

**Комфорт.** Chevrolet Aveo вище і просторніше. Ширина (+180 мм) і висота (+100 мм) дверного проема в Aveo значительно більше – пригибаться при посадке приходится значительно меньше. Но само сидение в Aveo установлено выше, из-за чего преимущества более высокого кузова растрачивается. Шумоизоляция Chevrolet Aveo существенно эффективнее, чем в Lanos. Если на холостых оборотах эта разница еще не так ощутима, то после 3000 об/мин шум в Lanos уже становится слишком навязчивым.

**В движении.** Замеры разгонной динамики с хронометром особых отличий не выявили. А вот на скорости свыше 140 км/час Chevrolet Aveo более четко держит траекторию, тогда как Lanos уже начинает “плавать”. Эффективность подвески лучше на Aveo. Он легко проходит мелкие и средние неровности, да и слышны они в салоне меньше.

### **Выводы**

В результате прикладного применения общих теоретических положений для технических систем различного уровня сложности выяснилось, что менее сложные механические объекты с аналитической точки зрения лучше оцениваемы, чем многоуровневые составные системы.

Таким образом, в результате исследования получена уточненная и конкретизированная примерами методика определения оптимального технического решения из множества имеющихся, этапы которой содержат потенциал для дальнейшей аналитической проработки.

### **Список использованных источников**

1. Богданов А. А. Тектология. Кн.1 / А. А. Богданов – М.: Экономика, 1989. – 304 с.
2. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка – М.: Мир, 1987. – 208 с.
3. Максименко В. А. Аналитическое моделирование технической системы / В. А. Максименко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – №2(49). – С. 10-14.
4. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В. Т. Павлице – К.: Вища шк., 1993. – 556 с.
5. Режим доступа: [http://daewoo-lanos.infocar.ua/test\\_lanos\\_id150.html](http://daewoo-lanos.infocar.ua/test_lanos_id150.html).

УДК 621.941.025

**В.В. Кальченко**, д-р техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**Ю.Д. Юрченко**, ст. викладач

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ РІЗЦЯМИ З ВНУТРІШНІМ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯМ**

*Наведені результати експериментальних досліджень температури різання при обробці збірними токарними різцями з внутрішнім тепловідведенням.*

### **Постановка проблеми**

Підвищення зносостійкості різальних інструментів є однією з найбільш важливих задач сучасного машинобудування, вирішення яких може бути здійснене за рахунок розробки нових конструкцій різальних інструментів, що дозволяють підвищити продуктивність та точність механічної обробки, зменшити витрати дефіцитних інструментальних матеріалів та підвищити надійність процесів різання. До таких, принципово нових та прогресивних, різальних інструментів можна віднести конструкцію збірного токарного різця з внутрішнім тепловідведенням.

Одним із основних факторів, що впливають на інтенсивність зносу різального інструменту, є температура різання. Дослідженню температури різання при точінні присвячена велика кількість наукових праць, але вони не охоплюють сферу застосування збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням.

### **Аналіз досліджень і публікацій**

Токарна обробка твердосплавними інструментами супроводжується значними температурами (700-900<sup>0</sup>С) в зоні різання, що приводять до зниження твердості поверхневих шарів інструмента, активізації адгезійних та дифузійних процесів на контактних ділянках різальних інструментів. Температура різання також впливає на процес стружкоутворення, наріст, усадку стружки, сили різання, якість обробленої поверхні і найбільшою мірою на зношування різальних інструментів [4; 5; 8].

Зменшення температури різання здійснюється переважно шляхом використання різноманітних мастильно-охолоджувальних середовищ. Але при обробці конструкційних матеріалів твердосплавними різцями з високими швидкостями різання та в умовах переривчастого різання безпосередня подача мастильно-охолоджувальних середовищ у зону обробки може привести до нерівномірного охолодження різальної пластини, внаслідок чого виникають теплові удари, які призводять до появи у твердому сплаві термічних тріщин та руйнування різальної кромки. В таких умовах зниження температури в зоні різання та підвищення стійкості інструменту може бути здійснене шляхом застосування збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням [6].

Відомі теоретичні методи дослідження [3; 4; 8] дозволяють розробити математичні моделі та отримати аналітичні залежності для розрахунку температури різання залежно від умов процесу обробки. До головних недоліків таких методів слід віднести великий обсяг обчислень та значний перелік обмежень, що значно ускладнює їх застосування при дослідженні збірних інструментів з механічним кріпленням різальних пластин. Головним чином, теоретичні методи дослідження використовують для розрахунку температури різання для суцільних конструкцій інструментів.

При дослідженні збірних конструкцій інструментів виникають значні похибки розрахунків (30-50 %), що ставить під сумнів отримані результати.

Комп'ютерні методи дослідження [3] температури різання є зручними, наглядними та високопродуктивними, але разом з цим також існує ряд обмежень при їх використанні для дослідження збірних конструкцій інструментів, оскільки дуже складно відтворити реальні умови процесу різання. Для отримання достовірних результатів комп'ютерні моделі слід тестувати проведенням серій натурних експериментів [1].

Експериментальні методи дослідження [5; 7] у поєднанні з методами планування експерименту та статистичними методами обробки дослідних даних дозволяють отримати порівняно прості й адекватні математичні моделі, що дають можливість отримати достовірні дані. Головним недоліком такого методу дослідження є більш висока трудомісткість порівняно з вищенаведеними теоретичним та комп'ютерним методами.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що для дослідження температури різання при точінні збірними різцями з внутрішнім тепловідведенням найбільш доцільним є застосування експериментального методу.

За даними [2; 4; 5] для розрахунку оптимальних швидкостей та подач найбільший інтерес представляє оптимальна і постійна для відповідних умов температура різання  $\Theta_0$ , при досягненні якої спостерігається найменша інтенсивність відносного поверхневого зносу.

### **Мета статті**

Встановлення основних закономірностей впливу на температуру різання умов процесу точіння збірними різцями з внутрішнім тепловідведенням, встановлення аналітичних залежностей та розробка рекомендацій для визначення оптимальних режимів різання.

### **Виклад основного матеріалу**

На першому етапі були проведені однофакторні стійкісні дослідження відносного поверхневого зносу  $h_{в.п}=f(v)$  (при постійних подачі та глибині різання) з паралельним вимірюванням температури різання, які дозволили встановити діапазони режимів рі-

зання, де можуть бути визначені оптимальні температури різання при обробці сталі 12X18H9T твердими сплавами T15K6 та BK6.

На другому етапі дослідження проводились за методикою повного факторного експерименту типу ПФЕ-2<sup>k</sup> [7]. За параметр оптимізації  $Y$  була прийнята температура різання  $\theta$ , в якості факторів, що варіювались, були прийняті:  $X_1$  – глибина різання  $t$ ;  $X_2$  – подача  $S$  та  $X_3$  – швидкість різання  $V$ . Числові значення рівнів факторів варіювання наведено в табл. 1 та 2.

Таблиця 1

Рівні варіювання факторів для твердого сплаву T15K6

Рівні факторів	Режими різання		
	$t$ , мм	$S$ , мм/об	$V$ , м/хв
Середній (0)	0.5	0.25	150
Верхній (+)	0.9	0.4	200
Нижній (-)	0.1	0.1	100

Таблиця 2

Рівні варіювання факторів для твердого сплаву BK6

Рівні факторів	Режими різання		
	$t$ , мм	$S$ , мм/об	$V$ , м/хв
Середній (0)	0.5	0.25	100
Верхній (+)	0.9	0.4	160
Нижній (-)	0.1	0.1	40

Матриця планування повного факторного експерименту типу 2<sup>3</sup> з ефектом взаємодії наведена у табл.3.

Таблиця 3

Матриця планування експерименту типу 2<sup>3</sup>

№	X0	X1	X2	X3	X12	X13	X23	X123
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
1 <sub>0</sub>	-	0	0	0	0	0	0	0
2 <sub>0</sub>	-	0	0	0	0	0	0	0
3 <sub>0</sub>	-	0	0	0	0	0	0	0
4 <sub>0</sub>	-	0	0	0	0	0	0	0

В якості математичної моделі (ММ) прийнята лінійна математична модель. Уточнення типу моделі (лінійна або нелінійна) виконується при аналізі значимості коефіцієнтів регресії та перевірці адекватності моделі.

Механізм впливу режимів різання на температуру різання достатньо добре вивчений, тому очікувана математична модель матиме наступний вигляд:

$$\theta = C_{\theta} \cdot t^m \cdot s^n \cdot V^p. \quad (1)$$

Для визначення постійних коефіцієнтів виконаємо логарифмування наведеної емпіричної залежності:

$$\ln \theta = \ln C + m \ln t + n \ln s + p \ln V + d \ln t \ln s + f \ln t \ln V + k \ln s \ln V + r \ln t \ln s \ln V. \quad (2)$$

Введемо позначення: Фактори:

$$\ln \theta = y \quad \left. \begin{array}{l} \ln C = b_0 \quad d = b_{12} \\ m = b_1 \quad f = b_{13} \\ w = b_2 \quad k = b_{23} \\ p = b_3 \quad r = b_{123} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \ln t = \tilde{X}_1 \\ \ln S = \tilde{X}_2 \\ \ln V = \tilde{X}_3 \end{array}$$

Рівняння математичної моделі у натуральному масштабі буде мати наступний вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 \tilde{X}_1 + b_2 \tilde{X}_2 + b_3 \tilde{X}_3 + b_{12} \tilde{X}_1 \tilde{X}_2 + b_{13} \tilde{X}_1 \tilde{X}_3 + b_{23} \tilde{X}_2 \tilde{X}_3 + b_{123} \tilde{X}_1 \tilde{X}_2 \tilde{X}_3. \quad (3)$$

Для переходу від натурального до нормованого масштабу виконаємо кодування значень  $X_1, X_2, X_3$  за наступними формулами:

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i0}}{\Delta \tilde{X}_i}, \quad (4)$$

де  $X_i$  – кодоване значення фактора (у нормованому масштабі);

$i$  – номер фактора;

$\tilde{X}_i$  – поточне значення фактора (у натуральному масштабі);

$\tilde{X}_{i0}$  – значення фактора на основному рівні (у натуральному масштабі);

$\Delta \tilde{X}_i$  – інтервал варіювання фактора (у натуральному масштабі), що обчислюється за формулою:

$$\Delta \tilde{X}_i = \frac{\tilde{X}_{i \max} - \tilde{X}_{i \min}}{2}, \quad (5)$$

де  $\tilde{X}_{i \max}$  – значення верхнього рівня фактора;

$\tilde{X}_{i \min}$  – значення нижнього рівня фактора;

Рівняння математичної моделі у нормованому масштабі буде мати наступний вигляд:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (6)$$

При цьому фактори мають безрозмірний вигляд, а їх значення прийняті (+1) – верхній рівень, (-1) – нижній рівень і (0) – середній (основний) рівень, що значно спрощує розрахунок коефіцієнтів регресії.

Для переходу до аналітичної функції у вигляді рівняння (2) виконаємо перетворення кодованих значень факторів у натуральне значення за формулою:

$$X_i = \frac{\ln \tilde{X}_i - \ln \tilde{X}_{i0}}{\ln \Delta \tilde{X}_i}, \quad (7)$$

де  $X_i$  – нормоване значення фактора;  $\ln \tilde{X}_i$  – логарифм поточного значення фактора;  $\ln \tilde{X}_{i0}$  – логарифм значення фактора на основному рівні;  $\ln \Delta \tilde{X}_i$  – логарифм інтервалу варіювання фактору.

Після проведення перетворень отримаємо формулу:

$$\begin{aligned}
y = & b_0 + b_1 \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + b_2 \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + b_3 \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + \\
& + b_{12} \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \cdot \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + b_{13} \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \cdot \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + \\
& + b_{23} \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \cdot \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \cdot \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \cdot \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Після проведення перетворень із формули (8) отримаємо формули для розрахунку коефіцієнтів для рівняння (2):

$$C = b_0 + b_1 \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + b_2 \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + b_3 \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{12} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + \tag{9}$$

$$+ b_{13} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{23} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3}.$$

$$m = \frac{b_1}{\ln \Delta X_1} + \frac{b_{12}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + \frac{b_{13}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + \frac{b_{123}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} \tag{10}$$

$$n = \frac{b_2}{\ln \Delta X_2} + \frac{b_{12}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + \frac{b_{23}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + \frac{b_{123}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} \tag{11}$$

$$p = \frac{b_3}{\ln \Delta X_3} + \frac{b_{13}}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + \frac{b_{23}}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + \frac{b_{123}}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \tag{12}$$

$$d = b_{12} \frac{1}{\ln \Delta X_1} \frac{1}{\ln \Delta X_2} + b_{123} \frac{1}{\ln \Delta X_1} \frac{1}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} \tag{13}$$

$$f = b_{13} \frac{1}{\ln \Delta X_1} \frac{1}{\ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{1}{\ln \Delta X_1} \frac{1}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \tag{14}$$

$$k = b_{23} \frac{1}{\ln \Delta X_2} \frac{1}{\ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{1}{\ln \Delta X_2} \frac{1}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \tag{15}$$

$$r = b_{123} \frac{1}{\ln \Delta X_1} \frac{1}{\ln \Delta X_2} \frac{1}{\ln \Delta X_3} \tag{16}$$

Досліди проводили на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16К20 при зовнішньому поздовжньому точінні заготовок із сталі 12Х18Н9Т (160...170 НВ,  $\sigma_B = 600$  МПа). Діаметр заготовок знаходився у межах  $D = 101 \dots 120$  мм, довжина заготовок становила 250 мм. Закріплення заготовок на верстаті здійснювалось по циліндричній поверхні запресованої оправки з упором по торцю у трьохкулачковому патроні. Другим кінцем заготовка опиралась центровим отвором на центр задньої бабки верстата.

Точіння здійснювалось експериментальним різцем з внутрішнім тепловідведенням. Різець оснащувався багатограними різальними пластинами типу 10114-110408 ГОСТ 19065-80 із твердих сплавів марок ВК6 та Т15К6. Геометричні параметри різців:  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 27^\circ$ ,  $\gamma = 5^\circ$ ,  $\alpha = \alpha_1 = 7^\circ$ ,  $\lambda = 5^\circ$ ,  $r = 1$  мм.

Режими різання при проведенні дослідів встановлювались згідно з таблицею рівнів факторів (табл. 1 і 2) та матриці планування (табл. 3) – стовпці  $X_1$ ,  $X_2$  та  $X_3$ .

Температура різання вимірювалась методом природної термопар. Заготовка ізолювалась від кулачків токарного патрона з допомогою діелектричних підкладок і діелектричної вставки, якою заготовка опиралась на центр задньої бабки верстата. При вимірюваннях температури різання рухомий контакт притискався до різальної пластини пружиною. Рухомі контакти, як і різальні пластини, були виготовлені із твердих сплавів марок ВК6 та Т15К6, що перешкождало утворенню паразитних термопар.

Різець, на відміну від класичного методу, не ізолювався від різцетримача верстата, оскільки при наявності діелектричних підкладок не можливо було оцінити реальний вплив внутрішнього тепловідведення на температуру різання. У зв'язку з цим вимірювання термо-ЕРС здійснювалось з інтервалом 30...40 с, короткочасним притисканням на 3...5 з рухомого контакту до різальної пластини. Після стабілізації показників мілівольтметра важіль з рухомим контактом відводився від різальної пластини і утримувався фіксатором, що перешкоджало його нагріванню і появі паразитних термо-ЕРС.

Для вимірювання термо-ЕРС був використаний мілівольтметр МП-18 кл.1 з вхідним опором 2,5 кОм. Ціна поділки шкали мілівольтметра складала 0,5 мВ, діапазон шкали складав 0...45 мВ. Тарування термопар "12Х18Н9Т-ВК6" та "12Х18Н9Т-Т15К6" здійснювалось стандартними методами [9].

Для розрахунку коефіцієнтів регресії був використаний метод найменших квадратів (МНК). Умова МНК записується наступним чином:

$$U = \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \min. \quad (17)$$

Формули для розрахунку коефіцієнтів регресії можна записати в такому вигляді:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i X_{ji}; b_{uj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i X_{ui} X_{ji}, \quad (18)$$

де  $N$  – загальне число дослідів;  $y_i$  – параметр відгуку в  $i$ -тій точці;  $X$  – кодоване значення фактора;  $i$  – номер дослідів (рядка у матриці планування);  $j=0,1,2,\dots,k$  – номери факторів.

Дисперсію повторюваності дослідів визначимо за формулою:

$$S_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2, \quad (19)$$

де  $n$  – кількість повторюваних дослідів;  $y_q$  – параметр відгуку;  $\bar{y}$  – середнє арифметичне відхилення параметру відгуку

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_q, \quad (20)$$

де  $q=1,2,\dots,n$  – номер паралельного дослідів.

Виконаємо перевірку значимості коефіцієнтів регресії, попередньо визначивши довірчий інтервал коефіцієнтів. Для всіх коефіцієнтів регресії довірчі інтервали рівні між собою, і визначаються за формулою:

$$\Delta b_j = \pm t \sqrt{\frac{S_0^2}{N}}, \quad (21)$$

де  $t$  – табличне значення критерію Стюдента при заданому рівні значимості  $\alpha$  та відповідному числі ступенів вільності.

Рівень значимості приймався  $\alpha=5\%$ .

Число ступенів вільності для дисперсії повторюваності визначимо за формулою:

$$f_1 = n - 1, \quad (22)$$

де  $n$  – число повторних дослідів; 1 – число ступенів вільності використаних при розрахунку середнього арифметичного для параметру відгуку.

Коефіцієнт регресії значимий, якщо його абсолютна величина більша ніж довірчий інтервал.

Перевірка адекватності моделі проводилася за  $F$ -критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}, \quad (23)$$

де  $S_{ad}^2$  – дисперсія адекватності,

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{f_2}, \quad (24)$$

де  $f_2$  – число ступенів вільності для дисперсії адекватності, рівне числу різних дослідів, результати яких використовуються при розрахунку коефіцієнтів регресії, мінус число коефіцієнтів, що визначаються;

$$f_2 = N - (k + 1), \quad (25)$$

де  $N$  – загальне число дослідів;  $k$  – число факторів експерименту.

Рівень значимості, як і в попередньому випадку, приймаємо  $\alpha=5\%$ . Модель можна вважати адекватною, якщо розрахункове значення  $F$ -критерію Фішера не перевищує табличного значення.

На основі наведеного алгоритму було розроблено програму для розрахунку коефіцієнтів регресії для розроблених математичних моделей у нормованому і натуральному масштабах, а також виконання перевірки на адекватність отриманих математичних моделей (рис. 1). Програма розроблена з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel.

Рівні факторів	Рівні факторів варіювання			Dzar(0)=120 мм			Математична модель для розрахунку температури різання при точінні сталі 12Х18Н9Т різцем з внутрішнім тепловідведенням (твердий сплав Т15К6)				
Середній	t, мм	S, мм/об	V, м/хв	Dzar(min,max)=101 мм	n(0)=400 об/мин	n_max=630 об/мин	n_min=315 об/мин	θ, °C(експ)	lnθ(експ)	lnθ(MM)	θ, °C(MM)
Верхній	0,9	0,4	200								
Нижній	0,1	0,1	100								
Матриця планування експерименту											
X0	X1	X2	X3	X12	X13	X23	X123	θ, °C(експ)	lnθ(експ)	lnθ(MM)	θ, °C(MM)
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	670	6,5072777	6,5174275	677
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	700	6,5510803	6,5480778	698
1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	715	6,5722825	6,5671777	711
1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	735	6,5998705	6,5978280	734
1	-1	-1	1	1	1	-1	1	850	6,7452363	6,7408313	846
1	1	1	-1	1	-1	1	-1	875	6,7742239	6,7714816	873
1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	890	6,7912215	6,7905815	889
1	1	-1	1	1	1	1	1	910	6,8134446	6,8212318	917
0	0	0	0	0	0	0	0	790	6,6720329		
0	0	0	0	0	0	0	0	800	6,6846117		
0	0	0	0	0	0	0	0	805	6,6908423		
0	0	0	0	0	0	0	0	790	6,6720329		
Коефіцієнти регресії для рівняння з нормованими змінними:											
b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123				
6,66932967	0,015325	0,024875	0,111702	-0,0028724	-0,00252	-0,00357	0,0011813				
Оцінка значимості коефіцієнтів регресії ("1" – значимий, "0" – незначимий)											
1	1	1	1	0	0	0	0	Лінійність моделі:		Лінійна	
Коефіцієнти регресії для рівняння з дійсними змінними:											
m0	m1	m2	m3	m10	m20	m30	m100				
5,1138034	0,01395	0,035887	0,322304	0	0	0	0				
Дисперсія відтворюваності експерименту:				8,8571E-05				Число степенів вільності 2:		4	
Число степенів вільності 1:				3				Дисперсія адекватності:		5,756E-05	
Дисперсія коефіцієнтів регресії:				6,3265E-06				Розрахунковий критерій Фішера при p=0,95:		0,6498713	
Табличний критерій Стюдента при p=0,95:				3,1824463				Табличний критерій Фішера при p=0,95:		9,1171823	
Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії:				0,00800466				Адекватність моделі:		Адекватна	

Рис. 1. Загальний вигляд інтерфейсу програми розрахунку коефіцієнтів регресії та перевірки на адекватність отриманої математичної моделі

У результаті розрахунків були отримані апроксимуючі поліноми:

$$\hat{Y}_{T15K6} = 6,669 + 0,015X_1 + 0,025X_2 + 0,112X_3 - 0,0028 X_1X_2 - 0,0025X_1X_3 - 0,0036X_2X_3 + 0,0012X_1X_2X_3 \quad (26)$$

$$\hat{Y}_{BK6} = 6,612 + 0,020X_1 + 0,033X_2 + 0,124X_3 - 0,001 X_1X_2 + 0,0008X_1X_3 - 0,0009X_2X_3 + 0,004X_1X_2X_3 \quad (27)$$

Значимість коефіцієнтів регресії визначимо із врахуванням величини довірчого інтервалу  $\Delta b_j$ . За результатами розрахунків можна зробити висновок, що при використанні сплаву Т15К6 (при  $\Delta b_j = 0,008$ ) значимими є коефіцієнти регресії:  $b_0 = 6,669$ ,  $b_1 = 0,015$ ,  $b_2 = 0,025$  та  $b_3 = 0,112$ . При використанні сплаву ВК6 (при  $\Delta b_j = 0,005$ ) значимими будуть коефіцієнти регресії:  $b_0 = 6,612$ ,  $b_1 = 0,020$ ,  $b_2 = 0,033$  та  $b_3 = 0,124$ . Решта коефіцієнтів регресії не значима, оскільки їх значення менше величини довірчого інтервалу.

Отримані математичні моделі є адекватними, оскільки за результатами розрахунку значення  $F$ -критерію Фішера становлять  $F_p=0,65$  при використанні сплаву Т15К6 та  $F_p=0,69$  при використанні сплаву ВК6, що значно менше табличного значення  $F_T=9,12$ .

Після розшифровки математичних моделей була отримана залежність температури різання від глибини різання, подачі та швидкості різання:

$$\text{- для сплаву Т15К6 } \theta = e^{\frac{5,114}{t} + \frac{0,014}{S} + \frac{0,036}{V} + 0,322} \quad (28)$$

$$\text{- для сплаву ВК6 } \theta = e^{\frac{5,867}{t} + \frac{0,018}{S} + \frac{0,048}{V} + 0,179} \quad (29)$$

У результаті можна навести остаточні значення постійних коефіцієнтів  $C_\theta$  та показників степені  $m$ ,  $n$  та  $p$  у формулі (1) для розрахунку температури різання при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням:

- для сплаву Т15К6 -  $C_\theta = 166,3$ ;  $m = 0,014$ ,  $n = 0,036$ ,  $p = 0,322$ ;
- для сплаву ВК6 -  $C_\theta = 353,2$ ;  $m = 0,018$ ,  $n = 0,048$ ,  $p = 0,179$ .

Відхилення розрахованих значень температури різання від експериментальних даних не перевищує 2 %.

Подальші розрахунки температури різання при точінні сталі 12Х18Н9Т різцем з внутрішнім тепловідведенням, оснащеним різальними пластинами із твердих сплавів марок ВК6 та Т15К6, були виконані за допомогою програмного забезпечення MachCAD.

Нижче (рис. 2 та 3) наведені алгоритм і результати розрахунку температури різання  $\theta, ^\circ\text{C}$  залежно від параметрів режиму різання при точінні сталі 12Х18Н9Т різцем з внутрішнім тепловідведенням, оснащеним різальною пластиною із твердого сплаву Т15К6. Подача змінювалася у діапазоні  $S = 0,1 \dots 1,1$  мм/об, швидкість різання змінювалася у діапазоні  $V = 100 \dots 200$  м/хв. Для представлення результатів у вигляді таблиць та графіків значення глибини різання  $t$ , мм фіксувалося:  $t_1 = 0,1$  мм,  $t_2 = 0,25$  мм,  $t_3 = 0,5$  мм,  $t_4 = 1$  мм,  $t_5 = 2$  мм,  $t_6 = 3$  мм.

Введення діапазону зміни вхідних параметрів та кроку сітки для побудови графічних залежностей

**ORIGIN** := 0                            **i** := 0, 1 .. 20    **j** := 0, 1 .. 20

**t** := 0.5                                    **s<sub>i</sub>** := (0.1 + **i**·0.05)    **v<sub>j</sub>** := (100 + **j**·5)

Коефіцієнти регресії для рівняння з нормованими змінними:

**b<sub>0</sub>** := 6.669    **b<sub>1</sub>** := 0.015325    **b<sub>2</sub>** := 0.024875    **b<sub>3</sub>** := 0.111701

**W(s, v)** := e<sup>(**b<sub>0</sub>** + **b<sub>1</sub>** ·  $\frac{\ln(t)+0.6931}{1.1284}$  + **b<sub>2</sub>** ·  $\frac{\ln(s)+1.3864}{0.6931}$  + **b<sub>3</sub>** ·  $\frac{\ln(v)-5.016}{0.3465}$ )</sup>

Коефіцієнти регресії для рівняння з дійсними змінними:

**m<sub>0</sub>** := 5.114    **m<sub>1</sub>** := 0.014    **m<sub>2</sub>** := 0.036    **m<sub>3</sub>** := 0.322

**θ(s, v)** := e<sup>**m<sub>0</sub>** · **t**<sup>**m<sub>1</sub>**</sup> · **s**<sup>**m<sub>2</sub>**</sup> · **v**<sup>**m<sub>3</sub>**</sup></sup>    **N<sub>i, j</sub>** := **W(s<sub>i</sub>, v<sub>j</sub>)**

**M<sub>i, j</sub>** := **θ(s<sub>i</sub>, v<sub>j</sub>)**

Рис. 2. Алгоритм розрахунку температури різання  $\theta_{i,j} = \theta(S_i, V_j)$  при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням (сталі 12Х18Н9Т, твердий сплав Т15К6,  $t = 0,5$  мм)



		<b>V</b>																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
<b>S =</b>	0	0.1	668	679	689	699	708	718	727	736	744	753	761	769	777	785	792	800
	1	0.15	678	689	699	709	719	728	738	747	755	764	772	781	789	796	804	812
	2	0.2	685	696	706	716	726	736	745	754	763	772	780	789	797	805	812	820
	3	0.25	690	701	712	722	732	742	751	760	769	778	787	795	803	811	819	827
	4	0.3	695	706	717	727	737	747	756	765	774	783	792	800	808	817	824	832
	5	0.35	699	710	721	731	741	751	760	770	779	788	796	805	813	821	829	837
	6	0.4	702	713	724	734	745	754	764	773	783	791	800	809	817	825	833	841
	7	0.45	705	716	727	738	748	758	767	777	786	795	803	812	820	829	837	844
	8	0.5	708	719	730	740	751	761	770	780	789	798	807	815	823	832	840	848
	9	0.55	710	722	732	743	753	763	773	782	792	801	809	818	826	835	843	851
	10	0.6	712	724	735	745	756	766	775	785	794	803	812	820	829	837	845	853
	11	0.65	715	726	737	747	758	768	778	787	796	805	814	823	831	840	848	856
	12	0.7	716	728	739	749	760	770	780	789	798	808	816	825	834	842	850	858
	13	0.75	718	730	741	751	762	772	782	791	800	810	818	827	836	844	852	860
	14	0.8	720	731	742	753	763	774	783	793	802	811	820	829	838	846	854	862
	15	0.85	721	733	744	755	765	775	785	795	804	813	822	831	839	848	856	864
	16	0.9	723	734	746	756	767	777	787	796	806	815	824	833	841	849	858	866
	17	0.95	724	736	747	758	768	778	788	798	807	816	825	834	843	851	859	867
	18	1	726	737	748	759	770	780	790	799	809	818	827	836	844	853	861	869
	19	1.05	727	739	750	760	771	781	791	801	810	819	828	837	846	854	862	871
	20	1.1	728	740	751	762	772	782	792	802	812	821	830	839	847	856	864	872

Рис. 3. Результати розрахунку температури різання  $\theta_{i,j} = \theta(S_i, V_j)$  при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням (сталь 12X18H9T, твердий сплав T15K6,  $t = 0,5$  мм)

Стовпці  $i$  таблиці (рис. 3) відповідають значенням швидкості різання у таблиці **V** (стовпці  $i = 16 \dots 20$  – не показані), рядки  $j$  таблиці відповідають значенням подачі у таблиці **S**. На перетині відповідного рядка та стовпця знаходиться значення температури різання  $\theta, ^\circ\text{C}$ .

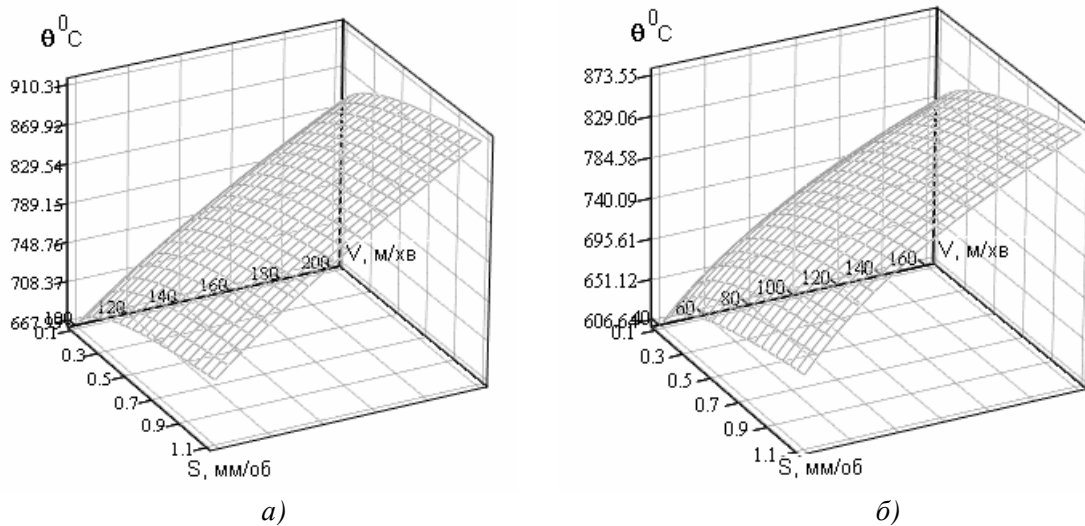


Рис. 4. Графіки залежності температури різання  $\theta_{i,j} = \theta(S_i, V_j)$  при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням, оснащеним твердими сплавами T15K6 (а) та VK6 (б) (сталь 12X18H9T,  $t = 0,5$  мм)

Результати проведених досліджень температури різання дозволяють визначити оптимальні режими різання при точінні сталі 12X18H9T різцями з внутрішнім тепловідведенням.

Відомо [4; 5; 10], що глибина різання головним чином залежить від стадії обробки та розмірів заготовки, тому в процесі досліджень були прийняті наступні значення: чорнова стадія –  $t = 3,0$  мм, напівчистова стадія –  $t = 1,0 \dots 2,0$  мм, чистова стадія –  $t = 0,25 \dots 1,0$  мм, кінцева стадія –  $t = 0,1 \dots 0,25$  мм.

Слід відмітити, що вплив глибини різання на температуру різання набагато менший, ніж швидкості різання та подачі, оскільки показники степені  $m$  у формулі (1) значно менші ніж  $n$  та  $p$ .

Призначення подачі при чорновій стадії обробки здійснюється залежно від жорсткості технологічної системи (діаметра заготовки та перерізу державки різця). При напівчистовій, чистовій та кінцевих стадіях обробки подача призначається залежно від шорсткості обробленої поверхні та радіуса при вершині різця. Тому головним завданням при визначенні оптимальних умов обробки є встановлення оптимальних швидкостей різання, при яких забезпечується мінімальна величина відносного поверхневого зносу  $h_{в.п}$ , мкм/0,1м<sup>2</sup>. Попередніми дослідженнями було встановлено, що точки мінімуму на кривих  $h_{в.п}=f(v)$  відповідають значенням оптимальних швидкостей різання, для яких існує відповідне значення оптимальної температури різання.

Виходячи з цього, підставивши у формулу (1) значення оптимальної температури різання  $\theta_o$ , отримаємо:

$$\theta_o = C_\theta \cdot t^m \cdot s^n \cdot V^p, \quad (30)$$

тоді оптимальна швидкість різання може бути визначена за формулою:

$$V_o = \left( \frac{\theta_o}{C_\theta \cdot t^m \cdot s^n} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (31)$$

де  $C_\theta$  – постійний коефіцієнт;  $m$ ,  $n$ ,  $p$  – показники степені.

Після проведення перетворень отримаємо остаточну формулу для розрахунку оптимальної швидкості різання:

$$V_o = \frac{C_v}{t^x \cdot s^y} \cdot k_v, \quad (32)$$

де  $C_v$  – постійний коефіцієнт,  $x$ ,  $y$  – показники степені,  $K_v$  – коефіцієнт, що враховує конкретні умови різання.

У цьому випадку можна прийняти, що  $K_v = K_{пв}$ , де  $K_{пв}$  – коефіцієнт, що враховує стан поверхні заготовки.

Оскільки сталь 12Х18Н9Т часто приймається за еталон оброблюваності для важко-оброблюваних матеріалів (коефіцієнт  $K_{mv} = 1,0$ ), то для вибору значення коефіцієнта  $K_{пв}$  при розрахунках оптимальної швидкості різання для матеріалів цієї групи можна скористатися даними, наведеними у літературі [10, с. 261, табл. 3].

Проведені дослідження дозволили визначити оптимальні температури різання для наступних пар інструментального та оброблюваного матеріалів:

- сталь 12Х18Н9Т- твердий сплав Т15К6 -  $\Theta_o = 800$  °С;
- сталь 12Х18Н9Т- твердий сплав ВК6 -  $\Theta_o = 750$  °С.

Підставимо ці значення у формулу (31) і визначимо значення постійних коефіцієнтів та показників степені у формулі (32) для розрахунку температури різання при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням:

- для сплаву Т15К6 -  $C_v = 131,2$ ;  $x = 0,43$ ;  $y = 0,112$ ;
- для сплаву ВК6 -  $C_v = 68,2$ ;  $x = 0,1$ ;  $y = 0,268$ .

Аналіз результатів розрахунку дозволив розробити практичні рекомендації для призначення режимів різання при обробці сталі 12Х18Н9Т твердими сплавами марок Т15К6 та ВК8. Рекомендовані режими різання для обробки твердим сплавом Т15К6 наведені у табл. 4.

Промислові випробування збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням на заводі ТОВ «Черкасиелеватормаш» показали високу ефективність таких інструментів. При обробці деталей із вуглецевих та низьколегованих конструкційних сталей зносостійкість багатограних твердосплавних пластин збільшилась в 1,2...1,3 рази, а про-

дуктивність обробки деталей зросла на 10...20 % порівняно з різцями стандартизованих конструкцій. Точність та якість обробки поверхонь деталей не змінилась.

Таблиця 4

*Рекомендовані режими різання при точінні різцями з внутрішнім тепловідведенням (сталь 12X18H9T, твердий сплав T15K6)*

S, мм/об	Оптимальна швидкість різання V, м/хв.					
	t = 0,1 мм	t = 0,25 мм	t = 0,5 мм	t = 1 мм	t = 2 мм	t = 3 мм
0,1	185	180	175	170	165	160
0,15	180	175	170	165	160	155
0,2	175	165	160	155	155	150
0,25	170	160	160	155	150	145
0,3	165	160	155	150	145	145
0,35	165	155	150	145	145	140
0,4	160	155	150	145	140	140
0,45	160	150	145	145	140	135
0,5	155	150	145	140	140	135
0,6	155	145	140	140	135	130
0,7	150	145	140	135	130	130
0,8	150	140	140	135	130	130
0,9	145	140	135	135	130	125
1,0	145	140	135	130	125	125

При обробці деталей із жароміцних та корозійностійких сталей на рекомендованих режимах різання було досягнуто підвищення зносостійкості багатограних твердосплавних пластин в 1,5...1,8 рази та продуктивності обробки деталей на 30...50 % порівняно з різцями стандартизованих конструкцій. Разом з цим було досягнуто покращення точності та якості обробки поверхонь деталей на 15...20 %. При цьому кращі результати були отримані при використанні сплавів T15K6 та T14K8, оптимальні швидкості різання для яких були більшими на 25...30 %, ніж для сплавів BK6 та BK8.

### Висновки

1. Розроблена методика дозволила дослідити вплив умов обробки на температуру різання при точінні збірними різцями з внутрішнім тепловідведенням.
2. Запропонований алгоритм та розроблена програма для статистичної обробки експериментальних даних.
3. Отримані аналітичні залежності для розрахунку температури різання та оптимальних швидкостей різання.
4. Розроблені практичні рекомендації для призначення режимів різання при обробці сталі 12X18H9T твердими сплавами марок T15K6 та BK8.
5. Наведені результати промислових випробувань збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням свідчать про перспективність застосування таких інструментів для обробки деталей із жароміцних та корозійностійких сталей.

### Список використаних джерел

1. Кальченко В. В. Моделювання теплового поля збірних токарних різців з оптимально-орієнтованими непереточуваними пластинками в T-FLEX CAD 3D / В. В. Кальченко, Ю. Д. Юрченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 3 (51). – С. 48-52.
2. Кальченко В. В. Обробка аустенітних сталей токарними різцями з внутрішнім тепловідведенням / В. В. Кальченко, Ю. Д. Юрченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 4 (53). – С. 79-85.

3. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания: учебное пособие / С. И. Пестрецов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 104 с.
4. Основи теорії різання матеріалів: підручник для вищ. навч. закладів / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок, Ю. К. Залого [та ін.]. – Львів: Новий Світ-2000, 2010. – 422 с.
5. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
6. Мироненко В. В. Збірні токарні різці з внутрішнім тепловідводом / В. В. Мироненко, Ю. Д. Юрченко // Вісник ЧДТУ. – Черкаси, 2002. – № 2. – С.97-104.
7. Научные исследования в технологии машиностроения: учебное пособие / В. А. Ванин, В. Г. Однолько, С. И. Пестрецов, В. Х. Фидаров, А. Н. Колодин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 232 с.
8. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников – М.: Машиностроение, 1991. – 288 с.
9. Слободяник П. Т. Методы и средства контроля температуры при механической обработке / П. Т. Слободяник // Машиностроит. пр-во. Сер. Технология и оборудование обработки металлов резанием: Обзор информ. ВНИИТЭМР. – М., 1990. – Вып. 2. – 36 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х томах. Т.2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985.