

УДК 621.9.04

Державний реєстраційний № 0116U5337

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
61166, м. Харків, проспект Науки, 9 А
тел. (057) 702-03-04, факс (057) 702-07-17

ПОГОДЖЕНО

Директор Товариства

з обмеженою

відповідальністю

«ВТ-ІНЖИНІРІНГ»

_____ **В.І. Чергінець**

М.П.

2016.08.31

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Харківського національного

економічного університету

імені Семена Кузнеця

докт. екон. наук, професор

_____ **В.С. Пономаренко**

М.П.

2016.08.31

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
ЗА ДОГОВОРОМ ЕУ № 597 від 11.12.2015 р.

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ
РІЗАННЯ ТА СТІЙКОСТІ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ
ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗА КРИТЕРІЄМ НАЙМЕНШОЇ
СОБІВАРТОСТІ ОБРОБКИ ДЛЯ УМОВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО
РІЗАННЯ
(заключний)**

Керівник НДР,

старший науковий співробітник

докт. техн. наук, професор

_____ **Ф.В. Новіков**

2016.08.31

Рукопис закінчено 22 серпня 2016 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, старший науковий співробітник	_____	Ф.В. Новіков (загальне керівництво, вступ, п. 1.1–1.5, висновки)
	2016.08.31	
Відповідальний виконавець, старший науковий співробітник	_____	В.О. Жовтобрюх (реферат, п. 1.6–1.8, розд. 2, рекомендації)
	2016.08.31	

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 95 с., 52 рис., 7 табл., 28 джерел.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси механічної високошвидкісної обробки деталей машин різанням.

Мета роботи – підвищення стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями, продуктивності механічної обробки та зменшення собівартості обробки за рахунок застосування оптимальних режимів різання в умовах високошвидкісного різання.

Предмет дослідження – теоретичне обґрунтування та визначення оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки для умов високошвидкісного різання.

Методи дослідження та апаратура – фундаментальні положення технології машинобудування, теорії різання матеріалів, опору матеріалів, фізики, математичного аналізу, математичного моделювання зі застосуванням мікроскопа МІМ-8, твердоміра Роквела, профілографа-профілометра.

Теоретично встановлено екстремальну залежність собівартості обробки від швидкості різання та продуктивності обробки, що дозволило визначити оптимальні режими різання і оптимальну стійкість різального інструменту за критерієм найменшої собівартості обробки. Показано, що застосовуючи твердосплавні інструменти зі зносостійкими покриттями нового покоління, можна реалізувати умови високошвидкісного різання на технологічних операціях точіння та фрезерування деталей машин, виготовлених із матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Це дозволяє значно підвищити продуктивність обробки та стійкість інструменту, зменшити собівартість обробки. Виходячи з цього, розроблено методику розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості інструментів, розроблено практичні рекомендації з підвищення ефективності високошвидкісного різання. Достовірність отриманих теоретичних рішень підтверджена експериментально.

Основні результати дослідження реалізовано в навчальному процесі ХНЕУ ім. С. Кузнеця та впроваджено в діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю "ВТ-ІНЖИНІРІНГ" (м. Дніпропетровськ).

МЕХАНІЧНА ОБРОБКА, ВИСОКОШВИДКІСНЕ РІЗАННЯ,
ОПТИМАЛЬНІ РЕЖИМИ РІЗАННЯ, СОБІВАРТІСТЬ ОБРОБКИ,
ПРОДУКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ, СТІЙКІСТЬ ІНСТРУМЕНТА.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
1. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ТА СТІЙКОСТІ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗА КРИТЕРІЄМ НАЙМЕНШОЇ СОБІВАРТОСТІ ОБРОБКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ДОСТОВІРНОСТІ ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ РІШЕНЬ	8
1.1. Методи підвищення ефективності процесів лезової та абразивної обробки	8
1.2. Математична модель визначення собівартості лезової обробки деталей машин	21
1.3. Теоретичний аналіз собівартості лезової обробки	27
1.4. Аналіз рівня технологічної підготовки механічної обробки за критерієм найменшої собівартості обробки	31
1.5. Розрахунок оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки	35
1.6. Оцінка економічної ефективності застосування на підприємствах України коштовних ріжучих інструментів зарубіжного виробництва	41
1.7. Проведення експериментальної оцінки достовірності отриманих теоретичних рішень	44
1.8. Порівняння існуючого і розробленого підходів до оптимізації параметрів режимів різання	47
2. РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ НА ОСНОВІ ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО РІЗАННЯ НА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЯХ ТОЧІННЯ ТА ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ МАТЕРІАЛІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	51

2.1. Оцінка економічної ефективності застосування збірних твёрдосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями	51
2.2. Вибір раціональних параметрів операцій механічної обробки деталей машин	58
2.3. Практичне використання результатів досліджень для підвищення ефективності механічної обробки деталей гідравлічних систем	61
2.4. Ефективність практичного застосування багатфункціональних токарно-фрезерних обробних центрів DOOSAN нового покоління серії PUMA SMX	69
2.5. Нові рішення в токарних сплавах від компанії TaeguTec	74
2.6. Нові рішення TaeguTec для обробки композиційних матеріалів..	77
2.7. Серія фрез ChaseFeed для фрезерування на високих подачах	81
ВИСНОВКИ	85
РЕКОМЕНДАЦІЇ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	92
ДОДАТОК. Довідка про використання результатів, окремих пропозицій та рекомендацій, отриманих в ході досліджень за госпдоговірною НДР за договором ЕУ № 597 від 11.12.2015 р. "Розробка методики розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твёрдосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки для умов високошвидкісного різання"	95

ВСТУП

В останні роки на машинобудівних підприємствах України почали широко використовуватися сучасні металорізальні верстати з ЧПУ типу "обробний центр" і збірні конструкції твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями зарубіжного виробництва, які реалізують умови високошвидкісного різання і дозволяють істотно підвищити продуктивність і якість обробки, вийти на створення конкурентоспроможної машинобудівної продукції. Разом з тим, ці верстати та інструменти є коштовними, що підвищує собівартість продукції, яка виготовляється. Тому застосування нових технологій високошвидкісної обробки стає економічно недоцільним. У зв'язку з цим надзвичайно актуальним є вирішення проблеми зниження собівартості обробки деталей машин за рахунок застосування оптимальних режимів різання, встановлених за критерієм найменшої собівартості обробки.

Необхідно відзначити, що питанню зниження собівартості обробки в науково-технічній літературі приділено велику увагу [2, 12], однак до теперішнього часу немає однозначного теоретичного уявлення про закономірності зміни собівартості обробки. У виробничих умовах ця проблема вирішується на основі експериментального визначення раціональних параметрів режимів різання в кожному конкретному випадку обробки деталей. Однак це не дає загального уявлення про шляхи підвищення ефективності обробки та не дозволяє кардинально вирішити проблему зниження собівартості обробки при використанні коштовних інструментів зарубіжного виробництва. Тому в даній роботі на основі встановленої екстремальної залежності собівартості від продуктивності обробки, підпорядковуючи її необхідній умові екстремуму, теоретично визначені оптимальні параметри режимів різання, що забезпечують підвищення продуктивності та зниження собівартості обробки. Показано, що основним шляхом підвищення ефективності обробки є перехід в область високошвидкісного різання, який можливий при використанні збірних конструкцій твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями нового покоління. У цьому випадку досягається підвищення стійкості інструменту, продуктивності та якості обробки, зниження собівартості обробки до економічно прийняттого рівня. Проведені експериментальні дослідження

підтвердили правочинність отриманих теоретичних рішень, що дозволило розробити інженерну методика розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки та запропонувати практичні рекомендації для підвищення ефективності застосування високошвидкісного різання на технологічних операціях точіння та фрезерування деталей машин, виготовлених із матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями.

Результати досліджень пройшли широку промислову апробацію та впроваджені у виробництво нових металорізальних верстатів з ЧПУ типу "обробний центр" і збірних конструкцій твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями зарубіжного виробництва при обробці деталей машин, виготовлених з різних важкооброблюваних матеріалів. Показано, що отримані теоретичні рішення можна використовувати як при лезовій, так і при абразивній обробці (шліфуванні) при виборі найбільш ефективних методів обробки, що забезпечують підвищення продуктивності, якості та економічності обробки.

Результати досліджень використовуються в Товаристві з обмеженою відповідальністю "ВТ-ІНЖИНІРІНГ" (м. Дніпропетровськ) при розробці й впровадженні нових технологічних процесів обробки деталей на високооберткових верстатах із ЧПУ на підприємствах України. Це дозволяє ефективно застосовувати нове дороге імпортне устаткування й інструменти в умовах обробки відповідальних деталей машин.

1. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ТА СТІЙКОСТІ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗА КРИТЕРІЄМ НАЙМЕНШОЇ СОБІВАРТОСТІ ОБРОБКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ДОСТОВІРНОСТІ ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ РІШЕНЬ

1.1. Методи підвищення ефективності процесів лезової та абразивної обробки

Процес різання – найбільш складний і найменш вивчений процес обробки металів. Наприклад, на відміну від процесів пластичного деформування металів (обробки металів тиском), процес різання меншою мірою математично формалізовано. Його дослідження здійснюється в основному експериментальними методами, що дозволяє отримати часткові рішення, справедливі лише для конкретних умов обробки. Тому встановлені таким чином оптимальні рішення в дійсності можуть бути дуже далекі від справжніх оптимальних рішень (які забезпечують найбільшу продуктивність або найменшу собівартість обробки), оскільки охоплюють "вузькі" діапазони зміни параметрів режимів різання, характеристик інструментів і оброблюваних матеріалів. Для більш обґрунтованого вибору оптимальних рішень необхідно мати узагальнені теоретичні рішення, які охоплюють широкі діапазони зміни параметрів обробки. У зв'язку з цим, спочатку в роботі проведено теоретичний аналіз методів підвищення ефективності процесів лезової обробки. Для більш повного уявлення про технологічні можливості механічної обробки проведено також теоретичний аналіз умов підвищення ефективності абразивної обробки (шліфування), що дозволило оцінити дійсні можливості механічної обробки різанням і вийти на вибір найбільш ефективних методів обробки та умов їх здійснення.

Як відомо, при точінні підвищити продуктивність обробки $Q = S \cdot V_{різ}$ можна збільшенням площі поперечного перерізу зрізу $S = a \cdot b$ і швидкості різання $V_{різ}$, де a , b – товщина і ширина зрізу, мм. При поздовжньому точінні (рис. 1, а) параметри a , b і S визначаються залежностями [24]:

$$a = \pi \cdot D_{дет} \cdot \frac{S_{позд}}{V_{рез}} \cdot \sin \varphi; \quad (1.1)$$

$$e = \frac{t}{\sin \varphi}; \quad (1.2)$$

$$S = \pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot \frac{S_{позд}}{V_{рез}}, \quad (1.3)$$

де $D_{дет}$ – діаметр оброблюваної деталі, мм;

$S_{позд}$ – швидкість поздовжньої подачі, мм/с;

t – глибина різання, мм;

φ – кут різця в плані.

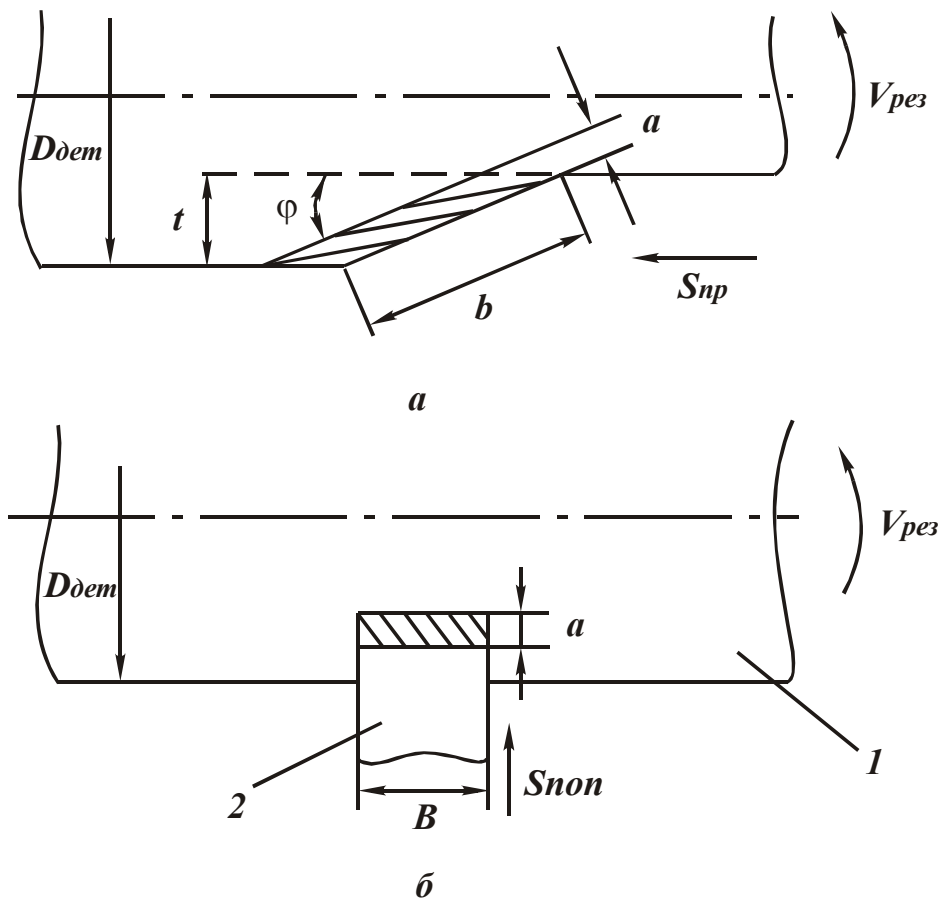


Рис. 1.1. Схеми поздовжнього (а) і радіального (б) точіння:

1 – деталь; 2 – різець.

Фіксоване значення S досягається, наприклад, встановленням S_{np} відповідно до залежності $S_{noz\partial} = \frac{S \cdot V_{piz}}{\pi \cdot D_{\partial em} \cdot t}$. Тоді продуктивність обробки $Q = S \cdot V_{piz}$ визначається множенням глибини різання і швидкості поздовжньої подачі, тобто $Q = \pi \cdot D_{\partial em} \cdot t \cdot S_{noz\partial}$.

При радіальному точінні (рис. 1.1, б) параметри a , v і S визначаються:

$$a = \pi \cdot D_{\partial em} \cdot \frac{S_{non}}{V_{piz}}; \quad (1.4)$$

$$v = B; \quad (1.5)$$

$$S = \pi \cdot D_{\partial em} \cdot B \cdot \frac{S_{non}}{V_{piz}}, \quad (1.6)$$

де S_{non} – швидкість поперечної подачі, мм/с;

B – ширина різця, мм.

Фіксоване значення S досягається встановленням S_{non} відповідно до залежності:

$$S_{non} = \frac{S \cdot V_{piz}}{\pi \cdot D_{\partial em} \cdot B}. \quad (1.7)$$

Продуктивність обробки $Q = S \cdot V_{piz} = \pi \cdot D_{\partial em} \cdot B \cdot S_{non}$ визначається швидкістю радіальної подачі S_{non} і шириною різання B .

Обмеженням збільшення параметра S є міцність ріжучої частини інструменту, а обмеженням збільшення V_{piz} – стійкість інструменту, яка обумовлена температурним фактором. Збільшити S можна застосуванням багатолезових інструментів, що забезпечують участь у різанні одночасно декількох лез. До них відносяться фрези, свердла, протяжки, мітчики та абразивні інструменти, які характеризуються великою кількістю ріжучих елементів.

При різанні дисковою фрезою (рис. 1.2, а) маємо:

$$a = \frac{\pi \cdot D_{\text{фр}}}{z} \cdot \frac{S_n}{V_{\text{різ}}} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{D_{\text{фр}}}\right); \quad (1.8)$$

$$e = B; \quad (1.9)$$

$$S = \frac{\pi \cdot D_{\text{фр}} \cdot B}{z} \cdot \frac{S_n}{V_{\text{різ}}} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{D_{\text{фр}}}\right), \quad (1.10)$$

де $D_{\text{фр}}$, B – відповідно, діаметр і ширина фрези, мм;

z – кількість ріжучих елементів фрези;

S_n – швидкість подачі, мм/с.

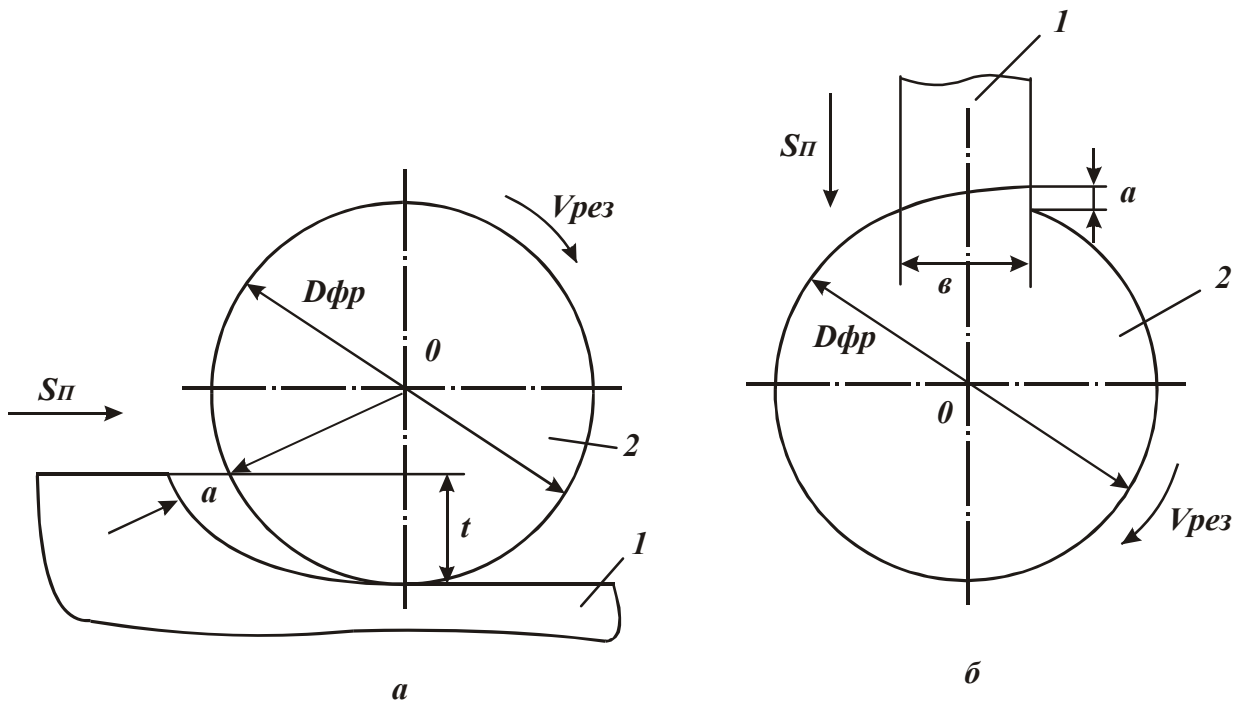


Рис. 1.2. Схеми різання дисковою (а) і торцевою (б) фрезами:

1 – деталь; 2 – фреза.

Продуктивність обробки Q визначається залежністю $Q = B \cdot t \cdot S_n$.

При різанні торцевою фрезою (рис. 1.2,б) основні параметри обробки визначаються залежностями:

$$a = \frac{\pi \cdot D_{\phi p}}{z} \cdot \frac{S_n}{V_{piz}}; \quad (1.11)$$

$$v = t; \quad (1.12)$$

$$S = \frac{\pi \cdot D_{\phi p} \cdot t}{z} \cdot \frac{S_n}{V_{piz}}; \quad (1.13)$$

$$Q = D_{\phi p} \cdot t \cdot S_n. \quad (1.14)$$

Під час свердління продуктивність обробки визначається:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D_{cv}^2 \cdot S_n, \quad (1.15)$$

де D_{cv} – діаметр свердла, мм;

S_n – швидкість подачі, мм/с.

На практиці набула широкого застосування багатоінструментна обробка одночасно декількома різцями, свердлами і т.д. Чим більше ріжучих елементів одночасно беруть участь в різанні, тим вища продуктивність. Найбільша кількість одночасно працюючих ріжучих елементів має місце при абразивній обробці, зокрема, при шліфуванні. Тому доцільно проаналізувати характер зміни продуктивності для різних кінематичних схем шліфування, розглядаючи $V_{piz} = V_{кр}$, де $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с.

Замість параметра S зручно розглядати площу контакту шліфувального круга з деталлю S_{nl} , так як в різанні бере участь велика кількість зерен, які можна характеризувати саме параметром S_{nl} . Тоді продуктивність обробки виразиться:

$$Q = S_{nl} \cdot V'_{det}, \quad (1.16)$$

де V'_{det} – лінійна швидкість знімання матеріалу в напрямку нормалі до круга, м/с.

Швидкість $V'_{дет}$ визначає ріжучі властивості інструменту. Площа $S_{пл}$ визначається $B \cdot L$, де B – ширина круга, мм; L – довжина дуги контакту круга з деталлю, мм. При шліфуванні периферією круга, рис. 1.3,а:

$$L = \sqrt{\frac{t \cdot D_{кр} \cdot D_{дет}}{D_{кр} + D_{дет}}}, \quad (1.17)$$

де t – глибина шліфування, мм;

$D_{кр}$, $D_{дет}$ – діаметри круга та деталі, мм.

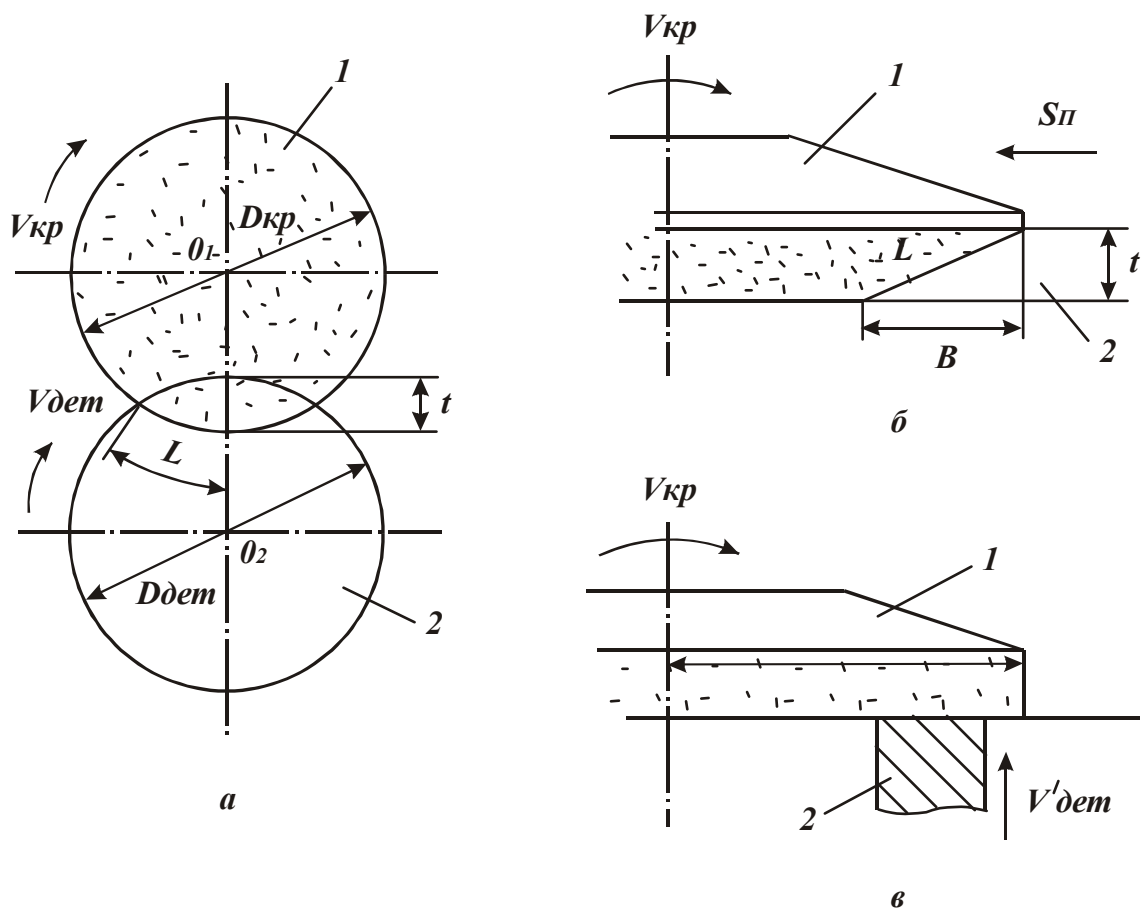


Рис. 1.3. Схеми шліфування: 1 – круг; 2 – деталь.

При шліфуванні торцем круга з урахуванням утворення на ньому забірного конуса (торцеве шліфування з тангенціальною подачею), рис. 1.3,б:

$$L = \sqrt{B^2 + t^2}. \quad (1.18)$$

При торцевому шліфуванні з радіальної подачею, коли оброблювана деталь рухається в напрямку нормалі до торця круга з постійною швидкістю $V'_{дет}$ (рис. 1.3,в), параметр $S_{пл}$ дорівнює фактичній площі контакту деталі (або декількох деталей) з торцем круга.

Збільшити $S_{пл}$ і Q при шліфуванні периферією круга можна за рахунок збільшення t , $D_{кр}$, $D_{дет}$ і B , а при торцевому шліфуванні з тангенціальною подачею – збільшенням B і t . Найбільші значення $S_{пл}$ і Q досягаються при торцевому шліфуванні з радіальної подачею (коли $S_{пл} \rightarrow \pi \cdot R_{кр}^2$), застосовуючи великогабаритні круги та багатомісну обробку деталей на верстатах з обертовим столом.

Суттєво збільшити площу контакту $S_{пл}$ можна при фасонному шліфуванні, виконуючи одночасно обробку декількох поверхонь одним кругом, (рис. 1.4,а), або виконуючи обробку периферією і торцем круга відразу двох поверхонь (рис. 1.4,б). По суті, це дозволяє концентрувати технологічні операції, що змінює традиційну технологію обробки. При обробці на автоматичних лініях, наприклад, колінчастих валів в роботі можуть брати участь одночасно кілька шліфувальних кругів, що збільшує площу обробки і продуктивність.

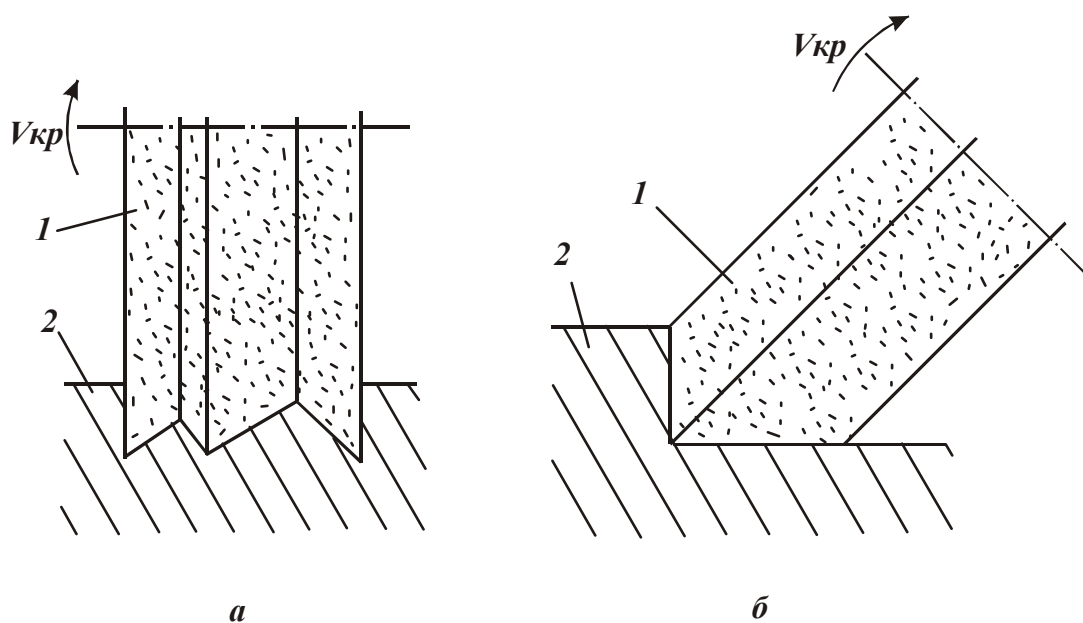


Рис. 1.4. Схеми шліфування.

Добитися суттєвого збільшення $S_{пл}$ і Q можна в умовах глибинного шліфування, що забезпечує знімання припуску до 50 мм і більше за один прохід круга з високою якістю обробки. За продуктивністю процес глибинного шліфування не поступається процесам лезової обробки, наприклад, фрезеруванню. Це дозволяє замість декількох операцій (наприклад, операцій фрезерування паза, потім його попереднього і остаточного шліфування) обробку виконати в одну операцію глибинного шліфування з забезпеченням всіх технічних вимог, тобто в даному випадку має місце концентрація операцій. Значними можливостями в плані збільшення площі контакту $S_{конт}$ має стрічкове шліфування, забезпечуючи обробку великих поверхонь або відразу декількох поверхонь, що мають складну геометричну форму, наприклад, конструктивних елементів літальних апаратів і енергетичних установок.

Фактично на збільшення площі обробки направлено застосування високочастотних коливальних рухів шліфувального круга в напрямку, перпендикулярному подачі деталі (основній подачі).

Це дозволяє виконувати різне шліфування відносно вузьким кругом довгих циліндричних деталей з високою продуктивністю.

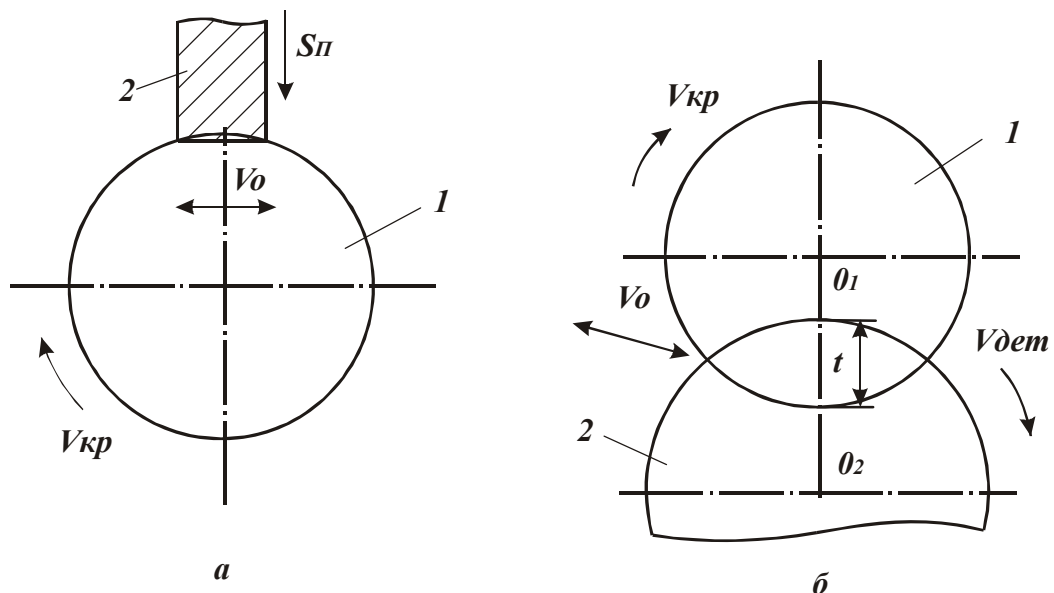


Рис. 1.5. Схеми шліфування.

Ще більший ефект обробки можна досягти, використовуючи високочастотні коливальні рухи торцевого круга (або деталі) в напрямку, перпендикулярному основній подачі, при плоскому або круглому зовнішньому

врізному шліфуванні зі зніманням великих припусків (рис. 1.5,а). По суті, товщина припуску, що знімається, тут виконує роль ширини шліфування (за аналогією з шліфуванням периферією круга). Тому, чим більше припуск, що знімається, тим більше продуктивність обробки [16]. Для реалізації цих методів шліфування необхідно осцилюючі рухи круга (або деталі) виконувати зі швидкістю, приблизно рівною швидкості круга ($V_0 \approx V_{кр}$). Очевидно, забезпечити такі високі швидкості для великих переміщення утруднено. Простіше реалізувати наступну схему (рис. 1.5,б). При круглому зовнішньому шліфуванні знімання відносно великого припуску виконується за одне (повільне) обертання деталі периферією круга. При цьому кругу (або деталі) повідомляється осцилюючий рух в тангенціальному напрямку зі швидкістю V_0 і амплітудою, що дорівнює або трохи перевищує величину припуску, що знімається (в площині шліфування). Ефект збільшення Q досягається за рахунок збільшення оброблюваної поверхні і швидкості обертання деталі, зберігаючи постійними навантаження, що діє на окреме зерно круга, і знос круга в цілому. В даному випадку амплітуда осцилюючого руху менше, так як товщина припуску, що знімається, значно менше довжини оброблюваної циліндричної деталі. При невеликій амплітуді переміщення можна реалізувати високочастотні коливальні рухи.

В роботі [16] показано, що чим більше швидкість осциляцій (на рис. 1.6. – швидкість деталі $V_{дет}$), тим більше продуктивність Q , незважаючи на те, що глибина шліфування $t < a_z$ зменшується. З цих позицій рекомендується шліфування виконувати з невеликою глибиною шліфування (що припадає на один оберт деталі) і швидкістю деталі, приблизно рівною швидкості круга.

Це можна реалізувати, наприклад, в умовах багатопрхідного і глибинного круглого зовнішнього або внутрішнього шліфування периферією круга (при глибинному шліфуванні необхідно утворювати на крузі забірний конус). Наведені на рис. 1.6 графіки отримані за умови однакового значення площі поперечного перерізу одиничного зрізу, тобто за умови однакової величини навантаження, що діє на зерно, і однієї величини лінійного зносу круга. Точка мінімуму продуктивності Q на графіку відповідає переходу від багатопрхідного до глибинного шліфування.

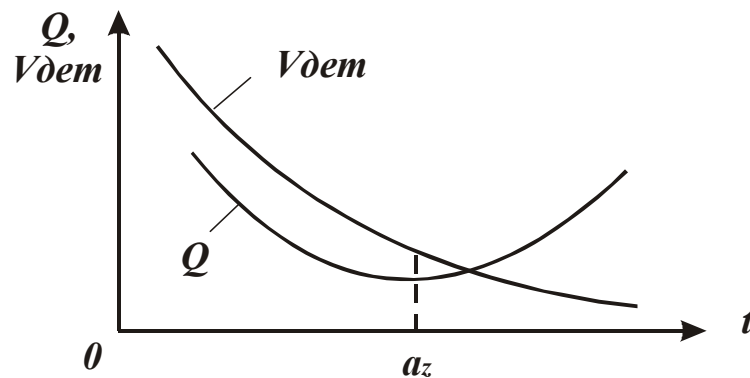


Рис. 1.6. Залежність Q і V_{det} від t .

Реалізувати ліву гілку залежності $Q-t$ (рис. 1.6) можна в умовах шліфування прямолінійного зразка, що рухається вздовж нормалі до круга, повідомляючи зразку або кругу додатковий високочастотний осцилюючий рух в тангенціальному (до круга) напрямку. Дана схема може бути використана під час заточування інструментів.

Таким чином, збільшити площу обробки S_{nl} і відповідно продуктивність Q можна збільшенням кількості одночасно працюючих інструментів (переходом від одно- до багатоінструментної обробки), збільшенням кількості заготовок, які одночасно встановлюються в пристосуванні або на верстаті (переходом від одно- до багатомісної обробки), а також застосуванням нетрадиційних режимів різання і додаткових кінематичних (зворотно-поступальних) рухів інструменту або заготовки [12]. Тут мається на увазі паралельна багатомісна обробка, так як послідовна багатомісна обробка не збільшує площі контакту інструменту з заготовками S_{nl} – заготовки послідовно вступають в контакт з інструментом. В даному випадку ефект обумовлений скороченням допоміжного часу обробки, тоді як при паралельній багатомісній обробці збільшення Q відбувається за рахунок збільшення та суміщення основного часу обробки заготовок.

Багатомісна паралельно – послідовна обробка з роздільною установкою заготовок забезпечує поєднання часу установки заготовок з основним часом. Допоміжний час зменшується пропорційно кількості одночасно оброблюваних заготовок.

Багатомісна паралельно – послідовна обробка з безперервною установкою і зміною оброблюваних заготовок на верстаті забезпечує повне суміщення часу установки заготовок з основним часом. Допоміжний час тут

відсутній, що дозволяє домогтися максимальної продуктивності. Дані схеми реалізуються, як правило, на обертових столах і барабанах з вертикальною або ж горизонтальною віссю.

Обробка на верстатах з ЧПУ, по суті, є прикладом багатомісної послідовної обробки з тією відмінністю, що збільшується не кількість оброблюваних заготовок, а кількість оброблюваних поверхонь (особливо на фрезерних верстатах з ЧПУ) з одного установу. Це забезпечує істотне зниження допоміжного часу обробки і високу концентрацію технологічних операцій. Особливою мірою це відноситься до обробки складних геометричних поверхонь, де традиційно використовується ручна слюсарна обробка, що вимагає великої кількості різних технологічних операцій (різних інструментів, оснастки і т.д.).

Умовно кінематичні схеми різання можна розбити на дві групи - залежно від характеру основної подачі: кругової або прямолінійною. До першої групи належать схеми обробки циліндричних деталей, а також плоских деталей з круговою подачею. До другої групи – схеми обробки плоских деталей з прямолінійною подачею.

Особливістю схем обробки першої групи є можливість істотного збільшення швидкості деталі (подачі), тоді як схеми обробки другої групи реалізуються при відносно невеликій швидкості деталі (подачі). У першому випадку збільшення продуктивності обробки $Q = S \cdot V_{piz}$ досягається як за рахунок збільшення V_{piz} , так і S , у другому випадку – лише за рахунок збільшення S . Як видно, можливості кінематичних схем першої групи ширше. Наприклад, стосовно до шліфування кінематичні схеми першої групи допускають реалізацію високопродуктивного багатопрхідного і глибинного шліфування (обробка циліндричних деталей, плоских поверхонь деталей з круговою подачею: на верстатах з обертовим столом і т.д.). Схеми другої групи допускають лише глибинне шліфування, тобто обробку з великою площею зрізу і невеликою основною подачею. По суті, дана схема обробки реалізується в умовах фрезерування, стругання, довбання і т.д.

Схеми точіння відносяться до першої групи і допускають обробку з невеликою або надзвичайно великою швидкістю різання за рахунок здійснення кругової подачі. Наприклад, шліфування торця кільця можна виконати за схемою плоского шліфування периферією або торцем круга, а також за схемою

точки зору продуктивності обробки може бути ефективніше схеми торцевого фрезерування, що застосовується для попередньої обробки даного класу деталей.

З цього випливає, що вибір оптимальної схеми обробки має першорядне значення у вирішенні завдань інтенсифікації механічної обробки. Необхідно прагнути до того, щоб при різанні площа контакту інструменту з деталлю лишалася незмінною. Це забезпечить максимальне використання потенційних можливостей інструменту.

Відповідно до залежностей $Q = S \cdot V_{різ}$ і $Q = S_{пл} \cdot V'_{дет}$, збільшити продуктивність Q можна збільшенням параметрів S , $S_{пл}$ і $V_{різ}$, $V'_{дет}$. Як правило, параметр $V_{різ}$ обмежений стійкістю інструменту в зв'язку з теплонапруженістю процесу різання. Зменшити тепловий вплив на інструмент можна як управлінням режимами різання, застосуванням мастильно-охолоджувальної рідини (МОР), ефективних інструментальних матеріалів, так і зміною конструкцій традиційних інструментів, підведенням додаткової енергії в зону обробки для поліпшення умов обробки і т.д. Одним з найбільш простих рішень проблеми зниження теплового впливу на інструмент є застосування багатолезових інструментів, які забезпечують періодичний контакт ріжучих елементів з оброблюваним матеріалом.

Ефективно застосування ротаційного різання круглими обертовими різцями [19]. Завдяки збільшенню довжини активної ділянки леза і додаткового переміщення його відносно зони різання відбувається перехід від безперервного до періодичного різання з інтенсивним тепловідвідом, зменшенням температури різання, підвищенням стійкості інструменту. Крім того, тут відбувається часткова заміна ковзання стружки, що утворюється, з передньою поверхнею інструменту на кочення, що знижує силову напруженість процесу.

Ефективно різання з випереджаючим пластичним деформуванням, в результаті чого вичерпується запас пластичності оброблюваного матеріалу і він стає більш крихким, що знижує сили і температуру різання. Випереджаюче пластичне деформування оброблюваного матеріалу досягається за рахунок дії на нього накатного ролика. Ролик розташований безпосередньо перед різцем. Крім зміни діаграми "напруження – деформація" оброблюваного матеріалу, накатної ролик створює в поверхневому шарі матеріалу мережу мікро-

макротріщин, що додатково знижує силову і теплову напруженість процесу.

Достатньо ефективні процеси різання лезовими інструментами з накладанням вібрацій і ультразвукових коливань. Завдяки можливості періодичного виходу інструменту з оброблюваного матеріалу, відбувається дроблення стружки, що сходить. Це знижує силову і теплову напруженість різання. Крім того, періодичний характер процесу різання знижує додатково температуру різання.

Застосування ультразвукових коливань істотно поліпшує умови тертя і зносу інструменту. Існують й інші ефективні способи зниження силової і теплової напруженостей обробки. Це, перш за все, комбіновані способи обробки, засновані на поєднанні механічної енергії різання з тепловою, електричною та іншими видами енергії (електроконтактна обробка, електрохімічне і електроерозійне шліфування і т.д.).

Таким чином, на основі проведеного аналізу технологічних можливостей різних методів механічної обробки різанням (включаючи методи лезової обробки і шліфування) визначені основні найбільш ефективні напрямки їх вдосконалення з точки зору підвищення продуктивності і зниження собівартості обробки.

1.2. Математична модель визначення собівартості лезової обробки деталей машин

Як відомо, узагальнюючим показником ефективності технологічного процесу є собівартість виробу (продукції). Собівартість промислової продукції – це виражені в грошовій формі поточні витрати підприємства на її виробництво й збут. Собівартість – один із найважливіших якісних показників, що характеризують усі сторони діяльності підприємства. Зниження собівартості – найважливіший шлях до підвищення ефективності промислового виробництва. Визначенню собівартості виготовлення продукції приділяють значну увагу [6]. Однак, при виборі оптимального варіанта технологічного процесу виготовлення деталей за критерієм мінімально можливої собівартості використовують, як правило, результати експериментальних досліджень, отриманих для цілком конкретних умов обробки. Це дозволяє отримати рішення, що охоплюють ”вузькі” діапазони досліджуваних параметрів, тоді як для обґрунтованого вибору оптимального варіанта обробки необхідно мати у

своєму розпорядженні загальні рішення, які справедливі в широких діапазонах параметрів і можуть бути отримані лише аналітичними методами. У зв'язку із цим важливим та актуальним є аналітичний опис собівартості обробки деталей і теоретичний аналіз шляхів її зменшення.

В загальному випадку з урахуванням двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робітника та витратою інструментів, собівартість обробки C визначається за залежністю [10]:

$$C = N \cdot \tau_o \cdot S_{год.} \cdot k_D + N \cdot \frac{\tau_o}{T} \cdot Ц, \quad (1.19)$$

де N – кількість деталей, що виготовляються;

τ_o – основний технологічний час обробки, год.;

$S_{год.}$ – тарифна ставка робітника, грн./год.;

k_D – коефіцієнт, що враховує всілякі нарахування на тарифну ставку робітника;

T – стійкість інструмента, год.;

$Ц$ – ціна інструмента, грн.

Для найпоширенішого методу механічної обробки – точіння, маємо

$$\tau_o = i \cdot \frac{L}{S_{позд}} = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot П \cdot L}{V \cdot t \cdot S}, \quad (1.20)$$

де $i = \frac{П}{t}$ – кількість поздовжніх ходів інструмента;

L – довжина ходу інструмента, м;

$S_{позд} = V \cdot \frac{S}{\pi \cdot D_{дет}}$ – поздовжня подача, м/с;

$П$ – величина припуску, що знімається, м;

$D_{дет}$ – діаметр деталі, м.

Чисельник у залежності (1.20) дорівнює об'єму матеріалу, що знімається, а знаменник – продуктивності обробки $Q = V \cdot t \cdot S$.

Стійкість інструмента T пов'язана із величиною τ_o залежністю $T = n \cdot \tau_o$, де n – кількість деталей, оброблених одним інструментом.

З використанням результатів багатофакторного планування експерименту стійкість інструмента T виражається [2]:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad (1.21)$$

де C_4 , m_1 , q , p – постійні для певних умов обробки.

Підставляючи залежності (1.20) і (1.21) у залежність $T = n \cdot \tau_o$, отримано:

$$n = \frac{C_4}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \Pi \cdot L \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1}}; \quad (1.22)$$

$$M = \frac{N}{n} = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot \Pi \cdot L \cdot N \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1}}{C_4}. \quad (1.23)$$

Приймаючи $\mathcal{G}_{сум} = \pi \cdot D_{дет} \cdot \Pi \cdot L \cdot N$ – сумарний об'єм матеріалу, що знімається із всіх деталей, та підставляючи залежності (1.20) і (1.23) в (1.19), отримано:

$$C = \mathcal{G}_{сум} \cdot \left(\frac{S_{зод} \cdot k_D}{V \cdot t \cdot S} + \frac{\Pi}{C_4} \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \right). \quad (1.24)$$

Як впливає з залежності (1.24), при $m_1, q, p > 1$ має місце екстремальна залежність C від V , t і S . Експериментально встановлено: $m_1 > q > p$, $m_1 > 1$ (при обробці сталей і чавунів різцями із твердих сплавів і швидкорізальних сталей $m_1 = 2 \dots 10$). Параметри p й q залежно від умов обробки можуть бути більшими й меншими від одиниці. Розглядаючи випадок $m_1 > 1$, $0 < p < 1$, $0 < q < 1$, залежність (1.19) прийме вигляд:

$$C = \mathcal{G}_{сум} \cdot \left(\frac{S_{зод} \cdot k_D}{V \cdot t \cdot S} + \frac{\Pi}{C_4} \cdot \frac{V^{m_1-1}}{t^{1-q} \cdot S^{1-p}} \right). \quad (1.25)$$

Зі збільшенням t і S собівартість C безупинно зменшується, а зі збільшенням V – змінюється за екстремальною залежністю.

Визначені екстремальні значення V і C з умови $C'_V = 0$:

$$V_{екс} = \left[\frac{S_{зод.} \cdot k_D \cdot C_4}{(m_1 - 1) \cdot \Pi \cdot t^q \cdot S^p} \right]^{\frac{1}{m_1}}. \quad (1.26)$$

Значення $V_{екс}$ тим менше, чим більші t й S . Друга похідна C''_V в точці екстремуму – додатна величина, тому має місце мінімум функції $C = f(V)$ (рис. 1.8). Підставляючи залежність (1.26) в (1.25), отримано:

$$C = \mathcal{G}_{сум} \cdot m_1 \cdot \left(\frac{S_{зод.} \cdot k_D}{m_1 - 1} \right)^{1 - \frac{1}{m_1}} \cdot \left(\frac{\Pi}{C_4} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1-q}{m_1}} \cdot S^{\frac{1-p}{m_1}}}. \quad (1.27)$$

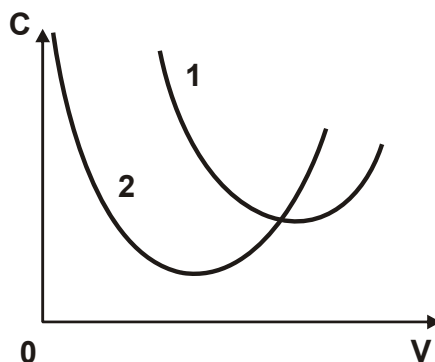


Рис. 1.8. Залежність C від V при $S = const$ ($S_1 < S_2$)

Собівартість обробки C тим менша, чим менші параметри $\mathcal{G}_{сум}$, $S_{зод.}$, k_D , Π і більші C_4 , t , S . Зменшити $\mathcal{G}_{сум}$ можна зменшенням припуску Π , що знімається (при заданих значеннях L , $D_{дем}$). Продуктивність обробки Q в точці мінімуму функції C дорівнює:

$$Q = \left(\frac{C_4 \cdot S_{зод.} \cdot k_D}{(m_1 - 1) \cdot \Pi} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot t^{\frac{1-q}{m_1}} \cdot S^{\frac{1-p}{m_1}}. \quad (1.28)$$

Зі збільшенням t і S продуктивність Q збільшується. Отже, досягти зменшення C при одночасному збільшенні Q можна збільшенням t і S , а також зменшенням $V_{екс}$ згідно із залежністю (1.26). Після підстановки залежності (1.26) у (1.21), отримано:

$$T = \frac{(m_1 - 1) \cdot \mathcal{C}}{S_{год.} \cdot k_D}. \quad (1.29)$$

Як видно, оптимальна стійкість інструмента T не залежить від параметрів режимів різання, а визначається економічними параметрами $S_{год.}$, k_D , \mathcal{C} . Параметри $S_{год.}$ й k_D впливають на собівартість обробки C і стійкість інструмента T . Отже, між C і T не існує цілком однозначної залежності. Параметр \mathcal{C} може змінюватися в більших межах, ніж $S_{год.}$ і k_D . Тому за рахунок зниження \mathcal{C} можна зменшувати параметри C й T , тобто економічно ефективно працювати з мінімально можливими значеннями T . Зменшення параметру \mathcal{C} веде до збільшення Q й $V_{екс}$. Оскільки $q < p$, то глибина різання t в залежність (1.28) входить більшою мірою, ніж подача S . У зв'язку з цим доцільно, в першу чергу, збільшувати t до величини припуску Π , що знімається, тобто обробку виконувати за один прохід інструмента.

Подачу S необхідно збільшувати з урахуванням технічних обмежень, наприклад, потужності верстата, міцності інструмента й привода верстата, шорсткості обробки та ін. Очевидно, при заданій площі поперечного перерізу зрізу ефективно збільшити глибину різання й зменшити подачу, що узгоджується із практичними даними. Залежність (1.27) з урахуванням (1.28) набуває вигляду:

$$C = g_{сум} \cdot \frac{S_{год.} \cdot k_D}{Q} \cdot \frac{m_1}{(m_1 - 1)}. \quad (1.30)$$

Отримано залежність (1.25), у якій другий доданок виражений через перший. Значення C , яке визначене із залежності (1.30), завжди більше від першого доданка в залежності (1.25) у $m_1 / (m_1 - 1)$ разів. Виходячи з рис. 1.9, відношення $m_1 / (m_1 - 1)$ змінюється в межах $2 \dots 1,1$ при збільшенні m_1 від 2 до 10.

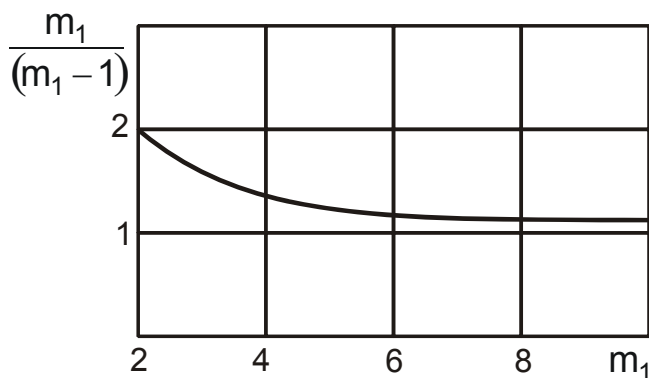


Рис. 1.9. Залежність $m_1 / (m_1 - 1)$ від m_1

Зменшити C можна, збільшуючи Q шляхом збільшення t й S і зменшення u , відповідно до залежності (1.28). При цьому швидкість різання повинна встановлюватися відповідно до залежності (1.26). Таким чином показано, що зменшення собівартості обробки C досягається за рахунок збільшення продуктивності Q . Причому, зменшити собівартість обробки C й відповідно збільшити продуктивність Q можна як за рахунок зміни параметрів режиму різання V , t і S , так і за рахунок зміни економічних параметрів $S_{\text{зод.}}$, k_D і особливо ціни інструмента C , яка може змінюватися в широких межах. Це свідчить про необхідність рішення технічних задач визначення оптимальних варіантів обробки деталей з використанням економічних методів [4].

Різного роду обмеження обробки, наприклад, точність і шорсткість обробки, приводять до обмеження параметрів режиму різання t й S , і згідно з (1.28), продуктивності Q . Собівартість C за залежністю (1.30) набуває відносно великих значень. Тому зменшити C можна виконанням обробки у дві й більше операції. Для більш глибокого аналізу умов забезпечення мінімально можливої собівартості обробки деталей, необхідно в другий доданок залежності (1.19) замість емпіричної формули (1.21) підставити формулу, установлену аналітичним шляхом. Це дозволить урахувати вплив на собівартість обробки ряду нових параметрів, які узагальнено виражаються у формулі (1.21) коефіцієнтом C_4 , установлюваним експериментально лише для цілком конкретних умов обробки, тобто для “вузьких” діапазонів зміни розглянутих параметрів обробки.

1.3. Теоретичний аналіз собівартості лезової обробки

Для більш глибокого аналізу собівартості лезової обробки слід залежність (1.19), що враховує дві змінні статті витрат при обробці, пов'язані з заробітною платою робітника і вартістю витрачених інструментів, представити у вигляді:

$$C = N \cdot \tau \cdot S_{\text{год.}} \cdot k_D + M \cdot Ц, \quad (1.31)$$

где N – річна програма випуску виробів;

$\tau = \tau_1 + \tau_2$ – час обробки виробу, с;

τ_1, τ_2 – основний і допоміжний час обробки виробу, с;

$S_{\text{год.}}$ – тарифна ставка робітника, грн.;

k_D – коефіцієнт, що враховує всі можливі нарахування на тарифну ставку робітника;

M – кількість витрачених інструментів;

$Ц$ – ціна інструменту, грн.

Приймаючи $\tau_1 = l/S$, $\tau_2 = 0$, $T = n \cdot \tau_1$, $T = A/S^\kappa$ (де l – довжина технологічного переходу, м; S – швидкість основної подачі, м/с; T – стійкість інструменту, с; n – кількість переходів; A, κ – параметри, що залежать від умов обробки, встановлюються експериментально), з урахуванням $M = \frac{N}{n}$ і

$n = \frac{A}{l} \cdot \frac{1}{S^{\kappa-1}}$, маємо:

$$C = N \cdot l \cdot \left(\frac{S_{\text{год.}} \cdot k_D}{S} + \frac{Ц}{A} \cdot S^{\kappa-1} \right). \quad (1.32)$$

Залежно від показника ступеня κ собівартість обробки C при збільшенні S може зменшуватися ($\kappa \leq 1$) або змінюватися за екстремальною залежністю ($\kappa > 1$), проходячи точку мінімуму. В останньому випадку екстремальне значення подачі $S_{\text{екс}}$ визначається за умови $C'_s = 0$, тоді:

$$S_{екс} = \left[\frac{S_{зод.} \cdot A \cdot \kappa_D}{(\kappa - 1) \cdot \Pi} \right]^{\frac{1}{\kappa}}. \quad (1.33)$$

Екстремальне (мінімальне) значення собівартості обробки $C_{екс}$ визначається:

$$C_{екс} = N \cdot l \cdot S_{зод.} \cdot k_D \cdot \frac{\kappa}{(\kappa - 1)} \cdot \left[\frac{(\kappa - 1) \cdot \Pi}{S_{зод.} \cdot k_D \cdot A} \right]^{\frac{1}{\kappa}}. \quad (1.34)$$

Вплив параметрів N і l на $C_{екс}$ значніше, ніж параметрів $S_{зод.}$, k_D , Π і A при $\kappa > 1$. Отже, основним шляхом зниження собівартості обробки є зменшення добутку $N \cdot l$. Зменшити параметр l можна за рахунок оптимізації траєкторії руху інструменту при обробці складних деталей на верстатах з ЧПУ. Однак при цьому в залежність (1.34) необхідно ввести другий доданок Π_1 , рівний вартості верстата з ЧПУ. Ефект буде мати місце в тому випадку, якщо перший доданок більше другого, тобто при відносно великому значенні N .

Застосування верстатів з ЧПУ знижує витрати, пов'язані з виготовленням технологічного оснащення, але створює додаткові витрати Π_2 з підготовки керуючих програм. Залежність (1.34) опишеться:

$$C_{екс} = N \cdot l \cdot S_{зод.} \cdot k_D \cdot \frac{\kappa}{(\kappa - 1)} \cdot \left[\frac{(\kappa - 1) \cdot \Pi}{S_{зод.} \cdot k_D \cdot A} \right]^{\frac{1}{\kappa}} + \Pi_1 + \Pi_2. \quad (1.35)$$

Якщо вартість технологічного оснащення Π_2 переважає в залежності (1.35), то її істотне зменшення (практично до рівня вартості керуючих програм) дозволить зменшити собівартість обробки $C_{екс}$ навіть при відносно невеликій програмі виробів N . Отже, верстати з ЧПУ ефективно застосовувати при виготовленні складних деталей (ефект створюється за рахунок оптимізації траєкторії руху інструменту і зменшення l) та при виготовленні невеликих партій деталей (ефект створюється за рахунок зменшення витрат на технологічне оснащення).

Згідно залежності (1.34), зменшити $C_{екс}$ можна зменшенням співвідношення $Ц/A$, тобто зменшенням вартості інструмента (або його переточування) і підвищенням його експлуатаційних характеристик (які узагальнено визначаються параметром A) шляхом застосування ефективних мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ, зміцнення інструменту, оптимізації режимів різання і т.д. Ефективно застосування прогресивних високопродуктивних технологій і інструментів, що забезпечують зменшення співвідношення $Ц/A$.

Представимо залежність (1.31) у вигляді:

$$C = N \cdot (\tau_1 + \tau_2) \cdot S_{зод.} \cdot k_D + N \cdot l \cdot \frac{Ц}{A} \cdot S^{\kappa-1}. \quad (1.36)$$

Важливою умовою зменшення собівартості обробки C є зменшення допоміжного часу обробки τ_2 за рахунок застосування верстатів–автоматів. Однак при цьому в залежності (1.36) необхідно ввести третій доданок $Ц_3$, рівний вартості верстата–автомата. Ефект буде в тому випадку, якщо третя складова істотно менше суми перших двох доданків, тобто при великому значенні N . З цих позицій можна пояснити також ефективність застосування багатоопераційних верстатів і верстатів з ЧПУ, так як вони забезпечують зниження допоміжного часу обробки τ_2 .

Зменшити собівартість обробки C можна застосуванням багатоінструментних верстатів. Залежність (1.36) з урахуванням вартості верстата $Ц_3$ набуде вигляду:

$$C = N \cdot (\tau_1 + \tau_2) \cdot S_{зод.} \cdot k_D + N \cdot l \cdot \frac{Ц}{A} \cdot S^{\kappa-1} + Ц_3, \quad (1.37)$$

где $N_1 = \frac{N}{z}$;

z – кількість одночасно працюючих інструментів.

Зменшення собівартості обробки C відбувається в тому випадку, якщо третя складова менше суми перших двох, тобто при великих значеннях N . Приймаючи $\tau_2 = 0$ та $\tau_1 = l/S$, залежність (1.37) опишеться:

$$C = N \cdot l \cdot \left(\frac{S_{\text{зод.}} \cdot k_{\text{Д}}}{z \cdot S} + \frac{\text{Ц}}{A} \cdot S^{\kappa-1} \right) + \text{Ц}_3. \quad (1.38)$$

Екстремальні значення $S_{\text{екс}}$ і $C_{\text{екс}}$ визначаються:

$$S_{\text{екс}} = \left[\frac{S_{\text{зод.}} \cdot A \cdot k_{\text{Д}}}{(\kappa - 1) \cdot z \cdot \text{Ц}} \right]^{\frac{1}{\kappa}}, \quad (1.39)$$

$$C_{\text{екс}} = N \cdot l \cdot S_{\text{зод.}} \cdot k_{\text{Д}} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{\kappa}{(\kappa - 1)} \cdot \left[\frac{(\kappa - 1) \cdot z \cdot \text{Ц}}{S_{\text{зод.}} \cdot k_{\text{Д}} \cdot A} \right]^{\frac{1}{\kappa}} + \text{Ц}_3. \quad (1.40)$$

Значення параметрів $S_{\text{екс}}$ і $C_{\text{екс}}$ тим менше, чим більше z . Очевидно, для кожного значення N існують оптимальні значення z і Ц_3 , які є визначальними характеристиками багатоінструментного верстата.

Даний аналіз справедливий за умови $\kappa > 1$. За умови $\kappa \leq 1$, відповідно до залежності (1.32), екстремум функції C від S відсутній: собівартість обробки C при збільшенні S безперервно зменшується. Обмеженням збільшення S можуть бути вимоги відносно якості та точності обробки. Визначити оптимальну подачу S можна на основі оптимізації режимів різання з урахуванням обмежень, наприклад, за шорсткістю та точністю обробки, залишковим напруженням в поверхневому шарі деталі та ін.

З огляду на те, що швидкість основної подачі S визначає продуктивність обробки Q , між собівартістю C і продуктивністю обробки Q за умови $\kappa \leq 1$ існує зворотний зв'язок. Чим більше Q , тим менше C . В цьому випадку критерії оптимізації обробки C і Q рівноважні.

1.4. Аналіз рівня технологічної підготовки механічної обробки за критерієм найменшої собівартості обробки

Рішення проблеми підвищення ефективності виробництва й створення конкурентоспроможної машинобудівної продукції вимагає широкого застосування прогресивних наукомістких технологій, що забезпечують істотне

підвищення продуктивності праці, поліпшення якості й зниження собівартості виробленої продукції. В основу технологічної підготовки виробництва необхідно покласти умову оптимальної собівартості металообробного виробництва [13]:

$$C = N \cdot \tau \cdot S_{\text{зод.}} \cdot k_{\text{Д}} + M \cdot Ц + S_2 \cdot P \cdot \tau, \quad (1.41)$$

де N – кількість оброблюваних деталей, шт.;

M – кількість споживаних інструментів, шт.;

$\tau = z \cdot \tau_0$ – норма часу на обробку однієї деталі, год.;

τ_0 – основний час на обробку однієї деталі, год.;

z – коефіцієнт, що враховує частку допоміжного часу на обробку однієї деталі стосовно основного часу;

$S_{\text{зод.}}$ – тарифна ставка робітника, грн/год.;

$k_{\text{Д}}$ – коефіцієнт, що враховує всілякі нарахування (податки) на заробітну плату робітника;

$Ц$ – ціна одного інструмента, грн;

S_2 – вартість одиниці енергії, грн;

P – споживана потужність процесу, кВт.

У формулі (1.41) враховані три основні складові витрати, пов'язані із заробітною платою робітника, вартістю інструментів і споживаної енергії при обробці на верстаті. Перетворимо формулу (1.41) з урахуванням співвідношень:

$$M = \frac{N \cdot \tau_0}{T}; \quad t_0 = \frac{\mathcal{G}}{Q}; \quad P = E \cdot Q; \quad C_0 = \frac{C}{n_1 \cdot \mathcal{G}}, \quad (1.42)$$

де T – період стійкості інструмента до його повного зношування, год.;

\mathcal{G} – об'єм металу, що знімається при обробці з однієї деталі, м³;

Q – продуктивність обробки, м³/год.;

E – енергоємність обробки, Дж/м³ (чи Вт · год./м³);

C_0 – вартість знімання одиниці об'єму металу, грн/м³ (питома собівартість обробки).

Тоді

$$C_0 = \frac{S_{\text{зод.}} \cdot z \cdot k_D}{Q} + \frac{Ц}{Q \cdot T} + S_2 \cdot E. \quad (1.43)$$

Параметр C_0 визначається сумою трьох доданків, які мають цілком конкретний фізичний зміст:

$C_{01} = \frac{S_{\text{зод.}} \cdot z \cdot k_D}{Q}$ – витрати на заробітну плату, пов'язані зі зніманням 1 м³ металу;

$C_{02} = \frac{Ц}{Q \cdot T}$ – витрати на інструменти, пов'язані зі зніманням 1 м³ металу;

$C_{03} = S_2 \cdot E$ – витрати на електроенергію, пов'язані зі зніманням 1 м³ металу.

Добуток $Q \cdot T$ визначає об'єм металу, що знімається одним інструментом за період його стійкості T . Формула (1.43) містить постійні ($S_{\text{зод.}}$, S_2 , z , k_D , $Ц$) і змінні (Q , T , E) величини. Зменшити C_0 можна за рахунок збільшення Q , $Q \cdot T$ і зменшення E .

Розглянуто приклад розрахунку параметрів C_{01} , C_{02} , C_{03} , C_0 для конкретного технологічного процесу обробки – шліфування кілець із твердого сплаву торцем алмазного круга на органічній зв'язці. В цьому випадку досягнута продуктивність обробки $Q=400$ мм³/хв ($Q=24 \cdot 10^6$ м³/год.). Час роботи круга до його повного зношування дорівнює $T=0,72$ годин. Енергоємність обробки дорівнює $E=20 \cdot 10^3$ кВт·год./м³. Значення постійних величин: $S_{\text{зод.}}=5,6$ грн/год.; $S_2=0,2$ грн/кВт·год.; $z=4$; $k_D=3$; $Ц=60$ грн. Підставляючи вихідні дані у формулу (1.43), маємо:

$$C_0 = 2,8 \cdot 10^6 + 3,47 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^3 = 6,27 \text{ грн/м}^3.$$

Найбільше значення приймає параметр $C_{02} = 3,47 \cdot 10^6$ грн/м³.

Параметр $C_{03} = 4 \cdot 10^3$ грн/м³ значно менше параметрів C_{01} , C_{02} і тому його в розрахунках можна не враховувати. Очевидно, зменшити питому собівартість обробки C_0 можна в першу чергу за рахунок зменшення доданка C_{02} . Це досягається, наприклад, застосуванням більш зносостійких алмазних кругів на

металевих зв'язках. Експерименти показали, що час роботи такого круга до повного зношування істотно збільшується й дорівнює $T=6$ годин.

Продуктивність Q і енергоємність E обробки при цьому залишаються приблизно тими ж. Ціна алмазного круга на металевій зв'язці більша, ніж алмазного круга на органічній зв'язці й становить $\Pi=90$ грн. З урахуванням вихідних даних параметр C_0 визначиться:

$$C_0 = 2,8 \cdot 10^6 + 0,625 \cdot 10^6 = 3,425 \cdot 10^6 \text{ грн/м}^3.$$

Як бачимо, застосування більш зносостійких алмазних кругів на металевих зв'язках дозволило зменшити доданок C_{02} в 5,55 разів, а питому собівартість обробки C_0 – в 1,83 раз.

У цьому випадку параметр C_0 обумовлений складовою C_{01} , тому що $C_{02} \ll C_{01}$. Тому наступним етапом зменшення C_0 необхідно розглядати зменшення доданка C_{01} за рахунок збільшення продуктивності обробки Q або за рахунок зменшення коефіцієнта z , що визначає частку допоміжного часу обробки стосовно основного часу. Зменшення коефіцієнта z – це автоматизація операції обробки; застосування, наприклад, верстата-автомата, що забезпечує виконання умови $z \rightarrow 0$ ($z < 1$). У цьому випадку доданок $C_{01} \rightarrow 0$, однак при цьому в залежність (1.43) необхідно ввести новий доданок C_{04} , що враховує витрати на придбання верстата-автомата. Природно, це приведе до збільшення C_0 . Ефект буде досягнутий у тому випадку, якщо сума C_{01} і C_{04} буде менше початкового значення $C_{01} = 2,8 \cdot 10^6$ грн/м³.

З урахуванням доданка C_{04} формула (1.43) набуде вигляду:

$$C_0 = \frac{S_{\text{зод.}} \cdot z \cdot k_D}{Q} + \frac{\Pi}{Q \cdot T} + S_2 \cdot E + \frac{\Pi_1}{N \cdot \vartheta}, \quad (1.44)$$

де Π_1 – ціна верстата-автомата, грн.

Тут $C_0 = \frac{\Pi_1}{N \cdot \vartheta}$ – витрати на верстат-автомат, пов'язані зі зніманням 1 м³

металу. При високій вартості верстата-автомата зменшити доданок C_{04} можна за рахунок збільшення кількості оброблюваних деталей N і об'єму металу ϑ , що знімається з оброблюваної деталі, тобто чим більше сумарний об'єм металу,

що знімається, $N \cdot \mathcal{Q}$, тим менше C_{04} . Отже, придбання верстата-автомата ефективно при великій програмі оброблюваних деталей. При обробці невеликої партії деталей основний шлях зменшення питомої собівартості обробки C_0 складається в зменшенні доданка C_{01} за рахунок збільшення продуктивної обробки Q .

Дослідами встановлено, що зі збільшенням сили притиску алмазного круга до оброблюваної деталі (твердосплавного кільця) продуктивність Q може бути збільшена в 2 рази, тобто до значення $Q=800$ мм³/хв (чи $Q=48 \cdot 10^6$ м³/годин).

Коефіцієнт $z=7$. Стійкість круга при цьому зменшується в 3,5 рази й становить $T=1,71$ годин. Енергоємність обробки E зменшується, однак несуттєво й, отже, доданком C_{03} у формулі (1.43) можна зневажити. З урахуванням нових вихідних даних, маємо:

$$C_0 = 2,45 \cdot 10^6 + 1,1 \cdot 10^6 = 3,55 \cdot 10^6 \text{ грн/м}^3. \quad (1.45)$$

Як видно, перший доданок C_{01} трохи зменшився (від $2,8 \cdot 10^6$ до $2,45 \cdot 10^6$), однак збільшився другий доданок C_{02} (від $0,625 \cdot 10^6$ до $1,1 \cdot 10^6$), що в остаточному підсумку привело до невеликого збільшення питомої собівартості обробки C_0 (від $3,425 \cdot 10^6$ до $3,55 \cdot 10^6$). Збільшення C_0 відбулося внаслідок відносно великого значення коефіцієнта z . Отже, зменшення основного часу обробки τ_0 за рахунок збільшення продуктивності обробки Q (коли зберігається великий допоміжний час обробки) малоефективно з погляду зниження собівартості обробки.

Із цього можна зробити висновок, що найбільш перспективним напрямком зменшення C_0 необхідно розглядати зменшення коефіцієнта z . Лише при невеликому значенні z , коли зміна (збільшення) продуктивності обробки Q практично не приведе до росту z , з'являється можливість зменшення C_0 за рахунок збільшення Q .

Розглянутий вище приклад є підтвердженням того, що застосування прогресивних наукомістких технологій (якими є, наприклад, технології шліфування алмазними кругами на високоміцних металевих зв'язках з їх

безперервним електроерозійним виправленням) виявляється не ефективним (або малоефективним) у зв'язку з низьким рівнем автоматизації й механізації праці, а також у зв'язку із застосуванням застарілого технологічного обладнання, заснованого на "ручній обробці" та ін. Зменшити коефіцієнт z можна також застосуванням нових кінематичних схем обробки партії деталей з більш високою продуктивністю.

По суті, залежність (1.44) відкриває нові можливості оптимізації технологічних процесів, вибору найбільш ефективних варіантів обробки на основі техніко-економічного аналізу [13, 24].

Аналізуючи доданки C_{01} , C_{02} , C_{03} , C_{04} для різних видів обробки, можна вийти на оптимальні режими різання, характеристики інструментів, устаткування й ін., тобто вийти на проектування оптимальної маршрутно-операційної технології механічної обробки.

1.5. Розрахунок оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки

Важливо провести аналіз собівартості обробки при поздовжньому точінні для чотирьох основних змінних статей витрат [8, 15]. Перша стаття враховує витрати на заробітну плату робітника за обробку партії деталей. Друга стаття враховує витрати на заробітну плату робітника, які пов'язані з заміною зношеного інструменту. Третя і четверта статті враховують витрати на різальний інструмент і електричну енергію, яка споживається при обробці. Тоді

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{год.}} \cdot k_{\text{Д}} + N_0 \cdot t_c \cdot S_{\text{год.}} \cdot k_{\text{Д}} + N_0 \cdot Ц + N \cdot P \cdot t_0 \cdot S_{\text{елект}}, \quad (1.46)$$

де N , N_0 – кількість оброблюваних деталей і споживаних ріжучих інструментів;

t_0 – основний технологічний час обробки, с;

$S_{\text{год.}}$ – тарифна ставка робітника, грн/с;

$k_{\text{Д}}$ – коефіцієнт, що враховує різноманітні нарахування на тарифну ставку робітника;

$t_{зм}$ – час, що витрачається на зняття затупленого інструменту, установку переточеного інструменту та підналадку верстата, с;

C – ціна ріжучого інструменту, грн;

P – ефективна потужність процесу різання, Вт;

$S_{елект}$ – вартість одиниці електричної енергії, грн/Дж.

З урахуванням співвідношень $N_0 = N / n$, $P = \sigma \cdot Q$, $n = T / t_0$, $t_0 = \mathcal{G} / Q$ і $\mathcal{G}_{сум} = N \cdot \mathcal{G}$, отримано:

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{зод.} \cdot k_D + N \cdot \frac{t_0}{T} \cdot (t_{зм} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + C) + \mathcal{G}_{сум} \cdot \sigma \cdot S_{елект}, \quad (1.47)$$

де n – кількість деталей, оброблених одним інструментом;

σ – умовне напруження різання (енергоємність обробки), Н/м²;

Q – продуктивність обробки, м³/с;

T – стійкість різального інструмента, с;

\mathcal{G} – об'єм металу, що знімається з однієї деталі, м³;

$\mathcal{G}_{сум}$ – об'єм металу, що знімається з N деталей, м³.

Як відомо [2], зі зміною режимів різання та інших умов обробки параметр σ мало змінюється, для конкретного матеріалу він залишається майже одним і тим же. Тому третій доданок для заданого значення $\mathcal{G}_{сум}$ в першому наближенні можна розглядати постійним. Тоді

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{Q} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + N \cdot \frac{\mathcal{G}}{Q} \cdot \frac{(t_{зм} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + C)}{T}, \quad (1.48)$$

где $Q = V \cdot t \cdot S$ – продуктивність обробки (при поздовжньому точінні), м³/с;

V – швидкість різання, м/хв;

t – глибина різання, м;

S – подача, м/об.

Виходячи із залежності (1.48), собівартість обробки C зменшується зі зменшенням \mathcal{G} і збільшенням Q . Однак, зі збільшенням Q буде зменшуватися T , що призведе до збільшення C . Отже, в загальному вигляді має місце

неоднозначний характер зміни собівартості обробки C від продуктивності обробки Q .

Стійкість інструменту T для поздовжнього точіння описується емпіричною залежністю [2]:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad (1.49)$$

где C_4 , m_1 , q , p – постійні для певних умов обробки.

Після підстановки залежності (1.49) в (1.48) з урахуванням $\alpha_1 = N \cdot \vartheta \cdot S_{\text{зод.}} \cdot k_D$; $\alpha_2 = N \cdot \frac{\vartheta \cdot (t_{\text{зм}} \cdot S_{\text{зод.}} \cdot k_D + \Pi)}{C_4}$, маємо:

$$C = \frac{\alpha_1}{Q} + \alpha_2 \cdot \frac{Q^{m_1-1}}{S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}}. \quad (1.50)$$

Функцію C підчиним необхідній умові екстремуму: $C'_Q = 0$. Тоді екстремальна продуктивність обробки $Q = Q_{\text{екстр}}$ визначиться:

$$Q_{\text{екстр}} = \left[\frac{S_{\text{зод.}} \cdot k_D \cdot C_4}{(t_{\text{зм}} \cdot S_{\text{зод.}} \cdot k_D + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q} \right]^{\frac{1}{m_1}}. \quad (1.51)$$

Як видно, екстремальне значення продуктивності обробки $Q_{\text{екстр}}$ тим більше, чим більше параметри C_4 , S , t й менше $t_{\text{зм}}$, Π . Тому, очевидно, глибину різання t доцільно встановлювати рівній величині припуску, що знімається. Подачу S також слід встановлювати максимально можливою, виходячи з умов міцності інструменту або потужності приводу верстата.

Збільшення параметра C_4 може бути досягнуто за рахунок підвищення фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу. Однак це передбачає збільшення ціни інструменту Π . Екстремальні значення швидкості різання $V_{\text{екстр}}$, стійкості інструменту $T_{\text{екстр}}$, основного технологічного часу

обробки $t_{0екстр}$, кількості деталей, оброблюваних одним інструментом $n_{екстр}$, кількості споживаних інструментів $N_{0екстр}$ і мінімальне значення собівартості обробки визначаються залежностями:

$$V_{екстр} = \frac{Q_{екстр}}{S \cdot t} = \left[\frac{S_{зод.} \cdot k_D \cdot C_4}{(t_{зм} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \frac{1}{S^{\frac{p}{m_1}} \cdot t^{\frac{q}{m_1}}}; \quad (1.52)$$

$$T_{екстр} = \frac{(t_{зм} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + \Pi) \cdot (m_1 - 1)}{S_{зод.} \cdot k_D}; \quad (1.53)$$

$$t_{0екстр} = \frac{\mathcal{G}}{Q_{екстр}} = \mathcal{G} \cdot \left[\frac{(t_{зм} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + \Pi) \cdot (m_1 - 1)}{S_{зод.} \cdot k_D \cdot C_4} \cdot \frac{1}{S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}} \right]^{\frac{1}{m_1}}; \quad (1.54)$$

$$n_{екстр} = \frac{T_{екстр}}{t_{0екстр}} = \frac{1}{\mathcal{G}} \cdot \left[\frac{(t_{зм} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + \Pi) \cdot (m_1 - 1)}{S_{зод.} \cdot k_D} \right]^{1-\frac{1}{m_1}} \cdot (C_4 \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q})^{\frac{1}{m_1}}; \quad (1.55)$$

$$N_{0екстр} = \frac{N}{n_{екстр}} = N \cdot \mathcal{G} \cdot \left[\frac{S_{зод.} \cdot k_D}{(t_{зм} \cdot S_{зод.} \cdot k_D + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \right]^{1-\frac{1}{m_1}} \cdot \left(\frac{1}{C_4 \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}} \right)^{\frac{1}{m_1}}; \quad (1.56)$$

$$C_{min} = \frac{N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{зод.} \cdot k_D}{Q_{екстр}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (1.57)$$

На рис. 1.10 в узагальненому вигляді показано умови зменшення собівартості й підвищення продуктивності механічної обробки.

Для визначення собівартості обробки слід виконати кількісну оцінку залежності (1.50). Для цього необхідно представити продуктивність обробки в вигляді $Q = z \cdot Q_{екстр}$, де $z > 0$ – деяка позитивна величина, яка за умови $Q = Q_{екстр}$ приймає значення, рівне одиниці. Тоді залежність (1.50) виразиться:

$$C = \frac{1}{S^{\frac{1-p}{m_1}} \cdot t^{\frac{1-q}{m_1}}} \cdot \left[\frac{\alpha_2 \cdot (m_1 - 1)}{\alpha_1} \right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \alpha_1 \cdot \left[\frac{1}{z} + \frac{z^{m_1-1}}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (1.58)$$

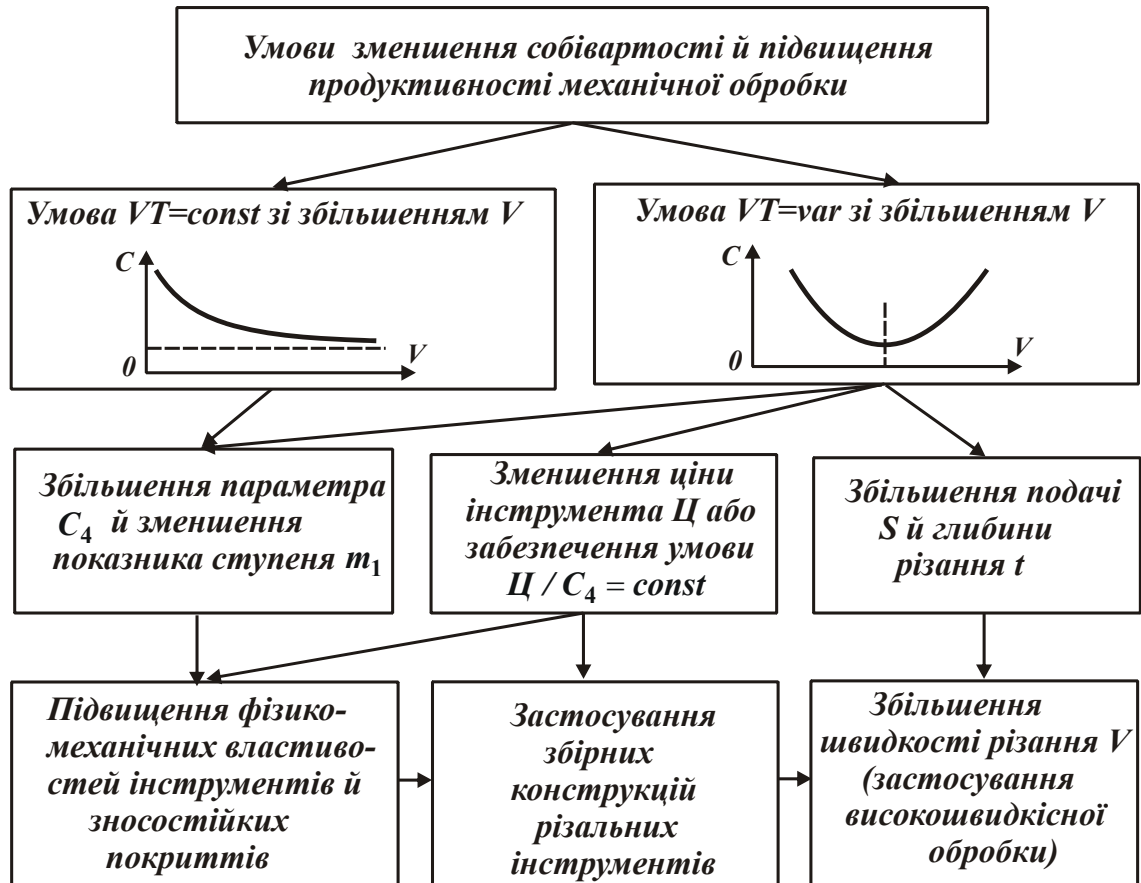


Рис. 1.10. Структурна схема умов зменшення собівартості й підвищення продуктивності механічної обробки.

Відносна собівартість обробки \bar{C} опишеться:

$$\bar{C} = \bar{C}_1 + \bar{C}_2 = \frac{1}{z} + \frac{z^{m_1-1}}{(m_1 - 1)}. \quad (1.59)$$

В роботі [2] показано, що при точінні вуглецевої конструкційної сталі твердосплавним різцем параметри $m_1=5$; $p=1,75$; $q=0,75$. Приймаючи $m_1=5$, за залежністю (1.59) визначимо перший та другий доданки залежності, а також відносну собівартість обробки \bar{C} (табл. 1.1, рис. 1.11).

Таблиця 1.1

Розрахункові значення величин

$$\bar{C}_1 = 1/z, \bar{C}_2 = 0,25 \cdot z^4, \bar{C} = 1/z + 0,25 \cdot z^4 \text{ и } \bar{C}_1 / \bar{C}_2$$

z	0,1	0,5	1	2	3
$\bar{C}_1 = 1/z$	10	2	1	0,5	0,33
$\bar{C}_2 = 0,25 \cdot z^4$	$0,25 \cdot 10^{-4}$	0,015	0,25	4	20,25
$\bar{C} = 1/z + 0,25 \cdot z^4$	10	2,015	1,25	4,5	20,58
\bar{C}_1 / \bar{C}_2	$40 \cdot 10^4$	133,3	4	0,0625	0,016

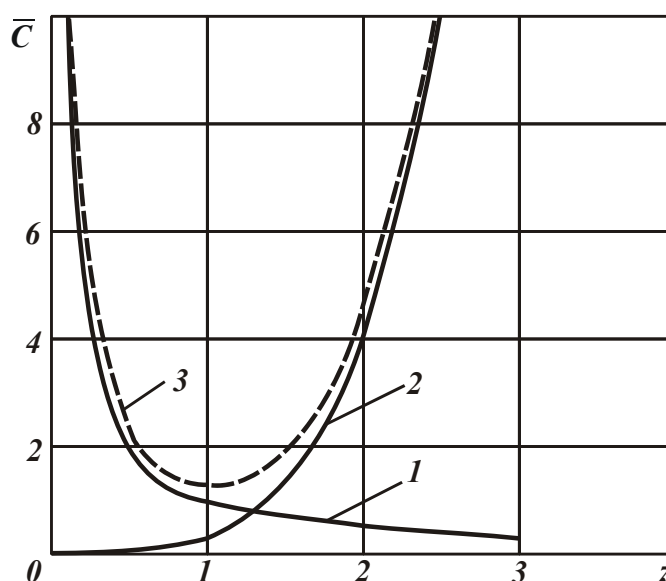


Рис. 1.11. Характер зміни функцій $1/z$ (1), $0,25 \cdot z^4$ (2) і $1/z + 0,25 \cdot z^4$ (3) для $m_1=5$.

Як впливає з табл. 1.1, зі збільшенням z відносна собівартість обробки \bar{C} змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку мінімуму (при $z=1$). Перший доданок в точці мінімуму собівартості обробки в 4 рази більше другого доданка.

1.6. Оцінка економічної ефективності застосування на підприємствах України коштовних ріжучих інструментів зарубіжного виробництва

Виходячи із залежності (1.50), на рис. 1.12 в загальному вигляді показано характер зміни собівартості обробки від швидкості різання та продуктивності

обробки. Як видно, собівартість обробки зі збільшенням продуктивності обробки Q змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку мінімуму. Зі зменшенням безрозмірного параметра m_1 , що визначає стійкість різального інструменту, мінімум собівартості обробки C_{min} зменшується і зміщується в область більших значень швидкості різання V (рис. 1.12,а) і, відповідно, продуктивності обробки Q . Тому, застосування імпортних твёрдосплавних інструментів, що характеризуються меншими значеннями $m_1 = 2 \dots 3$ (для вітчизняних твёрдосплавних інструментів $m_1 = 5 \dots 8$), дозволяє зменшити C_{min} і збільшити екстремальне значення продуктивності обробки $Q_{екстр}$ (рис. 1.12,б). Однак дана закономірність справедлива при однаковій ціні вітчизняного та імпортного інструментів. Насправді, вартість імпортного інструменту значно вище, ніж вітчизняного інструменту, що призводить до збільшення C_{min} і зменшення $Q_{екстр}$.

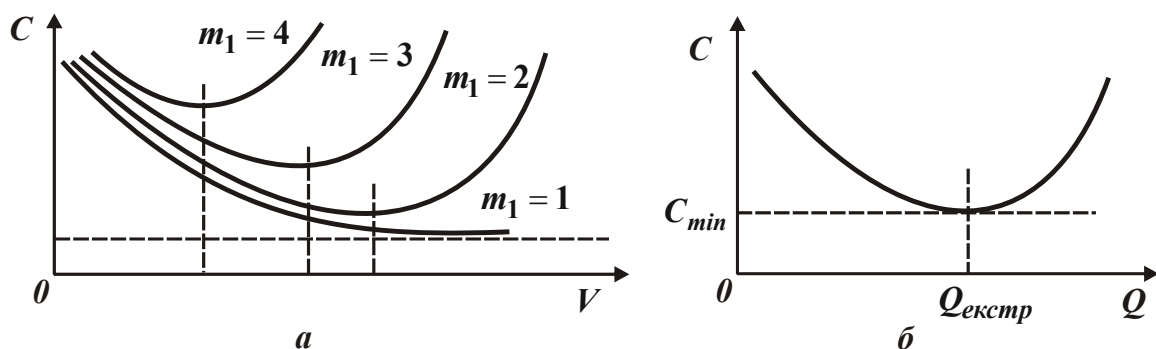


Рис. 1.12. Загальний вигляд залежності собівартості обробки від швидкості різання (а) та продуктивності обробки (б)

Виходячи із залежності (1.57), зі зменшенням величин C і $S_{зод}$ значення C_{min} зменшуються. З цього випливає, що в економічно розвинених країнах, де значення тарифної ставки робочого $S_{зод}$ більше, ніж в Україні, ефективно металообробку здійснювати зі збільшеною швидкістю різання V , реалізуючи умови високошвидкісного різання. В умовах вітчизняного виробництва з метою зниження собівартості обробки C_{min} необхідно зменшувати швидкість різання V , забезпечуючи задану продуктивність обробки за рахунок збільшення подачі S і глибини різання t . Цим показано, що в умовах машинобудівного виробництва України для підвищення стійкості інструменту $T_{екстр}$ необхідно більшою мірою використовувати його ресурс, забезпечуючи підвищений знос і ступінь затуплення інструменту. Однак, як відомо, це призводить до підвищення сили і

температури різання, зниження якості оброблюваних деталей, що неефективно. У зв'язку з цим слід порівняти собівартість обробки для двох значень S_{zod1} і S_{zod2} , що відрізняються, наприклад, в 10 разів для заданої продуктивності обробки $Q_{екстр2}$ (рис. 1.13).

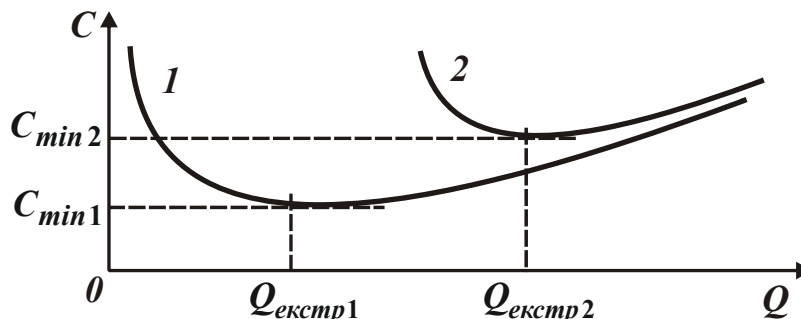


Рис. 1.13. Залежність C від Q

В точках екстремумів собівартість обробки C_{min} описується залежністю (1.57), розглядаючи в ній замість параметра S_{zod} , відповідно, параметри S_{zod1} і S_{zod2} , а замість коефіцієнта k_D , відповідно, коефіцієнти k_1 і k_2 . Значення собівартості обробки в точці $Q_{екстр2}$, розташованій на правій гілці екстремальної залежності $C - Q$ (позиція 1 на рис. 1.13), описується перетвореною залежністю (1.50):

$$C = \frac{N \cdot g}{Q_{екстр2}} \cdot \left[S_{zod1} \cdot k_1 + \frac{S_{zod2} \cdot k_2}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (1.60)$$

Із залежності (1.60) випливає, що зі збільшенням коефіцієнта k_1 перший доданок збільшується, а це призводить до збільшення $C \rightarrow C_{min2}$, а також до виконання умови $C_{min1} \rightarrow C_{min2}$. При цьому зменшується стійкість інструменту $T_{екстр}$ відповідно до залежності (1.53) і збільшуються швидкість різання і продуктивність обробки $Q_{екстр1} \rightarrow Q_{екстр2}$. Очевидно, це нівелює ефект зниження собівартості обробки. Тому чим менше коефіцієнт k_1 , тим менше C_{min1} і більш економічним є технологічний процес обробки деталей. Для $m_1=2$ в точці $Q_{екстр2}$ відношення C_{min2} / C , яке визначається з урахуванням залежностей (1.57) і (1.60) за умови $k_1 = k_2$, дорівнює 1,8, а для $m_1 = 4$ і $m_1 = 7$, відповідно, дорівнює 3,1 і 4,3. Таким чином, розрахункові значення C в точці $Q_{екстр2}$ завжди менше значення C_{min2} . З цього випливає, що з економічної точки

зору в умовах машинобудівного виробництва України, що характеризується меншими значеннями $S_{год.1} < S_{год.2}$, можна металообробку здійснювати з тією ж продуктивністю $Q_{екстр2}$, що і в разі $S_{год.1} = S_{год.2}$. Це не призведе до перевищення собівартості обробки значення C_{min2} . Однак при цьому збільшиться собівартість обробки C порівняно з екстремальним значенням C_{min1} (рис. 1.13), що для певних умов обробки цілком допустимо.

З урахуванням різної ціни інструменту для двох розглянутих випадків (C_1 і C_2), залежність (1.60) виразиться:

$$C = \frac{N \cdot g}{Q_{екстр2}} \cdot \left[S_{год.1} \cdot k_1 + \frac{S_{год.2} \cdot k_2}{(m_1 - 1)} \cdot \frac{C_1}{C_2} \right]. \quad (1.61)$$

У разі $C_1 > C_2$ собівартість обробки в точці $Q_{екстр2}$ збільшиться і при певному значенні C_1 може перевищити значення C_{min2} . Тому в даному випадку економічно неефективно обробку здійснювати з продуктивністю $Q_{екстр2}$. Вона повинна бути менше і, відповідно, менше швидкість різання, тобто необхідно переходити від високошвидкісної обробки до традиційної обробки. Тому купувати інструменти зарубіжного виробництва необхідно за ціною, близькою до ціни фірми–виробника. Придбання ж інструментів у фірм–посередників за завищеними цінами нівелює економічний ефект від застосування нових прогресивних інструментів. Цим, власне, і пояснюється низька ефективність застосування на машинобудівних підприємствах України імпортованих перспективних інструментів, які через високу вартість приходиться експлуатувати на верстаті з меншою швидкістю різання і, відповідно, з меншою продуктивністю обробки, ніж це передбачено рекомендаціями фірми–виробника інструменту. В результаті не використовуються високі технологічні можливості зазначених інструментів.

Цим показано, що застосування на машинобудівних підприємствах України зарубіжних високопродуктивних різальних інструментів у зв'язку зі зменшенням годинної тарифної ставки робітника дозволяє знизити собівартість обробки і тим самим підвищити конкурентоспроможність машинобудівної продукції, виробленої в Україні, порівняно з аналогічними показниками продукції, виробленої за кордоном. Однак це можливо за умови, коли ціна придбаного інструменту буде така сама, як і у зарубіжній фірми–виробника

інструменту. Для цього необхідно інструменти купувати безпосередньо у фірми–виробника, мінаючи посередницькі структури.

1.7. Проведення експериментальної оцінки достовірності отриманих теоретичних рішень

Для оцінювання достовірності теоретичних рішень проведено експериментальні дослідження операції фрезерування важкооброблюваного матеріалу Х2ГСНВМ-ВД.

Порівнювалися два варіанти фрезерування: монолітної фрезою 40 мм (виготовленою зі швидкорізальної сталі Р18) і збірною фрезою 42 мм (оснащеною твердосплавними пластинами з ТТ9030 зі зносостійким покриттям) виробництва фірми TaeguTec. Кількість зубів у фрез – 5; глибина різання – 2,5 мм; ширина різання – 6 мм; кількість проходів – 12. Експериментально встановлено, що оптимальна стійкість збірної фрези становить = 256 хв (4,26 год.), обробка ведеться зі швидкістю різання 99 м/хв і подачею 0,75 мм/об. Оптимальна стійкість монолітної фрези $T_{екстр} = 384$ хв (6,4 год.), обробка ведеться зі швидкістю різання 16 м/хв і подачею 0,3 мм/об.

Виконано розрахунок оптимальної (економічної) стійкості інструменту $T_{екстр}$ за залежністю (1.53) з урахуванням наступних вихідних даних. Збірна фреза складається з корпусу вартістю 1200 грн і 5 ріжучих пластин вартістю 40 грн за кожну, кількість ріжучих кромки у пластини – 4. Ресурс роботи корпусу фрези (кількість циклів заміни кромки) дорівнює 400. У зв'язку з цим, розрахункову ціну збірної фрези можна розглядати без урахування вартості його корпусу, тоді $C = 50$ грн. Як встановлено експериментально, час на заміну інструменту дорівнює $t_c = 5$ хв. Тарифна ставка робітника становить $S_{год.} = 12$ грн/год., а коефіцієнт $k_D = 2$. Безрозмірний параметр $m_1 = 3$. Підставляючи ці дані в залежність (1.53), отримано: $T_{екстр} = 4,3$ год. = 260 хв. Як видно, розбіжність розрахункового і експериментального значень $T_{екстр}$ незначно (знаходиться в межах 10%, рис. 1.14).

При розрахунку оптимальної стійкості монолітної фрези 40 мм (виготовленої з швидкорізальної сталі Р18) виходили з наступного. Вартість фрези становить 138 грн. Однак вона допускає 20 перезаточень (ресурс роботи

фрези після перезаточення дорівнює 100%). Витрати на одне перезаточення становлять 20 грн. Виходячи з цього, в якості розрахункової ціни інструменту слід розглядати $C=20$ грн. Час на заміну інструменту становить $t_{зм}=15$ хв. Експериментально встановлено, що безрозмірний параметр $m_1=6$. Після підстановки цих даних в залежність (1.53) з урахуванням $S_{год.}=12$ грн/год. і $k_D=2$, отримано: $T_{екстр}=5,42$ год.=325 хв. Як видно, різниця розрахункового та експериментального значень $T_{екстр}$ не перевищує 15%, що цілком допустимо для практичного використання залежності (1.53).

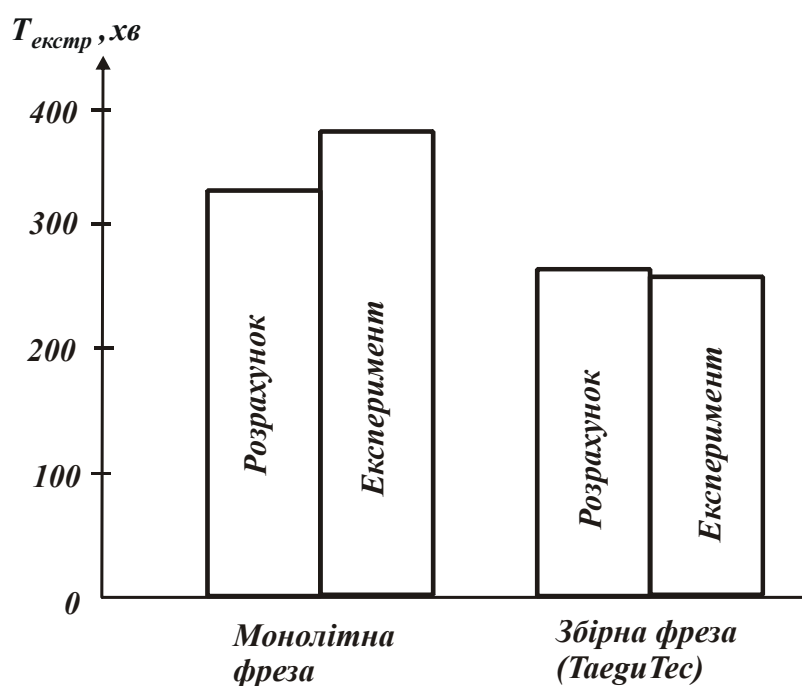


Рис. 1.14. Діаграма розподілу значень $T_{екстр}$ при фрезеруванні

Таким чином показано, що експериментально встановлені значення оптимальної (економічної) стійкості збірної і монолітної фрез приблизно відповідають мінімуму собівартості обробки (встановленому теоретично), тобто обробка здійснюється на оптимальних режимах різання. У зв'язку з цим, слід визначити співвідношення двох статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робітника і витратою інструментів за період їх стійкості. При обробці збірної фрезою витрати на заробітну плату робітника складають $Z_{з/n} = T \cdot Z_{год.} \cdot k_D = 4,26 \cdot 12 \cdot 2 = 102,24$ грн, а витрати на інструмент –

$Z_{інстр} = C = 50$ грн (рис. 1.15). Відношення витрат дорівнює: $Z_{з/n}/Z_{інстр} = 2$ (рис. 1.16). Виходячи із залежності (1.57), відношення двох розглянутих витрат для $m_1=3$ дорівнює 2, тобто розрахункове і експериментальне значення збігаються. Це свідчить про достовірність отриманого теоретичного рішення й що мінімум собівартості обробки реалізується за умови 2-кратного перевищення витрат на заробітну плату над витратами на інструмент.

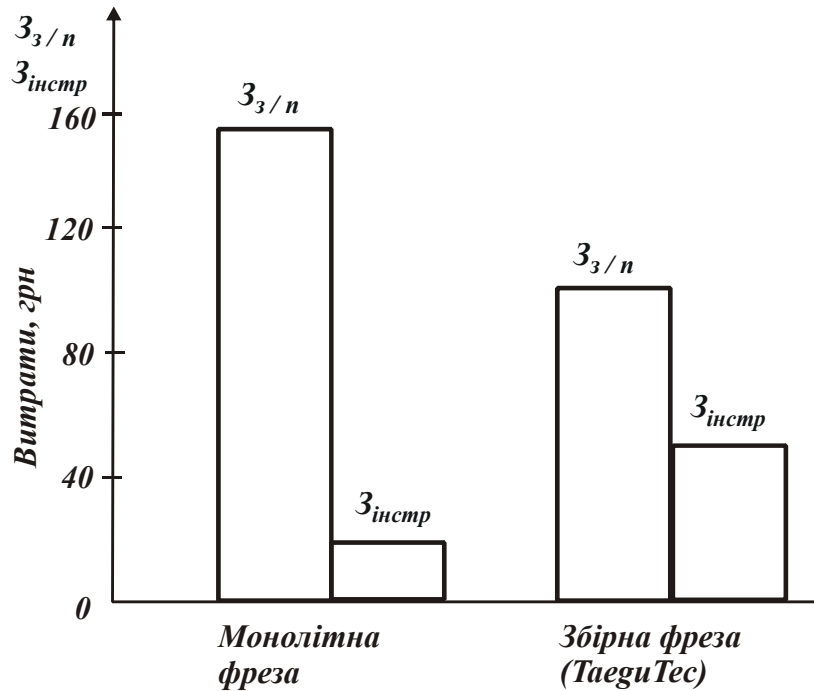


Рис. 1.15. Діаграма розподілу значень витрат $Z_{з/n}$ і $Z_{інстр}$.

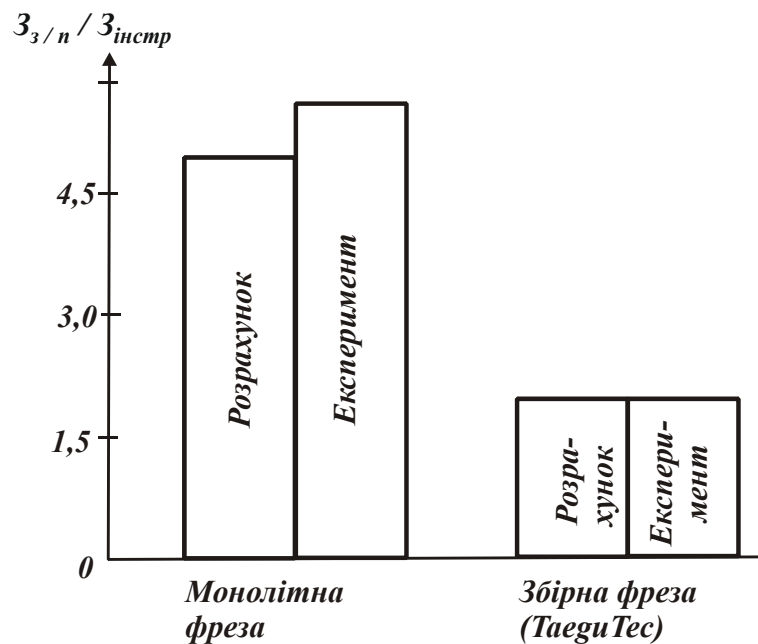


Рис. 1.16. Діаграма розподілу значень відношення $Z_{з/n} / Z_{інстр}$.

Така ж закономірність має місце і при фрезеруванні монолітної фрезою. Витрати на заробітну плату робітника складають $Z_{з/n} = T \cdot Z_{год.} \cdot k_D = 6,4 \cdot 12 \cdot 2 = 153,60$ грн, а витрати на інструмент – $Z_{інстр} = Ц = 20$ грн (рис. 1.15). Відношення витрат дорівнює $Z_{з/n} / Z_{інстр} = 5,69$ (рис. 1.16). Згідно залежності (1.57), відношення цих двох розглянутих витрат для $m_1=6$ дорівнює 5. Отже, розрахункове і експериментальне значення даного віднош відрізняються незначно (в межах 15%).

1.8. Порівняння існуючого і розробленого підходів до оптимізації параметрів режимів різання

Вирішенню завдань оптимізації режимів різання, характеристик інструментів і інших параметрів механічної обробки в науково-технічній літературі постійно приділяється велика увага [1, 9, 10, 11, 21, 22, 24]. В даний час розроблено нормативи режимів різання для основних видів механічної обробки [23], які дозволяють науково обгрунтовано підійти до проектування ефективних технологічних процесів виготовлення деталей машин.

Одним із перших завдань оптимізації параметрів механічної обробки стало завдання визначення оптимальних режимів різання при токарній обробці (рис. 1.17 [20]) з урахуванням обмежень і граничних умов. Для цього розроблено математичну модель [25], яка включає цільову функцію (ЦФ), граничні умови (ГРУ) і обмеження (ОГР).

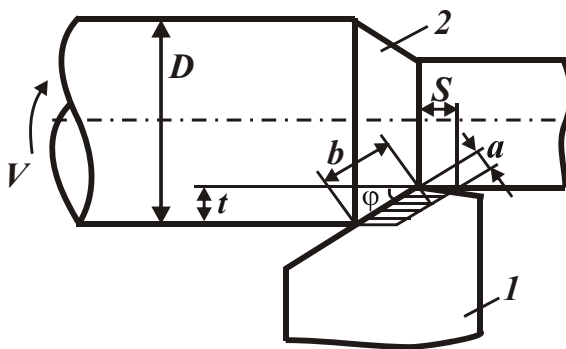


Рис. 1.17. Розрахункова схема поздовжнього точіння:
1 – різець; 2 – оброблювана деталь.

Машинний час визначається за залежністю:

$$t_p = \frac{L}{n \cdot S}. \quad (1.62)$$

В якості цільової функції прийнято машинний час

$$\min t_p = \frac{L}{n \cdot S} \rightarrow \max (F > n \cdot S). \quad (\text{ЦФ})$$

Прийняті обмеження по ріжучій здатності інструменту, потужності приводу головного руху верстата і продуктивності обробки:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot S^y \leq \frac{1000 \cdot C_v}{\pi \cdot T_n^m \cdot t^{x_v}} \text{ (ріжуча здатність інструмента)} \\ n^{z_p+1} \cdot S^{y_p} \leq \frac{6120 \cdot 10^{3(z_p+1)} \cdot N_{\text{дв}} \cdot \eta}{C_p \cdot (\pi \cdot D)^{z_p+1} \cdot k_p \cdot t^{x_p}} \text{ (потужність приводу)} \\ n \cdot S \geq \frac{n \cdot l_p}{60 \cdot k_3 \cdot n_{\text{д}} - t_{\text{дон}} \cdot \Pi} \text{ (продуктивність обробки)}. \end{array} \right. \quad (\text{ОГР})$$

Прийняті граничні значення частоти обертання шпинделя і поздовжньої подачі:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \end{array} \right., \quad (\text{ГРУ})$$

де n , S – частота обертання шпинделя і поздовжня подача (параметри оптимізації);

T_n – нормативна стійкість інструменту;

D – діаметр оброблюваної деталі;

t – глибина різання;

C_v і C_p – постійні коефіцієнти;

l_p – виліт різця;

k_3 – коефіцієнт завантаження обладнання;

$n_{\text{д}}$ – кількість одночасно оброблюваних деталей;

P – задана продуктивність обробки;

t_p – машинний час;

L – довжина переміщення різця;

$t_{дон}$ – допоміжний час;

$N_{привод}$ – потужність приводу головного руху верстата;

η – ККД приводу.

У даній математичній моделі [25] система обмежень (ОГР) і цільова функція (ЦФ) нелінійні. Тому, якщо праві частини в нерівностях обмежень (ОГР) позначити буквою P з відповідними індексами і представити систему обмежень і цільову функцію в логарифмічних координатах, то рішення задачі оптимізації математичної моделі істотно спроститься.

Після перетворень умови оптимізації в новій постановці набудуть вигляду:

$$\begin{aligned}
 F_1 = l_n \cdot F = \alpha + \beta &\rightarrow \max; \\
 \alpha = l_n \cdot S; \quad \beta = l_n \cdot n; \\
 \beta + y \cdot \alpha &\leq l_n \cdot P_{pc}; \\
 (z_p + 1) \cdot \beta + y_p \cdot \alpha &< l_n \cdot P_{m.c}; \\
 \beta + \alpha &\geq l_n \cdot P_p; \\
 \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}; \quad \beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{max}.
 \end{aligned}
 \tag{1.63}$$

В даному випадку максимум цільової функції буде знаходитися в вершині заштрихованого багатокутника – області допустимих значень параметрів, що оптимізуються (рис. 1.18). Ця вершина найбільш віддалена від початку координат (n^*, S^*) . Оптимальне рішення задачі з цією математичною моделлю отримано в роботі [25] чисельним методом.

Як видно, в даному рішенні в якості цільової функції прийнято машинний час, тоді як на практиці поряд зі зниженням машинного часу важливо забезпечити і зниження собівартості обробки, чому і присвячена ця робота. Тому для обґрунтованого вибору оптимальних параметрів механічної обробки необхідно оптимізацію режимів різання проводити за двома критеріями:

найменшому машинного часу обробки (або максимальною продуктивністю) і найменшою собівартістю обробки. Таким чином, розроблена в роботі методика розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки розширює технологічні можливості механічної обробки, дозволяє домогтися істотного підвищення продуктивності і зниження собівартості обробки при забезпеченні високої якості оброблюваних поверхонь.

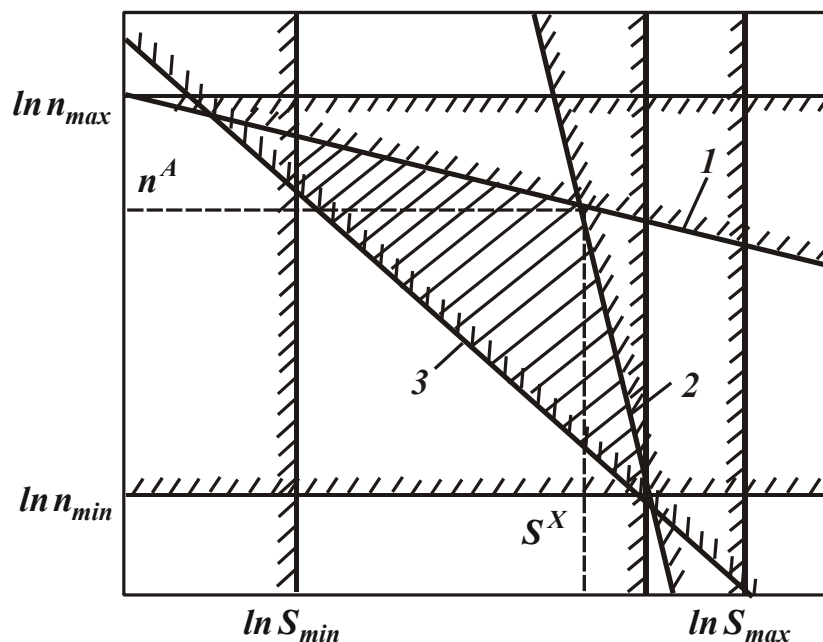


Рис. 1.18. Область допустимих значень параметрів, що оптимізуються [25]:
1 – ріжуча здатність інструменту; 2 – потужність приводу; 3 – продуктивність обробки.

2. РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ НА ОСНОВІ ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО РІЗАННЯ НА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЯХ ТОЧІННЯ ТА ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ МАТЕРІАЛІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

2.1. Оцінка економічної ефективності застосування збірних твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями

У п. 1.7 проведено експериментальну оцінку достовірності отриманих теоретичних рішень щодо визначення собівартості обробки на операції фрезерування деталей з важкооброблюваного матеріалу (сталь Х2ГСНВМ-ВД) монолітної фрезою $\varnothing 40$ мм (виготовленою зі швидкорізальної сталі Р18) і збірної фрезою $\varnothing 42$ мм (оснащеною пластинами з твердого сплаву ТТ9030 зі зносостійким покриттям). Показано, що в другому випадку забезпечується істотне зменшення собівартості обробки. Однак результати отримані з урахуванням лише двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робітника і витратою ріжучих інструментів. Для більш повного аналізу собівартості обробки необхідно враховувати також змінні статті витрат, пов'язані з експлуатацією обладнання (металорізальних верстатів), та інші витрати. У зв'язку з цим, слід визначити сумарні витрати (повну собівартість обробки C) за наступною залежністю:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + P_{\text{витрат}}, \quad (2.1)$$

де C_1 – витрати на заробітну плату робітників, грн;

C_2 – витрати на різальний інструмент, грн;

C_3 – витрати на обладнання, грн;

$P_{\text{витрат}}$ – інші витрати (додаткові накладні витрати без урахування витрат на обладнання та ріжучий інструмент), грн.

В табл. 2.1 – 2.3 наведено результати розрахунків 4-х розглянутих статей витрат, що припадають на одну деталь, яка обробляється. Як видно, при

фрезеруванні монолітною фрезою зі швидкорізальної сталі P18 витрати складають: $C_1=120,33$ грн; $C_2=25,6$ грн; $C_3=171,26$ грн; $P_{витрат}=180,5$ грн, а собівартість обробки $C=497,69$ грн. Відповідно при фрезеруванні збірною фрезою (оснащеною пластинами з твердого сплаву TT9030 зі зносостійким покриттям) виробництва фірми TaeguTec (Південна Корея) витрати складають: $C_1=19,53$ грн; $C_2=5,36$ грн; $C_3=19,86$ грн; $P_{витрат}=29,30$ грн, а собівартість обробки $C=74,05$ грн.

В результаті собівартість обробки від застосування збірної фрези зменшилася в 6,7 разів, а економія витрат (на 1 деталь) склала 423,64 грн, тоді як її ціна дорівнює 1400 грн, а ціна монолітної фрези – всього 138 грн, тобто ціна збірної фрези більше ціни монолітної фрези.

Таблиця 2.1

Розрахунок витрат на заробітну плату робітника на 1 операцію (на 1 деталь)

Статті витрат на заробітну плату робітника	Позначення	Одиниці виміру	Варіант 1 (базовий)	Варіант 2 (новий)
Трудомісткість операції	T	год.	6,90	0,8
Тарифна ставка робітника	P	грн/год.	12	12
Коефіцієнт підвищення заробітної плати робітника за рахунок зниження трудомісткості	$K1$		1	1,4
Основна заробітна плата робітника $Z_{осн} = T \cdot P \cdot K1$	$Z_{осн}$	грн	82,80	13,44
Додаткова заробітна плата робітника	$K1$	%	8,33	8,33
	$Z_{додат}$	грн	6,89	1,12
Відрахування на соціальне страхування	$K3$	%	37	37
	$O_{с/с}$	грн.	30,636	4,97
Витрати на заробітну плату в розрахунку на 1 деталь (1 операцію)	C_1	грн.	120,33	19,53

Таблиця 2.2

Розрахунок витрат на устаткування на 1 операцію (на 1 деталь)

		A	B	C
	Од. вим.		%	грн
<i>Витрати на утримання обладнання (за рік) $Z_{обл.}$</i>		SF80G/F2		
Вартість обладнання з верстатними пристосуваннями				137000
Період амортизації (термін окупності)	рік	6		
Амортизаційні відрахування			16,7	22879
Площа під обладнання	м ²	25		
Вартість оренди 1 м ² площі в місяць	грн	108		
Орендна плата за виробничі площі	грн			32400
Розрахунковий фонд роботи обладнання за рік	год.	4000		
Витрати на утримання обладнання (за рік) $Z_{обл.}$	грн			55279
Вартість верстато-години утримання обладнання $C_{в-год.}$	грн/год			13,82
<i>Витрати при експлуатації обладнання (за рік) $Z_{зо}$</i>				
Час експлуатації обладнання за рік	год.	4000		
Потужність верстата	кВт	30		
Вартість 1 кВт/год. електроенергії	грн	0,28		
Витрати на електроенергію	грн			33600
Витрати на інженерно-технічне обслуговування обладнання	грн			1200
Витратні матеріали (масло, МОР та ін.)	грн			2000
Витрати на верстатне оснащення	грн			9000
Витрати при експлуатації обладнання (за рік) $Z_{екс.обл.}$	грн			44000
Вартість верстато-години експлуатації обладнання $C_{в-год.}$	грн/год			11,00
<i>Вартість верстато-години $C_{в-год.}$</i>	грн/год			24,82
Час обробки деталі (трудомісткість операції) T	год.	6,90		0,8
Витрати на обладнання на 1 операцію (на 1 деталь)	год.	171,26		19,86

Таблиця 2.3

Розрахунок сумарних витрат (собівартості) C на виконання операції
фрезерування

Статті витрат (показники) на 1 деталь (операцію, перехід)	Од. вим.	Варіант 1 (базовий)	Варіант 2 (новий)	Частка статей витрат,% (Фірма TaeguTec)	
Трудомісткість обробки T	год.	6,9	0,8		
Витрати на інструмент C_2	грн	25,60	5,36	5,14	7,24
Витрати на обладнання C_3	грн	171,26	19,86	34,41	26,81
Витрати на зарплату C_1	грн	120,33	19,53	24,18	26,37
Інші витрати $P_{витрат}$	грн	180,5	29,3	36,26	39,56
Сумарні витрати C	грн	497,69	74,05	100	100
Економія витрат на 1 деталь	грн		423,64		85,12

Цим показана ефективність застосування з точки зору зниження собівартості обробки більш продуктивного, хоча і кошовного інструменту виробництва фірм TaeguTec (Південна Корея).

Як видно, собівартість обробки при обробці збірною фрезою істотно менше (рис. 2.1). Це обумовлено підвищеними фізико-механічними властивостями інструментального матеріалу збірної фрези й її більш високою продуктивністю різання та стійкістю. В результаті досягається значно більша продуктивність обробки (в 8,6 разів перевищує продуктивність фрезерування монолітною фрезою з швидкорізальної сталі P18), що, власне, і є основною умовою зменшення собівартості обробки.

На рис. 2.2 наведено експериментальні значення відношення продуктивності обробки збірною й монолітною фрезами $\frac{Q_{збір}}{Q_{монол}}$, а також

відношення вартостей збірної і монолітної фрез $\frac{Q_{збір}}{Q_{монол}}$.

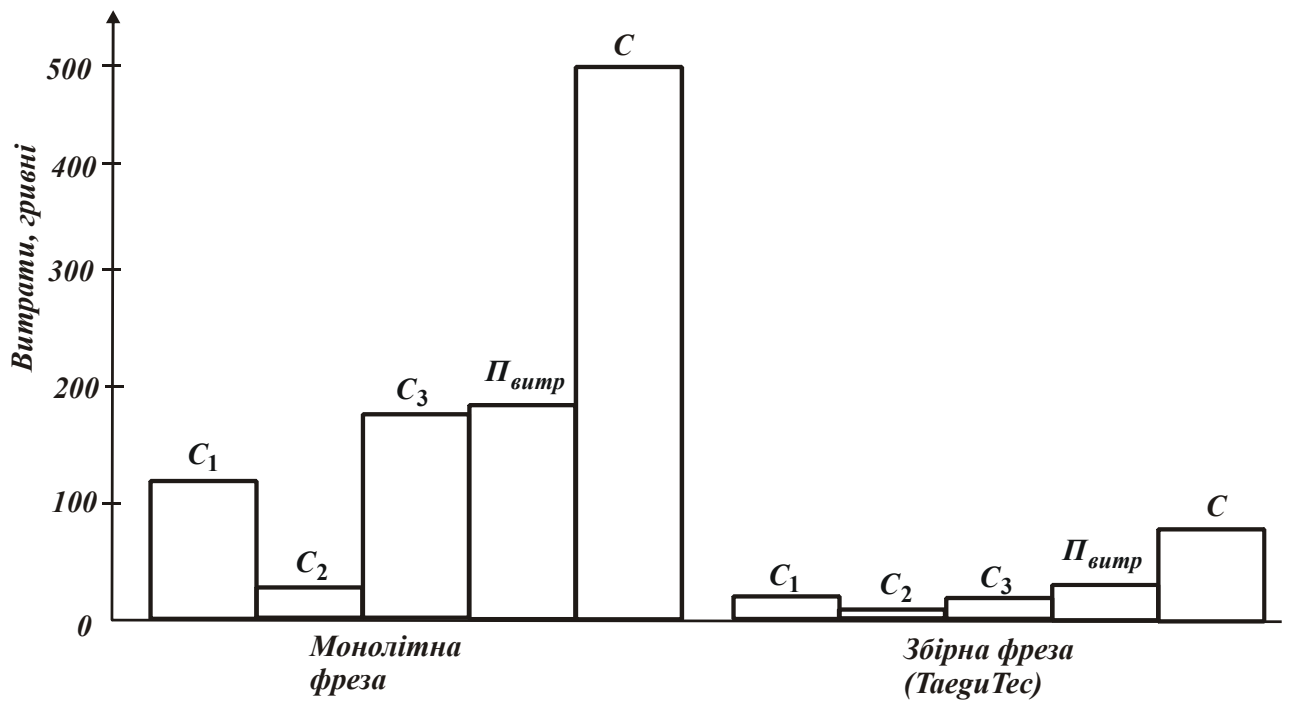


Рис. 2.1. Діаграма розподілу значень витрат C_1 , C_2 , C_3 , $P_{витрат}$ і C при фрезеруванні монолітною кінцевою фрезою та збірною кінцевою фрезою.

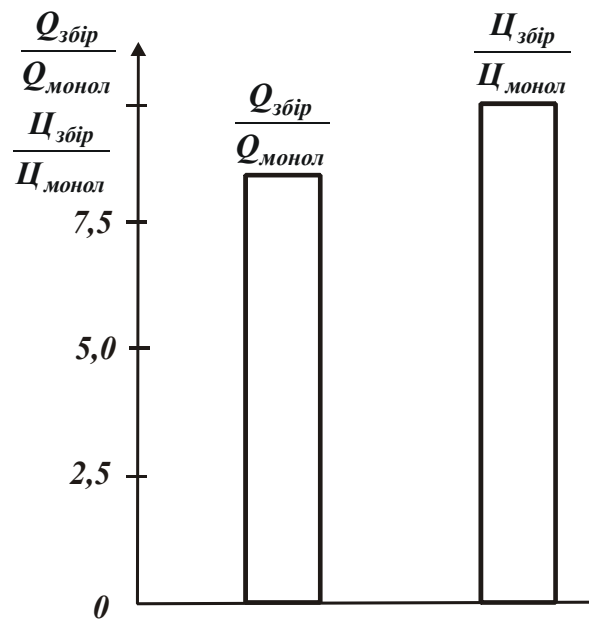


Рис. 2.2. Діаграма розподілу відношень $\frac{Q_{збір}}{Q_{монол}}$ і $\frac{Ц_{збір}}{Ц_{монол}}$.

Як видно, 10-кратне збільшення вартості збірної фрези призводить до збільшення продуктивності обробки в 8,6 разів, а це в кінцевому підсумку створює ефект в зниженні собівартості обробки (як показано вище, в 7,6 разів).

Необхідно відзначити, що частка витрат, пов'язаних з витратою інструменту, в сумарних витратах невелика і складає всього 5% для монолітної фрези зі швидкорізальної сталі P18 і 7% для збірної фрези. Отже, збільшення вартості збірного твердосплавного інструменту зі зносостійким покриттям практично не вплинуло на збільшенні сумарних витрат (собівартості обробки C), тоді як досягнуте при цьому збільшення продуктивності обробки дозволило значно знизити собівартість обробки. Це в кінцевому підсумку і визначило економічний ефект обробки.

Із цього можна зробити важливий висновок про те, що підвищити ефективність механічної обробки (зменшити собівартість обробки C) можна головним чином за рахунок збільшення продуктивності обробки, застосовуючи для цього прогресивні конструкції збірного твердосплавного інструменту зі зносостійкими покриттями. Вартість інструменту при цьому не є визначальним обмежуючим фактором, тому що частка витрат на ріжучий інструмент в сумарних витратах невелика і не призводить до помітного збільшення собівартості обробки C .

Такий же аналіз собівартості обробки був проведений для різних випадків механічної обробки із застосуванням як звичайних монолітних, так і збірних інструментів із твердих сплавів зі зносостійкими покриттями [5]. В результаті встановлено, що частка витрат на ріжучий інструмент в сумарних витратах (середньої собівартості машинобудівної продукції) становить всього 3% (рис. 2.3). Однак фактичний вплив правильності вибору інструменту на зниження собівартості готової продукції значно вищий, оскільки (як вже показано) при виборі інструменту необхідно враховувати оптимальне співвідношення його ціни, стійкості та продуктивності обробки.

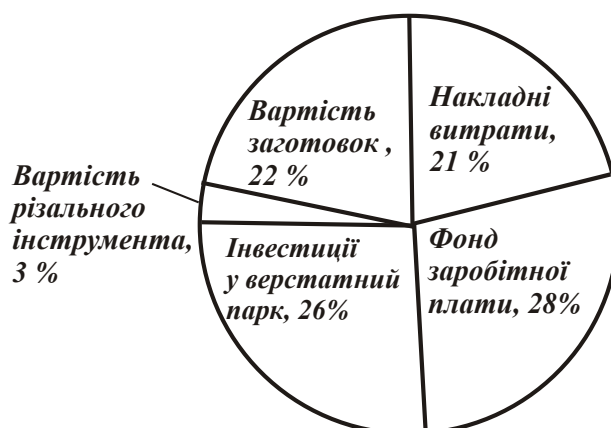


Рис. 2.3. Розподіл витрат на металообробку

Для аналізу слід розглянути вплив кожного з цих показників на собівартість продукції.

Зниження ціни ріжучого інструменту:

- зниження на 20% відповідає зниженню загальної собівартості виробу на $3\% \times (-20\%) = -0,6\%$;
- додаткове 33%-е зниження вартості на інструмент попереднього покоління дозволяє економити $3\% \times (-33\%) = -1,0\%$.

Підвищення стійкості різального інструменту:

- збільшення в два рази терміну служби відповідає зниженню собівартості на $3\% : 2 = -1,5\%$.

Збільшення продуктивності (швидкість / подача) ріжучого інструменту:

- збільшення продуктивності на 20% відповідає зниженню витрат на (накладні витрати + фонд заробітної плати + інвестиції в верстатний парк) $\times (-20\%) = (21\% + 28\% + 26\%) \times (-20\%) = 75\% \times (-20\%) = -15\%$. Навіть якщо при цьому витрати на інструмент зростають, наприклад, в півтора рази, тобто частина його вартості в собівартості зростає до $3\% + 1,5\% = 4,5\%$, то загальне зниження собівартості виробу становитиме $-15\% + 1,5\% = -13,5\%$.

Таким чином, очевидно, що збільшення швидкості обробки та вдосконалення технологічного процесу сприяють значному зниженню собівартості одиниці готової продукції (табл. 2.4, рис. 2.2).

Таблиця 2.4

Вплив ціни та стійкості ріжучого інструменту, а також швидкості різання на зниження собівартості продукції

Ціна	Стійкість	Швидкість різання і вдосконалення технологічного процесу
-1%	-1,5%	-15%

2.2. Вибір раціональних параметрів операцій механічної обробки деталей машин

В основу вибору раціональних умов обробки слід покласти методику визначення оптимальної (економічною) стійкості інструменту $T_{екстр}$, що

відповідає мінімуму собівартості обробки. Для цього спочатку для заданих значень ціни інструменту C , часу на зміну інструменту (заміну різальних кромок) $t_{зм}$, тарифної ставки робітника $S_{год.}$, коефіцієнта k_D , що враховує всілякі нарахування на тарифну ставку робітника, та безрозмірного параметра m_1 (що узагальнено визначає фізико-механічні властивості інструментального матеріалу) за залежністю (1.53) розраховується оптимальна (економічна) стійкість інструменту $T_{екстр}$. Потім, за залежністю (1.52) розраховується оптимальна швидкість різання $V_{екстр}$, приймаючи глибину різання t рівною величині припуску, що знімається, і встановлюючи подачу S максимально можливою, виходячи з умов міцності інструменту або потужності приводу верстата. Даний підхід визначення оптимальних умов обробки є загальним для різних методів механічної обробки: точіння, фрезерування, свердління і т.д., так як в його основу покладена універсальна аналітична залежність (1.53) для визначення оптимальної (економічної) стійкості інструменту $T_{екстр}$. Для розрахунку $T_{екстр}$ достатньо знати лише значення параметрів C , $t_{зм}$, $S_{год.}$, k_D і m_1 для кожного з розглянутих випадків обробки.

Як показано в п. 1.8, такий підхід відрізняється від застосовуваного на практиці підходу, заснованого на використанні експериментальних даних стійкості інструменту, наведених в довідковій літературі [2, 3, 9, 23] і справедливих для часткових умов обробки. Аналітичне визначення стійкості інструменту за залежністю (1.53) дозволяє отримати більш загальні рішення, що враховують специфіку обробки для кожного конкретного випадку (ціну інструменту C , безрозмірного параметру m_1 та ін.). Очевидно, експериментальним шляхом врахувати всі ці особливості обробки складно, що обмежує можливості науково обґрунтованого підходу до вибору оптимальної стійкості інструменту і, відповідно, оптимальних режимів різання, особливо за умови використання нових сучасних збірних конструкцій твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями.

Для визначення показника ступеня m_1 в емпіричній залежності (1.49) було проведено експериментальні дослідження стійкості інструменту T залежно від швидкості різання V при точінні сталі 45 різцями, оснащеними ріжучими пластинами з твердих сплавів ТТ8115, ТТ8125 и ТТ8135 з зносостійким покриттям, глибина різання $t=2$ мм, подача $S = 0,3$ мм/об.

Стійкість інструменту визначалася за умови досягнення на задній поверхні різця площадки зносу довжиною 0,25 мм.

Як впливає з рис. 2.4,а, для всіх трьох розглянутих твердих сплавів стійкість інструменту T зі збільшенням швидкості різання V зменшується і при $V = 500$ м/хв стає дуже малою величиною, особливо для твердого сплаву ТТ8135 (рівною всього 0,3 хв). Найбільшу стійкість досягнуто із застосуванням твердого сплаву ТТ8115.

Добуток параметрів $V \cdot T$ (довжина шляху різання) зі збільшенням швидкості різання V змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку максимуму при $V = 300$ м/хв (рис. 2.4,б). З фізичної точки зору це означає, що в діапазоні зміни швидкості різання $V < 350$ м/хв в зносі інструменту переважає механічний фактор, а при $V > 350$ м/хв – температурний фактор, в результаті чого стійкість інструменту інтенсивно зменшується. В діапазоні зміни швидкості різання $V < 350$ м/хв показник ступеня m_1 менше одиниці, а при $V > 350$ м/хв, навпаки, показник ступеня m_1 приймає значення, більше одиниці, і в залежності від марки твердого сплаву змінюється в межах: $m_1 = 3 \dots 6$.

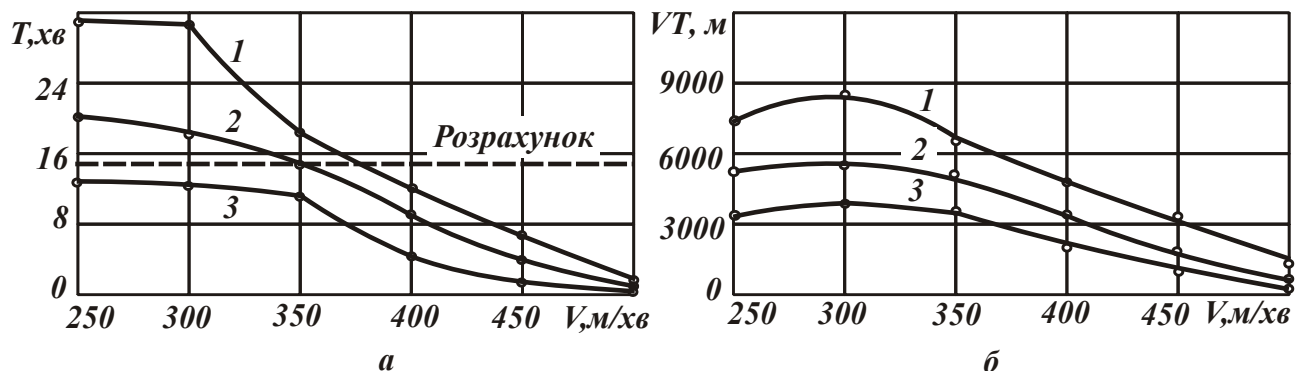


Рис. 2.4. Залежність стійкості твердосплавного інструменту T (а) і добутку параметрів $V \cdot T$ (б) від швидкості різання V : 1 – твердий сплав ТТ8115; 2 – твердий сплав ТТ8125; 3 – твердий сплав ТТ8135.

З наведених вище теоретичних досліджень випливає, що екстремум (мінімум) собівартості обробки C від швидкості різання V в діапазоні $V < 350$ м/хв відсутній, має місце лише безперервне зменшення C зі збільшенням швидкості різання V . В результаті оптимальною швидкістю різання можна вважати значення, рівне $V = 350$ м/хв.

За умови $V > 350$ м/хв буде досягтися екстремум (мінімум) собівартості обробки C від швидкості різання V , причому, при мінімально можливій швидкості різання $V = 350$ м/хв. Це впливає з аналітичної залежності (1.52), згідно з якою зі збільшенням показника ступеня m_1 швидкість різання V , що відповідає мінімуму собівартості обробки C , зменшується. Отже, оптимальною швидкістю різання для трьох розглянутих твердих сплавів є швидкість, яка дорівнює приблизно $V = 350$ м/хв.

Виконаємо розрахунок оптимальної (економічної) стійкості інструменту $T_{екстр}$, оснащеного ріжучою пластиною з твердого сплаву ТТ8125, на основі залежності (1.53). Для вихідних даних: $C = 3$ грн. (ціна умовної ріжучої кромки твердосплавної пластини); $t_{зм} = 2$ хв; $S_{год.} = 24$ грн/год.; $k_D = 1,37$ и $m_1 = 3$, отримано $T_{екстр} = 15$ хв (на рис. 2.4,а показано пунктирною лінією). Це приблизно відповідає швидкості різання $V = 350$ м/хв.

Із залежності (1.57) випливає, що мінімум собівартості обробки тим менше, чим менше параметр $S_{год.}$. Тому, зменшуючи $S_{год.}$, наприклад, в 1,5 рази (з 24 грн/год. до 18 грн/год.), оптимальна (економічна) стійкість інструменту $T_{екстр}$ збільшиться і прийме значення $T_{екстр} = 18,6$ хв. Це призведе до зменшення оптимальної швидкості різання до значення, близького до 300 м/хв, що відповідає максимуму добутку параметрів $V \cdot T$ (рис. 2.4,б).

Таким чином показано, що за рахунок зменшення параметра $S_{год.}$ можна зменшити швидкість різання, проте незначно. Набагато більшого ефекту можна досягти від зменшення часу $t_{зм}$, який при обробці звичайним монолітним інструментом приймає достатньо великі значення (у зв'язку з заточкою інструменту). Тому застосування збірних конструкцій інструментів, які передбачають лише заміну твердосплавних пластин, дозволяє істотно зменшити час $t_{зм}$ і, відповідно, оптимальну (економічну) стійкість інструменту $T_{екстр}$, а це призводить до відчутної зміни (збільшення) швидкості різання V .

Нижче наведено приклади ефективного використання сучасних збірних твердосплавних інструментів виробництва фірми TaeguTec (Південна Корея) і верстатів типу "обробний центр" з ЧПУ для механічної обробки відповідальних деталей гідравлічних систем.

2.3. Практичне використання результатів досліджень для підвищення ефективності механічної обробки деталей гідравлічних систем

Підвищення продуктивності і зниження собівартості обробки, забезпечення високих вимог до точності і якості виготовлення деталей гідравлічних систем передбачає застосування зносостійких інструментів, які характеризуються високою ріжучою здатністю, і високоточних сучасних верстатів з ЧПУ. Це, наприклад, стало вирішальним фактором у вирішенні проблеми економічного виготовлення деталей гідравлічних систем, таких як плунжер, п'ята і сферична втулка (рис. 2.5) [4, 14].

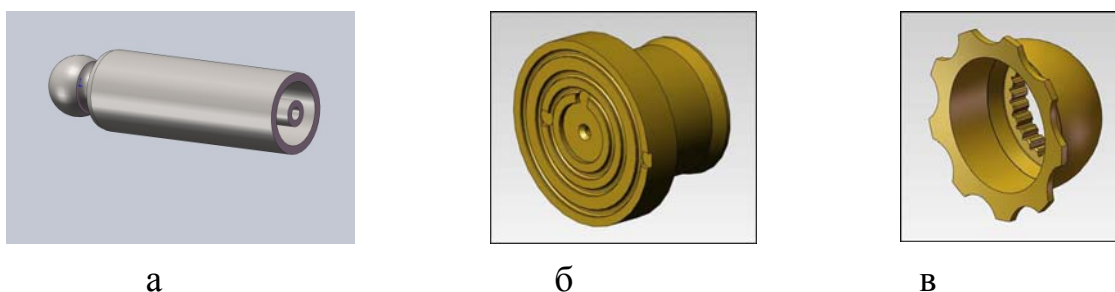


Рис. 2.5. Деталі гідравлічних систем: а – плунжер; б – п'ята; в – втулка сферична

Плунжер виготовляється зі сталі 40ХФ2, а п'ята і втулка сферична – з ливарної латуні ЛМцСКА. Обробку зазначених деталей (більше 10 різновидів і типорозмірів деталей) запропоновано здійснювати на високопродуктивному двошпindelному токарному обробному центрі PUMA 2100MS з приводним фрезерним інструментом (вісь С) і контр-шпинделем ("DOOSAN", виробництва Південна Корея), оснащеним револьверній головкою для зміни інструменту та системою управління (ЧПУ) Fanuc Oi-TD (рис. 2.6). Для кожного виробу був виготовлений окремий комплект затискного оснащення, а для операцій кільцевого фрезерування і глибокого свердління – верстат комплектувався потужною гідростанцією на 70 бар.

При розробці нової технології механічної обробки деталей гідравлічних систем був зроблений основний упор на фактор економічності, пов'язаний, з одного боку, з підвищенням продуктивності і зменшенням собівартості обробки, а з іншого боку, з універсалізацією обладнання з ЧПУ шляхом застосування нестандартних ріжучих інструментів і спеціального оснащення.

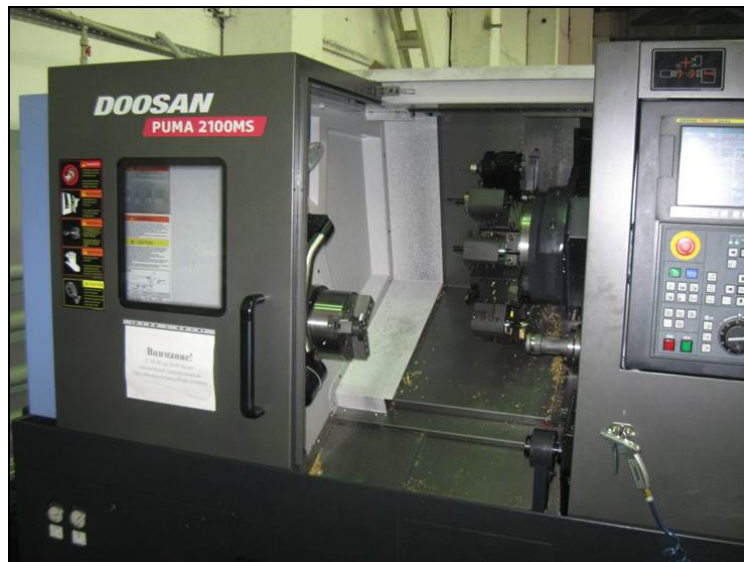


Рис. 2.6. Високопродуктивний двошпindelний токарний обробний центр PUMA 2100MS з приводним фрезерним інструментом і контр-шпинделем ("DOOSAN")

Так, раніше розглянуті деталі: плунжер, п'ята і втулка сферична оброблялися на різному устаткуванні. Навіть окремі операції доводилося виконувати на різних верстатах. Наприклад, токарну обробку плунжера здійснювали на одному обладнанні, а глибоке свердління – на спеціальному верстаті для глибокого свердління. В даний момент ці операції об'єднані й здійснюються на одному верстаті "DOOSAN". Крім того, використовуючи верстати агрегатного типу, складно коригувати розмір оброблюваної деталі в зв'язку зі зносом різального інструменту. Для введення корекції на агрегатному верстаті необхідно витратити більше 5 хвилин. Для введення корекції на верстаті "DOOSAN" з ЧПУ – всього 20 секунд. Наприклад, при обробці на агрегатному верстаті при виявленні браку на 3-х оброблених деталях з 7, відповідно, і 4 наступні оброблені деталі підуть в брак. При використанні верстата "DOOSAN" є можливість контролювати кожну деталь і таким чином виключається брак при обробці. При цьому з'являється можливість збільшення продуктивності обробки на кожній операції за рахунок того, що верстат "DOOSAN" характеризується підвищеною жорсткістю.

Отже, застосування такого обладнання як верстат з ЧПУ "DOOSAN" дозволяє вирішити проблему економічності й продуктивності обробки головним чином за рахунок його універсалізації, можливості обробки трьох розглянутих типів деталей (плунжер, п'ята і втулка сферична) на одному

верстаті. При цьому зменшуються витрати на енергоресурси. Для обслуговування верстата необхідний один робітник, тоді як для обробки даних деталей на агрегатних верстатах необхідно більше 5 робітників, що дозволяє економити фонд заробітної плати робітників. Крім того, мінімізується кількість бракованих деталей. Характеристики верстата "DOOSAN" дозволяють виконувати токарну обробку деталей різної конфігурації. У разі зміни конструкції деталі можливе швидке переналагодження обладнання.

Нижче наведені результати експериментальних досліджень застосування збірних конструкцій твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями замість традиційно використовуваних для обробки розглянутих вище трьох типових деталей гідравлічних систем: плунжера, п'яти і втулки сферичної (рис. 2.5). Спочатку розглянуто можливості підвищення ефективності операцій механічної обробки плунжера.

1. За існуючою технологією напівчистова обробка зовнішньої циліндричної поверхні плунжера проводилася звичайним контурним різцем з твердого сплаву T15K6 з режимом різання: $V=40$ м/хв, $S=0,15$ мм/об., $t=1,0$ мм. З метою підвищення продуктивності та зниження трудомісткості й собівартості обробки запропоновано використовувати сучасний збірний токарний різець TDJNL 2525 M15 зі змінною багатогранною пластиною TT8125 DNMG 150608 FC зі зносостійким покриттям (рис. 2.7) виробництва фірми TaeguTec (Південна Корея). Завдяки високій стійкості багатогранних змінних пластин зі зносостійким покриттям вдалося інтенсифікувати режим різання: $V=100$ м/хв, $S=0,1$ мм/об., $t=2,0$ мм. Це дозволило в 3 рази збільшити продуктивність обробки і головне - уникнути численних перезаточек інструменту і таким чином зменшити трудомісткість і собівартість обробки.



Рис. 2.7. Збірний токарний різець зі змінною багатогранною пластиною TT8125

2. Ще більший ефект був досягнутий на операції чистової токарної обробки, а також при формуванні сфери і радіусу плунжера. Згідно з чинною

технологією, дана операція здійснюється тим же твердосплавним різцем з режимом різання: $V=45$ м/хв, $S=0,1$ мм/об., $t=0,08$ мм. Замість цього різця запропоновано використовувати сучасний збірний токарний різець SVJNL 2525 M13 з кутом в плані 93 градуси зі змінною багатогранною пластиною TT8115 (рис. 2.8) VNMG 130404 FG, яка за твердістю вище пластини TT8125, що використовується для напівчистої обробки. Режим різання: $V=250$ м/хв, $S=0,12$ мм/об., $t=0,3$ мм. В результаті вдалося підвищити продуктивність обробки більш ніж в 10 разів.



Рис. 2.8. Збірний токарний різець з кутом в плані 93° і зі змінною багатогранною пластиною TT8115

3. Для свердління отворів в плунжері за існуючою технологією застосовувалися центрувальні свердла зі швидкорізальної сталі P18 з режимом різання: $V=40$ м/хв, $S=0,1$ мм/об. Застосування свердла ЕСЕМ 2060 зі сплаву UF 20 (рис. 2.9) дозволило збільшити швидкість різання до $V=80$ м/хв при такій же подачі $S=0,1$ мм/об.



Рис. 2.9. Свердло ЕСЕМ 2060 із сплаву UF 20

З метою підвищення продуктивності та якості обробки отворів були розроблені й впроваджені кардинально нові конструкції свердел для глибокого свердління отвору $\varnothing 3,15$ мм SPGD-03150-0410-30577-01 з довжиною ріжучої частини 125 мм. Свердління рекомендується здійснювати з режимом різання: $V=60$ м/хв, $S=0,08$ мм/об.

Далі наведено розроблені ефективні операції механічної обробки деталі "п'ята" (рис. 2.5,б).

1. За чинною технології напівчистова обробка зовнішньої циліндричної поверхні деталі "п'ята" здійснювалася фасонним різцем зі швидкорізальної сталі P18 з режимом різання: $V=100$ м/хв, $S=0,1$ мм/об., $t=2,0$ мм. Замість цього інструменту був застосований сучасний збірний токарний різець TDJNL 2525 M15 зі змінною багатогранною пластиною DNMG 150608 ML зі сплаву K10, що складається з WC + Co (рис. 2.10, табл. 2.5). Режим різання: $V=350$ м/хв, $S=0,25$ мм/об., $t=1,5$ мм. В результаті продуктивність обробки збільшилася в 6 разів, майже в таку ж кількість разів зменшилася собівартість обробки.



Рис. 2.10. Збірний токарний різець зі змінною багатогранною пластиною зі сплаву K10

Таблиця 2.5

Механічні та фізичні властивості твердого сплаву K10

Модуль пружності, Н/мм ²	Межа міцності на вигин, Н/мм ²	Межа міцності на стиск, Н/мм ²	Твердість (HRA)	Тепло-провідність, кал/(см·с·К)	Коефіцієнт теплового розширення, 10 ⁻⁶ /град
620	>2400	6200	92,7	0,19	4,7

2. Обробка 3-х глухих отворів $\varnothing 3,18 \pm 0,24$ мм раніше проводилася спеціальним свердлом $\varnothing 3,18$ мм зі швидкорізальної сталі P18 вітчизняного виробництва з режимом різання $V=30$ м/хв, $S=0,05$ мм/об. Нами на цій операції запропоновано застосовувати спеціальне твердосплавне свердло BOF D3.18X0.7X60-6 з ультрадрібнозернистого твердого сплаву UF10 (рис. 2.11) з режимом різання $V=120$ м/хв, $S=0,07$ мм/об. Це дозволило більш ніж в 5 разів підвищити продуктивність обробки при одночасному зменшенні собівартості обробки.

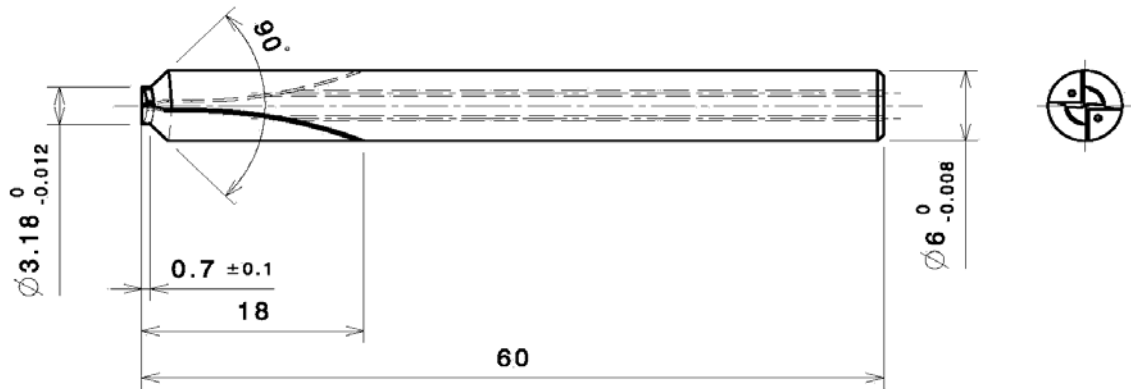


Рис. 2.11. Креслення твердосплавного свердла BOF D3.18X0.7X 60-6 зі сплаву UF10

3. Обробка центрального отвору $\varnothing 1,57^{+0,11}_{-0,04}$ мм раніше проводилася спеціальною фрезою $\varnothing 1,57$ мм зі швидкорізальної сталі P18 вітчизняного виробництва з режимом різання $V=30$ м/хв, $S=0,05$ мм/об. Застосування спеціальної твердосплавної фрези SSD D1.6X20FX70-6 зі сплаву UF10 (рис. 2.12) з режимом різання: $V=100$ м/хв, $S=0,07$ мм/об., дозволило в 5 разів збільшити продуктивність і знизити собівартість обробки.

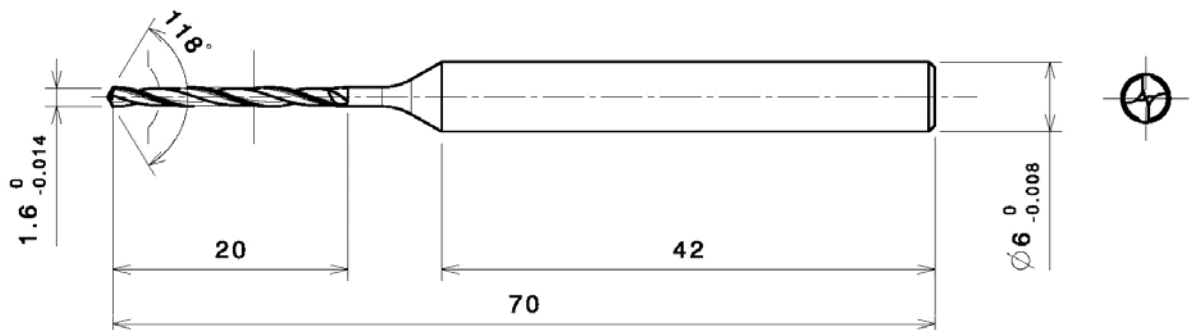


Рис. 2.12. Креслення твердосплавної фрези SSD D1.6X20FX 70-6 зі сплаву UF10

4. Точіння торцевих канавок запропоновано виконувати з режимом різання: $V=150$ м/хв, $S=0,1$ мм/об. Використовувалися канавочні різці зі змінною пластиною TTER 2525-2T8 і TDFT 1.25-0.38-D22 K10. Раніше ця операція проводилася напайним канавочним різцем зі швидкорізальної сталі P18 з режимом різання: $V=70$ м/хв, $S=0,07$ мм/об. В результаті досягнуто збільшення продуктивності обробки до 3-х разів.

5. Чорнова операція розточування отвору $\varnothing 17,12 \pm 0,04$ виконується різцем S16P SVJCR-11-UKR з використанням змінної пластини VCGT 110304 FL із

сплаву K10 (рис. 2.13) з режимом різання: $V=110$ м/хв, $S=0,08$ мм/об., $t=0,5$ мм. Раніше дана операція виконувалася з використанням напайного розточувального фасонного різця зі швидкорізальної сталі P18 з режимом різання: $V=50$ м/хв, $S=0,05$ мм/об., $t=0,5$ мм. Це дозволило до 4-х разів підвищити продуктивність обробки.



Рис. 2.13. Змінна пластина зі сплаву K10

6. Для обробки сфер R1,52 і $\varnothing 3,94 \pm 0,11$ мм традиційно використовувалися спеціальні фрези зі швидкорізальної сталі P18 з режимом різання: $V=50$ м/хв, $S=0,05$ мм/об. Завдяки використанню збірних фрез SBE 20304 і SBE 20394 із твердого сплаву UF10, які дозволяють реалізувати режим різання: $V=150$ м/хв, $S=0,08$ мм/об., вдалося підвищити швидкість різання і продуктивність обробки в 3 рази.

7. Обробка стопорної канавки за новою технологією проводиться токарним різцем MVQNR 2525 M16 зі змінною пластиною VNGG 160404 ML зі сплаву K10 з режимом різання: $V=420$ м/хв, $S=0,1$ мм/об., $t=0,5$ мм. Раніше використовувався контурний різець зі швидкорізальної сталі P18 вітчизняного виробництва з режимом різання: $V=110$ м/хв, $S=0,08$ мм/об., $t=0,1$ мм. Це дозволило значно (більш ніж в 10 разів) підвищити продуктивність обробки.

Виконано оцінку ефективності застосування розроблених операцій механічної обробки деталі "втулка сферична" (рис. 2.5,в).

1. За чинною технологією операція напівчистої обробки зовнішньої циліндричної поверхні деталі "втулка сферична", а також торцевої поверхні проводилася фасонним різцем з швидкорізальної сталі P18 з режимом різання $V=100$ м/хв, $S=0,1$ мм/об., $t=2,0$ мм. Замість цього інструменту був застосований сучасний збірний токарний різець TDJNL 2525 M15 зі змінною багатогранною пластиною DNMG 150608 ML зі сплаву K10 (рис. 2.14).

Це дозволило реалізувати наступний режим різання: $V=350$ м/хв, $S=0,25$ мм/об., $t=1,5$ мм.



Рис. 2.14. Збірний токарний різець зі змінною багатогранною пластиною зі сплаву K10

2. Розточування, а також обробка торця втулки раніше виконувалися контурним різцем зі швидкорізальної сталі P18 з режимом: $V=110$ м/хв, $S=0,08$ мм/об., $t=0,1$ мм. Запропоновано обробку проводити токарним різцем S25T SDUCR 11 з кутом в плані 93° , оснащеним пластиною DCGT 11T304 FL зі сплаву K10 (рис. 2.15) з режимом різання: $V=250$ м/хв, $S=0,2$ мм/об., $t=1,0$ мм. В результаті досягнуто збільшення продуктивності обробки більш ніж в 10 разів.



Рис. 2.15. Токарний різець з кутом в плані 93° , оснащений пластиною зі сплаву K10

3. Фрезерування круглих лисок ("зірочки") за діючою технологією здійснювалося фрезою $\varnothing 10$ мм зі швидкорізальної сталі вітчизняного виробництва з режимом різання: $V=30$ м/хв, $S=0,08$ мм/об. Дана фреза була замінена на фрезу REMA 3100C з твердого сплаву UF10 (рис. 2.16). Це дозволило інтенсифікувати режим різання: $V=100$ м/хв, $S=0,15$ мм/об. і більш ніж в 6 разів підвищити продуктивність обробки.



Рис. 2.16. Фреза REMA із твердого сплаву UF10

Таким чином показано, що застосування збірних конструкцій твердосплавних ріжучих інструментів зі зносостійкими покриттями за умови

правильного встановлення режимів різання та інших параметрів обробки відповідно до запропонованих в роботі практичних рекомендацій, дозволило значно збільшити продуктивність і зменшити собівартість обробки при одночасному забезпеченні високих показників точності, якості та шорсткості оброблюваних поверхонь. З метою підвищення працездатності інструментів при різанні матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями та розширення технологічних можливостей металорізальних верстатів, нижче наведено характеристики нових перспективних верстатів з ЧПУ і ріжучих твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями, призначених для обробки різних за оброблюваністю матеріалів.

2.3. Ефективність практичного застосування багатофункціональних токарно-фрезерних обробних центрів DOOSAN нового покоління серії PUMA SMX

Все частіше керівників машинобудівних підприємств України з метою підвищення якості продукції, що випускається, та її конкурентоспроможності привертають увагу багатофункціональні сучасні металорізальні верстати. Такий тип обладнання цікавий, перш за все, об'єднанням можливостей декількох машин в одному верстаті, що дозволяє економити виробничі площі, робочий час і використовувати найсучасніші технологічні можливості. Продуктивність, точність і надійність є основними критеріями, якими, на думку споживачів, повинно характеризуватися обладнання. У той же час, зростаюча необхідність у виробництві все більш складних деталей з мінімальними витратами, вимагає застосування обладнання з максимальною функціональною гнучкістю.

Токарно-фрезерні обробні центри серії PUMA SMX (рис. 2.17) компанії "DOOSAN Infracore Machine Tools" – це нове покоління багатофункціональних обробних верстатів, що відрізняються високою продуктивністю, винятковою точністю й простотою в експлуатації, які надають можливість використання кращих рішень в класі багатофункціонального обладнання. Токарно-фрезерні центри серії SMX є світовим лідером в своєму класі та забезпечують відмінні показники високоточної обробки за рахунок застосування системи мінімізації термічної деформації, заснованої на функціях температурної компенсації в процесі високошвидкісного різання. Ергономічний дизайн верстата підвищує комфорт оператора, забезпечуючи зручність завантаження-вивантаження

деталей, контролю процесу обробки й подальшого обслуговування, а в цілому ефективну експлуатацію всіх технологічних можливостей.



Рис. 2.17. Багатофункціональний токарно-фрезерний обробний центр PUMA SMX 2600S.

Короткі характеристики верстатів серії PUMA SMX:

- найвища жорсткість ортогональної конструкції;
- збільшене переміщення по осі Y, рівне 300 ± 150 мм, що визначає ширину оброблюваних поверхонь методом фрезерування – цей параметр кращий в класі аналогічних верстатів серед всіх світових виробників;
- ергономічний дизайн і компактні розміри;
- висока точність і продуктивність за рахунок застосування всіх відомих технологічних розробок;
- застосування систем автоматизованого вимірювання й функцій компенсації;
- два надпотужних токарних шпинделі, оснащені двигунами типу "Built-in" (головний шпиндель і контр-шпиндель);
- автоматичний магазин інструменту для фрезерного шпинделя на 40 позицій (у стандартній комплектації) з можливістю збільшення до 80 позицій;
- двигун фрезерного шпинделя типу "Built-in" (вбудований в поворотну фрезерну головку) зі збільшеною до 12000 об./хв максимальною швидкістю дозволяє виконувати фрезерні операції будь-якої складності, що забезпечується поворотом фрезерної головки на $240^\circ (\pm 120^\circ)$.

Висока продуктивність. Зниження машинного часу обробки деталі завжди було важливим критерієм, який впливав на загальну економічну ефективність машинобудівного підприємства. Найвища продуктивність

верстатів серії PUMA SMX досягається за рахунок скорочення загального часу обробки й кількості операцій шляхом комплексної механічної обробки навіть найскладніших деталей за один установ. Одночасно скорочується час циклу й міжопераційний час, чому сприяють неперевершені показники прискорених переміщень до 48 м/хв. Крім можливості комплексної обробки точінням, фрезеруванням, цикл виробництва деталі скорочується за рахунок виконання додаткових операцій з використанням допоміжного шпинделя.

Висока точність. Високу точність і швидкість обробки на верстатах серії PUMA SMX забезпечує використання високоміцних і високоточних напрямних типу LM. Крім того, під час тривалого процесу обробки точність зберігається за рахунок мінімізації термічних деформацій шпинделя і осей подачі за допомогою сучасної системи масляного охолодження, забезпечуючи постійну ступінь точності оберткових осей в межах $0,0001^\circ$, що дозволяє виключити доводочні операції та зменшити відсоток браку.

Для забезпечення прецизійної точності оброблюваних деталей в умовах масового виробництва (безперервний графік роботи обладнання, коефіцієнт використання обладнання – 0,90–0,95; підвищені режими різання; часті переходи від чорнової обробки до чистової і т.п.) всі моделі верстатів серії PUMA SMX оснащують системами зворотного зв'язку з датчиками лінійних переміщень (вимірювальними лінійками) виробництва компанії "HEIDENHAIN" (Німеччина). При цьому кінематичні та термічні зміни, а також вплив навантаження в процесі обробки, визначаються й враховуються в контурі управління, що дозволяє досягати високої точності позиціонування верстата - до 3 мкм в будь-який момент експлуатації.

П'ятивісева обробка. Для ефективної обробки складних деталей верстати серії PUMA SMX укомплектовують системою ЧПУ FANUC 31i-B5, що дозволяє виконувати безперервну обробку одночасно вздовж п'яти вісей. Дана система включає наступні функції: TCP – функція контролю центральної точки інструменту (рис. 2.18) і 3D Cutter Compensation - тривимірна (упереджувальна) компенсація ріжучого інструменту (рис. 2.19). Завдяки даним функціям, обробка складнопрофільних поверхонь стає більш простою та точною, наприклад, при обробці деталей типу імпеллер (механізм для створення реактивної тяги – пропелер, крильчатка, турбіна) і лопатка. Відмінною особливістю верстатів серії PUMA SMX є їх ортогональна конструкція, яка дозволяє максимізувати переміщення вздовж вісі Y до 300 мм, збільшуючи

зону обробки й габарити оброблюваних деталей. Також одним з основних переваг конструкції моделей верстатів даної серії є стандартне оснащення їх прямим приводом (тип "Built-in"), вбудованим безпосередньо в вузли токарного й фрезерного шпинделів. Відсутність передавальної трансмісії дозволяє не тільки підвищити ККД і виключити вібрації шпинделя, але також забезпечує більш тривалий термін експлуатації в умовах безперервного графіка експлуатації.

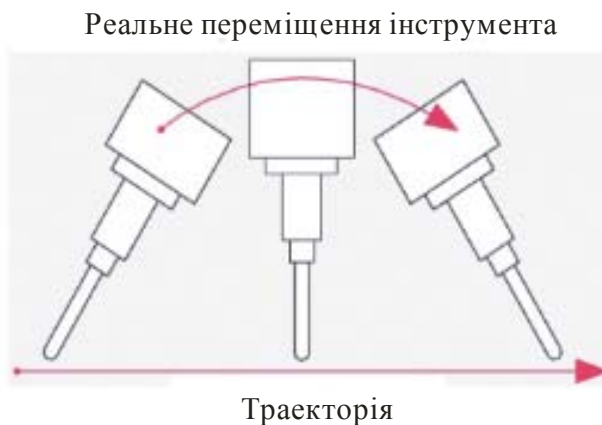


Рис. 2.18. Функція TSP

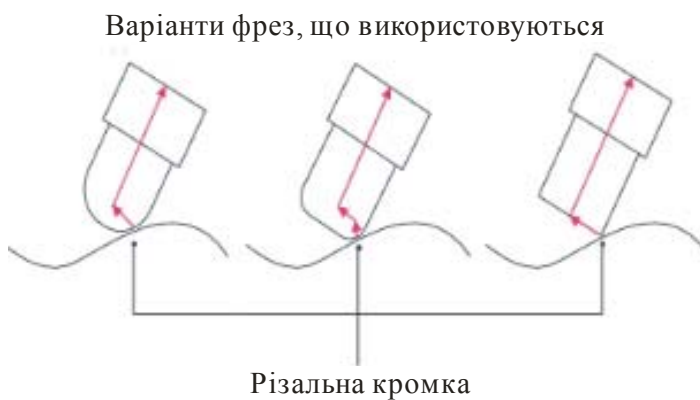


Рис. 2.19. Функція 3D Cutter Compensation

Для специфічних завдань, наприклад, при обробці складнопрофільних поверхонь деталей типу "вал" малих діаметрів з максимальною довжиною (до 1500 мм), моделі верстатів серії PUMA SMX оснащують програмованим гідравлічним люнетом з незалежним серводвигуном. А в 2015 році планується випуск подовженої версії верстата PUMA SMX з максимальною довжиною обробки до 2500 мм.

Токарно-фрезерні обробні центри компанії DOOSAN гідно зарекомендували себе у всьому світі, випускаючи складні деталі для авіаційної та оборонної промисловості Німеччини, Франції, Італії, Росії та США, а також для підприємств цілого ряду країн Азії. Устаткування компанії DOOSAN серії PUMA є еталоном у виробництві токарних верстатів вже протягом 40 років. Тільки для вимогливих європейських клієнтів було поставлено більше 25 тисяч токарних верстатів цієї серії, серед яких понад 500 багатофункціональних токарно-фрезерних обробних центрів. Застосування верстатів серії PUMA SMX вважається не тільки ефективним, але й престижним в усьому світі. Це дозволяє підняти продуктивність і технологічні можливості підприємства на новий, більш високий рівень.

Великою гордістю для українського представництва компанії DOOSAN в Україні є те, що для обробки найбільш складних і відповідальних деталей в умовах сучасного виробництва підприємства ПАТ "Мотор Січ" з 2012 року успішно експлуатуються три верстати попередньої версії токарно-фрезерних обробних центрів – PUMA MX 2600. Завдяки постійним новим розробкам і удосконаленням компанія DOOSAN продовжує шлях до світового лідерства в галузі верстатобудування, допомагаючи своїм клієнтам поліпшувати якість продукції, що випускається, і розширювати можливості виробництва.

Для забезпечення високого рівня обслуговування, компанія створила мережу офіційних сертифікованих Сервісних Центрів по всьому світу, контролюючи рівень задоволеності клієнтів обладнанням DOOSAN. З цією метою, на базі українського представництва – компанії "ВаріТек" в м. Дніпропетровськ створено один з кращих європейських Центрів гарантійного та сервісного обслуговування, рівень підготовки й досвід фахівців якого дозволяє вирішувати сервісні завдання практично будь-якого рівня.

Незважаючи на те, що в Україні активно експлуатується вже понад 200 обробних центрів DOOSAN, їх кількість постійно зростає. В 80% випадків сервісне завдання вирішується протягом першої доби після отримання сигналу за рахунок достатнього штату власних фахівців Центру та наявності оперативного запасу запасних частин в Україні та в Німеччині. Виставковий Центр верстатів DOOSAN в м. Дніпропетровськ дозволяє постійним клієнтам компанії "ВаріТек" завжди перебувати в курсі останніх новинок обладнання, а навчальний клас на постійній основі займається підготовкою або

перепідготовкою операторів і програмістів-технологів клієнтів, які експлуатують обладнання з ЧПУ компанії DOOSAN в Україні.

2.5. Нові рішення в токарних сплавах від компанії TaeguTec

Приступаючи до будь-якої операції механічної обробки, важливо враховувати специфіку й мету поставленого завдання для комплексного підходу в його реалізації. Іншими словами, на результат буде впливати не тільки вибір оптимального набору обладнання або найефективнішої геометрії інструменту, але й правильно підібрані режими експлуатації верстатів, а також характеристики інструментальних сплавів.

Технологи компанії TaeguTec враховують особливе значення інструментальних сплавів для вирішення величезного розмаїття промислових завдань, тому постійно розширюють ефективні лінійки інструментів новими типами покриттів, посилюючи свої лідируючі позиції в сегменті металообробки.

Номенклатура південнокорейського виробника доповнилася черговими новинками, що забезпечують високу стійкість та стабільність отриманих результатів в таких випадках: надійний сплав TT7505 для високошвидкісної обробки чавуну і міцний сплав TT8080 для обробки нержавіючих і жароміцних сплавів. Якщо необхідно обробити чавун і підвищити продуктивність, тоді слід застосувати пластини TaeguTec з більш високою твердістю в сплаві TT7505. Якщо необхідно виготовляти високоточні деталі з нержавіючих сталей, не допускаючи зупинок для зміни інструменту, то ідеальним рішенням є сплав TT8080 (рис. 2.20).



Рис. 2.20. Ріжучі пластини компанії TaeguTec

Стійкість інструменту під захистом – сплав TT7505. Збільшуючи продуктивність при обробці чавуну за рахунок підвищення швидкості різання, найчастіше стикаємося зі зносом ріжучої кромки по задній поверхні у вигляді лунки, викришуванням або ж налипанням на ріжучу кромку, що є результатом тертя, адгезії та дифузії. Всі ці питання тепер вирішуються завдяки застосуванню нового сплаву TT7505 для обробки чавуну при високошвидкісній обробці канавок (рис. 2.21).

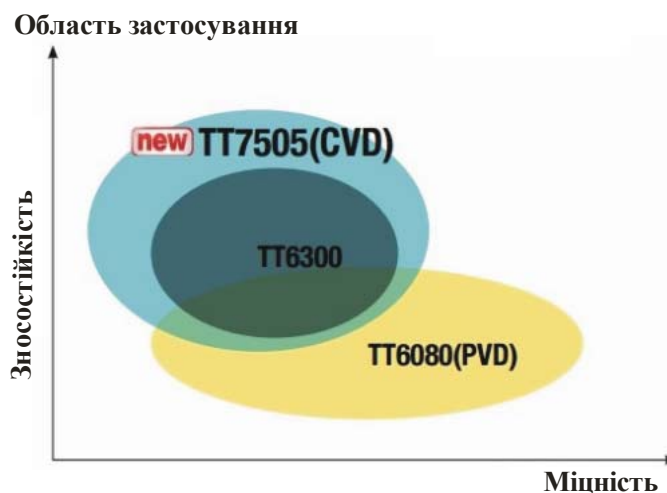


Рис. 2.21. Области застосування сплавів TT7505 і TT8080

Сплав TT7505 є оптимальним для високошвидкісної обробки чавуну, включаючи операції безперервного різання, гарантує стабільність і більш високу стійкість інструменту. Додатковою перевагою сплаву TT7505 є застосування спеціальної технології CVD-покриття й недавно розробленої підкладки для підвищення зносостійкості і міцності, які забезпечують підвищення продуктивності обробки в цілому.

В результаті ряду випробувань в Україні сплав TT7505 показав збільшення стійкості інструменту на 25% в процесі обробки ковкого чавуну і на 15–20% – при швидкісній обробці сірого чавуну.

Для нержавіючих сталей і жароміцних матеріалів – сплав TT8080. Новий сплав TT8080 з покриттям PVD (рис. 2.22) дозволяє мінімізувати негативні фактори при обробці жароміцних матеріалів, такі як висока температура в зоні різання, а в результаті – занижена швидкість і швидкий знос ріжучого інструменту. Завдяки високій тріщиностійкості, новий сплав TT8080 дозволяє виключити розшарування під час точіння й досягти значного

підвищення продуктивності обробки й стійкості інструмента. Сплав TT8080 був адаптований спеціально для токарних операцій і особливо він ефективний для обробки нержавіючих сталей і жароміцних сплавів при низьких швидкостях різання та переривчастому різанні.



Рис. 2.22. Области застосування PVD сплавів

Новий сплав TT8080 характеризується значною міцністю й високою стійкістю до відколів, будучи ідеальним варіантом для переривчастої та чорнової обробки нержавіючих сталей або інконель. У порівнянні зі сплавом попереднього покоління TT8020, новий сплав TT8080 гарантує підвищену стійкість інструменту й поліпшену стабільність обробки.

Випробування нового сплаву TT8080 в умовах різних виробничих процесів у всьому світі, а в 2016 році – і в Україні, показало значне збільшення стійкості інструменту також і в порівнянні з аналогічними рішеннями конкуруючих виробників інструменту з Європи, США та Азії. Наприклад, при торцевому переривчастому точінні "Корпусу клапана" на виробництві корабельних двигунів HUNDAY в Південній Кореї, сплав TT8080 з покриттям PVD підвищив стійкість інструменту на 160%.

В іншому випадку, при обробці штуцера труби з того ж матеріалу, нове покриття дозволило підвищити стійкість інструменту на 71% при зовнішньому переривчастому точінні. В умовах безперервної обробки кільця з матеріалу 08X16H11M3 на українському виробничому майданчику новий сплав показав підвищення стійкості на 30% в порівнянні з раніше застосовуваним конкурентним інструментом.

2.6. Нові рішення TaeguTec для обробки композиційних матеріалів

У багатьох галузях промисловості, таких як автомобілебудування, аерокосмічний напрямок і вітроенергетика, а також при створенні виробів для індустрії відпочинку, передові машинобудівники стали все частіше використовувати в серійному виробництві композиційні матеріали. Причина в їх високій ефективності через полегшення ваги й значній стабільності в порівнянні зі стандартними матеріалами. Наприклад, такі композити як волокнистий вуглепластик (пластик, армований вуглецевим волокном) на 70% легше конструкційної сталі та на 40% – алюмінієвого сплаву, але не поступаються їм за експлуатаційними показниками. Так, в аерокосмічній індустрії застосування вуглепластиків тільки через полегшення ваги дозволяє досягти більш високої паливної ефективності та економічності літальних апаратів. Кращі світові виробники ріжучого інструменту визначили цю тенденцію ще 25–30 років тому та інвестували в створення нових лінійок сплавів, покриттів і геометричних форм, відповідних завданню з обробки композиційних матеріалів, відстежуючи досягнення вчених.



Рис. 2.23. Номенклатура інструментів для обробки композиційних матеріалів

У червні 2016 року компанія TaeguTec значно оновила номенклатуру інструментів для обробки композиційних матеріалів (рис. 2.23). Арсенал новинок для ефективної обробки поповнили фрезерні пластини з сплаву PCD (полікристалічний алмаз), кінцеві твердосплавні фрези й свердла з алмазним покриттям. Ці нові інструментальні рішення задовольняють унікальним умовам різання важкооброблюваних матеріалів, оскільки об'єднують в собі переваги спеціального сплаву, видозміненої геометрії ріжучої кромки й високих термохімічних властивостей алмазного покриття.

Пластини з полікристалічного алмазу (PCD) (рис. 2.24) призначені для фрезерної обробки на підвищених швидкостях різання й подачах, забезпечуючи, тим самим, значне зниження машинного часу в порівнянні з іншими, більш традиційними для машинобудування матеріалами ріжучого інструменту. Завдяки спеціальній гострій геометрії ріжуча кромка цієї пластини запобігає відшаровуванню поверхні композиційних матеріалів під час фрезерування навіть при навантажених умовах різання.



Рис. 2.24. Пластини з полікристалічного алмазу (PCD)

Нові фрезерні пластини з сплаву PCD встановлюються на корпуси фрез стандартної лінійки ChaseMill (рис. 2.25), яка застосовується при обробці виробів з металу.



Рис. 2.25. Корпуси фрез стандартної лінійки ChaseMill

Розширюючи діапазон операцій обробки вуглепластика, фахівці TaeguTec пропонують 4 конфігурації твердосплавних кінцевих фрез з алмазним покриттям. Фрези RRFE-типу (рис. 2.26) ідеально підходять для обдирних робіт: виключають розшарування, знижують зусилля різання й вібрації, забезпечуючи високу продуктивність інструменту при чорновій обробці. Конфігурація твердосплавних кінцевих фрез RCFE TaeguTec з алмазним покриттям для обробки вуглепластика (рис. 2.27), також як RRFE-типу, виключає розшарування, знижує зусилля різання й вібрації, забезпечуючи високу продуктивність інструменту при чорновій обробці.



Рис. 2.26. Фреза RRFE-080-TT610



Рис. 2.27. Фреза RCFE-040-TTD610

Відмінною особливістю RCFE-фрез є кілька каналів для відведення стружки, що дозволяє працювати на підвищених режимах. Для чистової обробки композитів фахівці TaeguTec рекомендують використовувати твердосплавну кінцеву фрезу серії RCOM з алмазним покриттям (рис. 2.28), яка виключає розшарування, запобігаючи утворенню задирки, і представлена в 2-х конфігураціях: з лівим і правим напрямком спіралей канавок.



Рис. 2.28. Фреза RCOM-4060-TTD610

Наступною рекомендацією для обробки композиційних матеріалів є фрези серії RDCF з малим осьовим нахилом спіральних канавок (рис. 2.29). Це рішення також виключає розшарування й утворення тріщин, ідеально підходить для виконання чистових операцій.



Рис. 2.29. Фреза RDCF-4100

При виборі інструментальних рішень для обробки отворів компанія TaeguTec рекомендує застосовувати монолітні твердосплавні свердла з алмазним покриттям (рис. 2.30), які забезпечують максимальну якість поверхні без утворення задирок при виконанні наскрізних отворів.



Рис. 2.30. Монолітне твердосплавне свердло з алмазним покриттям CDF-050-034-06-TTD610

З огляду на особливості та відмінності процесів механічної обробки композиційних і традиційних матеріалів, фахівці TaeguTec розробили кілька варіантів ріжучих твердих сплавів, що дозволяють забезпечити найвищу стійкість інструменту при високопродуктивній обробці композитів. Зокрема, інноваційний PCD-сплав TD830, виготовлений з ультрадрібної алмазної фракції, показав на високу зносостійкість, міцність та якість кромки, він характеризується значною стійкістю до абразивного зносу й високою термічною стабільністю.

Наступним, рекомендованим фахівцями компанії, сплавом для обробки волоконних вуглепластиків є новий сплав TTD610. Завдяки передовій технології нанесення наноалмазного покриття, цей сплав забезпечує неперевершену стійкість інструменту й високу стабільність обробки, демонструє значну абразивну зносостійкість (твердість більше 8000 за Віккерсом), характеризується високими показниками теплопровідності та ударної стійкості.

2.7. Серія фрез ChaseFeed для фрезерування на високих подачах

При механічній обробці прес-форм і штампів слід враховувати специфіку даної галузі, коли доводиться фрезерувати тонкостінні заготовки з різних за

оброблюваностю матеріалів. Крім того, процес нерідко ускладнюється нестабільними умовами різання: малопотужне обладнання, великий виліт інструменту, нежорстке пристосування та ін.

Ефективним вирішенням подібних машинобудівних завдань вже кілька років виступає високопродуктивна серія фрез і пластин ChaseFeed, яка також підходить і для чорнових операцій (рис. 2.31).



Рис. 2.31. Фрези та пластини компанії TaeguTec

Сьогодні фахівці компанії TaeguTec доповнюють серію високоефективними пластинами SBMT (рис. 2.32) і широкою номенклатурою корпусів фрез, які забезпечують таку ж чудову продуктивність на високих швидкостях подачі, але при менших глибинах різання.



Рис. 2.32. Пластина SBMT

Покращений дизайн нової пластини включає в себе ряд очевидних, порівняно з діючими аналогами, переваг. Так, спеціальна конструкція нової односторонньої квадратної пластини SBMT з заднім кутом 5° помітно знижує сили різання в порівнянні з двосторонніми аналогами, а високопозитивна

ріжуча кромка у вигляді гвинтової лінії забезпечує більш м'яке й продуктивне фрезерування.

Наступною перевагою нової пластини SBMT є варіанти різної геометрії різальних крайок (рис. 2.33), що охоплюють широкі діапазони застосувань. Таким чином, підбираючи потрібний стружколом, технолог замовника отримує максимальну продуктивність при різних, часто нестабільних, умовах обробки. Універсальним рішенням для обробки сталей може бути геометрія M; стружколом ML призначений для низьковуглецевих, нержавіючих і жароміцних сталей, а також для боротьби з вібрацією при великому вильоті інструменту; а геометрія MR рекомендована для загартованих сталей і переривчастого різання.

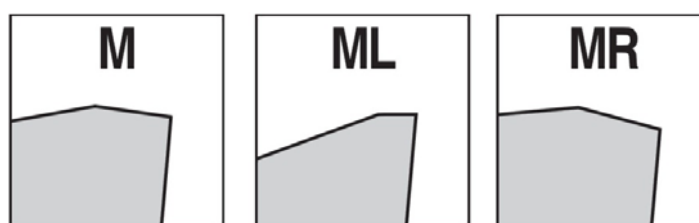


Рис. 2.33. Геометрія різальних крайок

Режими обробки, в тому числі й глибина різання, залежать від багатьох чинників, таких як потужність верстата, довжина інструменту, геометрія формотворної прес-форми і т.п. Фахівці TaeguTec врахували цю залежність і в серії пластин ChaseFeed, розробивши пластини двох габаритів – SBMT09 і SBMT13, що забезпечують максимальну глибину фрезерування 1,2 мм і 2 мм відповідно.

Крім того, відмінною рисою пластин SBMT09 і SBMT13, в порівнянні зі стандартними односторонніми пластинами, є можливість обробки на підвищених подачах за рахунок збільшеної товщини й повороту самої пластини на корпусі фрези відносно кута в плані 90°.

Для кожного габариту пластини SBMT виробник надає рекомендацію у вигляді параметра "Програмований радіус R" (рис. 2.34), який має значення R3 для 09-го габариту і R4.5 для 13-го габариту. Така опція необхідна при розрахунку керуючих програм, де потрібно ставити коректну геометрію інструменту (діаметр, радіус при вершині, виліт і т.д.).

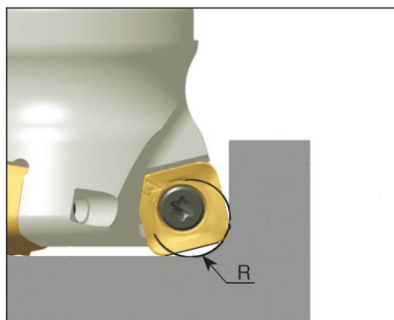



Рис. 2.34. Програмований радіус

Таблиця 2.6

Результати випробувань нових пластин SBMT 09

Параметр	ТаегуТес	Інструмент іншого виробника
Деталь	Прес-форма 	
Оброблюваний матеріал	Низьколегована сталь 09Г2С	
Інструмент	TESB 332-M16-09	D32 Z3
Пластина	BLMP 0904R-M TT9080	WNMX 09T316Z
Виліт фрези, мм	180	
Швидкість різання V , м/хв	120	120
Оберти шпинделя s , об./хв	1200	1200
Подача хвилинна F , мм/хв	2500	2000
Подача на зуб Fz , мм/зуб	0,69	0,55
Глибина різання Ap , мм	1	0.6
Об'єм металу, що знімається Q , см ³ /хв	80	38,4
Продуктивність	208%	100%

Серія пластин SBMT 09 (13) встановлюється на кінцеві фрези $\text{Ø}25_{.42}$ мм, торцеві фрези $\text{Ø}32_{.125}$ мм і фрези модульного типу $\text{Ø}25_{.42}$ мм. Конструкція всіх корпусів фрез ChaseFeed передбачає охолодження за рахунок каналів для подачі мастильно-охолоджувальної рідини (МОР).

На одному з машинобудівних підприємств України нами проводилися технічні випробування нових пластин SBMT 09, результати яких наведені в табл. 2.6. Показники вражають: нова пластина SBMT 09 продемонструвала збільшення продуктивності в 2 рази при відчутному зниженні вібрацій в процесі фрезерування.

Окремі випробування на стійкість показали перспективність застосування нового інструменту фірми TaeguTec при високошвидкісній обробці. Так, при фрезеруванні заготовки з інструментальної сталі марки 4X5B2ФС застосування високопозитивної пластини SBMT дозволило підвищити показники стійкості інструменту на 88%.

Проведений аналіз сучасних конструкцій твердосплавних інструментів, металорізальних верстатів з ЧПУ і технологічних процесів обробки різних деталей вказує на їх значні можливості в плані підвищення продуктивності й зниження собівартості обробки. Для їх ефективного застосування доцільно використовувати розроблену в даній роботі методику розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки.

ВИСНОВКИ

1. У роботі теоретично обґрунтовані методи підвищення ефективності процесів лезової обробки, а для порівняння й абразивної обробки (шліфування), що дозволило з єдиних позицій оцінити технологічні можливості механічної обробки матеріалів різанням і на цій основі вибрати найбільш ефективні методи лезової обробки, які підлягають подальшому вдосконаленню з точки зору підвищення продуктивності й зниження собівартості обробки.

2. Аналітично описана собівартість обробки деталей і обґрунтовані умови її зменшення, які полягають у виборі як параметрів режимів різання, так і економічних параметрів обробки. Теоретично встановлено екстремальність залежності собівартості обробки від швидкості різання та продуктивності обробки, що дозволило визначити економічно обґрунтовані (оптимальні) режими різання й оптимальну стійкість різального інструменту за критерієм найменшої собівартості обробки. Показано можливість істотного зменшення собівартості обробки за рахунок зниження ціни на придбання інструменту.

3. Теоретично встановлено доцільність зменшення собівартості обробки за рахунок оптимізації траєкторії руху інструменту при обробці складних деталей на верстатах з ЧПУ. Це знижує витрати, пов'язані з виготовленням технологічного оснащення, проте створює додаткові витрати з підготовки керуючих програм. Тому верстати з ЧПУ ефективно застосовувати при виготовленні невеликих партій складних деталей. Теоретично доведено ефективність застосування верстатів–автоматів, багатоопераційних і багатоінструментних верстатів, які забезпечують зниження допоміжного часу обробки

4. Наведено конкретні приклади зменшення собівартості обробки при одночасному збільшенні продуктивності обробки за рахунок зменшення основних складових витрат, пов'язаних із заробітною платою робітника, вартістю інструментів і споживаної енергії при обробці на верстаті. Це досягається за рахунок застосування прогресивних конструкцій інструментів, зміни параметрів режиму різання та зменшення допоміжного часу обробки стосовно основного часу шляхом автоматизації операції обробки й застосування верстата–автомата, а також застосування нових кінематичних схем обробки партії деталей з більш високою продуктивністю. Показано, що

таким чином можна визначити оптимальні режими різання, характеристики інструментів, устаткування й ін., тобто вийти на проектування оптимальної маршрутно-операційної технології механічної обробки.

5. Отримано аналітичну залежність для визначення собівартості обробки з урахуванням чотирьох основних змінних статей витрат (пов'язаних із заробітною платою робітника, витратами на інструмент і його заміну, а також на електроенергію) і встановлені умови її зменшення за рахунок зменшення екстремального (мінімального) значення собівартості обробки від швидкості різання. Аналітично визначені екстремальні значення продуктивності обробки, стійкості інструмента, кількості інструментів, необхідних для обробки заданої партії деталей та ін. Встановлено, що екстремальні значення собівартості й продуктивності обробки пов'язані між собою обернено пропорційною залежністю, а забезпечити одночасне збільшення продуктивності й зменшення собівартості обробки можна за рахунок підвищення фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу, зменшення вартості інструменту і переходу в область високошвидкісного різання.

6. Показано, що в економічно розвинених країнах, де значно більше тарифна ставка робітника, ефективно металообробку здійснювати за рахунок застосування високошвидкісного різання. В умовах вітчизняного виробництва з метою зниження собівартості обробки необхідно зменшувати швидкість різання, забезпечуючи задану продуктивність обробки за рахунок збільшення подачі й глибини різання. Цим показано, що в умовах машинобудівного виробництва України для підвищення стійкості інструменту необхідно більшою мірою використовувати його ресурс, забезпечуючи підвищений знос і ступінь затуплення інструменту.

7. Теоретично встановлено, що купувати інструменти зарубіжного виробництва необхідно за ціною, близькою до ціни фірми-виробника. Придбання ж інструментів у фірм-посередників за завищеними цінами нівелює економічний ефект від застосування нових прогресивних інструментів. Цим пояснюється низька ефективність застосування на машинобудівних підприємствах України імпортованих перспективних інструментів, які через високу вартість приходиться експлуатувати на верстатах з меншою швидкістю різання і, відповідно, з меншою продуктивністю обробки, ніж це передбачено рекомендаціями фірми-виробника інструменту. В результаті не використовуються високі технологічні можливості зазначених інструментів.

8. Експериментально встановлено, що застосування збірних конструкцій твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями, які характеризуються підвищеною стійкістю й продуктивністю обробки, дозволяє зменшити собівартість обробки в першу чергу за рахунок зменшення статті витрат, пов'язаної з заробітною платою робітника, яка більше статті витрат на інструмент. Це повністю підтверджує отримані теоретичні рішення. Тому ефективно використовувати високопродуктивні, хоча й коштовні збірні конструкції твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями.

9. Порівняння розрахункових і експериментальних значень стійкості інструменту, які відповідають мінімуму собівартості обробки, показали на їх високу збіжність (розбіжність не перевищує 15%). Це дозволяє розрахунковим шляхом, не вдаючись до виконання трудомістких експериментальних досліджень, встановити оптимальну (економічну) стійкість інструменту й по ній визначити оптимальний режим різання та інші умови обробки. Отримана залежність для визначення стійкості інструменту справедлива для різних методів механічної обробки.

10. Виконано оцінку економічної ефективності отриманих теоретичних рішень на прикладі застосування прогресивних збірних конструкцій твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями при фрезеруванні важкооброблюваного матеріалу (сталь Х2ГСНВМ-ВД). Експериментально встановлено, що застосування збірної кінцевої твердосплавної фрези зі зносостійким покриттям замість монолітної кінцевої фрези дозволяє в 6,7 разів зменшити собівартість і в 8,6 разів підвищити продуктивність обробки, незважаючи на її вищу вартість (1400 грн., тоді як вартість монолітної фрези складає всього 138 грн.). Це пов'язано з тим, що частка витрат на інструмент в собівартості обробки невелика (5 – 7%), а ефект зниження собівартості обробки від застосування збірної фрези досягається за рахунок багаторазового збільшення продуктивності обробки і відповідно зменшення статті витрат, пов'язаної з заробітною платою робітника.

11. На основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів зроблено висновок про те, що підвищити ефективність механічної обробки (зменшити собівартість обробки) можна головним чином за рахунок збільшення продуктивності обробки, застосовуючи для цього прогресивні конструкції збірного твердосплавного інструменту зі зносостійкими покриттями.

12. Розроблено методику розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки. На її основі визначено оптимальні параметри різних операцій механічної обробки (точіння, розточування, фрезерування, свердління) деталей гідравлічних систем, що дозволило значно підвищити продуктивність і зменшити собівартість обробки.

13. Експериментально встановлено, що застосування прогресивних збірних твердосплавних різців зі зносостійкими покриттями на операціях точіння деталей гідравлічних систем (плунжера, п'яти, втулки сферичної) замість традиційно використовуваних різців з швидкорізальної сталі дозволяє в 5 і більше разів підвищити продуктивність і приблизно в таку ж кількість разів зменшити собівартість обробки.

14. Експериментально доведено можливість зниження трудомісткості й собівартості обробки деталей гідравлічних систем за рахунок універсалізації обладнання з ЧПУ шляхом використання нестандартних ріжучих інструментів і спеціального оснащення.

15. Наведено результати експериментальних досліджень працездатності нових прогресивних збірних конструкцій твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями з використанням сучасних високообертових верстатів з ЧПУ типу "обробний центр" при обробці різних за оброблюваністю матеріалів. Показано, що при правильно обраних умовах обробки, особливо оптимальних режимів різання (встановлених на основі розробленої в роботі методики вибору оптимальних режимів різання), їх застосування дозволяє багаторазово підвищити продуктивність і знизити собівартість обробки. Тому рекомендовані технологічні процеси механічної обробки можуть бути ефективно використані на машинобудівних підприємствах України.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Розроблено методику розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки для умов високошвидкісного різання, яка є основою створення високопродуктивних технологічних процесів лезової обробки, що забезпечують зменшення собівартості обробки до економічно прийняттого рівня, достатнього для ефективного застосування сучасних високооберткових верстатів з ЧПУ типу "обробний центр" і коштовних збірних конструкцій твердосплавних інструментів зарубіжного виробництва на машинобудівних підприємствах України. Використовуючи запропоновану методику розрахунку, проведено оцінювання економічної ефективності й надано практичні рекомендації відносно застосування збірних твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями на операції фрезерування деталей з важкооброблюваного матеріалу (сталі Х2ГСНВМ-ВД) збірної фрезою $\varnothing 42$ мм (оснащеною пластинами з твердого сплаву ТТ9030 зі зносостійким покриттям) замість вітчизняної монолітної фрези $\varnothing 40$ мм, виготовленої зі швидкорізальної сталі Р18, що дозволило до 10 разів підвищити продуктивність обробки й приблизно в стільки ж разів зменшити собівартість обробки.

На основі розробленої методики також проведено вибір раціональних параметрів операцій механічної високошвидкісної обробки на операції точіння заготовок із сталі різцями, оснащеними ріжучими пластинами із твердих сплавів ТТ8115, ТТ8125 і ТТ8135 зі зносостійким покриттям. Показано, що в цьому випадку швидкість різання може бути збільшена до 500 м/хв, а стійкість інструменту рекомендується встановлювати в межах 15 хвилин, що дозволяє домогтися істотного збільшення продуктивності обробки.

Експериментально встановлено, що застосування сучасних збірних твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями на операціях точіння, розточування, фрезерування й свердління деталей гідравлічних систем (плунжера, п'яти, втулки сферичної) дозволило в середньому в 3 – 5 разів підвищити продуктивність і зменшити собівартість обробки при забезпеченні необхідних показників якості оброблюваних поверхонь.

Показано, що токарно-фрезерні обробні центри серії PUMA SMX компанії "DOOSAN Infracore Machine Tools" – це нове покоління багатофункціональних обробних верстатів, які відрізняються високою продуктивністю, точністю та простотою в експлуатації, надають можливість використання кращих рішень в класі багатофункціонального обладнання. Токарно-фрезерні центри серії SMX є світовим лідером в своєму класі й забезпечують високі показники високоточної обробки за рахунок застосування системи мінімізації термічної деформації, заснованої на функціях температурної компенсації в процесі високошвидкісного різання.

Встановлено, що сплав TT7505 ефективно використовувати для високошвидкісної обробки чавуну, а міцний сплав TT8080 – для обробки нержавіючих і жароміцних сплавів південнокорейського виробництва. Для обробки композиційних матеріалів рекомендується використовувати фрезерні пластини зі сплаву PCD (полікристалічний алмаз), кінцеві твердосплавні фрези й свердла з алмазним покриттям. Ці нові інструментальні рішення задовольняють унікальним умовам різання важкооброблюваних матеріалів, оскільки об'єднують в собі переваги спеціального сплаву, модифікованої геометрії ріжучої кромки й високих термохімічних властивостей алмазного покриття.

Встановлено, що конфігурація твердосплавних кінцевих фрез RCFE TaeguTec з алмазним покриттям для обробки вуглепластиків, також як і фрез RRFE-типу, виключає розшарування, знижує зусилля різання й вібрації, забезпечуючи високу продуктивність інструменту при чорновій обробці. Відмінною особливістю RCFE-фрез є кілька каналів для відведення стружки, що дозволяє працювати на підвищених режимах. Для чистової обробки композитів рекомендується використовувати твердосплавну кінцеву фрезу серії RCOM (компанії TaeguTec) з алмазним покриттям, яка виключає розшарування, запобігаючи утворенню задирки, і представлена в 2-х конфігураціях: з лівим і правим напрямком спіралей канавок.

Для високопродуктивної обробки композитів рекомендується використовувати ріжучі тверді сплави TaeguTec, що дозволяють забезпечити найвищу стійкість інструменту. Так, інноваційний PCD-сплав TD830, виготовлений з ультрадрібної алмазної фракції, показує високу зносостійкість, міцність та якість кромки, характеризується винятковою стійкістю до абразивного зносу й значною термічною стабільністю.

Для обробки волокнистих вуглепластиків рекомендується новий сплав TTD610. Завдяки передовій технології нанесення наноалмазного покриття, цей сплав забезпечує неперевершену стійкість інструменту й високу стабільність обробки, відрізняється високою абразивною зносостійкістю (твердість більше 8000 за Віккерсом), забезпечує високі показники теплопровідності та ударної стійкості.

Для механічної обробки прес-форм і штампів, коли доводиться фрезерувати тонкостінні заготовки з різних за оброблюваністю матеріалів, пропонується високопродуктивна серія фрез і пластин ChaseFeed, яка може бути застосована й для чорнових операцій. В даний час компанія TaeguTec доповнила серію високоефективними пластинами SBMT і широкою номенклатурою корпусів фрез, які забезпечують таку ж продуктивність на високих швидкостях подачі, але при менших глибинах різання.

Застосування наведених практичних рекомендацій в діяльності Товариства з обмеженою відповідальністю “ВТ-ІНЖИНІРІНГ” (м. Дніпропетровськ) дозволить підвищити ефективність розробки технологічних процесів обробки деталей машин, виготовлених із матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями, на основі застосування високошвидкісного різання на різних технологічних операціях обробки.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 343 с.
3. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
4. Жовтобрюх В. А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.
5. Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидроаппаратуры / В.А. Жовтобрюх // Физические и компьютерные технологии: труды 17-й Международ. науч.-техн. конф. – Харьков: ХНПК "ФЭД". – 2011. – С. 68-73.
6. Жовтобрюх В. А. Разработка и внедрение эффективных технологических процессов механической обработки / В. А. Жовтобрюх // Сучасні системи технологій у машинобудуванні: Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛПРА, 2015. – С. 92–105.
7. Жовтобрюх В. О. Розробка ефективних технологій високошвидкісної механічної обробки деталей гідравлічних систем / В. О. Жовтобрюх, Ф. В. Новіков // Физические и компьютерные технологии: труды 19-й Международной научно-практической конференции. – Харьков: ГП ХМЗ "ФЭД", 2014. – С. 66–75.
8. Жовтобрюх В.А. Теоретический анализ условий уменьшения себестоимости механической обработки / В.А. Жовтобрюх // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 115. – С. 68-73.

9. Израилович М.Я. Оптимизация процессов механической обработки алмазным и твердосплавным инструментом / М.Я. Израилович. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 44 с.
10. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
11. Лоладзе Т. Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т. Н. Лоладзе, Г. В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 110 с.
12. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
13. Математическая модель определения экономически выгодных режимов резания / Ф.В. Новиков, Е.С. Яценко, А.Н. Ковальчук, И.Е. Иванов // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технічний прогрес і ефективність виробництва. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2006. – № 41. – С. 33-36.
14. Новиков Ф.В. Разработка эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2011. – Вып. 29. – С. 212-215.
15. Новиков Ф.В. Расчет параметров режимов резания по критериям наименьшей себестоимости и наибольшей производительности обработки / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научн.-техн. конф., 19-22 сентября 2011 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2011. – 148–151.
16. Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с.
17. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
18. Новіков Ф. В. Теорія високоякісної обробки деталей машин: монографія / Ф. В. Новіков. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с.
19. Обработка высокопрочных материалов / Е.С. Пуховский, А.П. Гавриш, Е.Ю. Грищенко; Под общ. ред. Гавриш А.П. – К.: Техніка, 1983. – 134 с.
20. Резание металлов / С.Н. Филоненко. – К.: Вища школа, 1969. – 259 с.

21. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

22. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: учебник / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, А.Г. Ракович, Б.И. Сеницын; Под общ. ред. С.Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.

23. Справочник машиностроителя. В 6-ти томах. / Под редакцией Э.А. Сателъ. – 3-е издание, исправ. и доп. – М.: Машиностроение, 1964. – Т.5. – 920 с.

24. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособ. / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

25. Технологія машинобудування: підручник / О.В. Якимов, В.М. Царюк, О.О. Якимов, Г.О. Оборський, В.П. Ларшин, О.В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.

26. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.

27. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2003. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов". – 802 с.

28. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2004. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин". – 546 с.

ДОДАТОК



Инженерный Центр "ВТ-Инжиниринг"
 адрес почтовый:
 49045, г.Днепропетровск, ул. Верхняя, 2-а
 тел.: +3 8056 7908594, +3 8056 7908540
 р/с 26000000112362, АО "Укресимбанк" МФО 305675
 ОКПО 38433250, ІПН 384332504640, свід. № 200088705
 e-mail: info@vt-e.com.ua, http://vt-e.com.ua/

Лучшие комплексные решения «под ключ» для металлообработки!

Инженерный Центр "ВТ-Инжиниринг"
 адреса поштова:

Иск. № _____ от "___" _____ 201__ г.
 на № _____ от "___" _____ 201__ г.

49045, м.Дніпропетровськ, вул. Верхня, 2-а
 тел.: +3 8056 7908594, +3 8056 7908540
 р/р 26000000112362, АТ "Укресімбанк" МФО 305675
 ЄДРПОУ 38433250, ІПН 384332504640, свід. № 200088705
 e-mail: info@vt-e.com.ua, http://vt-e.com.ua/

№ 405 від 31.08.2016

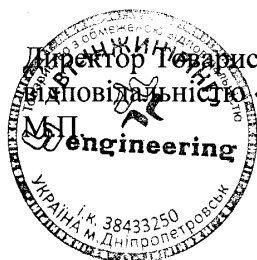
ДОВІДКА

про використання результатів, окремих пропозицій та рекомендацій,
 отриманих в ході досліджень за госпдогвірною НДР
 за договором ЕУ № 597 від 11.12.2015 р.


«Розробка методики розрахунку оптимальних режимів різання та
 стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм
 найменшої собівартості обробки для умов високошвидкісного різання»

Розроблена методика розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки для умов високошвидкісного різання дозволяє конкретизувати вибір оптимальних режимів різання в кожному конкретному випадку, охоплює широкі діапазони їх зміни для різних оброблюваних матеріалів й не потребує проведення складних й трудомістких експериментальних досліджень як це передбачено існуючими нормативами режимів різання для звичайних твердосплавних й швидкорізальних інструментів вітчизняного виробництва. Встановлено, що розроблена методика дозволяє по-новому підійти до проектування технологічних процесів механічної обробки та суттєво підвищити продуктивність і зменшити собівартість обробки деталей, виготовлених з матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями, при забезпеченні високих показників точності та якості оброблених поверхонь й відкриває широкі можливості ефективного використання на підприємствах України сучасних високообертальних металорізальних верстатів зі ЧПУ типу «обробний центр» із застосуванням твердосплавних різальних інструментів із зносостійкими покриттями нового покоління зарубіжного виробництва, які забезпечують виготовлення високоякісної машинобудівної продукції, але є дуже коштовними.

Результати науково-дослідної роботи «Розробка методики розрахунку оптимальних режимів різання та стійкості твердосплавних інструментів із зносостійкими покриттями за критерієм найменшої собівартості обробки для умов високошвидкісного різання» впроваджено в діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «ВТ-ІНЖИНІРІНГ».



Директор Товариства з обмеженою
 відповідальністю «ВТ-ІНЖИНІРІНГ»


 В.І. Чергінець