему диференціальних рівнянь теплопровідності, як при постійних, так і при змінних коефіцієнтах.

Розглянутий метод носить назву явного, оскільки виражає значення ϑ в момент τ_{k+1} через значення в момент τ_k.

Незважаючи на простоту формул, він має істотний недолік, пов'язаний з обмеженням $p \geq 2n$, де n – розмірність простору. При такому обмежені потрібно багато часу для того щоб прослідкувати рішення протягом великого періоду, наприклад до $F_0 \sim 1$.

Таких недоліків позбавлені неявні схеми, в яких збільшення l досягається за рахунок того, що на кожному часовому кроці доводиться вирішувати систему рівнянь. При цьому в разі однієї просторової змінної рішення досягається невеликим числом операцій завдяки трьохдіагональному вигляду матриці цієї системи.

Розглянемо шеститочкову схему в якій $\partial^2\vartheta/\partial x^2$ апроксимується за формулою:

$$\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} \approx \frac{\left(\vartheta_{k-1,i-1} - 2\vartheta_{k-1,i} + \vartheta_{k-1,i+1}\right) + \left(\vartheta_{k,i-1} - 2\vartheta_{k,i} + \vartheta_{k,i+1}\right)}{2h^2}. \qquad (2.114)$$

Неважко переконатися, що для достатньо гладкої функції складеної з цих виразів наближена формула для $\partial/\partial\tau - a\cdot\partial^2/\partial x^2$ має помилку $O(h^2 + l^2)$ для точки $x = ih$, $\tau = (k - l/2)l$.

Тому рівняння являється неоднорідним.

Відомо, що рівняння:

$$\frac{\vartheta_{k,i} - \vartheta_{k-1,i}}{l} = a\frac{\left(\vartheta_{k-1,i-1} - 2\vartheta_{k-1,i} + \vartheta_{k-1,i+1}\right) + \left(\vartheta_{k,i-1} - 2\vartheta_{k,i} + \vartheta_{k,i+1}\right)}{2h^2} + f_{k-\frac{1}{2},i} \qquad (2.115)$$

стійке і його рішення при $h \to 0$, $l \to 0$ зводиться до вирішення диференціального рівняння теплопровідності.

Покажемо, як у випадку однієї просторової змінної вирішувати систему рівнянь на кожному шарі.

Диференціальне рівняння теплопровідності (2.115) для невідомих $\{\vartheta_{k,i}\}$ можна переписати у вигляді:

$$\vartheta_{k,i-1} - 2\left(1+\frac{h^2}{al}\right)\vartheta_{k,i} + \vartheta_{k,i+1} = B_i, \tag{2.116}$$

де B_i утворені із $f_{k\text{-}1,i}$ і значення $\vartheta_{k\text{-}1,i}$, які відомі.

Нехай крайові умови (першого, другого або третього роду) мають вигляд:

$$\left.\begin{aligned}\vartheta_{k,0} &= \alpha\vartheta_{k,1} + \beta,\\ \vartheta_{k,N} &= \gamma\vartheta_{k,N-1} + \delta;\end{aligned}\right\}, \tag{2.117}$$

при цьому $\alpha \le 1$ і $\gamma \le 1$.

Будемо шукати залежність виду:

$$\vartheta_{k,i} = p_i\vartheta_{k,i-1} + q_i, \tag{2.118}$$

яке має задовольняти рішення рівняння(2.116).

Визначаючи $\vartheta_{k,i\text{-}1}$ за допомогою (2.118) і використовуючи (2.116), маємо:

$$\vartheta_{k,i-1} - \left[2\left(1+\frac{h^2}{al}\right) - p_{i+1}\right]\vartheta_{k,i} = \beta_i - q_{i+1}. \tag{2.119}$$

Потрібно, щоб рівняння (2.119) було наслідком системи (2.117); так як коефіцієнти при однакових ϑ і вільні члени повинні бути пропорційні, в результаті отримаємо:

$$p_i = \frac{1}{2\left(1+\frac{h^2}{al}\right) - p_{i+1}};\; q_i = p_i\left(B_i - q_{i+1}\right) \tag{2.120}$$

За цими формулам можна знайти p_i ($i = N$–1, N–2,…, 1), починаючи зі значення $p_N = \gamma$.

При цьому:

$$|p_i| < \frac{1}{1+2\frac{H^2}{al}}.$$

Знаючи p_i, знаходимо q_i ($i = N$–1,…, $q_N = \delta$).

Взявши рівняння (2.118) при $i = 1$ і перше із системи (2.117), вирішимо систему рівнянь для $\vartheta_{k,0}$ і $\vartheta_{k,1}$; нерівності $\alpha < 1$ і $|p_1| < 1/(1+2h^2/al)$ забезпечують її рішення. За співвідношенням (2.118) знаходимо послідовно всі інші $\vartheta_{k,i}$.

Чисельні методи рішення мають великі потенційні можливості, проте їх широке застосування для вирішення рівнянь теплопередачі стримувалося недостатньо адекватними моделями через неточність вихідних даних, що в першу чергу відноситься до потоку тепла яке входить в деталь.

З іншої сторони для забезпечення адекватності математичних моделей отримали достатній розвиток методи ідентифікації параметрів цих моделей на основі вирішення задач теплообміну за експериментальними даними отриманими при дослідженні різних процесів і об’єктів.

Найбільш часто чисельні методи використовують в тих випадках, коли рішення крайових задач теплопровідності точними методами неможливо, особливо при розгляданні нелінійних задач. У цих випадках доводиться звертатися до тих чи інших чисельних методів розв’язання. Слід відмітити, що використання чисельних методів часто дозволяє відмовитись від спрощеного трактування математичної моделі процесу.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. На які основні групи розділяють методи визначення температури різання?

2. Які методи належать до непрямих засобів реєстрації температури в зоні різання?

3. Які методи належать до безпосередніх засобів реєстрації температури в зоні різання?

4. Опишіть будову та принцип роботи термопари.

5. Які особливості роботи штучних та напівштучних термопар?

6. Опишіть принцип роботи природної та перерізувнної термопари.

7. Що відносять до термоіндикаторів, їх види та можливості застосування?

8. Охарактеризуйте безконтактні методи вимірювання температури та наведіть основні види.

9. В яких випадках доцільно використовувати безконтактні методи реєстрації температур?

10. Який, на вашу думку, метод реєстрації температури різання найбільш доцільно використовувати в процесах механічної обробки?

11. Назвіть основні аналітичні методи оцінки температури різання та дайте їм характеристику.

12. Назвіть основні чисельні методи розрахунку температур.

13. Яка основна ідея методу скінчених елементів?

14. На чому засновано метод скінчених різниць?

Розділ 3. ОСОБЛИВОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РІЗАННІ МАТЕРІАЛІВ

Температура різання визначає працездатність різального інструмента, обмежує умови металообробки і головним чином впливає на структурний стан поверхні деталі.

Для реалізації високотемпературних процесів при різанні матеріалів використовуються інструменти із полікристалічних надтвердих матеріалів, основними з яких є композити на основі нітриду бору та синтетичні алмази. Такі композити мають високу твердість (~ 34 ГПа), значну теплопровідність (λ = 100 Вт/м·К) та низький коефіцієнт тертя з матеріалами, що обробляються (f = 0,12), завдяки чому є можливість оброблювати сталі високої твердості (62…64 HRC), коли температура в зоні різання досягає 1000…1200 °С.

В зв’язку з цим, вивчення теплових явищ при обробці конструкційних матеріалів високої твердості інструментами із ПНТМ є актуальним.

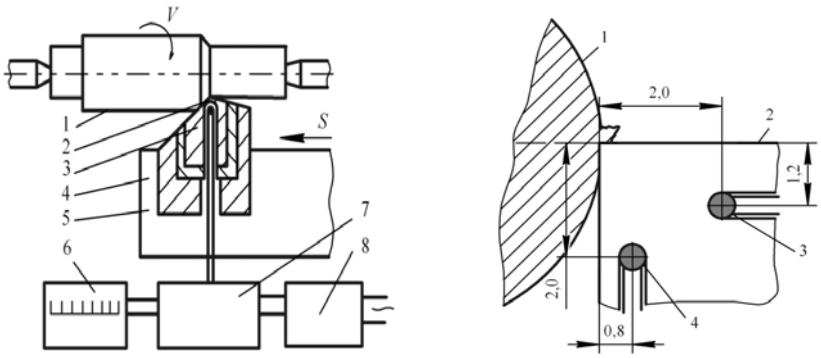
3.1. Вплив умов обробки інструментами із ПНТМ на температуру різання

Температура різання є важливим чинником процесу обробки будь-якого матеріалу, оскільки вона впливає на стійкість інструмента, сили різання та стан поверхні деталі. Більш високі температури різання призводять до збільшення плинності матеріалу заготовки, що робить його більш пластичним. Це призводить до зменшення сил різання і, отже, до поліпшення оброблюваності матеріалу. Але підвищення температури різання викликає інтенсифікацію механізмів зношення інструмента, теплове деформування деталі та зниження якості обробки.

В зв’язку зі специфічними властивостями інструментів із ПНТМ визначення температури в зоні різання є досить складною задачею. Тому для оцінки температури різання, а також визначення розподілу температурних полів

в інструментах використовують емпіричні залежності, отримані при обробці деталі із конкретного матеріалу за певних умовах, або ж найчастіше – експериментальні методи.

Оскільки інструменти із ПНТМ на основі кубічного нітриду бору (КНБ) майже не електропровідні, то це ускладнює використання методів штучної термопари для визначення температури різання. В роботі [37] для визначення градієнта температури використано штучну хромель-алюмельову термопару вбудовану в різець із ПНТМ ельбор-Р (рис. 3.1).



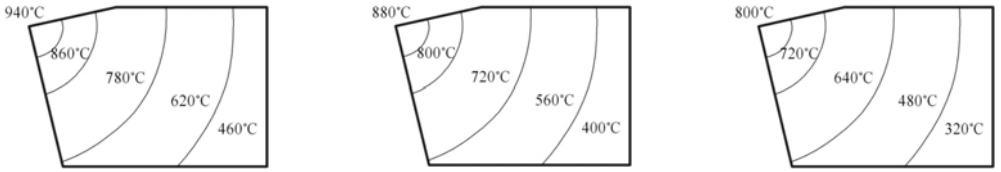
а *б*

Рис. 3.1. Схема вимірювання температури (а) і розміщення термопар в різці ПНТМ (б):1 – деталь; 2 – різальна пластина; 3, 4 – термопари;5 – різцетримач; 6 –міліамперметр; 7 – підсилювач постійного струму; 8 – джерело живлення

Для того, щоб визначити температуру при різанні матеріалів, інструментами із ПНТМ, важливо знати температурний градієнт і його максимальне значення (qrad $Q = \Delta Q/\Delta l$, де ΔQ –різниця температур на ділянці заготовки інструмента довжиною Δl).

З врахуванням отриманих величин градієнтів температур, на рисунку 3.2 представлені температурні поля в різці із ПНТМ при точінні загартованих сталей, 12ХН3А (56…58 HRC), ШХ15 (62…64 HRC), 5ХНМ (50…55 HRC). При цьому довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця приблизно дорівнює довжині контакту його задньої поверхні з деталлю і складає 0,2 мм,

тому можна прийняти, що тепловий потік в різець надходить від точкового джерела і розповсюджується у всі напрямки однаково.



а *б* *в*

Рис. 3.2. Температурне поле різця із ПНТМ ельбор-Р при точінні сталей:
а – ШХ15 (v = 75 м/хв.); б – 12ХН3А (v = 80 м/хв.); в – 5ХНМ (v = 100 м/хв.)

Коефіцієнт теплопровідності ПНТМ ельбор-Р порівняно великий, що забезпечує швидкий відвід теплоти в масу інструмента, особливо на ділянці задньої поверхні, де контакт «різець-деталь» супроводжується виділенням значної кількості теплоти. Слід також відмітити, що низький коефіцієнт тертя інструментів на основі ПНТМ з деталями призводить до утворення меншої кількості тепла, чим при використанні різців із твердих сплавів.

Це пояснює розходження значень температури різання в залежності від швидкості при чистовому точінні наплавлених покриттів інструментами із твердого сплаву Т15К6 і ПНТМ ельбор-Р. При точінні покриттів зі швидкостями різання 0,2…2,5 м/с температура різання для різців із твердого сплаву на 20...30 % вища, ніж для інструментів із ПНТМ (рис. 3.3) [38].

При обробці сталей з високою твердістю інструментами із ПНТМ на основі КНБ з низькими швидкостями різання $v < 0{,}5$ м/с, довжина контакту стружки з передньою поверхнею невелика. Підвищення швидкості різання призводить до збільшення температури на ділянці контакту.

Обробка зі швидкостями різання $v > 5$ м/с, супроводжується виникненням високої температури різання, при якій стружка розігрівається до такої стану, що може навіть оплавитись, тобто температура різання досягає значень плавлення оброблюваного матеріалу.

Значний вплив на температуру різання чинить процес зношення інструмента. При точінні загартованих сталей інтенсифікація величини зносу призводить до збільшення сил тертя на задній поверхні різця та більшої деформації стружки в процесі обробки і, як наслідок, збільшення температури різання в середньому на 30...34 % (рис. 3.4).

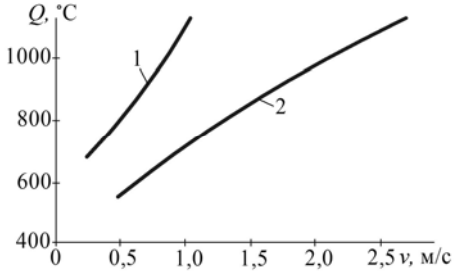


Рис. 3.3. Вплив швидкості різання на температуру при чистовому точінні (S = 0,14 мм/об; t = 0,33 мм; $h_з$ = 0,33 мм) сталі 5ХНМ (50-55 HRC), різцями із твердого сплаву Т15К6 (1) і ПНТМ ельбор-Р(2)

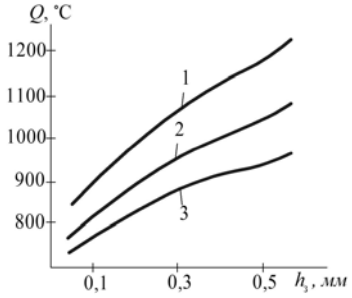


Рис. 3.4. Залежність температури різання від величини зносу різця по задній поверхні при точінні сталей 1 – ШХ15; 2 – 12ХН3А; 3 – 5ХНМ

Зі збільшенням твердості оброблювального матеріалу, степінь впливу зносу інструмента на температуру різання збільшується.

Вплив подачі та глибини на температуру різання при чистовому точінні сталей високої твердості інструментами із ПНТМ на основі КНБ показано на рисунку 3.5.

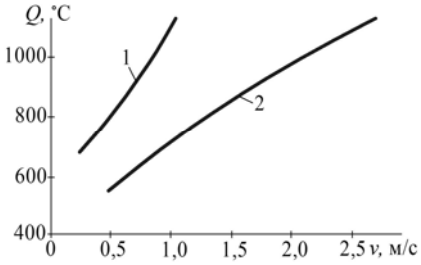


Рис. 3.5. Вплив подачі S (1) та глибини різання t (2) на температуру різання при чистовому точінні сталі 5ХНМ (v = 1,8 м/с)

Степінь впливу подачі та глибини різання на температуру різання значно менші, ніж вплив швидкость різання.

Зі збільшенням подачі збільшується тиск стружки на передню поверхню різця і тим самим збільшується робота деформації. При цьому усадка стружки і питома робота різання знижуються.

Коефіцієнт тертя мало залежить від величини подачі, так як довжина радіусної ділянки інструмента завжди більше подачі.

Тому кількість теплоти, що формується в зоні різання, збільшується порівняно в меншій мірі, ніж подача.

Збільшення товщини стружки призводить до збільшення площі контакту з передньою поверхнею, що дозволяє підвищити теплопередачу в тіло різця. Таким чином, при обробці сталей високої твердості інструментами із ПНТМ зі збільшенням подачі температура різання зростає, але в меншій мірі ніж при збільшені швидкості різання. Тому величину подачі при чистовій обробці слід вибирати максимальною, виходячи з умови забезпечення якості обробленої поверхні.

Глибина різання має значно менший вплив на температуру різання, так як при збільшені глибини, збільшується довжина різальних кромок, які беруть участь у роботі різання, збільшуючи теплопередачу у різець.

Найбільший вплив на температуру різання при обробці сталей високої твердості має швидкість різання, що й обмежує продуктивність обробки.

При обробці деталей з напиленими покриттями для визначення температури різання, як і для матеріалів з однорідною структурою, використовують метод штучної термопари. Твердість даних матеріалів складає 55...60 HRC, а температура в зоні різання може досягати > 1000 °С.

Через невеликі розміри різальних пластин і високі механічні властивості інструментального композиту підвід термопари в зону різання є досить складною задачею.

Тому температура різання вимірюється в місці контакту термопари з опорною поверхнею різальної пластини (рис. 3.6), з подальшою екстраполяцією температури нагріву в двох точках на вершину різця (точка *A*).

При точінні масивними різцями період нестаціонарного теплообміну невеликий, теплові потоки, що проходять через «різець-деталь-стружка» швидко стабілізуються і температура на вершині різця майже не змінюється [39].

Враховуючи ці фактори, задача визначення температури в точці *A* зводиться до стаціонарного виду. Припустимо, що температура різання змінюється з точки *A* до точок 1 та 2 за лінійним законом, тобто температура визначається рішенням одномірної задачі теплопровідності [40]:

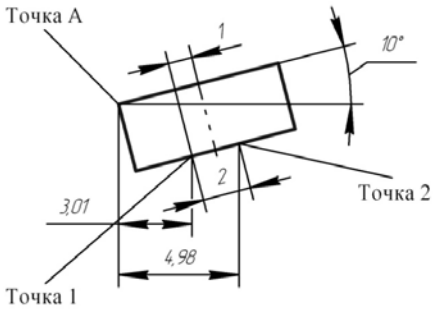


Рис. 3.6. Схема вимірювання температур на опорній поверхні пластини із ПНТМ

$$\frac{d^2Q}{dx} = 0 \tag{3.1}$$

де x – поточна координата.

Крайові умови:

– від точки *A* до точки 1

$$\left.\begin{array}{l} x = 0 \;\; Q = 0 \\ x = l_1 \;\; Q = Q_1 \end{array}\right\};$$

– від точки А до точки 2

$$\left.\begin{array}{l} x = 0 \;\; Q = 0 \\ x = l_2 \;\; Q = Q_2 \end{array}\right\}.$$

Розв’язавши рівняння (3.1), отримаємо, що температура в точці *A* визначається за залежністю:

$$Q_p = \frac{Q_1 l_2 - Q_2 l_1}{l_2 - l_1}, \tag{3.2}$$

де $Q_р$ – температура в точці *A*; Q_1 – температура в точці 1; Q_2 – температура в точці 2; l_1 – відстань між точками 1 та *A*; l_2 – відстань між точками 2 та *A*.

Дослідження, виконані з урахуванням цього підходу, показують, що при точінні поверхні деталі з газотермічного покриття ПГ-10Н-01 (55...60 HRC) зі швидкістю 2,0...2,5 м/с температура різання досягає 1120 °С. Температура, що відповідає оптимальній швидкості різання складає 870...900 °С.

Залежність температури від режимів різання при обробці інструментом покриттям ПГ-10Н-01 від швидкості різання, подачі та величини зносу інструмента представлені на рисунку 3.7.

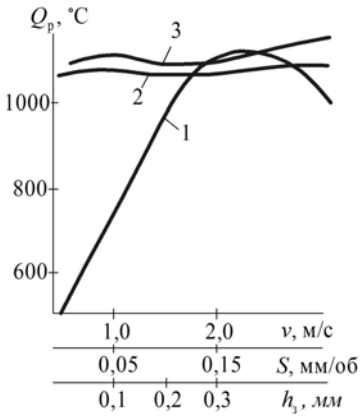


Рис. 3.7. Вплив умов обробки на температуру в зоні різання з покриттям ПГ-10Н-01: 1 – швидкості різання (S = 0,1 мм/об; $h_з$ = 0,1 мм); 2 – подачі (v = 1,67 м/с; $h_з$ = 0,1 мм); 3 – зносу інструмента (v = 1,67 м/с;) S = 0,1 мм/об)

Зміна подачі від 0,05 до 0,3 мм/об призводить до збільшення температури в зоні різання на 11 %.

При зносі інструмента по задній поверхні, температура на вершині різця зростає і при повністю зношеному інструменті досягає 1140...1150 °С.

При збільшенні швидкості різання температура в зоні стружкоутворення збільшується, а при подальшому збільшені швидкості знижується (рис. 3.7). Даний ефект пояснюється несуттєвим впливом швидкості різання на напруження в площині зсуву, а також зниженням напружень на передній поверхні інструмента і збільшенням кута зсуву.

Розглянутий ефект пов’язаний зі змінами, які відбуваються зі структурою, механічними властивостями оброблюваного матеріалу на ділянках контакту з інструментом під час збільшення швидкості різання.

Ще одним фактором, що впливає на зниження температури в зоні контакту інструмент–стружка при збільшені швидкості різання є коефіцієнт тертя на передній поверхні інструмента, який може знижуватися до величини 0,01...0,10, що за даними роботи [38] цілком ймовірно при обробці конструкційних матеріалів різцями із полікристалічних надтвердих матеріалів.

3.2. Високотемпературні явища при обробці матеріалів різанням

Механічна обробка матеріалів різанням може призводити до хімічних реакцій між інструментальним та оброблюваним матеріалами за рахунок теплової енергії, тому що механічна енергія від процесу різання майже цілком трансформується в теплову.

Температура в контактній зоні різання визначає механізм зношування і період стійкості інструмента, обмежує продуктивність обробки, чинить значний вплив на якість обробленої поверхні: шорсткість, структурний стан і фазовий склад матеріалу поверхневого шару виробів. Визначення залежності середньої температури різання в загальному випадку дозволяє прогнозувати стійкість різального інструмента і, за рахунок оптимізації режимів обробки, забезпечити раціональні умови його експлуатації.

Розглянуті в розділі 2 методи оцінки та прогнозування температур в зоні різання найчастіше не мають достатню точність і достовірністю, або не дозволяють отримати повну картину величин і розподілу температур в контактній зоні різання. Необхідно відзначити, що експериментальне дослідження температурних полів в зонах контакту інструмента з оброблюваним матеріалом в реальних умовах є вкрай складним завданням через малі розміри контактних ділянок, великих значень тисків і швидкоплинності явищ.

В той же час, більш детальне вивчення теплофізичних ефектів в контактних зонах вкрай важливо для розуміння причин, що обумовлюють зношування інструментів, особливо у випадках, коли знос супроводжується утворенням продуктів хімічної взаємодії контактуючих матеріалів, дифузійним зносом та іншими явищами, характерними для обробки в умовах високих температур.

Поставлена задача може бути вирішена шляхом застосування безконтактних способів вимірювання температури різання. В роботі [11] застосована оригінальна безконтактна методика, що дозволяє в режимі in-situ визначати величини і температури на плямах контакту, а також розподіл температури по поверхні стружки, прилеглої до передньої поверхні інструмента.

З цією метою в отворі твердосплавного інструмента в районі зони контакту на відстані 0,1 мм від різальної кромки різця розміщено алмазне «вікно» товщиною 0,5 мм (рис. 3.8).

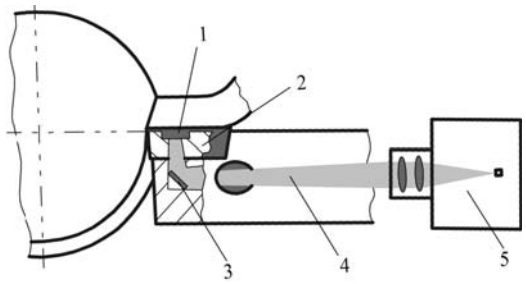
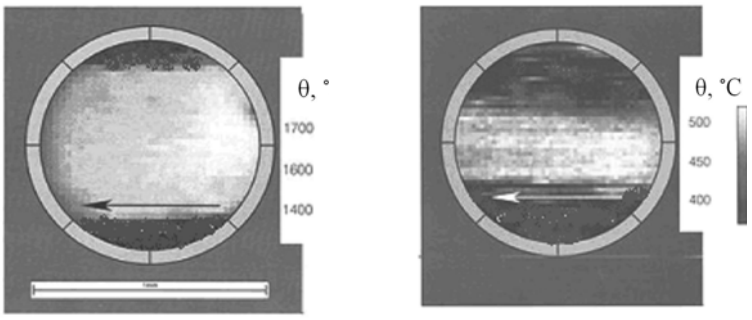


Рис. 3.8. Модель температурних досліджень в контактній зоні різання: 1 – алмазне вікно; 2 – різальна пластина; 3 – дзеркало; 4 – інфрачервоне випромінювання; 5 – оптичний тепловізор

Інфрачервоне випромінювання з ділянки контакту на передній поверхні інструмента в процесі різання проектувалося на сканер термографічної системи (оптичний тепловізор) з високою роздільною здатністю через оптичний канал, виконаний у державці різця. Для визначення абсолютних величин температури різання система тарувалася за допомогою стружки, яка була отримана з матеріалів, які використовувалися при експериментах і нагрівалася до різних температур в середовищі інертного газу.

У роботі [11] наведені термограми розподілу температури по плямі контакту на передній поверхні інструмента при точінні сплавів TiAl6V4 і AlZnNgCu1,5.

Як видно з рисунків, величина температури різання в цих зонах при обробці титанового сплаву TiAl6V4 при швидкості різання 2,5 м/с і подачі 0,2 мм/об знаходиться в діапазоні 1300...2000 °С (рис. 3.9, *а*), а із зростанням подачі до 0,3 мм/об досягає 2300 °С.



а *б*

Рис.3.9. Розподіл температури по контактній ділянці на передній поверхні інструмента:
а – при точінні сплаву TiAl6V4 (v = 2,5 м/с; S = 0,2 мм/об; t = 0,5 мм);
б – при точінні сплаву AlZnNgCu1,5 (v = 16,6 м/с; S = 0,1 мм/об; t = 0,5 мм)

При точінні алюмінієвого сплаву AlZnNgCu1,5 (v = 10...21,6 м/с; S = 0,1...0,4 мм/об) діапазон значень температури різання становить 400...800 °С (рис. 3.9,*б*).

На рисунках (3.9, *а, б*) можна виділити область відповідну середній частині стружки на першій третині ширини вікна, в напрямку переміщення стружки, уздовж передньої поверхні різця. Ця область відповідає зоні з максимальними контактними напруженнями. Саме тут спостерігаються аномально високі величини контактної температури, які значно перевищують середню, по ділянці контакту, температуру різання.

Наведені експериментальні дані суперечать результатам ряду інших досліджень. Так моделювання й застосуванням МСЕ процесу різання TiAl6V4 показало, що максимальні значення температури різання на контактній ділянці при v = 3,0 м/с; S = 0,1 мм/об, не перевищує 700°С [39] а при v = 2,7 м/с; S = 0,15 мм/зуб ~ 1000 °С [42].

Вимірювання, проведені авторами [43] при обробці твердосплавними інструментами і різцями, оснащеними інструментальною керамікою, показали, що при обробці TiAl6V4 зі швидкістю 1,25 м/с, середня температура різання досягає 900 °С. При обробці алюмінієвих сплавів алмазним інструментами і різцями, оснащеними двошаровими алмазно-твердосплавними пластинами середня температура різання не перевищує 200-300 °С навіть при високих (10...13 м/с) швидкостях різання, що також набагато нижче експериментально встановлених авторами значень [11], які досягають 800 °С.

Вказані протиріччя пояснюються, ймовірно, тим, що при аналітичних і модельних дослідженнях не враховуються явища термо-трибоактивації контактуючих поверхонь і можливість виникнення в місцях зіткнення мікронерівностей короткочасних, високотемпературних спалахів [44].

Стандартні ж експериментальні методики не мають необхідною чутливістю для виявлення цих ефектів.

Значення температур досягають і навіть перевищують температуру плавлення оброблюваного матеріалу, яка для сплаву TiAl6V4 складає 1650 °С, а для AlZnNgCu1,5 – 640 °С.

Для процесів обробки таких матеріалів різанням не вдалося створити будь-які моделі, що описують подібні явища. Тим не менш, можна виділити підходи, які в подальшому можуть сприяти поясненню даного феномена.

Для пояснення таких високих температур при терті використовується декілька моделей. Одна з них, модель «магма-плазми» розроблена Тіссеном, Мейером та Хайнике [45]. Відповідно до даної моделі в момент контакту різальної кромки інструмента з оброблюваною поверхнею в області контакту відбувається квазідіабатичне акумулювання енергії і з'являються так званні «згустки енергії» (рис. 3.10). Причиною накоплення такої енергії є обмежена швидкість розповсюдження збурення в реальній системі.

Рис. 3.10. Схема утворення «магма-плазми» при механічному активуванні матеріалу

В початковий момент контакту зароджується найвищий збуджений стан, який автори називали «трибоплазмою». Саме він характеризується найбільш сильно порушеною кристалічною структурою і наявністю нестаціонарних високозбуджених фрагментів кристалу і навколишньої реакційної сфери у вигляді частинок решітки, іонів, електронів. В цій фазі розвиваються дуже високі локальні температури понад 10^4 К.

Вище зазначене явище існує дуже короткий час, порядку $10^{-4}...10^{-3}$ с, але за цей час значно ослаблює решітку матеріалу, призводить до рекомбінації компонентів плазми, розповсюдження дислокацій і розтріскування композиту, емісії фотонів і електронів.

Не дивлячись на те, що всі трибоефекти проявляються в мікрооб’ємому масштабі, явища, що викликають і супроводжують їх концентруються на мікрорівні. Таким чином локальні точки розігріву (спалахи температури), на яких можна спостерігати аномально високі температури можна вважати активаторами трибохімічних перетворень у матеріалах.

Наявність на контактних поверхнях ділянок з температурою, що істотно перевищує середню температуру різання, також може бути пов’язане з виникненням спалахів температури у результаті інтенсивного деформування на стиках нерівностей на поверхнях трибологічної пари.

Експериментальні дані та результати аналітичних досліджень [10, 45] свідчать про виникнення в процесі тертя різних матеріалів температурних спалахів, які пов’язані з руйнуванням ділянок адгезійного з’єднання на контактних поверхнях.

Ймовірно, що і в процесі різання, локалізуючись на фактичних плямах контакту пари, різець-деформований матеріал, в умовах високих (1...4 ГПа) тисків, характерних для зони різання, температурні спалахи можуть призводити до виділення великої кількості теплоти.

Механічна обробка приводить до інтенсифікації багатьох фізичних і мікропроцесів в твердих тілах, які можуть бути причиною виникнення трибохімічних реакцій та високих температур за яких ці реакції відбуваються. Аномально високі температури (спалахи температур), які інтенсифікують трибохімічні реакції, локалізуються на фактичних плямах контакту, розміри яких на 2–3 порядки менше номінальних розмірів контактних ділянок.

Враховуючи незначний час існування спалахів температури, постійну міграцію плям фактичного контакту, а також різні причини виникнення температур спалахів, вивчення їх за допомогою експериментальних та теоретичних методів є досить складною задачею.

3.3. Аналітична оцінка температури в контактній зоні

Фундаментальною основою створення і ефективного застосування різальних інструментів є вивчення контактних явищ у зоні різання, які досліджуються на рівні оцінки параметрів механіки і теплофізики, кінетики, термодинаміки і фізико-хімії процесу. Кількісний опис поточного фізико-хімічного та механічного стану матеріалу інструмента й оброблюваного матеріалу в контактній зоні для конкретних умов процесу механічної обробки, вивчення еволюції і можливості трансформації поверхонь інструмента в контактній зоні під дією термобаричних умов процесу різання, становить наукову базу для вдосконалення різальних інструментів і процесів механічної обробки, використовується в мотивації вибору або створення матеріалів для різальних інструментів.

Теплофізичні процеси різання багато в чому обумовлюють потенційні можливості продуктивністю і якісною обробкою виробів із сучасних конструкційних матеріалів, особливо інструментами з надтвердих композитів.

В розглянутих вище температурних явищах, які відбуваються в зоні різання інструментами оснащеними ПНТМ, показано вплив умов обробки на величину температури різання, розподіл теплових потоків на передній і задній поверхні інструмента.

Особливості теплоутворення при обробці лезовим інструментами із ПНТМ визначаються їх структурою та фізико-механічними властивостями: низьким коефіцієнтом тертя по оброблюваним матеріалам, високими значеннями тепло- і температуропровідності, які забезпечують швидкий відвід теплоти із зони різання і дозволяють проводити обробку з високими швидкостями різання, відносно малими силами різання в порівнянні різцями із інших інструментальних матеріалів.

Вивчення температурних явищ і теплофізичних показників контактної взаємодії в зоні різання дуже важливе для розуміння причин, що обумовлюють зношення інструментів, особливо у випадках, коли зношення супроводжується утворенням продуктів хімічної взаємодії контактуючих матеріалів, дифузійним масоперенесенням і іншими явищами характерними для обробки різанням в умовах високих температур.

Експериментальне визначення температур в контактній зоні стосовно інструментів із ПНТМ в реальних умовах різання є складної задачею, зважаючи на малий розмір контактних ділянок, великих значень тиску, швидкоплинності явищ, що протікають в зоні різання і високу твердість інструментального композиту.

Для аналітичного визначення температури в контактній зоні в роботі [47] пропонується використовувати спрощену схему контакту передньої поверхні інструмента зі стружкою. Прийнято, що гребінці шорсткості є тільки на поверхні інструмента, а нижню поверхню стружки в початковий момент часу вважають гладкою.

В умовах різання контакт є пружно-пластичним, але розглядають умови, які відповідають пластичному контакту інструмента з стружкою (рис. 3.11).

В роботі [47] показано, що максимум температури $T_{\max}$ (рис. 3.12) не на вершині різця ($x = 0$), а на певній відстані від неї ($x = h$), положення цього максимуму залежить від швидкості різання і з її збільшенням переходить на контактну площадку.

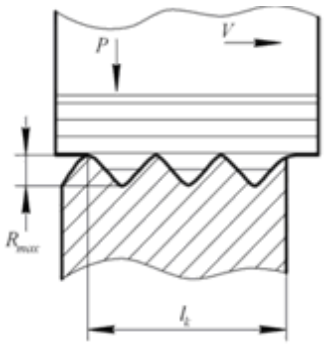


Рис. 3.11. Схема контакту

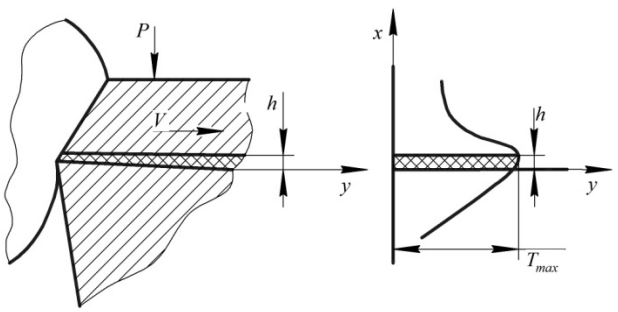


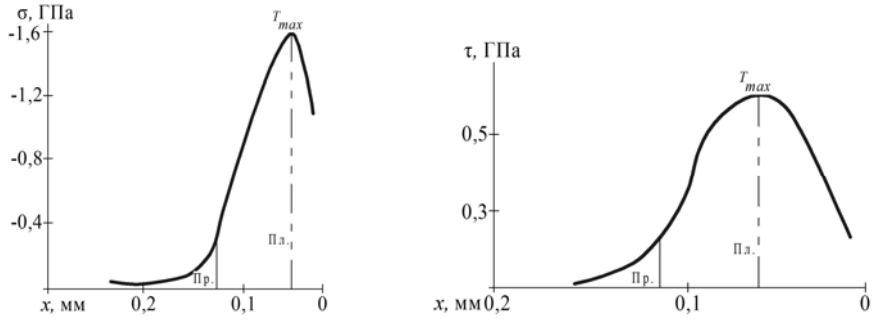
Рис. 3.12. Схема контактування на передній

в'язкого шару з жорсткою шорсткою поверхнею інструмента

поверхні інструмента з утворенням в'язкотекучого шару і схема розподілення температур

Аналіз графіків розподілу нормальних та дотичних напружень (рис. 3.13) на передній поверхні інструмента оснащеного ПНТМ на основі КНБ показав [48], що на долю напружень, які відповідають пластичним деформаціям припадає близько 85 % від загального рівня діючих напружень, а площа контакту для пластичної ділянки близько 60 % від загальної площі контакту.

Орієнтовні параметри контактної ділянки на передній поверхні інструмента дозволяють розділити величини площі фактичного контакту на пластичні і пружні складові.



а *б*

Рис. 3.13. Розподіл нормальних (а) та дотичних (б) силових напружень на передній поверхні інструмента із ПНТМ на основі КНБ

(сталь ШХ15 60 HRC;v = 1,83 м/с; S = 0,05 мм; t = 0,25 мм)

Згідно методики И. В. Крагельського [49] температура спалаху на локальній плямі контакту:

$$T_c = \frac{\sqrt{2}+1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \cdot \frac{f P_z v d}{2 A_r \lambda_2} \qquad (3.3)$$

де λ – теплопровідність, c – теплоємність, ρ – густина, f – коефіцієнт тертя, d – діаметр плями контакту, A_r – фактична площа контакту, Pz – головна складова сили різання, v – швидкість різання; індекс 2 відповідає матеріалу з більшою твердістю.

Діаметр плями контакту:

$$d = 2\sqrt{2}\left(\frac{rR_{\max}}{\nu}\cdot\left(\frac{N}{HB\cdot b}\right)^{\frac{1}{\nu}}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.4)$$

Фактична площа контакту:

$$A_r = \frac{2\pi rR_{\max}}{\nu}\left(\frac{N}{HB\cdot b}\right)^{\frac{1}{\nu}}, \quad (3.5)$$

$$N = 2\pi HB\sqrt{r_{поп}\cdot r_{пов}}. \quad (3.6)$$

r – радіус заокруглення вершин.

$$r = \sqrt{r_{поп}\cdot r_{пов}}, \quad (3.7)$$

де $r_{поп}$ і $r_{пов}$ – радіус заокруглення одиничної мікронерівності в поперечному і повздовжньому напрямку;

Для визначення вихідних параметрів проведені дослідження топографії контактних поверхонь різального інструмента із ПНТМ на основі КНБ. Параметри шорсткості мали наступні значення – *Ra* 0,078, *Rp* 0,174 та *Rmax* 0,222, параметри опорної кривої ν = 1,2 і b = 3,3.

Фізико-механічні характеристики матеріалів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Фізико-механічні характеристики інструментального та оброблюваного матеріалів

Матеріал	λ, Вт/м·К	c, Дж/кг·К	ρ, кг/м^3	*HB*, МПа
КНБ	100	670	3260	...
ШХ15	40	500	7812	5000

Розрахунок проводили для точіння сталі ШХ15 (60 HRC) з режимами різання S = 0,22 мм/об, ν = 0,33 м/с, t = 0,4 мм. Вихідні параметри для визначення температури спалаху T_c наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.Вихідні параметри для розрахунку T_c

f	A_r, мкм^2	d, мкм	r, мкм	N, Мпа	P_z, кН
0,12	0,03	0,197	54	1,69	1,6

Результати розрахунків залежності від зміни швидкості різання та подачі представлені на рисунках 3.14 та 3.15.

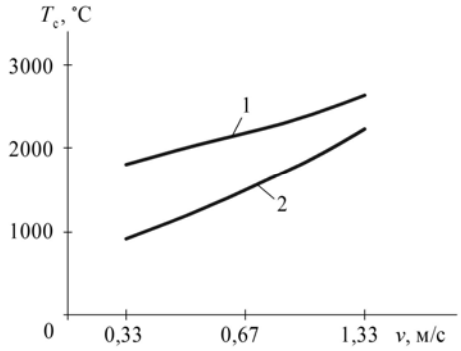


Рис. 3.14. Залежність температури спалахів T_c від подачі S:1 – для пластичної ділянки контакту; 2 – для пружної; (t = 0,4 мм;v = 1,0 м/с)

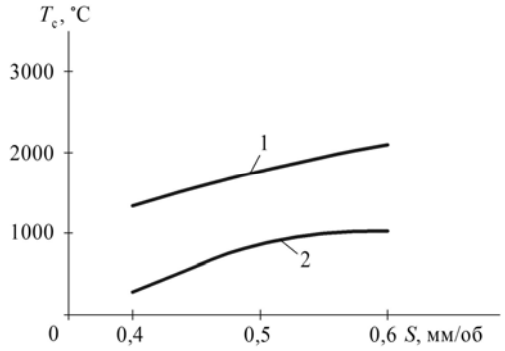


Рис. 3.15. Залежність температури спалахів T_c від швидкості різання:1 – для пластичної ділянки контакту; 2 – для пружної;(t = 0,4 мм;S = 0,22 мм/об)

Температура спалахів на одиничній плямі контакту для незношеного різального інструмента на пластичній ділянці контакту, в початковий момент різання, складає T_c ~ 2500 °С. Для ділянки пружної деформації температура спалахів має нижчі значення T_c ~ 2000 °С, що пояснюється невеликою площею фактичного контакту, а також відносно невеликими силами, в порівнянні з пластичною ділянкою контакту.

На ділянці пластичної деформації в контакті така висока температура обумовлена деформацією матеріалу на мікронерівностях інструмента, а також руйнуванням містків зварювання утворених в результаті адгезійної взаємодії інструментального композиту з обробленим матеріалом. Зі зношенням контактних поверхонь інструмента значення температурних спалахів зростають в зв’язку зі збільшенням як мікронерівностей на контактних ділянках інструмента, так і контактних навантажень на окремих нерівностях.

Практично після перших актів контактування, впадини шорсткості на інструменті заповнюються в’язким матеріалом стружки, утворюючи містки зварювання.

Періодичне руйнування даних ділянок, руйнування мікронерівностей, деформування матеріалу викликає флуктацію швидкостей пластичного потоку і контактних напружень, які є основною причиною температурних спалахів. Ці спалахи температури необхідно враховувати при визначені максимальних температур, а також при описанні фізико-хімічної взаємодії інструментального і оброблюваного матеріалів в зоні різання.

Результати досліджень показують, що при точінні загартованої сталі інструментом, оснащеним ПСТМ на основі КНБ, температура на плямах спалаху на передній поверхні інструмента перевищує температуру плавлення обробленого матеріалу. У зв’язку з короткостроковістю дії джерела теплоти на плямі спалаху середня температура різання складає ~ 1000...1200 °С, проте рівень контактної температури обумовлює можливість хімічної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалів в мікрооб’ємах [50]. Наслідком такої взаємодії є реалізація в зоні різання явища контактно-реактивного плавлення та інтенсифікації зношування інструмента.

3.4. Теплові явища при обробці композиційних матеріалів різанням

У сучасній промисловості існує тенденція поширеного використання композиційних матеріалів. Найбільш часто використовують композити з металевою або полімерною матрицями.

Одним з перспективних напрямків використання композитів з металевою матрицею є створення на їх основі захисних покриттів, наприклад, напилених.

У більшості випадків такі матеріали характеризуються гетерогенною структурою, яка включає низку різноманітних компонентів – металів, їх оксидів, боридів, нітридів та інших. У результаті формування покриттів не тільки відновлюються розміри деталей, але й зміцнюється їхня поверхня.

Практичний досвід використання зносостійких покриттів, який накопичений в різних галузях промисловості, показує, що таким чином можна, в 2...5 раз зменшити знос, а також ефективно відновлювати деталі, які вийшли з ладу.

Полімерні композиційні матеріали знайшли широке застосування практично у всіх областях промисловості. Особливу популярність полімери отримали в ракетно-космічній та авіаційній техніці, в автомобілебудуванні, машинобудуванні, на будівництві, у виробництві побутової техніки, в різних областях медицини, а також у багатьох інших галузях, витісняючи при цьому традиційні матеріали, зокрема метали. Вироби з полімерних композиційних матеріалів користуються великим попитом, який характеризується стабільним зростанням, незважаючи на зростання цін на сировину.

Попит на вироби з полімерних композиційних матеріалів зумовлений низкою переваг перед традиційними матеріалами. Полімери мають підвищену міцність і одночасно малу щільність, що робить їх незамінним матеріалом при виробництві сучасних виробів і конструкцій. Крім цього вони мають низку позитивних властивостей, таких як корозійна стійкість, довговічність тощо. А висока технологічність у процесі обробки при відносно низьких температурах різання надає широкі можливості для виготовлення виробів будь-якої складності при мінімальних витратах виробництва.

Теплові явища, що супроводжують механічну обробку композиційних матеріалів мають деякі відмінності в порівнянні з обробкою звичайних металів.

3.4.1. Особливості розподілу тепла при обробці композитів з металевою матрицею

При обробці композиційних матеріалів з гетерогенною структурою розрахунок температур різання за традиційними методиками, наприклад, [51, 52], призводить до значних розходжень з експериментальними даними, що пов’язано з не врахуванням дійсних значень теплофізичних характеристик оброблюваних матеріалів.

Такі матеріали мають фази з різними теплофізичними властивостями (пори, кристалічні включення, оксиди, шлаки та інші), характер розташування яких є випадковим. Фронт теплового поля під час механічної обробки розповсюджується по фазах з високою теплопровідністю.

Тому він має складний характер, а, за даними роботи [53], відноситься до категорії фрактальних кривих.

Рівняння теплопровідності у випадку розповсюдження тепла у фрактальних середовищах передбачає попередню оцінку величини фрактальної розмірності фронту теплового поля D_f.

Враховуючи наведене вище, вибір значень теплофізичних характеристик і розробка моделі розрахунку температури різання, рівня нагріву заготовки і встановлення характеру розповсюдження теплоти вимагає використання фрактальних уявлення про структуру оброблюваного матеріалу.

Відомо, що коефіцієнт теплопровідності матеріалу залежить від його хімічного складу і температури. У випадку обробки неоднорідних матеріалів, ця характеристика залежить також і від їх структури, наприклад, величини пористості і характеру розподілу пор в матеріалі, характеру поєднання більш чи менш теплопровідних фаз.

Для визначення теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу з гетерогенною структурою використовують методики, аналогічні розробленими для суцільних матеріалів, але з урахуванням структурних особливостей матеріалу. Як приклад розглянемо наступне.

Згідно основного закону теплопровідності (закону Фур'є) кількість теплоти dQ, яка проходить через елемент поверхні dF за час $d\tau$, пропорційна градієнту температури:

$$dQ = -\lambda \, \mathrm{grad}\theta \, dF \, d\tau \qquad (3.8)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{grad}\theta \, \mathrm{d}F \, \mathrm{d}\tau} \tag{3.9}$$

У свою чергу градієнт температури чисельно дорівнює зміні температури на одиниці довжини нормалі до ізотермічної поверхні. Позначивши одиничний вектор, який перпендикулярний до ізотермічної поверхні, як "1_n" отримаємо:

$$\mathrm{grad}\,\theta = 1_{\mathrm{n}} \frac{\partial \theta}{\partial n} \tag{3.10}$$

Під час обробки матеріалів в гетерогенною структурою, фронт теплового поля буде розповсюджуватись не по нормалі до поверхні обробки, а мати складний фрактальний характер.

У той же час довжину фрактальної кривої можна наближено визначити за формулою:

$$L(\delta) = a \cdot \delta^{1-D} \tag{3.11}$$

де D – фрактальна розмірність кривої; δ – розмір комірок, які використовуються для визначення фрактальної розмірності кривих.

У випадку визначення градієнту температури $a = 1_n$ – довжина одиничного вектора.

У зв’язку з тим, що величина фрактальної розмірності інваріантна до масштабу вимірювання, градієнт температури для гетерогенного матеріалу визначається як:

$$\mathrm{grad}'\theta = L(\delta) \frac{\partial \theta}{\partial n} = 1_{\mathrm{n}} \delta^{1-\mathrm{D}} \cdot \mathrm{grad}\theta \tag{3.12}$$

де $\mathrm{grad}\theta$ – величина градієнта температури в суцільному матеріалі.

Тоді в загальному випадку коефіцієнт теплопровідності матеріалу з гетерогенною структурою визначається як [65]:

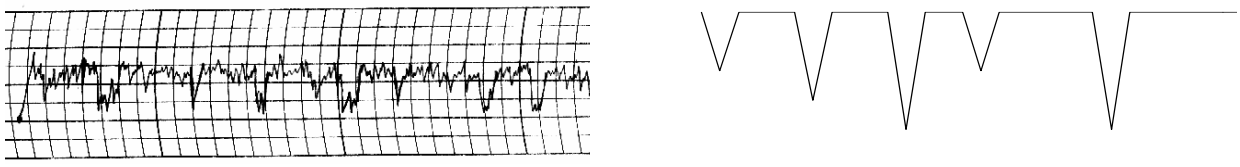
$$\lambda' = \frac{\mathrm{d}Q}{L(\delta)\mathrm{grad}\,\theta \, \mathrm{d}F \, \mathrm{d}\tau} = \frac{\lambda c}{\delta^{1-D}} \tag{3.13}$$

де λc – коефіцієнт теплопровідності аналогічного за хімічним складом суцільного матеріалу; $D = D_f$ – фрактальна розмірність фронту теплового поля.

Для визначення характеру розповсюдження теплоти в оброблюваних покриттях використовують результати деформаційно-спектрального аналізу.

Трибограми, які отримані методом деформаційно-спектрального аналізу, пов'язані з нестабільністю механічних властивостей оброблюваного матеріалу, особливістю будови його структури та дефектністю. Припустивши, що ординати трибограм, які випадають з генеральної сукупності, характеризують наявність, наприклад, пор, тобто фрагментів матеріалу з умовно нульовими механічними і теплофізичними властивостями, можна спрощено змоделювати характер фронту теплопровідності в неоднорідному матеріалі.

Прийнявши, що структура гетерогенного пористого композиту складається з однорідного матеріалу (наприклад, феробору у випадку газополуменевого покриття $Fe_{80}B_{20}$) та макропор (рис. 3.16, *а*), замінюємо ординати трибограм покриття одним постійним значенням та отримаємо спрощену модель фронту розповсюдження тепла в матеріалі, яка враховує наявність макропори (рис. 3.16, *б*). Отримана крива являє собою предфрактал першого покоління триадної кривої Коха. Користуючись математичними залежностями для третього покоління ($n = 3$) кривої Коха, отримаємо наближену довжину ліній теплопровідності на одиниці довжини: $L(\kappa) = \kappa^{1-D_f}$.



а *б*

Рис. 3.16. Фрагмент трибограми (а) газополуменевого порошкового покриття $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$: б – фрактальна модель теплового фронту в матеріалі покриття

З урахуванням того, що довжина ланки предфракталу третього покоління: $\kappa = 3^{-n} \cdot 1 = 3^{-3} \approx 0{,}04$, отримаємо:

$$L(\kappa) = 0{,}04^{1-D_f}.$$

Фрактальна розмірність кривої на рисунку 3.16, *б* склала D_f = 1,103.

Тоді коефіцієнт теплопровідності матеріалу газополуменевого покриття, напиленого з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$, користуючись рівнянням (4.5) наближено дорівнює [54]:

$$\lambda' = \frac{\lambda}{(0{,}04)^{1-D_f}} = \frac{\lambda}{(0{,}04)^{-0{,}103}} = 0{,}72 \cdot \lambda \qquad (3.14)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності сплаву $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$.

Аналогічний результат отримано також для інших покриттів, наприклад, напиленого з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$.

Для достатньо точного визначення фрактальної розмірності, опираючись на накопичений досвід, можна обмежитись використанням мінімального розміру комірки, який дорівнює *a*/50. У відповідності зі рівнянням (3.14) для розрахунку коефіцієнта теплопровідності газополуменевого покриття (λ′), правомірно використовувати розмір комірки середньої величини: δ = *a*/25 = 0,04.

Тоді вираз (3.13) набуде вигляду:

$$\lambda' = \frac{dQ}{(0{,}04)^{1-D_f}\,\mathrm{grad}\theta\, dF\, d\tau} = \frac{\lambda_c}{(0{,}04)^{1-D_f}}. \qquad (3.15)$$

У свою чергу така фізична характеристика матеріалу як коефіцієнт температуропровідності залежить від величини λ та визначається залежністю ω = λ / *c*ρ, де *c* – масова теплоємність, Дж/кг·°С; ρ – щільність речовини.

З урахуванням вищесказаного вираз для розрахунку температури на вершині різця під час точіння гетерогенного композиту (напиленого покриття) набуває вигляду [54]:

$$T = \frac{(1+c)\cdot C_2 \cdot q}{1 + \frac{(C_2 \cdot \sqrt{\lambda/(0{,}04)^{1-D_f}})}{C_1}}, \qquad (3.15)$$

де D_f – фрактальна розмірність фронту теплового поля; λ – значення коефіцієнта теплопровідності сплаву, який використовується для формування композиту.

На рисунку 3.17 наведені результати експериментальних досліджень та розрахунків температури різання на вершині інструмента під час точіння газополуменевого покриття, напиленого з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20.}$

Аналіз залежностей температури на вершині різця від швидкості різання (рис. 3.17) свідчить про те, що використання фрактальних уявлень про структуру оброблюваного матеріалу суттєво підвищує точність її оцінки.

Порівняння експериментальних та аналітичних даних показало, що використання методики, яка враховує гетерогенність, зокрема, пористість, структури оброблюваного матеріалу, дозволяє порівняно точно визначити температуру різання. Експериментальна (*1*) та теоретична (*2*) прямі розташовані поруч, а різниця між їх значеннями не перевищує 10 %. У випадку розрахунку температури (пряма *3*) за методикою, розробленою для монолітних матеріалів, відзначаються значно більші розбіжності (у середньому 18,7 %) в порівнянні з експериментальними значеннями.

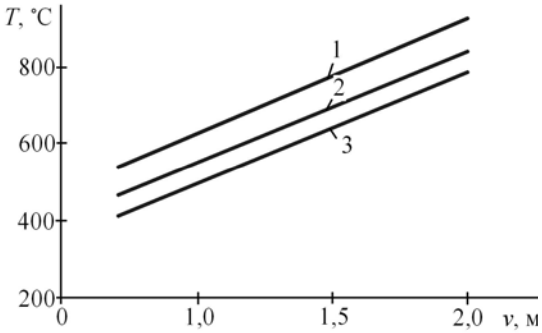


Рис. 3.17. Залежність температури на вершині різця від швидкості різання під час точіння газополуневого покриття, напиленого з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$ (S = 0,05 мм/об; t = 0,15 мм), 1 – експериментальні значення; 2 – розраховані значення для матеріалу с порами; 3 – розраховані значення для монолітного матеріалу.

3.4.2. Температура при різанні композитів на полімерної основі

Полімерні композити піддаються практично всім видам механічної обробки. Особливостями процесу різання полімерів являється – інтенсивне

зношування і затуплення різальних інструментів із-за наявності в складі полімерів важкооброблюваних наповнювачів.

Зниження експлуатаційних характеристик інструментів відбувається внаслідок перегріву. При цьому через погану теплопровідність більшості композитів на полімерній основі, тепло, що утворюється при різанні, може відводитися тільки в різальний інструмент. Враховуючи це, а також низьку температуру плавлення полімерів, режими різання вибирають головним чином за умов відсутності термічної деструкції полімеру та досягнення необхідній якості оброблюваної поверхні виробу. Таким чином, при обробці полімерів потрібно керуватися законами швидкісного, а не силового різання.

Як при обробці композитів з металевою матрицею, так і при обробці різанням полімерних композиційних матеріалів джерелом утворення теплоти є робота, витрачена на деформацію зрізаного шару, на подолання сил тертя між оброблюваним матеріалом і стружкою на передній та задній поверхнях інструмента. До того ж теплота різання в обох випадках розподіляється між інструментом, деталлю і стружкою. Однак величина теплових потоків при різанні полімерних і металевих композитів розрізняються досить істотно [1].

Перехід теплоти на поверхні різального клина відбувається нерівномірно. Основна частина теплоти надходить в різальний клин з боку задньої поверхні інструмента, де діють великі сили. Концентрація теплоти в інструменті призводить до формування на різальної кромці і в об’ємі самого різального інструмента значних температур.

За даними в роботі [55], температура в окремих точках різальної кромки досягає значень ~ 500 °С, що значно вище температури теплостійкості полімерних композитів. Відбувається утворення припіків на обробленій поверхні, її деструкція та утворення дефектного поверхневого шару. Дефектний поверхневий шар при різанні, наприклад, реактопластів досягає 0,3...0,4 мм і за кольором відрізняється від кольору вихідної структури матеріалу. Тому при різанні полімерних композиційних матеріалів температура не повинна перевищувати температуру теплостійкості основи композиту.

Відомо, що зливна стружка забирає більшу частину тепла, ніж стружка надлому. Основна ж частина теплоти утворена в процесі різання переходить в різальний інструмент через низьку теплопровідність полімерних композитів, особливо термореактивних. І хоча тверді сплави в інструменті можуть без помітного погіршення різальних властивостей витримувати температуру 900...950 °С, проте концентрація в інструменті основної долі теплоти, що виділяється при різанні таких композитів, сприяє інтенсивному його зношуванню.

Крім того, слід відмітити, що для умов процесу різання матеріалів на полімерній зв'язці в контактній зоні інструмента має місце механо-хімічний вплив продуктів деструкції полімеру, що інтенсифікує зношування інструмента.

Для визначення температури різання при обробці пластмас використовують штучні термопари, методи інфрачервоної пірометрії [56].

Вплив швидкості різання на температуру різання полімерних композитів при використанні твердосплавних інструментів показана на рисунку 3.18.

На рівень температури при різанні таких матеріалів впливає теплопровідність інструментального матеріалу. Чим більша теплопровідність інструментального матеріалу (твердий сплав ВК6), тим краще він відводить тепло. Найнижча температура спостерігається при різанні алмазними інструментами, що мають найбільшу теплопровідність. При роботі з такими інструментами температура різання не перевищує 125...200 °С при зміні режимів різання в широкому робочому інтервалі.

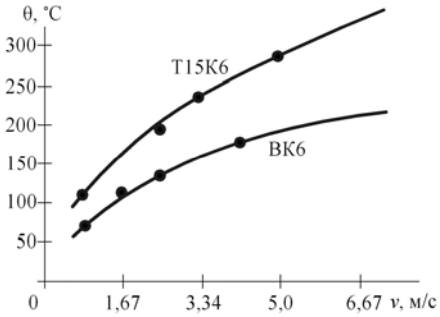


Рис. 3.18. Залежність температури від марки інструментального матеріалу при точінні склотекстоліту (S = 0,21 мм/об; t = 1 мм)

Збільшення зносу інструмента, викликає інтенсивне зростання температури різання. При різанні термопластів вона зростає від 40...50 °С до 300 °С, а при різанні реактопластів від 80...100 °С до 600...650 °С. Для кожного оброблюваного матеріалу в певному інтервалі температур спостерігається

збільшення шорсткості обробленої поверхні і поява інших ознак (оплавлення, виділення газів), які є візуальними ознаками затуплення інструмента [1, 56].

Теплота різання в значній мірі змінює властивості оброблюваного матеріалу. Якщо врахувати, що теплостійкість більшості конструкційних пластмас не перевищує 290 °С, то при температурі 60...90 °С, в разі обробки термопластичних пластмас, спостерігається розплавлення оброблюваної поверхні і налипання зрізаної стружки на інструмент.

Внаслідок чого оброблена поверхня виходить грубою, із задирами і з спотвореними формою і розмірами, а в окремих випадках процес різання стає взагалі неможливим.

Зниження температури в зоні різання при обробці композитів на полімерної основі досягається:

– за рахунок зменшення сил тертя між оброблюваним матеріалом і задньою поверхнею інструмента, а також між стружкою і передньою поверхнею при застосуванні ретельно полірованого інструмента;

– в результаті використання алмазного інструмента, який має значно менший коефіцієнт тертя з оброблюваним матеріалом в порівнянні з іншими інструментальними матеріалами і більш високий коефіцієнт теплопровідності;

– застосуванням інструментів з критичним за величиною переднім і великим заднім кутами, при роботі яких витрачається мінімальна робота, а отже, буде і мінімальне тепловиділення;

– через охолодження стиснутим повітрям або охолоджувальною рідиною, сумісної з видом основі матеріалу.

При цьому слід пам'ятати, що деякі пластмаси поглинають вологу, і в таких випадках застосування охолоджуючих рідин виключається;

– шляхом підбору відповідних режимів різання.

При цьому найбільш сильний вплив на температуру в зоні обробки має швидкість різання.

Емпіричні залежності температури від режимів різання при точінні різних пластмас за даними [56] мають вигляд:

для гетинаксу

$$\theta = C_\theta \cdot v^{0,28} \cdot S^{0,23} \cdot t^{0,22}, \tag{3.17}$$

для фенопласту

$$\theta = C_\theta \cdot v^{0,32} \cdot S^{0,24} \cdot t^{0,17}, \tag{3.18}$$

для амінопластів

$$\theta = C_\theta \cdot v^{0,28} \cdot S^{0,24} \cdot t^{0,21}. \tag{3.19}$$

Приведені залежності температури від режимів різання мають практичне значення, так як їх можна використовувати для визначення максимально допустимої швидкості різання для обробки композиту на основі полімеру в залежності від конкретних значень глибини різання та подачі.

При обробці полімерних композитів, для досягнення максимальної продуктивності механічної обробки при мінімальній температурі різання, рекомендується проводити оброблення на високих швидкостях з малими подачами, і не рекомендується використовувати рідинне охолодження через ковзання інструмента по оброблюваній поверхні.

Для охолодження різального інструмента слід використовувати стиснуте повітря. Також доцільно використовувати інструменти, які мають високу теплопровідність, такі як метало- та мінералокераміка, а також інструменти із надтвердих матеріалів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні характеристики інструментів із ПНТМ.

2. Яким чином впливають основні параметри процесу різання (v, S, t) на температуру різання стосовно інструментів із ПНТМ?

3. Яким чином підвищення температури різання впливає на зношення інструмента?

4. Як пояснюється ефект зниження температура різання при збільшені швидкості обробки?

5. В результаті чого виникають аномально високі температури в контактній зоні різання?

6. Виділіть основні підходи для пояснення високотемпературних явищ в контактній зоні різання.

7. Наведіть та поясніть схему контакту стружки з передньою поверхнею інструмента. Якими явищами супроводжується даний контакт?

8. Коротко опишіть методику розрахунку високотемпературних явищ в зоні різання.

9. Який вплив мають високотемпературні явища на зношення різального інструмента?

10. Яким чином пористість гетерогенних металевих покриттів впливає на температуру різання?

11. Яка специфіка обробки полімерних композитів?

12. Яким чином впливають режими різання, при обробці полімерних композитів, на температуру різання?

13. За рахунок чого можливо досягнути зниження температури різання при обробці полімерних композитів?

14. Які інструментальні матеріали найбільш доцільно використовувати при обробці полімерних композитів?

IV. ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ЛЕЗОВІЙ ОБРОБЦІ

Для створення оптимальних умов на контактних ділянках інструмента із оброблюваною деталлю, однією з необхідних умов є зміна температури різання, оскільки для кожної пари тертя інструмент – деталь існує оптимальне значення температури різання. Обробка з умовами різання, які відповідають оптимальній температурі різання, забезпечують отримання економічних показників процесу обробки та створення на обробленій деталі стану поверхні, що відповідає умовам експлуатаційного навантаження.

Практичне рішення поставленої задачі за рахунок використання параметрів різання, конструкції інструментів, а також впровадження новітніх прийомів організації процесу охолодження, дає можливість змінювати термічний режим процесу обробки в різних місцях зони різання.

Основні способи управління температурою різання при роботі лезвійним інструментом, представлені на рисунку 4.1. Зупинимось окремо на кожному з наведених методів якими можливо забезпечувати направлене регулювання температури.

4.1. Вплив факторів процесу обробки на температуру різання

Вплив будь-якого фактору, слід розглядати через призму того, наскільки важливий його вплив на кількість тепла, що виділяється в процесі зняття стружки матеріалу і приводить до росту температури, а також при зміні якого збільшується теплопередача, тим самим зменшуючи середню температуру в зоні різання. Розглянемо, як буде змінюватися середня температура різання в

залежності від зміни швидкості, подачі, глибини різання, а також особливостей впливу матеріалу оброблюваної деталі та геометричних параметрів інструмента.

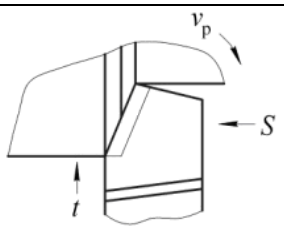
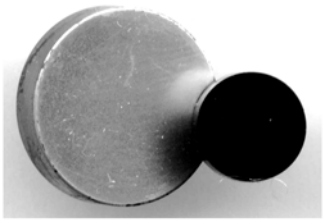
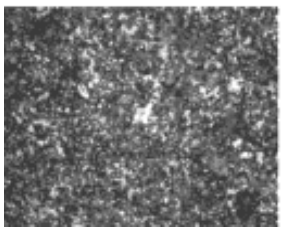
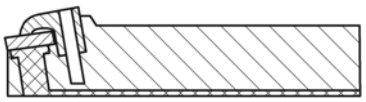
	**Оптимізація режимів різання** + Зменшення зношення інструменту + Зменшення температури різання + Інтенсифікація режимів різання - В умовах виробництва незавжди є можливість розрахунку оптимальних режимів
	**Різальні інструменти із новітніх композитів** + Зменшення коефіцієнта тертя + Підвищення теплопровідності + Інтенсифікація режимів різання + Висока твердість - Трудомісткість проведення досліджень - Висока вартість - Значні внутрішні напруги
	**Зносостійкі покриття** + Зменшення адгезійної взаємодії + Зменшення окислювальних процесів + Зменшення температури різання + Підвищення стійкості інструментів + Інтенсифікація режимів різання + Інформативна функція - Низька міцність з'єднання поверхні покриття з поверхнеюінструменту - Низька стійкість при роботі на удар
	**Інструменти спеціальної конструкції** + Зменшення температури різання + Зменшення інтенсивності зносу + Підвищення продуктивності обробки + Зменшення похибки обробки - Трудомісткість виготовлення інструменту - Зниження жорсткості конструкції інструменту
	ВикористанняМОТС і газових середовищ + Зменшення температури різання + Інтенсифікація режимів різання + Підвищення стійкості інструменту + Змащувальна дія - Трудомісткість проведення досліджень - Небезпека для здоров'я

Рис. 4.1. Основні методи управління тепловим станом в зоні різання

Вплив швидкості різання. Температура в найбільш небезпечній зоні різця – на передній грані, поблизу різальної кромки, залежить від швидкості різання, так як саме в цій зоні формується і розподіляється тепловий потік.

Головним джерелом тепла в даній зоні є теплота тертя стружки по передній поверхні інструмента та теплота деформації самої стружки. Тому при збільшені швидкості різання, майже в такій же степені підвищується робота тертя і, відповідно, кількість утвореної теплоти і температура на передній поверхні інструмента зростає (рис. 4.2).

Однак дана залежність не прямо пропорційна, тому що при збільшені v сила P_z зменшується внаслідок підвищення температури і зменшення пластичних властивостей оброблюваного матеріалу. Крім того, зменшується довжина контакту стружки з передньою поверхнею, в наслідок чого більшість тепла залишається в стружці. Цей ефект полягає в основі розглянутого вище високошвидкісного різання, забезпечуючи не тільки можливість підтримувати постійну температуру різання, але й досягати її зниження в той же час підвищуючи продуктивність обробки. Високошвидкісна обробка характеризується кардинальними змінами в процесі деформування оброблюваного матеріалу. Зрізання шару металу в значній мірі відбувається в результаті крихкого руйнування. Відомо, що енергії для крихкого руйнування потрібно набагато менше, ніж для пластичного. Тому при надвисоких швидкостях різання, не дивлячись на зростання v, температура в зоні різання зменшується в наслідок зменшення роботи деформації метала, а також різкого зниження тертя на контактних поверхнях інструмента.

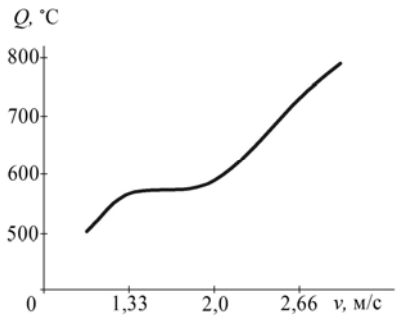


Рис. 4.2. Залежність температури різання від швидкості

Однак у сучасному виробництві не завжди є технології, які забезпечують обробку на високих швидкостях різання, але при удосконаленні обладнання даний метод зменшення температури буде застосовуватись більш активно.

Вплив подачі та глибини різання. Зі збільшенням подачі *S* також мав би збільшуватися тепловий потік в тіло різця, а отже і температура різання, внаслідок збільшення тиску стружки на передню поверхню інструмента та збільшення роботи деформації. Однак, при збільшенні величини подачі відбувається незначне збільшення температури поблизу різальної кромки, що пов'язано зі зменшенням усадки стружки, при цьому відповідно зменшується робота деформації, яка припадає на 1 мм^3 стружки. Крім того, збільшення подачі мало впливає на тертя по задній поверхні інструмента. Тому кількість тепла, яка утворюється в стружці, буде збільшуватися в меншій мірі, ніж збільшення подачі. Одночасно зі збільшенням подачі, збільшується площа контакту різця зі стружкою, що покращує теплопередачу. В результаті зі збільшенням подачі, температура різання підвищується, але в значно менше, ніж при збільшені швидкості різання.

Ще менший вплив на температуру різання має глибина різання *t*, оскільки при її зміні навантаження на одиницю довжини різальної кромки не змінюється. При збільшені глибини різання пропорційно збільшується довжина активної різальної кромки і майже в такій же мірі підвищується теплопередача із зони різання і, як наслідок, збільшення притоку теплоти буде незначним. Тому зі збільшенням глибини різання не відбувається значної зміни температури.

Проаналізувавши вплив основних параметрів процесу різання на температуру, можна зробити висновок, що для зменшення температури різання при заданій площині перетину зрізуваного шару необхідно виконувати оброблення із можливо більшим відношенням *t*/*S*, тобто зі широкими і грубими стружками, які збільшують площу контакту з передньою поверхнею, покращуючи тепловідведення із зони різання. Отже, для зменшення температури в зоні різання необхідно вибирати режими із максимальною глибиною *t*, зменшуючи подачу *S* та ще більше зменшуючи швидкість різання *v*.

Вплив геометрії різця на температуру різання. При зміні головного кута в плані φ площа шару, що зрізається не змінюється, але змінюється довжина активної частини головної різальної кромки. При збільшені φ ця довжина

зменшується, умови теплопередачі погіршуються і температура різання підвищується, при зменшені кута φ відбувається зворотна картина (рис. 4.3).

Зі збільшенням переднього кута γ пластична деформація металу стружки і сили різання зменшуються, отже зменшується і температура різання. Однак при цьому зменшується площа контакту різальної кромки інструмента із стружкою, що зменшує тепловіддачу. При досягненні переднього кута γ деякого значення, умови теплопередачі погіршуються настільки, що температура різання починає підвищуватись, при одночасному знижені сил (рис. 4.4).

Аналогічний вплив на температуру різання має задній кут α.

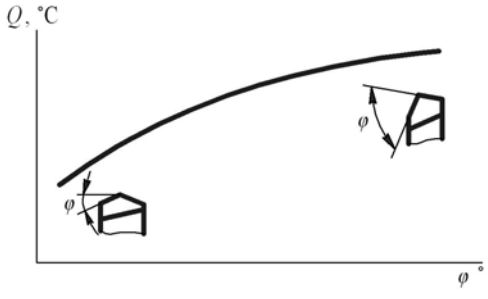


Рис. 4.3. Вплив головного кута в плані φ інструмента на температуру різання

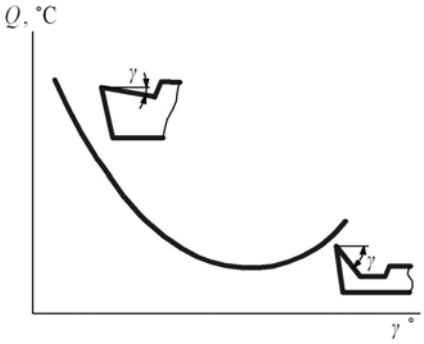


Рис. 4.4. Вплив переднього кута γ на температуру різання

Відносно впливу на температуру різання головного кута в плані φ необхідно враховувати до чого призводить зміна цих кутів – до більшої або меншої деформації оброблюваного матеріалу перед передньою поверхнею інструмента в результаті спільної дії головної та допоміжної різальних кромок. Зменшення величини кута при вершині інструмента ($\varepsilon = 180° - \varphi - \varphi_1$) підвищує кількість тепла в зоні різання.

Очевидно, що збільшення радіуса при вершині *r*, а також площі перерізу *F* державки інструмента умови теплопередачі покращуються і температура в зоні різання знижується.

Вплив оброблюваного матеріалу на температуру різання. Підвищення твердості оброблюваного матеріалу впливає на збільшення температури різання

в зв’язку із ростом роботи стружкоутворення і тертя на контактних ділянках інструмента. При різання крихких матеріалів, таких як чавун, робота пластичної деформації досить мала, питомі сили різання не великі і, відповідно, температура різання нижче, чим при обробці сталі. Але слід враховувати, що чавун має вуглецеві включення і при обробці різанням вони руйнуються з утворенням вільних радикалів, які характеризуються підвищеним зчепленням із поверхнями різального інструмента, внаслідок чого, температура в зоні різання збільшується.

Нагрів інструмента суттєво залежить від теплопровідності оброблюваної деталі. При обробці кольорових металів температура нижча, не тільки через незначні навантаження, але й внаслідок високої теплопровідності даних металів. І, навпаки, при обробці жароміцних сталей, температура різального інструмента значно підвищується.

4.2. Спеціальні конструкції різальних інструментів

Ефективним методом регулювання потужності тепловиділення є розподілення роботи різання між декількома інструментами або зубами, які працюють одночасно або послідовно. Наприклад, заміна розточувального різця зенкером із числом зубців z при однакових режимах різання товщина зрізу на одне лезо зенкера, в z разів менше, ніж при обробці різцем, і, як наслідок, температура в зоні різання кожного зуба зенкера менша, ніж в зоні різання різцем. Періодично перериваючи контакт інструмента із заготівкою, можна керувати температурою різання.

При безперервному точінні температура різання спочатку швидко зростає і при досягненні певного значення стабілізується. Якщо процес обробки зупинити в момент, коли температура різання не досягнула свого найбільшого значення і продовжити обробку після перерви, то граничне значення температури буде нижче [3].

Але в умовах виробництва не завжди можливо замінити токарні операції на операції з використанням багатозубцевого інструмента. Тим більше, що ведення періодичних перерв для покращення термічного режиму різального леза може не компенсувати втрати від зниження продуктивності обробки.

Одним із методів вирішення даної проблеми є застосування ротаційних методів обробки. Ротаційні методи обробки відрізняються від звичайних тим, що крім основних переміщень (*v, S, t*), в процесі різання додається ще один – обертання різального елементу інструмента зі швидкістю v_p (рис. 4.5).

При точінні ротаційним інструментом в роботі бере участь вся різальна кромка, тоді як при нерухомому тільки його частина. Конструктивно таке переміщення на реалізують шляхом обертання робочої частини круглого різця.

Нестаціонарність теплообміну при ротаційній обробці не єдиний фактор, що впливає на зниження температури в зоні різання. За наявності обертового моменту на контактних поверхнях різальної пластини створюються умови тертя, які відрізняються від умов тертя для стаціонарного інструмента із закріпленою пластиною.

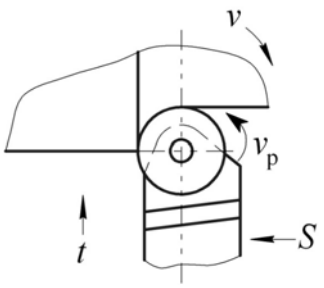


Рис. 4.5. Метод ротаційного точіння

Ротаційне переміщення різальної кромки призводить до зменшення роботи деформації в зоні різання, що веде до зниження тепловиділення еквівалентного даній роботі. Також, при такому методі обробки, суттєво змінюється розподіл теплоти між деталлю, різцем та стружкою. Щільність теплового потоку в різці, що має обертовий різальний елемент, в декілька разів менша, ніж в нерухомому, внаслідок чого температура на передній поверхні інструмента знижується.

В зв’язку з інтенсифікацією теплового потоку в тіло різця, зі збільшенням часу роботи температура різця підвищується. Щоб не допустити перегріву і зниження ротаційного ефекту, необхідно інтенсивно охолоджувати зону різання потоком рідини або стисненим повітрям.

Аналіз використання ротаційної технології обробки показав, що при оптимальній швидкості різання і використанні охолоджуючих середовищ,

можна досягнути такого зниження температури контактних поверхонь інструмента, якого неможливо досягнути будь-яким іншим шляхом. Стійкість інструмента підвищується не тільки за рахунок зниження температури, а й за рахунок збільшення довжини активної ділянки різальної кромки.

Ще одним дієвим способом зменшення температури леза різального інструмента є застосування конструкції інструментів із внутрішнім тепловідведенням (рис. 4.6).

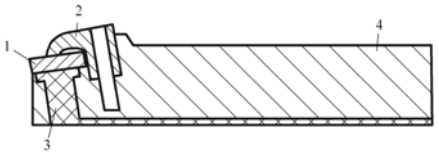


Рис. 4.6. Конструкція різця з внутрішнім тепловідведенням: 1 – різальна пластина; 2 – прихват; 3 – канал заповнений матеріалом з високою теплопровідністю; 4 – державка

Особливістю конструкції даного різця є те, що в державці виконано канал (*3*) заповнений матеріалом з високою теплопровідністю (мідь, алюміній тощо). Як показано в роботі [57], застосування конструкції різця з тепловідведенням призводить до зниження температури різання (рис. 4.7) за рахунок перерозподілу теплових полів та швидшого відведення теплоти із зони різання.

У всьому діапазоні температур різання, різець із внутрішнім тепловідведенням дозволяє проводити обробку зі швидкостями, які на 25...30 % вищі, в порівнянні зі звичайним інструментом, при цьому зношення різальних пластин 1,5 рази менше. Це дає можливість інтенсифікувати режими обробки і збільшити продуктивність процесу.

Вибір раціональної конструкції різальної частини інструмента також має вплив на температуру різання. Для зниження температури в зоні різання доцільно обмежувати довжину контактних ділянок на передній і задній поверхнях інструмента.

Якщо зменшити довжину контакту f_1 стружки із передньою поверхнею, то густина теплового потоку зменшується за рахунок

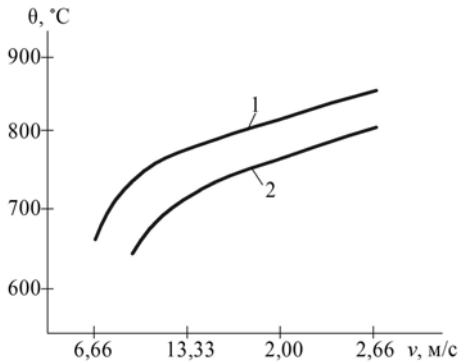
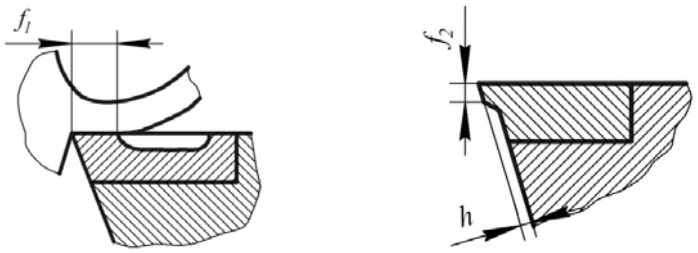


Рис. 4.7. Вплив швидкості різання на температуру різання при точінні звичайним різцем (1) та різцем із внутрішнім тепловідводом (2), різальна пластина ВК6; сталь 12Х18Н9Т; t = 0,5мм; S = 0,4 мм/об)

зменшення площі ділянки тертя, а температура різання зменшується на 20...30 °С. Даного ефекту можна досягти конструктивно, виконавши на передній поверхні інструмента лунку (рис. 4.8, *а*). Зменшення довжини контакту до величини f_1 майже не впливає на теплообмін і температуру на задній поверхні інструмента.

Коли ж стійкість інструмента визначається в основному зносом по задній поверхні, доцільно її обмежити на величину f_2, як показано на рис 4.8, *б*. В такій конструкції різця теплота, що утворюється внаслідок тертя по задній поверхні, досягнувши деякого значення не змінюється, таким чином зменшуючи затуплення інструмента [3].



а *б*

Рис. 4.8. Конструкція різця із укороченою передньою (а) та задньою поверхнею (б)

Відомо, що оброблювана деталь є своєрідним охолоджувачем інструмента. Для того щоб інтенсифікувати відвід тепла із інструмента в деталь, потрібно створити на інструменті малонавантажені тепловідвідні кромки (рис. 4.9). Такі кромки, знімаючи невеликий шар матеріалу, незначно підвищують загальну кількість теплоти, що утворюється при різанні. Завдяки великій довжині контакту з поверхнею оброблюваної деталі, різальні кромки сприяють відводу теплоти із інструмента в тіло деталі. Ефективними є різці, в яких допоміжні різальні кромки виконані із кутом в плані φ = 0 [3].

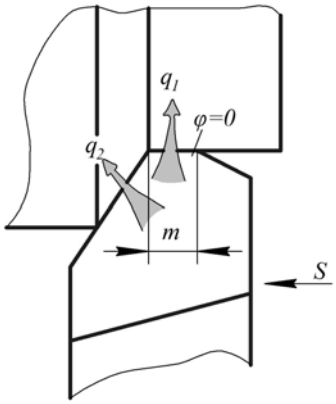


Рис. 4.9. Інструмент із малонавантаженою різальною кромкою

Теплофізичний аналіз показує, що в міру збільшення відношення довжини малонавантаженої

кромки m до подачі S кількість теплоти, що передається оброблюваній деталі через задні поверхні різця збільшується, так як тепловому потоку щільністю q_2 додається інтенсивний потік щільністю q_1.

Тепловідвідні фаски, на робочих поверхнях інструмента із заднім кутом α близьким до нуля також інтенсифікують теплопередачу в оброблювану деталь, а також знижують вібрації в процесі різання.

4.3. Застосування зносостійких покриттів

Однією із основних тенденцій вдосконалення різальних інструментів є формування на їх робочих поверхнях захисних покриттів. Нові можливості покращення працездатності різального інструмента відкриваються завдяки цілеспрямованій зміні фізико-механічних і теплофізичних властивостей поверхневого шару шляхом його модифікації, що дозволяє збільшити зносостійкість робочих поверхонь інструмента, особливо непереточуваних пластин з твердих сплавів та різальної кераміки [58].

Зносостійкі покриття повинні мати: високу твердість і зберігати її при температурах різання; бути інертними до адгезії та високотемпературної корозії з оброблюваним матеріалом у всьому діапазоні температур різання; відрізнятись стабільністю механічних властивостей; інертність до розчинення в оброблюваному матеріалі при високих температурах; опір до руйнування при значних коливаннях температур і напружень тощо. Також властивості зносостійких покриттів повинні бути сумісними з властивостями матеріалу інструмента і мати високу адгезійну і когезійну міцність.

При цьому матеріали покриття та інструмента повинні мати: спорідненість кристалохімічної будови; оптимальне співвідношення основних фізико-механічних і теплофізичних характеристик (модулям пружності, коефіцієнта Пуассона, лінійного розширення, тепло- і температуропровідності); малу схильність матеріалів до твердофазних, дифузійних реакцій у всьому діапазоні температур і напружень в умовах процесу різання.

Формування зносостійких покриттів на різальному інструменті полягає в створені на робочих поверхнях покриття з мінімальним напружено-деформованим станом, виходячи з умов когезійної міцності його поверхневого шару при термосиловому навантажені в процесі різання з урахуванням залишкових напружень в системі «покриття-основа», що дозволить підвищити працездатність різального інструмента [58].

До загальних вимог, що відносяться до зносостійких покриттів, належать: висока щільність і суцільність покриття, що забезпечують захист матеріалу інструмента від взаємодії з оброблюваним матеріалом і навколишнім середовищем; стабільність властивостей покриття в часі; малі коливання товщини покриття в межах робочих поверхонь, які дозволяють зберегти геометричну точність інструмента, можливість отримання покриттів гранично простим і економічним способом.

В каталогах продукції світових виробників різального інструмента і в технічній літературі з'явилася інформація про інструменти, які оснащені полікристалічними надтвердими матеріалами на основі кубічного нітриду бору із захисними покриттями. Для мінімізації зношування різальних інструментів, за рахунок зниження інтенсивності адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом, застосовуються покриття TiN, TiAlN, TiSiN, а для окислювальних процесів – покриття з Al_2O_3 [59, 60].

Такі інструменти рекомендують для обробки загартованих сталей, марганцевих сталей та вибіленого чавуну. Наявність покриття забезпечує підвищення стійкості інструмента, полегшує визначення величини зношення.

Наявність на контактних поверхнях інструмента захисних покриттів призводить до зміни механіки і фізико-хімії контактної взаємодії інструмента і оброблюваного виробу.

Перше зумовлюється перерозподілом напружень на поверхнях інструмента, зміною коефіцієнта тертя і, як наслідок, сил і температури різання.

Друге пов'язане з тим, що для забезпечення найбільш оптимальних умов роботи різального інструмента в кожному конкретному випадку потрібно

вибирати таке покриття, яке забезпечує мінімізацію або відсутність ефектів, що роблять найбільший негативний вплив на працездатність різального інструмента [51].

Захисне покриття може виконувати роль пасивного протектора, який перешкоджає безпосередньому контактування інструментального та оброблюваного матеріалів в зоні різання, або грати «активну» роль, змінюючи умови хімічної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалів в зоні різання.

Вище було показано, що нанесення захисних покриттів змінює розподіл напружень на робочих поверхнях інструмента, а також зменшує адгезійну складову зношення, що в свою чергу впливає на температуру в зоні різання.

На рисунку 4.10 показана поверхня та злам різального інструмента із зносостійким покриттям на основі n-TiC/α-C n-TiC/α-C нанесеним на різальну пластину із ПНТМ на основі КНБ.

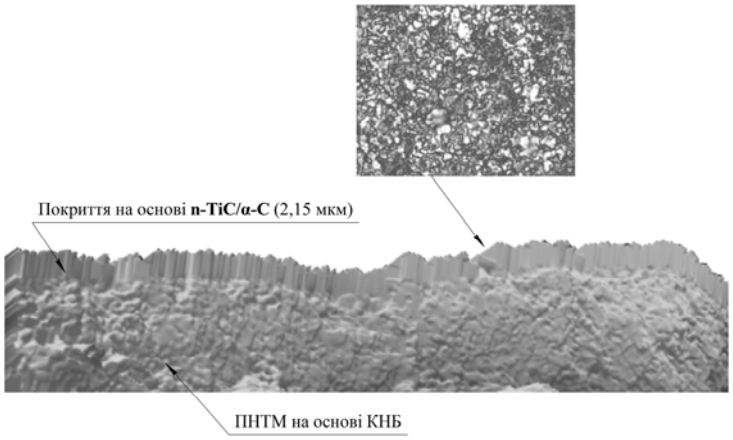


Рис. 4.10. Поверхня та злам різального інструмента із покриттям n-TiC/α-C

Надтверді нанокомпозиційні покриття на основі n-TiC/α-C представляють собою нову генерацію матеріалів. Вони складаються, як мінімум, з двох фаз з нанокристалічною і аморфною структурою. Внаслідок малого розміру зерна (≤ 10 нм) і більш значної ролі граничних зон, які оточують окремі зерна, ведуть себе по різному в порівнянні з матеріалами з розміром зерна більше 100 нм і демонструють абсолютно інші властивості.

Так як ПНТМ на основі КНБ має низьку електропровідність, що унеможливлює вимірювання електрорушійної сили методом природної термопари, для визначення температури різання використовувалася штучна хромель-алюмелева термопара, яка встановлювалася у державку інструмента.

Для врахування факторів, що впливають на тепловиділення, поширення теплоти та розподіл температури при різанні в інструменті, стружці та на поверхнях обробленої деталі використовували метод скінчених елементів [62].

Вихідні дані отримані на основі експериментально-розрахункового підходу з використанням зворотної задачі теплопровідності.

Лінійна нестаціонарна задача теплопровідності описана рівнянням:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\alpha\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right). \qquad (4.1)$$

На рисунку 4.11, *а*. приведено приклад розбивки на елементи моделі різця і його контактних ділянок при моделюванні методом скінчених елементів, а на рисунку 4.11, *б*. – розподіл температури різання на поверхнях інструмента отримані методом МСЕ.

а *б*

Рис. 4.11. Розбивка контактних поверхонь моделі різця (а) та розподіл температури різання на його контактних ділянках (б)

Для визначення температури різання інструментом з ПНТМ на основі КНБ отримана математична модель (4.2), яка описує залежність температури в контрольній точці інструмента від умов обробки.

$$T_C = -4{,}79 + 89{,}20C - 86{,}86C^2 + 0{,}17T_P + 0{,}20CT_P \quad (4.2)$$

де C – довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента, мм; T_P – температура різання, ^{0}С; T_C – температура в контрольній точці, ^{0}С.

Довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента:

$$C = a\zeta^{0,1}[\zeta(1 - tg\gamma) + sec\gamma] + (0{,}40 - 0{,}56).$$

Вирішуючи рівняння (4.2) відносно T_P, знаходимо середню температуру різання для інструмента з покриттям і без покриття, шляхом зміни розрахованої температури в контрольній точці T_C. Отриманні результати представлені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1.Результати досліджень температури різання при точінні сталі ШХ15

v, м/с	S, мм/об	T_C, °С	T_p, °С
Без покриття			
1,56	0,12	198	815
2,08			944
2,33		275	1092
2,66			1207
3,16		324	1310
2,33	0,12	275	1092
	0,15		1135
	0,19	295	1181
	0,25		1225
	0,29	308	1238
З покриттям			
1,56	0,12	170	726
2,08			847
2,33		258	1016
2,66			1143
3,16		310	1305
2,33	0,12	258	1016

	0,15		1075
	0,19	278	1125
	0,25		1187
	0,29	305	1224

Як видно з таблиці 4.1, температура різання для інструмента з покриттям має дещо нижчі значення, ніж для інструмента без покриття. Наявність покриття вносить зміни у механізм взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом, тим самим зменшує коефіцієнт тертя і, як наслідок – температуру різання.

Ще одним можливим поясненням даного ефекту є те, що при зміні коефіцієнта тертя відбувається перерозподіл напружень на контактних поверхнях інструмента.

При інтенсифікації режимів різання, або збільшенні терміну роботи інструмента, температура різання підвищується і майже дорівнює температурі різання інструментом без покриття, що пов’язано з руйнуванням зносостійкого покриття та винесенням його за межі зони контакту.

На рисунку 4.12, представлено залежність температури різання від швидкості різання для інструмента з покриттям та без покриття, а на рисунку 4.13 – від подачі. При збільшені швидкості різання різниця між температурою різання інструментами з покриттям та без покриття зменшується інтенсивніше, ніж при режимах різання при збільшені подачі

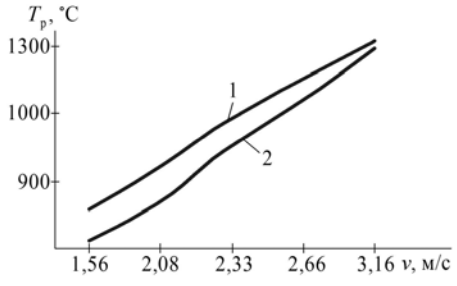


Рис. 4.12. Залежність температури різання від швидкості різання для інструмента з покриттям (1) та без

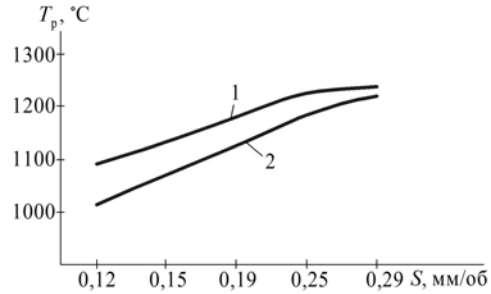
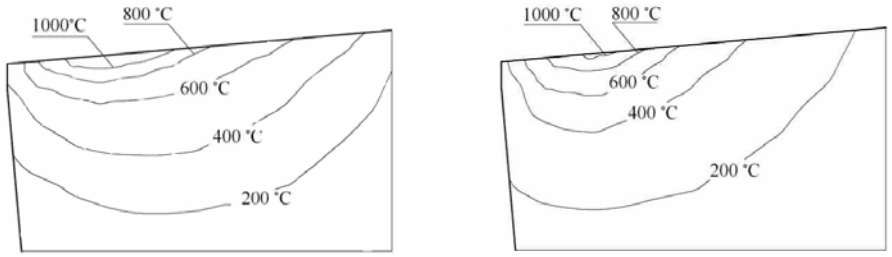


Рис. 4.13. Залежність температури різання від подачі для інструмента з покриттям (1) та без покриття (2);

покриття (2); (S = 0,12 мм/об; t = 0,3 мм) *(v = 140 м/с; t=0,3мм)*

В роботі [63] досліджено розподіл температурного поля (рис. 4.14) в зоні різання для твердосплавного інструмента ВК8 зі зносостійким покриттям TiN, і показано, що температурне поле в різальному клині інструмента із покриттям (рис. 4.14 б) займає значно меншу площу в зоні контакту, ніж температурне поле для інструмента без покриття (рис. 4.14 а).



а *б*

Рис. 4.14. Розподіл температури в різальному клині інструмента без покриття (а) та з покриттям TiN (б): v = 2,66 м/с; S = 0,3 мм/об; t = 1 мм

Зносостійке покриття TiN знижує температуру різання внаслідок зменшення коефіцієнта тертя на передній поверхні різального інструмента і потужность теплового потоку. Зміщення значень ізотерм пов’язане із зменшенням довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструмента.

Формування карбонітридних покриттів TiCN і TiZrCN викликає ще більшу трансформацію ізотерм в бік різальної кромки інструмента, внаслідок зменшення довжини контакту в порівнянні з покриттям TiN.

В деяких випадках застосування зносостійких покриттів дає можливість відмовитись від використання охолоджуючих рідин. Наприклад, використання покриття TiAlN в більшості випадків виключає використання МОТС. Висока теплопровідність покриття покращує теплопередачу із зони різання і запобігає утворенню тріщин в процесі обробки. При цьому термін служби інструмента збільшується, а середня температура різання зменшується, що пов’язано з

пониженим коефіцієнтом тертя, а також стійкістю до окислення при високих температурах.

Скінченно-елементний аналіз різального інструмента з покриттями дозволив отримати розподіл температурних полів при термосиловому навантаженні і показав, що модифікація поверхні інструмента покриттями викликає зміну напружено-деформованого стану як в поверхневих шарах, так і по глибині різального інструмента [48].

Результати досліджень інструмента зі зносостійким покриттям показали, що основною причиною впливу покриття на тепловий стан інструмента є зміна умов контактної взаємодії з оброблюваним матеріалом.

Зносостійкі покриття знижують довжину контакту стружки з передньою поверхнею, складові сили різання, що призводить до зменшення інтенсивності джерел теплоти деформації $q_д$, тертя по передній та задній поверхні $q_п$ і $q_з$. Це в свою чергу зменшує кількість теплоти, що надходить до різального клину.

Однак, не завжди і не всі зносостійкі покриття дають змогу зменшити температуру різання. В роботі [48] для зменшення окислювальних процесів на контактних ділянках різального інструмента із ПНТМ на основі КНБ використано зносостійке покриття на основі Al_2O_3.

Представлені результати (рис. 4.15) залежності температури різання від швидкості при точінні сталі ШХ15 (60– 62 HRC), отриманні розрахунково-експериментальним шляхом, показали, що температура при різанні інструментом із покриттям на 10...30 °С вища ніж для інструмента без покриття. Такий ефект визначається зміною характеру тертя на контактних ділянках інструмента і, як наслідок, збільшенням коефіцієнта тертя для інструмента з покриттям, а також деяким підвищенням шорсткості поверхні інструмента при формуванні покриття за рахунок неоднорідності розподілення електричного

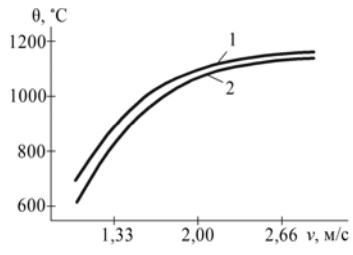


Рис. 4.15. Вплив швидкості різання на температуру різання при точінні сталі ШХ15 (S = 0,09 мм/об; t = 0,25 мм) різцем з покриттям (1) та без покриття (2)

потенціалу на виступах та впадинах вихідної поверхні.

Ефективність використання зносостійких покриттів на різальних інструментах, визначається багатьма факторами: твердістю і зносостійкістю покриття, малою адгезійною активністю по відношенню до оброблюваного матеріалу, міцністю зчеплення з інструментальним матеріалом, коефіцієнтом термічного розширення, теплопровідністю, здатністю зберігати основні властивості при високих температурах. Застосування покриттів істотно впливає на характеристики процесу різання, збільшуючи опір контактних площадок макро- та мікро руйнування, що зумовлюють перерозподіл напружень, коефіцієнта тертя і, як наслідок, сил і температур різання. Зносостійкі покриття можна розглядати, як своєрідний проміжний технологічний шар між контактуючими поверхнями інструментального і оброблюваного матеріалу, за рахунок якого можна керувати властивостями інструментального композиту, основними показниками процесу, зносом і працездатністю інструмента, шляхом вибору складу, структури і будови покриття, типу його зв’язку з інструментальним матеріалом і технологічними умовами його формування.

4.4. Мастильно-охолоджуючі технологічні середовища

У процесах механічної обробки поверхневі шари оброблюваної деталі та інструмента знаходяться в стані активної фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем, що вводиться в зону обробки у вигляді так званих мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ. При правильно вибраному складі й способі використання МОТС можна значно зменшити сили тертя на контактних ділянках «інструмент–деталь–стружка», зменшити тепловиділення і посилити відведення теплоти, а також забезпечити видалення стружки і відходів обробки із зони різання та з робочих поверхонь інструмента. У результаті зменшується зношення, затуплення та засалювання інструмента, підвищуються його працездатність та період стійкості. Все це дозволяє значно підвищити продуктивність обробки і поліпшити якість деталей.

Ефективність застосування МОТС багато в чому залежить від способу попадання їх в зону різання (рис. 4.16).

Температура різання знижується головним чином за рахунок зниження температури контактної зони різець – стружка, яка при охолодженні з боку передньої поверхні майже не змінюється і дещо знижується при охолодженні з боку задньої поверхні.

Всі мастильно-охолоджувальні технологічні середовища за агрегатним станом розділені на чотири типи: газоподібні, рідкі, пластичні і тверді.

Найбільш розповсюдженими є рідкі мастильно-охолоджуючі технологічні середовища. Їх прийнято називати мастильно-охолоджуючими рідинами. Ефективність дії мастильно-охолоджуючих рідин в значній мірі залежать від способу підведення їх в зону різання (Рис. 4.16).

Поширеним способом подачі таких рідин є полив вільним струменем. Вільно падаючий струмінь, витікає із сопел різних конструкцій під тиском 0,03...0,1 МПа, тобто під дією сили тяжіння, і поливає зону різання. Цей метод подачі рідини в зону різання малоефективний і має суттєві недоліки: велика витрата рідини (10-16 л/хв), розбризкування рідини, слабкий змащувальний ефект [64].

Більш ефективним є високонапірне охолодження. Рідину подають під тиском 1,5…2,0 МПа зі сторони задньої поверхні інструмента через отвір діаметром 0,4…0,5 мм, при цьому витрати рідини становлять приблизно 0,5 л/хв. На операціях глибокого свердління та при виконанні алмазно-абразивного шліфування на верстатах з ЧПК тиск струменя рідини досягає 10 МПа.

В результаті високого тиску частки рідини інтенсивніше проникають в мікротріщини, швидше перетворюються в пар та охолоджують нагріті поверхні. Напірний струмінь можна подавати як в зону обробки, з боку задньої грані інструмента, так і по каналах в тілі інструмента. При подачі в зону обробки швидкість напірного струменя сягає 40...60 м/с.

Але струминне охолодження також має недоліки: необхідність застосування насосів; сильне розбризкування рідини, застосування спеціальних захисних пристроїв; необхідність ретельної очистки рідини.

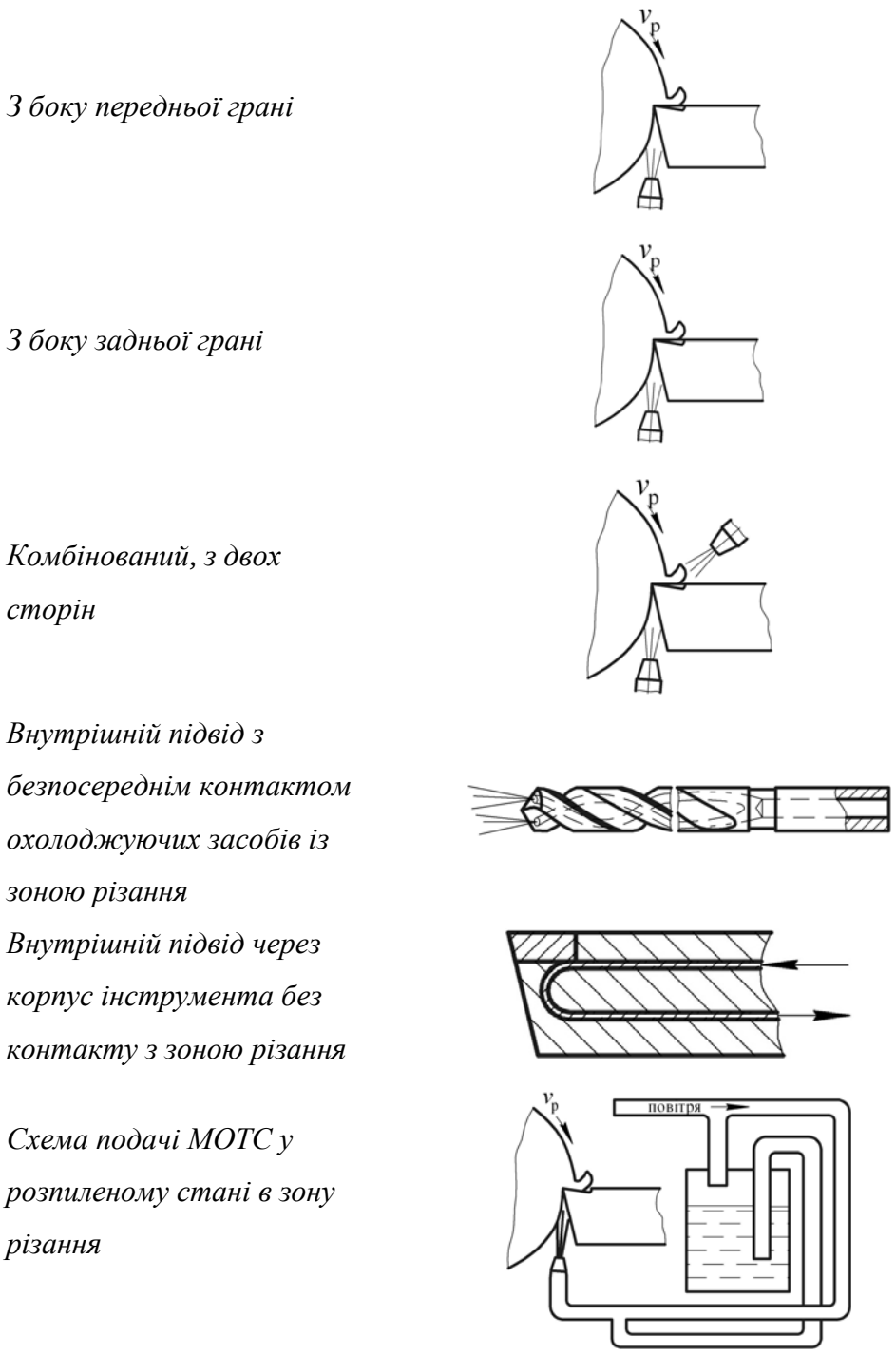


Рис. 4.16. Методи подачі МОТС в зону різання

З метою зменшення розбризкування рекомендується розгалужувати потік мастильно-охолоджуючої рідини:

– частину потоку МОТС направляти у вигляді тонкого напірного струменя;

– частину МОТС – вільним поливом.

Недоліки подачі мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ високонапірним струменем наступні:

– необхідність оснащення верстата спеціальною насосною станцією;

–труднощі пов’язані із забезпечення у виробничих умовах потрібного напрямку струменя МОТС на різальну кромку інструмента;

– сильне розбризкування рідини;

– необхідність ретельного очищення МОТС.

Подача мастильно-охолоджуючого технологічного середовища в розпиленому стані здійснюється шляхом змішування МОТС і повітря, а суміш у вигляді аерозолю направляють в зону різання.

Ефективність дії МОТС при такій подачі можна пояснити підвищенням фізичної і хімічної активності МОТС, порівняно з охолодженим нерозпиленим струменем. До переваг такої подачі мастильно-охолоджуючого технологічного середовища відносяться незначні витрати рідини, наприклад, 400...500 г/год водного мастильно-охолоджуючого технологічного середовища.

При використанні систем з малою подачею МОТС, виникнення аерозолів відбувається при подачі рідини в робочу зону, причому висока концентрація аерозолів спостерігається при зовнішній системі розпилення. При цьому аерозоль представляє собою масляний туман (розмір часток від 1 до 5 мкм).

Розпилені мастильно-охолоджуючі технологічні середовища застосовують в наступних випадках:

– на операціях, де застосування МОТС поливом неможливо;

– при обробці важкооброблюваних матеріалів, коли полив не ефективний;

– для зменшення температурних деформацій деталей в процесі обробки.

Аерозолі з успіхом застосовують на агрегатних верстатах, автоматичних лініях і верстатах з ЧПК, в тому числі багатоопераційних.

Подача мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ по каналах в тілі інструмента є досить ефективною, але вона використовується для обмеженої номенклатури інструментів [64].

Для підведення МОТС до обертових інструментів з внутрішніми каналами застосовують спеціальні патрони із маслоприймачами. Глибокі отвори свердлять з примусовим зовнішнім або внутрішнім відводом стружки і підведенням МОТС під високим тиском, застосовуючи при цьому спеціальні різальні інструменти.

Така технологія подачі мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ поширена при обробці глибоких отворів спіральними свердлами, твердосплавними свердлами однобічного різання, рушничними і кільцевими свердлами, мітчиками, протяжками.

При глибокому свердлінні рідина під тиском 2,0…2,5 МПа попадає в зону різання по каналах, або по трубкам, вмонтованим в інструмент. У цьому випадку охолоджуються інструмент, зона різання і одночасно вимивається стружка.

Іноді застосовують внутрішнє охолодження інструментів (при свердлінні або точінні крихких матеріалів). Для цього в інструменті роблять канали, по яких прокачуються охолоджуючі рідини.

Охолодження розпорошеною рідиною проводять за допомогою інжекторної установки. Розпорошена емульсія подає в зону різання з боку задньої поверхні інструмента. При виході із сопла, рідинна суміш легко розширюється, унаслідок чого відбувається зниження її температури на 10…12 °С. Попадаючи на нагріті поверхні заготовки і інструмента, частинки рідини миттєво випаровуються і відводять велику кількість теплоти.

При невеликих витратах рідини (200…400 г/год) ефективно використовуються її змащувальні і охолоджуючі властивості. Стійкість інструментів при охолоджені розпорошеною рідиною в порівнянні зі стійкістю при охолоджені вільним струменем значно збільшується. Але цей метод

вимагає ретельного дотримання правил техніки безпеки. Для захисту від туману, на верстатах встановлюють спеціальні відсмоктуючі установки.

Ефективним методом охолодження поверхонь різального інструмента є застосування різноманітних газів (стисле повітря, вуглекислоту тощо). Газ подається під високим тиском через отвір в інструменті і виходить із малих каналів під пластиною якомога ближче до різальної кромки. При розширенні газу температура інструмента знижується. Газ охолоджує зону різання і одночасно видаляє стружку. Однак такий спосіб охолодження досить дорогий і не отримав широкого застосування.

Охолоджуючий вплив мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ. При різанні основна частина механічної енергії перетворюється в теплоту. Охолоджуюча дія МОТС заснована на законах теплообміну. Нагрітий до високих температур різальний інструмент, заготовка та стружка передають, шляхом конвективного теплообміну мастильно-охолоджуючому середовищу частину тепла.

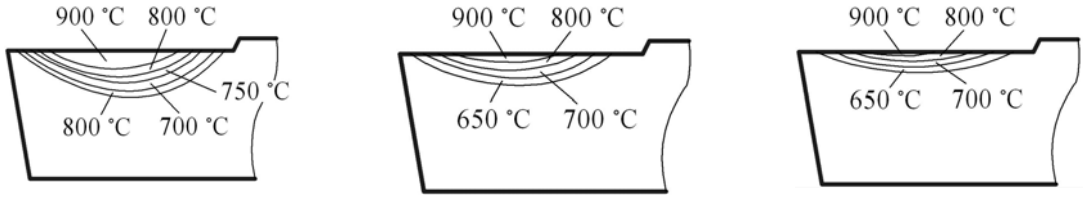
Крім того, тепловідведення при різанні може здійснюватися внаслідок теплопередачі випромінюванням, випаровуванням середовища і протіканням хімічних реакцій, що відбуваються при поглинанні теплової енергії.

Теплопередачі, пов’язані з випромінюванням, випаровуванням і хімічними реакціями, невеликі. Тому при оцінці охолоджуючої дії МОТС обмежуються розглядом конвективного теплообміну, який залежить, головним чином, від теплофізичних властивостей і гідродинамічних умов подачі рідини.

На теплообмін найбільше впливають в’язкість, теплопровідність, теплоємність, щільність і змочувальна властивість МОТС, а також різниця температур охолоджувальної поверхні і потоку рідини.

У процесі різання найбільшому впливу високої температури піддається інструмент. Дослідження показують, що застосування мастильно-охолоджуючого середовища не перешкоджає виникненню високої температури в інструменті [65].

Однак вплив мастильно-охолоджуючого технологічного середовища істотно зменшує область нагрівання інструмента (рис. 4.17). При цьому подача МОТС під тиском на допоміжну задню поверхню інструмента більш ефективна, ніж її полив вільно падаючим струменем на передню поверхню інструмента.



а *б* *в*

Рис. 4.16. Розподіл температури на передній поверхні інструмента з швидкорізальної сталі при обробці заліза (v = 3,0 м/с): а – без використання МОТС; б – при поливі МОТС струменем; в – при подачі МОТС під тиском

Застосування охолоджуючої рідини не перешкоджає утворенню високої температури в зоні пластичного деформування, яка недоступна прямому впливу мастильно-охолоджуючого технологічного середовища. Максимальна температура на передній поверхні інструмента складає більше 900 °С, незалежно від того як відбувався процес різання – без використання МОТС, поливом МОТС чи її подачею під тиском.

Охолодження направленим струменем рідини, поданим під тиском обумовило різке зростання градієнту температури.

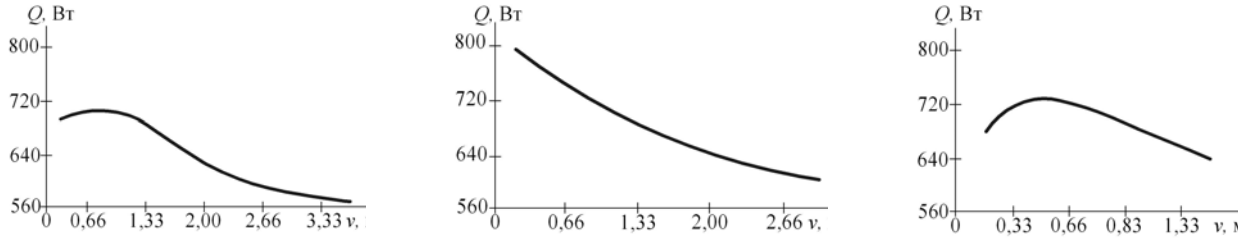
Охолоджуюча дія мастильно-охолоджуючого технологічного середовища може мати і негативні наслідки. Так, наприклад, при фрезеруванні твердосплавним інструментом з високою швидкістю різання, застосування МОТС призводить до значних градієнтів температури різальної частини фрези і зменшення її стійкості. Крім того, інтенсивне охолодження поверхні оброблюваного виробу призводить, як правило, до виникнення в металі внутрішніх напружень, що погіршує експлуатаційні властивості виробу.

В роботі [66] проведені дослідження у яких як мастильно-охолоджуючі технологічні середовища були використані різні речовини, включаючи воду та водяний туман, для визначення впливу парового шару на процес охолодження.

В початковий момент нагрівання інструмента охолодження потоком води більш ефективне, ніж водяним туманом. Однак при температурі ~ 650...700 °С охолодження туманом значно краще, ніж потоком води. В інших діапазонах температур охолодження водяним туманом менш ефективне.

Автори [66] пояснюють даний ефект тим, що при низьких температурах охолодження відбувається за рахунок передачі тепла рідкій фазі води. При цьому більш ефективне використання охолодження потоком води. При збільшені температури на поверхні інструмента з’являється парова плівка і коефіцієнт теплопровідності знижується. Розпилення води в зоні різання руйнує парову плівку і коефіцієнт теплопровідності збільшується. При більш високій температурі парова плівка збільшується і ефективність охолодження туманом зменшується.

Однією з головних функцій мастильно-охолоджуючого технологічного середовища є відведення тепла із зони різання. На рисунку 4.17 представлена відносна інтенсивність охолодження зони різання водяним розчином соди та мастила при точінні різних матеріалів.



а *б* *в*

Рис. 4.17. Відносна інтенсивність охолодження зони різання водяним розчином соди та мастила при точінні різцем із твердого сплаву ВК 8 – сталі 45 (а), 12Х18Н10Т (б), титанового ВТ22 (в); (S = 0,14 мм/об; t = 1,0 мм)

Як видно з рисунка 4.17, застосування МОТС істотно змінює теплофізичний стан зони різання, забираючи при низьких швидкостях різання до 80 % утвореного тепла. При досягненні швидкостей 1,33...1,66 м/с інтенсивність тепловіддачі різко зменшується, і надалі зменшується незначно.

Такий ефект може проявлятися тільки при наявності перешкод для теплопередачі на контактних ділянках інструмента. Вони можуть утворюватись в результаті гідродинамічних ефектів поверхневі плівки, що блокують теплопередачу, як у тіло інструмента, так і у стружку та заготовку.

Причому при збільшені інтенсивності теплового потоку роль утворених плівок зростає. Тому при низьких швидкостях різання, коли щільність теплового потоку невелика, вони не представляють собою особливих бар'єрів для тепловіддачі. При високих швидкостях у присутності плівок теплопередача може бути настільки ускладнена, що температура різання не буде змінюватись, а може навіть і підвищитись.

Охолоджувальна дія мастильно-охолоджуючого технологічного середовища зменшується зі збільшенням товщини зрізуваного шару і швидкості різання. При швидкості різання 2,5 м/с, температура різання майже не залежить від використання МОТС. В таких випадках охолоджуюча рідина може використовуватись тільки для стабілізації температури оброблюваної деталі з метою зменшення похибки форми, яка виникає внаслідок нерівномірного нагрівання оброблюваної поверхні.

При переривчастих процесах обробки застосування мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ може призвести до негативних наслідків через великі коливання температури на контактних поверхнях інструмента під час робочого та холостого циклів. Термічні напруження, що при цьому виникають, призводять до утворення тріщин і руйнування інструмента.

Вибір марки мастильно-охолоджуючого технологічного середовища визначається процесами, які відбуваються на контактних поверхнях інструмента. При роботі з високими швидкостями доцільно використовувати рідини на водній основі, а при роботі з низькими швидкостями – рідини на основі мастил. Зі збільшенням швидкості обробки збільшується виділення теплоти, в таких умовах для зниження термонапруження процесу різання,

доцільно використовувати мастильно-охолоджуючі технологічні середовища, які мають високі охолоджуючі властивості.

Враховуючи, що більшість мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ є універсальними їх можна використовувати, як при низьких, так і при високих швидкостях різання.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні способи управління тепловим станом в зоні різання.

2. Як впливає варіювання швидкості різання на температуру різання?

3. Опишіть вплив подачі та глибини різання на температуру різання.

4. Який вплив геометрії різця та оброблюваного матеріалу на температуру різання?

5. В чому полягає ідея надшвидкісного різання?

6. Як можна керувати температурою різання, регулюючи довжину контакту інструмента з оброблюваною деталлю?

7. За допомогою яких конструктивних рішень будови різця можна керувати температурою різання?

8. Що дає укорочення контактних ділянок на передній та задній поверхнях інструмента?

9. Яку роль виконують захисні покриття на поверхнях інструмента?

10. Що представляють собою покриття на основі n-TiC/α-C*?*

11. Який вплив захисних покриттів на зношення різальних інструментів?

12. Назвіть основні функції зносостійких захисних покриттів.

13. Яка роль застосування мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ?

14. Назвіть основні методи подачі мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ в зону різання.

15. На що спрямована дія мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ?

16. Чи можна виокремити найбільш ефективний метод управління тепловим станом в зоні різання?

V. АЛГОРИТМ І ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ ТОЧІННІ

5.1. Послідовність розрахунку температури різання

Визначити температуру різання при точінні заготовки зі сталі ШХ15 (R_m = 650 МПа; ω = 0,065 см^2/сек; λ = 0,08 кал/(см·сек·град)).

Інструмент із твердого сплаву Т15К6 (γ = 0°; α = 12°; φ = φ_1 = 45°; λ_p = 0,064 кал/(см·сек·град)).

Режими різання: v = 1,33 м/с; S = 0,5 мм/об; t = 4,1 мм;

Сили різання: P_z = 4960 Н; P_y = 2830 Н.

Коефіцієнт усадки k = 2,85.

Довжина загальмованого шару Δ = 0,05 мм. Довжина контакту по задній поверхні різця l_z = 0,1 мм.

Алгоритм розрахунку за методикою [66]:

1. Визначаємо параметри перерізу зрізу:

$$b = \frac{t}{\sin\varphi} = 4{,}818 \text{ мм}; \; a = S \cdot \sin\varphi = 0{,}425 \text{ мм};$$

2. Розраховуємо довжину контакту по передній поверхні різця:

$$l_p = 2a\left[k \cdot (1 - tg\gamma) + \sec\gamma\right] = 2{,}383 \text{ мм};$$

3. Сила на задній поверхні різця:

$$F_{T.Z.} \approx N_{T.Z.} \approx 2{,}52 \cdot \sigma_{\text{В}} \cdot b \cdot l_z = 78{,}9 \text{ Н};$$

4. Інтенсивність теплового потоку від сил тертя на надрізцевій стороні стружки:

$$q_0 = 6{,}25\frac{P_{N0}\cos\gamma + P_{Z0}\sin\gamma}{b \cdot l_p} \cdot \frac{v}{k} = 4936 \text{ кал/(см}^2\text{·сек);}$$

де $P_{N0} = P_y$ ... $N_{T.Z}$; $P_{Z0} = P_z$ ... $F_{T.Z}$;

5. Розраховуємо кут зсуву:

$$\Phi = \arcsin\left(\frac{\cos\gamma}{\sqrt{k^2 - 2k \cdot \sin\gamma + 1}}\right) = 29°2';$$

6. Інтенсивність потоку тепла, утвореного від деформації матеріалу:

$$q_d = 3{,}9\frac{v \cdot \sin\Phi}{a \cdot b \cdot k}\left[P_{Z0}(k - \sin\gamma) - P_{N0} \cdot \cos\gamma\right] = 22440 \text{ кал/(см}^2\text{·сек);}$$

7. Розраховуємо безрозмірний критерій Пекле:

$$P_e = \frac{1}{6} \cdot \frac{v \cdot a}{\omega} = 87;$$

8. Визначаємо кількість теплоти від деформації, що виноситься стружкою:

$$b^* = \left(1 + 1{,}33 \cdot \frac{k\sqrt{\sin\Phi}}{\sqrt{P_e}}\right)^{-1} = 0{,}848;$$

9. Визначаємо безрозмірний критерій φ', що враховує коефіцієнт, передачі теплоти від поверхні різання в стружку: c = 0,15 (див. додаток)

$$\varphi' = 1{,}33 \cdot 10^{-2}\frac{v \cdot a^2}{\omega \cdot d} = 0{,}03.$$

9. Визначаємо температуру деформації:

$$\Theta_d = 0{,}6\frac{\omega \cdot k}{\lambda \cdot v} \cdot b^* \cdot q_d = 208 \text{ °C;}$$

10. Знаходимо безрозмірну величину, що характеризує форму контактних ділянок:

$$\eta_1 = \frac{b}{l_p} = 2{,}02;$$

Кут загострення різця β та безрозмірна величина η_1 обумовлюють величину функції M_1, яка для нашого випадку складає 0,17 (див. додаток).

11. Розраховуємо температуру різання:

$$\Theta = \frac{l_p^2 \cdot M_1}{\lambda_p (l_p + l_z)} \cdot \frac{0{,}141 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot l_p}{v}} \cdot q_0 + (1 + c) \cdot \Theta_d}{M_1 \frac{l_p}{\lambda_p} + \frac{\Delta}{40\lambda} + 0{,}184 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot l_p}{v}}} = 710^{\circ}\text{C}.$$

5.2. Завдання на самостійну роботу

Таблиця 5.1 Вихідні дані для розрахунку температури різання

№ п/п	Матеріал заготовки	Матеріал істру-менту	Режими різання			Сили різання		Геометричні параметри різця		
			v, м/с	*S*, мм/об	*t*, мм	*Pz*, Н	*Py*, Н	γ°	α°	φ°
1	40ХН	Т15К6	4,4	0,25	0,5	6700	4300	15	7	45
2	12Х18Н3Т	ВК8	4,18	0,23	0,8	9480	5200	15	10	45
3	30Х	Т15К6	3,5	1,2	0,4	4500	2680	10	8	45
4	Ст.45	Т15К6	1,5	0,4	0,2	3200	1580	15	8	45
5	20ХН3А	Т15К6	2,2	1,0	1,0	9800	6500	12	10	45
6	30ХГС	ВК8	0,92	0,52	0,39	8250	3650	0	12	45
7	СЧ20	Т14К8	1,75	0,6	0,25	8480	3640	15	6	45
8	Ст.40	ВК6	2,5	0,3	0,45	5780	3810	10	8	45
9	Ст.20	Т15К10	3,0	0,5	0,2	9570	5600	12	6	75
10	30Х	ВК8	3,25	0,25	0,15	8740	6920	8	10	60
11	20ХН3А	Т15К6	0,95	0,3	0,4	5710	2570	16	12	60
12	40ХН	Т14К8	1,75	1,5	0,5	1100	7690	13	6	45
13	30ХГС	ВК6	3,5	1,75	0,25	8570	6780	8	6	60
14	Ст.40	ВК6	2,9	2,0	0,6	9840	7850	25	12	70
15	СЧ40	Т15К6	4,75	0,5	0,15	4200	3200	8	8	45
16	СЧ20	Т14К8	1,5	0,15	0,2	5720	4560	12	10	45
17	Ст.45	ВК6	2,75	0,2	0,5	8520	2760	8	10	45

18	40ХН	Т15К10	3,5	0,5	0,75	9560	8710	10	8	60
19	12Х18Н3Т	ВК8	4,25	0,8	0,5	7410	6520	16	15	60
20	20ХН3А	Т14К8	2,3	1,0	0,75	8590	6270	12	10	40

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аналітичні методи – 33, 53, 72

Вимірювання температури різання – 32, 33, 34, 37, 43, 44, 48

Вплив швидкості різання – 16, 93, 117, 123, 129, 140

– подачі та глибини – 93, 124, 149

– геометрії різця – 125, 149

– оброблюваного матеріалу – 126

Диференційне рівняння теплопровідності – 25

Діаметр плями контакту – 105, 106

Закон Фур'є – 25, 27, 111

Зносостійкі покриття – 131, 139, 140

ІЧ-випромінювання – 46

Коефіцієнт теплопровідності – 24, 25, 27, 29, 31, 92, 111, 112, 113, 114, 118, 146

– температуропровідності – 28, 55, 114

МОТС – 40, 52, 138, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149

Напруження – 97, 99, 105, 107, 131, 132, 133, 137, 139, 140, 145, 147

Основний закон теплопровідності – 31

Пірометр – 43, 44, 45, 46

Природна термопара – 36

Полімерні композити – 109

Радіаційний метод – 43

Робота тертя – 123

Розподіл температури – 155, 156

Стружка – 11, 17, 18, 20, 21, 22, 35, 45, 50, 92, 95, 116, 124, 141, 144

Температури спалаху – 105, 107, 108, 109

Тепловий потік – 156

Теплові явища – 10, 11, 32, 110

Тепловий баланс – 14, 31

Магма плазма – 100, 101
Метод прозорого інструмента – 50
– мікроструктурного аналізу – 51, 52

Термоіндикатори – 38, 39, 40, 53, 89
Термоперетворювач – 41, 42, 46

Фактична площа контакту – 105, 106
– Фур’є – 53, 56, 58
– функцій Гріна – 60, 64
– інтегральних перетворень – 65, 69, 70, 71
– скінчених елементів – 73, 74, 77, 89, 134
– скінчених різниць – 80, 86, 89
Чисельні методи – 34, 72, 88, 89

Тепловізор – 46, 47, 48, 49, 50, 98
Термопари – 35, 37, 134
– штучні – 35
– природні – 35, 36, 53

ГЛОСАРІЙ

Атомно-силова мікроскопія – (від латин. μΙκροσ – дрібний, маленький та σκοποσ – бачу) – вивчення об‘єктів з використанням атомно-силового мікроскопу, тобто скануючого зондового мікроскопу високої роздільної здатності, принцип дії якого оснований на взаємодії зонду кантилевера з поверхнею досліджуваного зразка.

Вектор – елемент лінійного простору, який позначає напрям зміни певних параметрів.

Геометричні умови – умови однозначності, які задають форму і розміри тіла, в якому протікає процес.

Градієнт – (від латин. “gradiens” – той, що крокує) вектор-функція $\varphi(x, y, z)$: $\overrightarrow{grad}\,\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \frac{\partial\varphi}{\partial y}, \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)$, в якій $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – одиничні вектори декартових осей.

Граничні умови – умови теплової взаємодії тіла з навколишнім середовищем, можуть бути задані у різній формі в залежності від характеру процесу.

Деформація (від новолат. deformatio – спотворення) – зміна відносного положення частинок тіла, зумовлена їх переміщенням у результаті зміни міжатомних відстаней і перегрупування блоків атомів.

Ентальпія – термодинамічний потенціал, що характеризує стан системи в термодинамічній рівновазі у випадку вибору незалежної зміни тиску, ентропії та кількості частинок.

Ентропія (від давньогрец. έντροπία – перетворення) – поняття, уперше введене Клаузіусом у термодинаміці в 1865 р. для визначення міри відхилення реального процесу від ідеального. Визначена як сума зведеної теплоти, є функцією стану і залишається сталою для оборотних процесів.

Коефіцієнт тепловіддачі – α [Вт/(м^2·К)], чисельно дорівнює кількості теплоти, що віддається (отримується) одиницею площі поверхні тіла в одиницю часу при різниці температур між поверхнею і середовищем в один градус і характеризує інтенсивність теплової взаємодії середовища з поверхнею тіла.

Конвекційна тепловіддача – конвекційний теплообмін між поверхнею твердого тіла та рідиною.

Конвекція (конвекційний теплообмін) – перенесення теплоти при переміщенні об'ємів рідини або газу в просторі.

Концентровані потоки енергії (КПЕ) – сфокусовані в області малих розмірів потоки заряджених часток (електронів, іонів), лазерне випромінювання (імпульсно-періодичне та безперервне) з різною довжиною хвилі, імпульсні та безперервні потоки низькотемпературної плазми, радіаційні теплові потоки, високотемпературні понадзвукові газові потоки, хвилі горіння тощо, які використовуються в цілях проведення технологічних операцій зварювання, термічної обробки, розмірної обробки, полірування, напилювання, наплавлення тощо.

Композиційний матеріал – штучно створений неоднорідний суцільний матеріал, що складається з двох або більше компонентів з чіткою межею розділу між ними.

Крайові умови – сукупність початкових (полягають в завданні розподілу температури в тілі в початковий момент часу і необхідні лише при розгляді нестаціонарних задач) і граничних (задаються розподілом температури по поверхні S тіла у будь-який момент часу: $T(x, y, z, t)\big|_s = \varphi(x, y, z, t) = T_s, x, y, z \in S$ умов.

Ламінарний рух (від новолат. lamina – пластинка, смужка) – рух, під час якого рідина або газ переміщується шарами без перемішування та пульсацій (тобто безладних швидких змін швидкості та тиску).

Математична модель процесу – сукупність диференціального рівняння теплопровідності та умов однозначності (початкові та граничні умови, фізичні характеристики матеріалу, геометричні розміри тіла), що описують цей процес.

Метод розділення змінних – один з фундаментальних аналітичних методів розв’язання різних задач.

Механічна обробка матеріалів – це високошвидкісне пружно-пластичне деформування, яке протікає у зоні контакту інструмента з оброблюваною деталлю.

Нестаціонарне температурне поле – (див. Поле) поле, температура якого змінюється і в просторі, і з часом. В цьому випадку кажуть, що температура є функція простору і часу: $T = f(x, y, z, t)$.

Поверхневе натягнення – термодинамічна характеристика поверхні розділу двох фаз, що перебувають у рівновазі, яка визначається роботою оберненого ізотермокінетичного утворення одиниці площі цієї поверхні розділу за умови, що температура, об'єм системи та хімічні потенціали всіх компонентів в обох фазах залишаються постійними.

Поверхнево-активна речовина (ПАР) – хімічна сполука, яка, концентруючись на поверхні розділу фаз, зумовлює зниження поверхневого натягнення.

Полімер – природні та штучні сполуки, молекули яких складаються з великого числа повторюваних однакових або різних за будовою атомних угруповань, з'єднаних між собою хімічними або координаційними зв'язками в довгі лінійні або розгалужені ланцюги.

Променista теплова енергія – це один із видів електромагнітної енергії, яка поширюється у однорідному ізотропному середовищі або вакуумі за допомогою електромагнітних хвиль.

Пружність – властивість речовини чинити механічний опір силі, що діє на неї і набувати після її спаду початкової форми.

Потенціал (векторного поля $\vec{A}(x, y, z)$) – така функція u для якої $\vec{A} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, u$.

Похідна (по напряму) – швидкість зміни функції вздовж цього напряму.

Режими різання – це сукупність значень швидкості різання, подачі або швидкості руху подачі та глибини різання.

Стружка – деформований і відділений в результаті обробки різанням поверхневий шар матеріалу заготовки.

Стаціонарне температурне поле – (див. Поле) поле, температура якого в будь-якій його точці не змінюється з часом, тобто є функцією тільки координат:

$$T = f_1(x, y, z), \ \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

ТермоЕРС – явище виникнення електрорушійної сили між двома контактами різних провідників, які перебувають при різній температурі.

Температура – фізична величина, яка характеризує тепловий стан тіла.

Температурне поле – сукупність значень температур в усіх точках даного простору в даний момент часу.

Теплове випромінювання – процес розповсюдження теплоти електромагнітними хвилями.

Теплоперенесення – фізичний процес передачі теплової енергії від більш гарячого тіла до холодного або безпосередньо (при контакті), або через розділяючу (тіла або середовища) перегородку з якого-небудь матеріалу.

Тепловізор – вимірювально-обчислюваний комплекс, призначений для безконтактного одночасного вимірювання температури усіх точок поверхні об'єкта.

Теплопровідність – молекулярне перенесення теплоти в тілах (або в середовищі між ними), обумовлене неоднорідністю розподілу температури в просторі.

Тепловий потік – кількість теплоти dQ_t, що проходить в одиницю часу dt через одиницю площі ізотермічної поверхні dS, за умов, що напрям у будь-якій точці ізотропного тіла протилежний напряму градієнта температури:

$$q = |\overline{q}| = \frac{d^2 Q_t}{dt \cdot dS} = \frac{dQ}{dS}.$$

Термічні напруження (термонапруження) – міра внутрішніх сил, які виникають в деформованому тілі під впливом зовнішніх термічних дій (високих температурних градієнтів, теплових ударів тощо).

Список літератури

1. *Ящерицын П. И.* Основы резания материалов и режущий инструмент: [Учебник для машиностроительных спец. ВУЗов] / П. Н. Ящерицын, М. Л. Яременко, Н. И. Жигалко. – 2-е изл., доп. и перераб. – Москва: Высшая школа, 1981. – 790 с.

2. *Якимов О. В.* Теплофізика механічної обробки: Підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, Л. Т. Слободяник, Д. В. Іоргачов // Одеса: Астропринт, 2000. – С. 256.

3. *Резников А. Н.* Тепловые процесы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников // М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

4. *Трент Е. М.* Резание металлов: Пер. сангл. / Пер. Г. Н. Айзенштока. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 263.

5. *Неумонина Н. Г.* Тепловые процессы в технологической системе резания: Учебное пособие / Н. Г. Неумонина, А. В. Белов. – Волгоград: ВолгГТУ, 2006. – 84 с.

6. *Бобров В. Ф.* Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

7. *Можаев С. С.* Скоростное и силовое точение сталей повышенной прочности / С. С. Можаев, Т. Г. Саромотина. – М.: Оборонгиз, 1957. – 273 с.

8. *Даниелян А. М.* Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов / А. М. Даниелян. – М. : Изд-во МАШГИЗ, 1954–. 276 с.

9. *Кузнєцов В. Д.* Фізика резания и трения металлов и кристаллов. Избраные труды. – М.: Наука, 1972. – 310 с.

10. *Польцер Г.* Основы трения и изнашивания. / Г. Польцер, Ф. Майенр. – М.: Машиностроение, 1984. – 263 с.

11. *Müller-Humel P.* Temperature measurement on diamond-coated tools during machining / Ind. Diam. Rev. – 1995. – 55, № 2. – P. 78-83.

12. *Даниелян А. М.* Резание металлов и инструмент / А. М. Даниелян. – М.: Машгиз, 1950. – 454 с.

13. Розенберг Ю. А. Резание материалов: Учебник для техн. ВУЗов. / Ю. А. Розенберг. – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат», Зауралье, 2007. – 294 с.

14. Мазур М. П. Основи теорії різання матеріалів: підручник / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.; під заг. ред. М. П. Мазура. – Львів: Новий світ, 2010. – 422 с.

15. Криворучко Д. В. Основи 3-D моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів: навчальний посібник / Д. В. Криворучко, В. О. Залога, В. Г. Корбач. – Суми: Вид-воСумДУ, 2009. – 208 с.

16. Alvelid B. Cutting temperature thermoelectric measurements / Alvelid B // Ann. of the CIRP. – 1970. – Vol. 18. – P. 98.

17. Yang H. Dynamics of cutting tool temperatures during cutting process / H. Yang, W. Yang // Exp. Heat Trans. – 1994. – № 7. – P. 108-110.

18. O'Sullivan D. Temperature measurement in single point turning / D. O'Sullivan, M. Cotterell // J. Mater. Process. Technol. – 2001. – Vol. 118. – P. 75-85.

19. Sutter G. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining / G. Sutter, L. Faure, A. Molinari et all. // Int. J. Mach. Tools Manufac. – 2003–. № 3. – P. 97-105.

20. Stephenson D. A. Tool temperatures in interrupted metal cutting / D. A. Stephenson, A. Ali // J. Eng. Ind. – 1992. – № 114(2). – P. 45-58.

21. Kitagawa T. Temperature and wear of cutting tools in high speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn / T. Kitagawa, A. Kubo, K. Maekawa // Wear. – 2002. № 2. – P. 27-35.

22. Komanduri R. A. review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology / R. Komanduri, Z. B. Hou // Trib. Int. – 2001. – № 10. – P. 653-682.

23. Carvalho S. R. Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder / S. R. Carvalho,

S. M. M. Lima e Silva, A. R. Machado, G. Guimaraes // J. of Mater. Process. Technol. – 2006. – P. 86-97.

24. Barrow G. A review of experimental and theoretical techniques for assessing cutting temperatures. / Barrow G. A. // Ann. of the CIRP. – 1973. – № 2. – P. 81-97.

25. Sato M. An experimental technique for the measurement of temperature on CBN tool face in end milling. / M. Sato, T. Heda, T. Hisataka // Int. J. of Mach. Tools Manufac. – 2007. – Vol. 47(14). – P. 120-135.

26. В. А. Николаенко. Использование оптоволокна в оптической системе пирометров. / В. А. Николаенко, А. Ю. Неделько, Д. Ю. Кропасов. / ОАО НПП «Эталон». – 2002. – С. 21-26.

27. Huda A. Measurement of interface temperature between a cutting tool and a chip in turning using two-color pyrometer. / A. Huda, M. Yamada, Keiji et all // The 3rd Int. Symposium on Advanced and Aerospace Sci. & Technol. – 1998. – № 633. – 255 p.

28. Sato K. Grinding temperature / Sato K // Bull. Jap. Soc. Grind. Engrs. – 1961. – 287 p.

29. Tian X. The development and use of thin film thermocouples for contact temperature measurement. / X. Tian, F. Kennedy, J. Deacutis, A. Hennig // Tribol. Trans. – 1992. – №3 – P. 257-272.

30. Arndt G. On the temperature distribution in orthogonal machining / G. Arndt, R. H. Brown // Int. J. Mach. Tool. Des. Res. – 1967. – Vol. 7. – P. 39-53.

31. Kodacsy J. Investigation of cutting of cutting temperatures relation to the tool wear / J. Kodacsy, V. Molnar // Int. j. of Eng. – 2011. – T. IX, № 2. – P. 169-172.

32. Słodki B. Chip forms and their correlation with temperature and cutting forces in inconel 625 and 718 turning. / B. Słodki, G. Struzikiewicz, T. Ślusarczyk // XXV MicroCAD Int. Sc. Conf. Proc. – 2010. – № 12. – P. 159-164.

33. Dinc C. Analysis of thermal fields in orthogonal machining with intared imaging. / C. Dinc, I. Lazoglu, A. Serpengurel // J. of Mater. Process. Technol. – 2008. – № 198. – P. 147-154.

34. Николаев В. А. Тнокое точение спеченных материалов. / В. А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1979. – 64 с.

35. Wright P. Metallographic methods of determining temperature gradients in cutting tools / P. Wright, E. Trent // Iron and Steel Inst. – 1973. – Vol. 211 (5). – P. 364-368.

36. Спиридонов Ф. Ф. Алгоритмы и методы численного моделирования характеристик теплового состояния системы «деталь-обрабатывающий инструмент» в процессах механической обработки. / Ф. Ф. Спиридон, А. М. Фирсов, В. В. Смирнов. – Барнаул: Изд-во Алтай. гос. технол. ун-та, 2000. – 92 с.

37. Коломиец В. В. Экспериментальное определение температурного поля резца из эльбор-Р. / В. В. Коломиец, В. П. Зубарь, В. В. Голик, В. В. Колганенко // Синт. алмазы. – 1977. – №1. – С. 28-31.

38. Клименко С. А. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. П. Хайфец и др. Под общей редакцией С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.

39. Егоров С. В. Резание конструкционных материалов и режущий инструмент: Лабораторный практикум / С. В. Егоров, А. Г. Червяков. – М.: Высшая школа. – 1996. – 188 с.

40. Клименко С. А. Температура при точении напыленных порошковых покрытий / С. А. Клименко, Л. Г. Полонский, Ю. А. Муковоз // Сверхтв. мат. – 1994. – № 5/6. – С. 44-47.

41. Coupard D. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V / Int. J. of Mach. Tools Manufac. – 2008. – № 48. – P. 275-288.

42. Abdel-Aal H. A. Influence of thermal conductivity on wear when machining titanium alloys. / H. A. Abdel-Aal, M. Nouari // Trib. Int. – 2009. – № 42. – P. 359-372.

43. Dearnley P. A. Evaluation of principal wear mechanisms of cemented carbides and ceramics used for machining titanium alloys IMI318. / P. A. Dearnley, A. N. Grearson // Trib. Int. – 2009. – № 42. – P. 359-372.

44. Клименко С. А. Высокотемпературные явления при обработке материалов резанием / С. А. Клименко, А. С. Манохин // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. науч. тр. – Краматорск. – 2011. – Вып. №28. – С. 61-65.

45. Хайнике Г. Трибология: Пер. с англ. / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.

46. Ковальчик Ю. И. Теоретическое и экспериментальное исследование температуры вспышек. // Вісник Харківського нац. ун-ту. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2008. – № 833. – С. 140-148.

47. Рыжкин А. А. О влиянии параметров температурного поля на трибологические характеристики пары трения // Вестник ДГТУ. Сер. Трение и износ. – 2005. – С. 460-472.

48. Копейкина М. Ю. Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием / М. Ю. Копейкина, С. А. Клименко, Ю. А. Мельнийчук, В. М. Береснев // Сверхтв. мат. – 2008. – № 5. – С. 87-97.

49. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

50. Turkevich V. Z. Thermodynamics of the interaction in the CBN-based tool material – Fe(Ni) system / V. Z. Turkevich, S. A. Klimenko, O. G. Kulik // Transactions SMF. – 1999. – Vol. XXVIII. – P. 8-11.

51. Худобин Л. В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л. В. Худобин, Е. Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1987. – 189 с.

52. Сидоров А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

53. Филоненко С. Н. Резание металлов. – К.: Техніка, 1975. – 232 с.

54. Мельнійчук Ю. О. Особливості точіння покриттів з аморфно-кристалічною структурою / Ю. О. Мельнійчук, С. А. Клименко // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства: Зб. наук. праць. – Харків: ХДТУСГ. – 2001. – Вип.8, Том1. – С. 69-74.

55. Буланова М. В. Исследование температуры резания при точении органопластиков / М. В. Буланова, В. Н. Подураев // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1979. – №5. – С. 18-22.

56. Штучный Б. П. Механическая обработка пластмасс: Справочник. – 2-е узд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.

57. Мироненко В. В. Дослідження теплового поля у збірних токарних різців з пасивним внутрішнім тепловідводом / В. В. Мироненко, Ю. Д. Юрченко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Науково-технічний журнал. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – № 3-4. – С. 145-149.

58. Антонюк В. С. Формування покриття підвищеної зносостійкості на робочих поверхнях різального інструмента. / В. С. Антонюк // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ», 2003. – Вип. 44. – С.110-112.

59. Гнесин Г. Г. Износостойкие покрытия на инструментальных материалах (Обзор). / Г. Г. Гнесин, С. Н. Фоменко // Порошковая металлургия. – 1996. – № 9-10. – С. 17-28.

60. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов: Справ. изд. – М.: Металлургия, 1988. – 319 с.

61. Антонюк В. С. Определение влияния покрытия на напряженно-деформированное состояние режущей части инструмента / В. С. Антонюк // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Зб. наук. праць. Тематич. Вип. «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 44. – С. 173-180.

62. Brito R. Thermal analysis in coated cutting tool / R. Brito, S. Carvalho, S. Marcondes, J. Ferreira // Int. Commun. in Head and Mass Trans. – 2009. – №36. – P. 314-321.

63. Табаков В. П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В. П. Табаков, А. В. Чихранов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с.

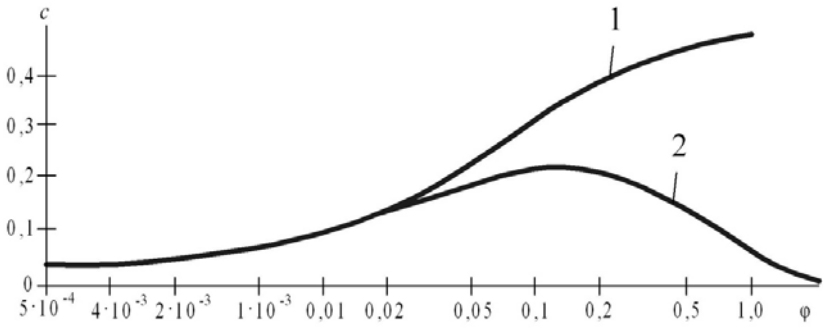
64. Латышев В. Н. Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1975. – 88 с.

65. Армарего И. Дж. А., Браун Р. Х. Обработка материалов резанием. Пер. с анг. В. А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

66. Резников А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

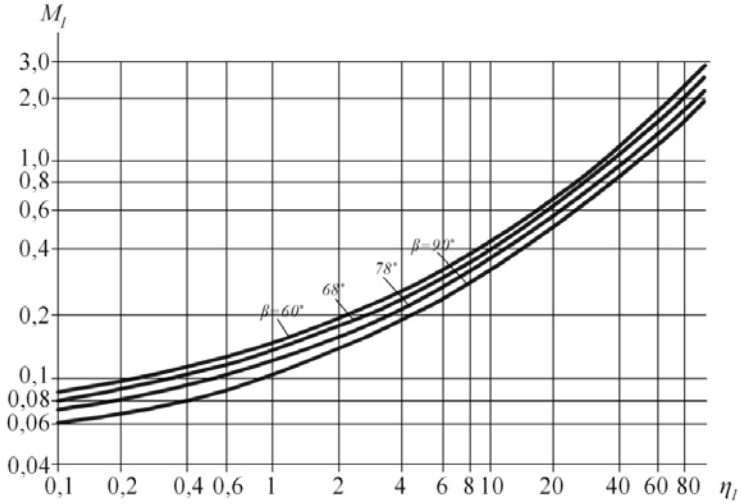
Додаток

Визначення коефіцієнта, що враховує передачу теплоти поверхні різання в стружку, *c*:



Значення коефіцієнта c, що враховує передачу теплоти в стружку через один оберт деталі; 1 – зовнішня сторона стружки; 2 – внутрішня сторона стружки

Визначення коефіцієнта M_1:



Функція M_1 в залежності від кута загострення різця β *і безрозмірної величини* η_1

ВПК «Політехніка»