

НОВІКОВ Ф. В., ПОЛЯНСЬКИЙ В. І.

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Розроблено уточнену математичну модель визначення умовного напруження різання під час лезової обробки на основі встановлення аналітичної залежності для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу. Показано, що у його формуванні переважає радіальна складова сили різання, яка й приводить до його значного зменшення (у 1,5 разів) щодо розрахункових значень, отриманих за відомими аналогічними залежностями. Це дозволило уточнити розрахунок параметрів силової та теплової напруженостей механічної обробки й обґрунтувати умови їх зниження шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання. На основі проведених експериментальних досліджень технологічних операцій механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості встановлено, що в умовах лезової обробки енергоємність та максимальна температура різання приймають значно менші значення, ніж при шліфуванні. Отже можливості підвищення продуктивності за умов забезпечення високої якості обробки при шліфуванні дуже обмежені. Для цього потрібно застосовувати сучасні технології високошвидкісної лезової обробки на високооборотних металорізальних верстатах із ЧПУ типу "оброблювальний центр", які, як установлено у роботі, характеризуються надзвичайно високими технологічними можливостями.

Ключові слова: умовне напруження різання, умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу, температура різання, тертя в зоні різання, шліфування, металорізальні верстати

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Разработана уточненная математическая модель определения условного напряжения резания при лезвийной обработке на основе установления аналитической зависимости для определения условного угла сдвига обрабатываемого материала. Показано, что в его формировании преобладает радиальная составляющая силы резания, которая и приводит к его значительному уменьшению (в 1,5 раза) относительно расчетных значений, полученных по известным аналогичным зависимостям. Это позволило уточнить расчет параметров силовой и тепловой напряженности механической обработки и обосновать условия их уменьшения путем уменьшения интенсивности трения в зоне резания. На основе проведенных экспериментальных исследований технологических операций механической обработки сложнопрофильной формирующей оснастки для пищевой промышленности установлено, что в условиях лезвийной обработки энергоёмкость и максимальная температура резания принимают значительно меньшие значения, чем при шлифовании. Следовательно, возможности повышения производительности при обеспечении высокого качества обработки при шлифовании весьма ограничены. Для этого нужно применять современные технологии высокоскоростной лезвийной обработки на высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр", которые, как установлено в работе, характеризуются чрезвычайно высокими технологическими возможностями.

Ключевые слова: условное напряжение резания, условный угол сдвига обрабатываемого материала, температура резания, трение в зоне резания, шлифование, металлорежущие станки

NOVIKOV F. V., POLYANSKY V. I.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF EFFECTIVE TECHNOLOGIES OF HIGH-SPEED MECHANICAL PROCESSING

A refined mathematical model for determining the conditional cutting stress during blade processing has been developed based on the establishment of an analytical dependence for determining the conditional shear angle of the processed material. It is shown that its formation is dominated by the radial component of the cutting force, which leads to its significant decrease (by 1.5 times) compared to the calculated values obtained according to known similar relationships. This made it possible to clarify the calculation of the parameters of mechanical processing power and thermal stresses and substantiate the conditions for their reduction by reducing the intensity of friction in the cutting zone. On the basis of the conducted experimental studies of the technological operations of mechanical processing of complex-profile forming equipment for the food industry, it was established that in the conditions of blade processing, the energy intensity and the maximum cutting temperature take much lower values than during grinding. Therefore, the possibilities of increasing productivity under the conditions of ensuring high quality processing during grinding are very limited. For this, it is necessary to apply modern technologies of high-speed blade processing on high-speed CNC metal cutting machines of the "machining center" type, which, as established in the robot, are characterized by extremely high technological capabilities.

Key words: conditional cutting stress, conditional shear angle of the processed material, cutting temperature, friction in the cutting zone, grinding, metal-cutting machines

Вступ. Створення конкурентоспроможної машинобудівної продукції потребує підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості та собівартості механічної обробки. В успішному вирішенні цих завдань першочергове значення має зниження сили та температури різання, виключення утворення на оброблюваних поверхнях різного роду силових і температурних дефектів. Актуальними слід розглядати завдання забезпечення високоефективної обробки виробів (деталей машин), виготовлених з важкооброблюваних матеріалів. Особливо це відноситься до технологічних операцій механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. В даний час для цього застосовуються інноваційні технології високошвидкісного різання на сучасних металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" та збірних твердосплавних і керамічних лезових інструментів зі зносостійкими покриттями. Разом з тим, не завжди вдається досягти необхідних високих техніко-економічних показників механічної обробки, для цього потрібні нові технологічні рішення. Тому в цій роботі запропоновано нові теоретичні підходи до визначення умов зниження силової та теплової напруженостей процесу різання на основі зниження енергоємності обробки шляхом зменшення інтенсивності тертя у зоні різання. Це дозволить обґрунтувати ефективні технології високошвидкісного різання на сучасних металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр".

Аналіз основних досягнень та літератури. Питанням зниження силової та теплової напруженостей процесу різання в науково-технічній літературі постійно приділяється значна увага. Серед опублікованих наукових праць є багато робіт, присвячених теоретичному аналізу умов зниження сили та температури різання [1–4]. Однак завдання аналітичного визначення енергоємності обробки та умов її зменшення не отримали належного розвитку, незважаючи на наявні численні результати експериментальних досліджень енергоємності обробки [5]. Їх аналіз показує, що при лезовій обробці енергоємність завжди менша, ніж енергоємність при шліфуванні. Відповідно, менше сили та температура різання, а продуктивність обробки, навпаки, більша. Це вказує на ефективність застосування на фінішних операціях методів лезової обробки. У той же час відсутність достатньо надійних методів розрахунку енергоємності обробки та основних параметрів силової та теплової напруженостей процесу різання не дозволяє виявити потенційні технологічні можливості різних методів механічної обробки та умов їх практичної реалізації. Це вимагає проведення подальших досліджень енергоємності обробки та виявлення закономірностей її зменшення, що дозволить розробити практичні рекомендації раціонального застосування ефективних технологій високошвидкісного різання на сучасних металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" та збірних твердосплавних і керамічних лезових інструментів зі зносостійкими покриттями.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є аналітичне визначення енергоємності обробки та умов її зменшення для обґрунтування раціонального застосування ефективних технологій механічної обробки, що забезпечують суттєве зниження силової та теплової напруженостей процесу різання та підвищення техніко-економічних показників механічної обробки.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- розробити уточнену математичну модель визначення умовного напруження різання під час лезової обробки на основі встановлення аналітичної залежності для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу;
- обґрунтувати умови зниження параметрів силової та теплової напруженостей механічної обробки;
- провести експериментальні дослідження енергоємності й максимальної температури різання та шляхів їх зменшення в умовах лезової обробки на технологічних операціях механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості;
- розробити практичні рекомендації щодо раціонального застосування ефективних технологій високошвидкісної механічної обробки на високооборотних металорізальних верстатах із ЧПУ типу "оброблювальний центр".

Матеріали дослідження. Для вирішення поставлених задач слід скористатися відомою аналітичною залежністю для визначення енергоємності (умовного напруження різання) при механічній обробці [6]: $\sigma = \sigma_{cm} / \operatorname{tg} \beta$, де σ_{cm} – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м²; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу. Для визначення кута β при різанні слід скористатися відомою формулою професора Зворикіна К. О. [4]: $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi) / 2$, де ψ – умовний кут тертя стружки із передньою поверхнею різця ($\operatorname{tg} \psi = f$ – коефіцієнт тертя); γ – позитивний передній кут різця. Однак, як показують розрахунки, формула професора Зворикіна К. О. приводить до завищених значень кута β – вони завжди більше експериментальних. Тому важливо уточнити залежність для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β при різанні, що дозволить більш правильно оцінювати енергоємність (умовне напруження різання) $\sigma = \sigma_{cm} / \operatorname{tg} \beta$ та визначати умови зменшення силової та теплової напруженостей механічної обробки.

Для цього роботу різання $P_z \cdot \Delta z$ (рис. 1) представлено сумою робіт $P \cdot \Delta l$ та $P_y \cdot \Delta y$:

$$P_z \cdot \Delta z = P_y \cdot \Delta y + P \cdot \Delta l \quad (1)$$

або

$$P_z \cdot \cos \beta = P_y \cdot \sin \beta + P, \quad (2)$$

де P_z , P_y – тангенціальна та радіальна складові сили різання, Н;

$P = \tau \cdot \delta \cdot l$ – сила, що виникає в умовній площині зсуву ОА, Н;

τ – дотичне напруження, що виникає в умовній площині зсуву ОА, Н/м²;

δ – ширина зрізу, м;

$l = a_{зріз} / \sin \beta$ – довжина умовної площини зсуву ОА, м;

$a_{зріз}$ – товщина зрізу, м;

β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу, град.; $\cos \beta = \Delta z / \Delta l$; $\sin \beta = \Delta y / \Delta l$.

Тангенціальну складову сили різання P_z подано у вигляді суми двох складових сил P_{z1} і P_{z2} , що забезпечують, відповідно, відокремлення елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу від основного матеріалу та їх пружно-пластичне переміщення вздовж умовної площини зсуву ОА₁ (рис. 2).

Тоді складові сили різання P_z і P_y приймають вигляд:

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} + P_{zmp}; \quad (3)$$

$$P_y = P_{y1} + P_{y2} + P_{y_{mp}}, \quad (4)$$

де P_{z1}, P_{y1} – складові сили різання, які приймають участь у здійсненні зсуву матеріалу уздовж умовної площини зсуву O_1A_1 , Н;

P_{z2}, P_{y2} – складові сили різання, які приймають участь у здійсненні зсуву матеріалу уздовж умовної площини зсуву O_2A_2 , Н;

$P_{z_{mp}}, P_{y_{mp}}$ – складові сили тертя, що виникають у процесі тертя оброблюваного матеріалу із задньою поверхнею різального інструмента, Н.

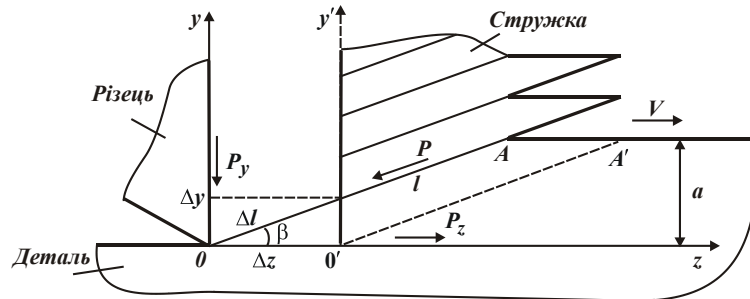


Рисунок 1 – Розрахункова схема параметрів процесу точіння

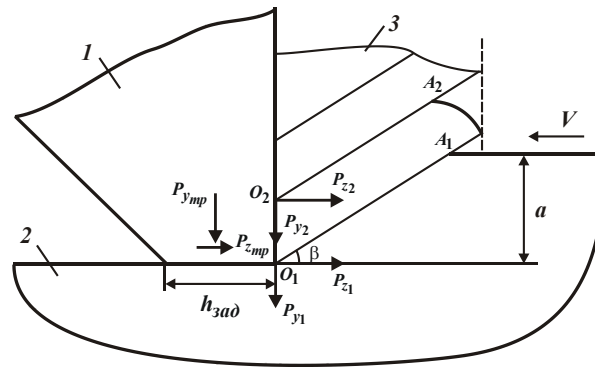


Рисунок 2 – Розрахункова схема параметрів силової напруженості процесу точіння:
1 – різець; 2 – оброблювальний матеріал; 3 – стружка, що утворюється

У процесі здійснення зсуву матеріалу уздовж умовної площини зсуву O_1A_1 (рис. 2) приймають участь складові сили різання P_{z1}, P_{y1}, P_{y2} , а складова сили різання P_{z2} фактично не приймає участі у формуванні кута β , тому її можна не урахувувати в розрахунках кута β . Також у першому наближенні можна прийняти: $P_{z1} = P_{z2}; P_{y1} = P_{y2}$. Відповідно, тангенціальну й радіальну складові сили різання слід виразити: $P_z = P_{z1}; P_y = P_{y1} + P_{y2} = 2P_{y1}$. Звідки

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{P_{z1}}{2P_{y1}}. \quad (5)$$

Після підстановки залежності (5) в рівняння (2) маємо:

$$\cos \beta = \frac{2 \cdot P_{y1}}{P_{z1}} \cdot \sin \beta + \frac{P}{P_{z1}}. \quad (6)$$

Із урахуванням відношень $P = \tau \cdot \sigma \cdot l$ та $l = a / \sin \beta$ рівняння (6) набуває вигляду:

$$\tau = \frac{1}{a \cdot \sigma} \cdot (0,5 \cdot P_{z1} \cdot \sin 2\beta - 2 \cdot P_{y1} \cdot \sin^2 \beta). \quad (7)$$

Із залежності (7) випливає, що умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β для заданих значень P_{z1} і P_{y1} неоднозначно впливає на дотичне напруження τ . Має місце екстремум функції τ від кута β . Для його визначення слід підкорити дотичне напруження τ необхідній умові екстремуму: $\tau'_\beta = 0$:

$$\tau'_\beta = \frac{1}{a \cdot \sigma} \cdot (P_{z1} \cdot \cos 2\beta - 2 \cdot P_{y1} \cdot \sin 2\beta) = 0. \quad (8)$$

Після перетворень отримано:

$$\frac{P_{z_1}}{P_{y_1}} = 2 \cdot \operatorname{tg} 2\beta. \quad (9)$$

Друга похідна:

$$\tau''_{\beta} = \frac{1}{a \cdot \epsilon} \cdot (-2 \cdot P_{z_1} \cdot \sin 2\beta - 4 \cdot P_{y_1} \cdot \cos 2\beta) < 0. \quad (10)$$

Як видно, друга похідна τ''_{β} – від'ємна величина, тому в точці екстремуму функції τ має місце максимум. Це вказує на те, що кут β , який аналітично описується залежністю (10), визначає положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу в зоні різання. У цьому випадку кут β залежить лише від відношення $P_{z_1}/P_{y_1} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$ [7]. Чим воно більше, тим більше кут β та менше силова напруженість процесу різання. Із урахуванням відношення $P_{z_1}/P_{y_1} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$ залежність (9) приймає вигляд:

$$\operatorname{tg} 2\beta = 0,5 \cdot \operatorname{ctg}(\psi - \gamma). \quad (11)$$

Розглядаючи закономірності формування кута β із урахуванням відношення $P_z/P_y = P_{z_1}/P_{y_1}$, залежність (11) виразиться:

$$\operatorname{tg} 2\beta = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma) \quad (12)$$

або $\operatorname{tg} 2\beta = \operatorname{tg}[90^\circ - (\psi - \gamma)]$, звідки $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi)/2$. У результаті приходимо до формули професора Зворикіна К. О. Як уже відзначалося, розраховані за цією формулою значення кута β значно більші експериментальних значень.

Порівняння залежностей (11) і (12) показує, що розраховані на основі залежності (11) значення кута β менше значень кута β , розрахованих на основі залежності (12). Тому залежність (11) в більшій мірі відображає закономірності формування умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β .

Розрахунками за залежністю (11) встановлено, що за експериментальними даними професора Коломійця В. В. [8] для умов поздовжнього точіння сталі 45 (HRC 50) різцем із гексаніту-Р (із головним кутом в плані $\varphi = 45^\circ$, переднім кутом різця $\gamma = -11^\circ$, режимом різання $S = 0,07$ мм/об.; $t = 0,2$ мм, величиною зносу різця на задній поверхні $h_{зад} = 0,1$ мм та кутом $\beta = 20^\circ$) маємо: $\psi = 20^\circ$; $f = \operatorname{tg} \psi = 0,364$. Отже, це відповідає експериментальним даним.

Розрахунками за залежністю (12) за цих умов обробки встановлено: $\psi = 61^\circ$; $f = \operatorname{tg} \psi = 1,8$, що не відповідає дійсності, оскільки $f > 1$, а кут $\psi > 45^\circ$. Це пов'язано із тим, що кут β в даному випадку повинен приймати значення, більші 20° . Так, для вихідних даних: $\gamma = -11^\circ$; $\psi = 20^\circ$ розрахункове значення кута $\beta = 29,5^\circ$, що значно (в 1,5 разів) перевищує експериментально встановлене значення $\beta = 20^\circ$. Таким чином отримана залежність (11) дозволяє уточнити залежність (12), яка співпадає з формулою професора Зворикіна К. О., а, відповідно, й залежність для визначення енергоємності (умовного напруження різання) при механічній обробці: $\sigma = \sigma_{cm} / \operatorname{tg} \beta$.

За умови $P_z/P_y = P_{z_1}/z \cdot P_{y_1}$ залежність (11) приймає узагальнений вигляд:

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{1}{z} \cdot \operatorname{ctg}(\psi - \gamma), \quad (13)$$

де z – безрозмірна величина ($z > 1$), що дорівнює відношенню тангенціальної складової сили різання P_{z_1} до її частини, яка приймає участь у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β .

Із залежностей (13) і $\sigma = \sigma_{cm} / \operatorname{tg} \beta$ випливає, що чим більше безрозмірна величина z , тим менше кут β та більше σ / σ_{cm} (рис. 3). Це вказує на те, що в умовах різання важкооброблюваних матеріалів, у яких експериментально встановлені значення кута β незначні (наприклад, на рівні $10^\circ - 15^\circ$ і менше), слід розрахунки кута β виконувати за залежністю (13). Це дозволяє більш точно визначити кут β та умовне напруження різання при механічній обробці σ порівняно із експериментальними значеннями. Так, зі збільшенням кута $(\psi - \gamma)$ кут β зменшується, а відношення σ / σ_{cm} , навпаки, збільшується більш інтенсивно зі збільшенням безрозмірної величини z , тобто більш інтенсивно порівняно з випадком $z = 1$, який відповідає формулі професора Зворикіна К. О. Це вказує на суттєвий вплив умов тертя на передній поверхні різця на формування умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β , який у даному разі дорівнює 20° . За умови відсутності тертя на передній поверхні різця (тобто для ідеальних умов обробки, що відповідають умовам одновісного стиску об-роблюваного матеріалу) кут β дорівнював би 45° , а $\sigma_{piz} \rightarrow \sigma_{cm}$. Тому основною умовою зменшення енергоємності обробки є зниження інтенсивності тертя в зоні різання та зносу інструменту шляхом застосування сучасних збірних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями [9].

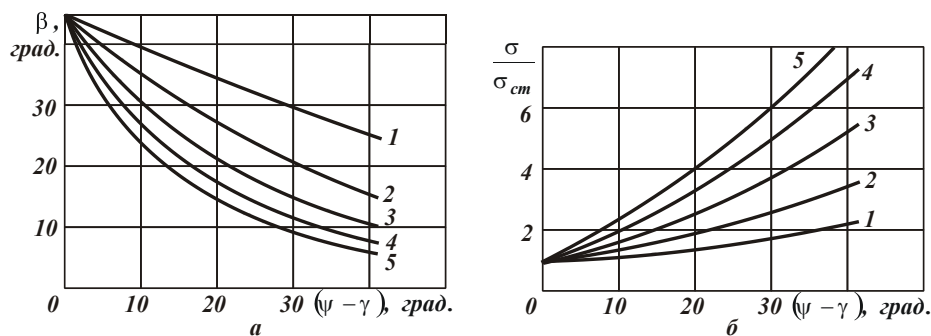


Рисунок 3 – Залежності кута β (а) та відношення $\sigma/\sigma_{см}$ (б) від кута $(\psi - \gamma)$: 1, ..., 5 – $z = 1, \dots, 5$

Для оцінювання достовірності отриманих теоретичних рішень було проведено комплекс експериментальних досліджень енергоємності, умовного напруження різання, температури різання та умов підвищення продуктивності й якості за різними методами механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості в ТОВ "Імперія металів" (м. Харків). Застосовували сучасні збірні лезові твердосплавні та керамічні різальні інструменти зі зносостійкими покриттями (закордонного виробництва) і сучасні високо-обертові металорізальні верстати із ЧПУ типу "оброблювальний центр".

Визначення енергоємності обробки (питомої роботи різання) здійснювали за залежністю $A_{num} = N/Q$ (де N – ефективна потужність різання, Н; Q – продуктивність обробки, $\text{м}^3/\text{с}$), яка співпадає із залежністю умовного напруження різання σ . Спочатку було визначено значення σ на операції плоского шліфування на плоскошліфувальному верстаті моделі 3Л723АФ2И абразивним кругом ПП450×80×203 64С 40СМ деталі зі сталі 3 із режимом різання: глибина шліфування $t = 0,01$ мм; швидкість деталі $V_{dem} = 15$ м/хв; поперечна подача за подвійний хід круга – 25 мм, швидкість круга $V_{кр} = 35$ м/с. Експериментально встановлено, що $N = 1,4$ кВт, а $Q = 3750$ $\text{мм}^3/\text{хв}$ (рис. 4). Тоді енергоємність обробки дорівнює $A_{num} = N/Q = 22,4$ Дж/мм³, а умовне напруження різання $\sigma = 22400$ Н/мм². Як видно, умовне напруження різання σ багаторазово перевищує межі міцності на стиск і зсув оброблюваного матеріалу. Це показує, що основну частину енергетичного балансу шліфування складає енергія, що витрачається на подолання сили тертя, яка виникає при шліфуванні. Енергія "чистого" різання в цьому випадку незначна, що приводить до збільшення температури різання.

Для визначення температури різання θ було використано аналітичну залежність [10]:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{dem} \cdot t}{\lambda \cdot 2 \cdot R_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}}, \quad (14)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·град);

ρ – щільність матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·град);

$R_{кр}$ – радіус шліфувального круга, м.

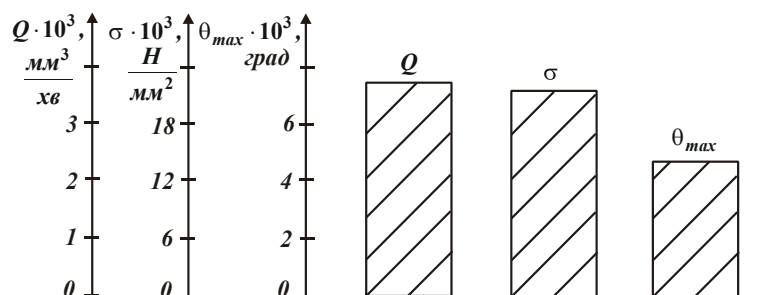


Рисунок 4 – Значення параметрів Q , σ і θ_{max} при плоскому шліфуванні деталі зі сталі 3

Для аналізу теплової напруженості шліфування було проведено оцінювання максимальної температури різання за залежністю $\theta_{max} = \sigma/(c \cdot \rho)$. Теплофізичні властивості оброблюваного матеріалу – сталі 3: $c \cdot \rho = 4,93 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град); $\lambda = 40,8$ Дж/(м·с·град). Розрахунками встановлено $\theta_{max} = 4544$ °С, що значно перевищує температуру плавлення оброблюваного матеріалу. Виходячи із залежності (1), встановлено відношення $\theta/\theta_{max} = 0,055$. Для значення $\theta_{max} = 4544$ °С отримано: $\theta = 250$ °С.

Для значень $t = 0,02$ мм і $t = 0,03$ мм розрахункові значення θ/θ_{max} і θ дорівнюють, відповідно: 0,08; 0,12 і $\theta = 363,5$ °C; $\theta = 545$ °C (рис. 5). У цьому випадку отримані відносно невеликі значення температури різання θ обумовлені незначною продуктивністю обробки, а також тим, що використовується лише до 12 % теплового балансу шліфування. Зі збільшенням продуктивності обробки температура різання θ може досягти рівня температури плавлення оброблюваного матеріалу.

Тому для забезпечення більш високої продуктивності та зниження енергоємності обробки $A_{лит}$ (умовного напруження різання σ) доцільно перейти від операції шліфування до операцій лезової обробки.

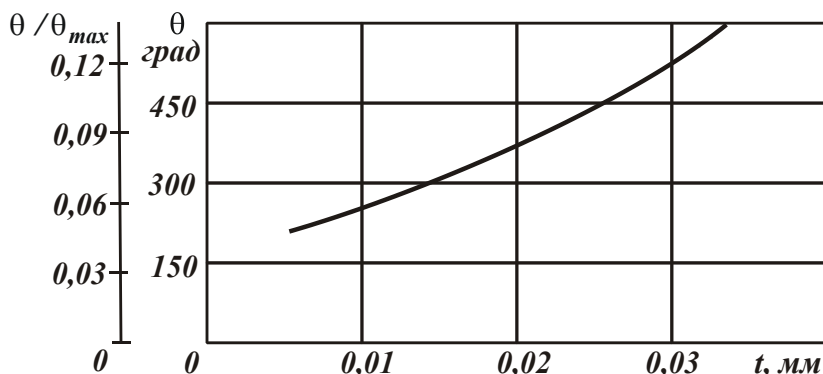


Рисунок 5 – Залежність температури різання θ та відношення θ/θ_{max} від глибини шліфування t

У роботі також наведено результати експериментальних досліджень операції розточування отворів $\varnothing 25$ мм в деталі зі сталі 3. Обробку здійснювали на верстаті QUASER MV204P із ЧПК FANUC 31iB із застосуванням розточувальної головки TRM 50 із додатковим її балансуванням. Різальний інструмент оснащено змінною багатогранною пластиною TPGX09020LDC100T, виготовленою із кермету зі зносостійким покриттям TiN. Режим різання: швидкість різання $V=157$ м/хв; глибина різання $t=0,1$ мм; подача $S=0,03$ мм/об.; частота обертання $n=2000$ об./хв. Продуктивність обробки $Q=V \cdot t \cdot S=471$ мм³/хв. (рис. 6). Як видно, у даному випадку номінальна (задана) продуктивність обробки менше, ніж при шліфуванні.

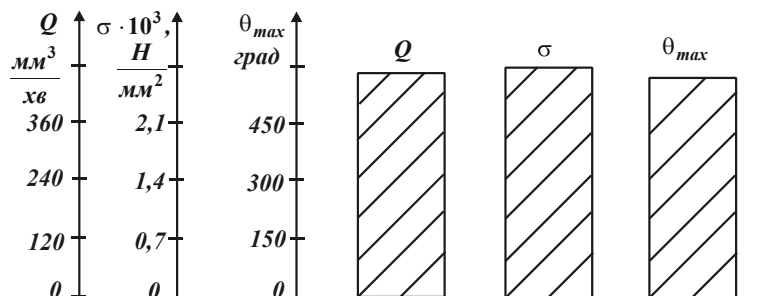


Рисунок 6 – Значення параметрів Q , σ і θ_{max} при розточуванні отворів

Експериментально встановлено $N=22$ Вт. Відповідно, $\sigma = N/Q = 2,8 \cdot 10^3$ Н/мм², що значно менше, ніж при шліфуванні.

Максимальна температура різання $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ із урахуванням значення $c \cdot \rho = 4,93 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град) для сталі 3 дорівнює $\theta_{max} = 568$ °C. Як видно, отримане значення θ_{max} значно менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. Відповідно, температура різання θ приймає ще менше значення. За даних умов різання $\theta/\theta_{max} = 0,75$. Тоді $\theta = 426$ °C. Це вказує на можливість суттєвого зниження теплової та силової напруженостей механічної обробки, забезпечення високої якості оброблюваної поверхні шляхом зменшення умовного напруження різання майже до межі міцності на стиск оброблюваного матеріалу – сталі 3. Тому застосування на операції розточування отворів сучасного лезового інструмента зі змінною багатогранною пластиною, виготовленою із кермету зі зносостійким покриттям TiN (закордонного виробництва), дозволяє значно підвищити ефективність обробки. Це також вказує на те, що доцільно на фінішних операціях обробки отворів перейти від традиційної технології внутрішнього шліфування до технологій високошвидкісного розточування сучасними різальними лезовими інструментами закордонного виробництва. У цьому випадку з'являється можливість суттєвого підвищення продуктивності обробки фактично без збільшення температури різання θ , оскільки вона незначно відрізняється від максимальної температури різання θ_{max} (рис. 7). При шліфуванні цього домогтися неможливо, оскільки відношення $\theta/\theta_{max} \ll 1$. Тому зі збільшенням продуктивності обробки буде збільшуватися й температура

різання, однак тільки до значення температури плавлення оброблюваного матеріалу. Обмеженням збільшення продуктивності при точінні може бути лише задана точність обробки. Виконати цю умову застосуванням традиційних технологій лезової обробки, як показано в даній роботі, надто складно.

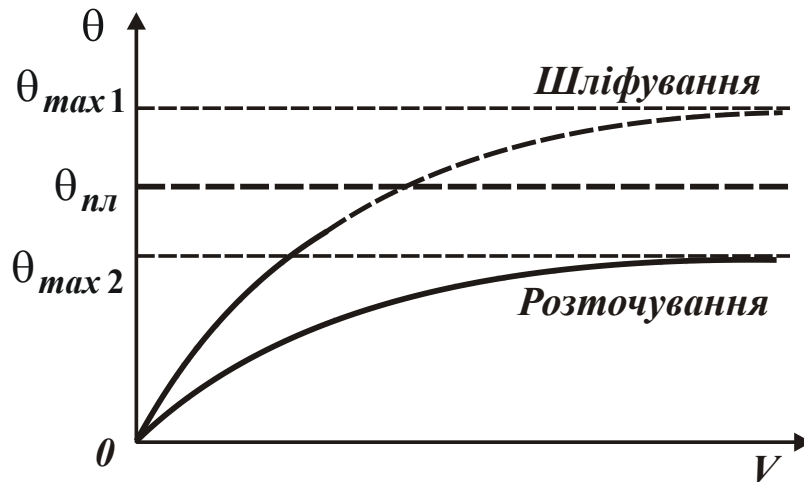


Рисунок 7 – Залежність температури різання θ від швидкості різання V

У роботі проведено експериментальні дослідження операції точіння деталі "вал", виготовленої із латуні ЛС59, на сучасному верстаті TAKISAWA NEX-910. Для латуні ЛС59: $c \cdot \rho = 3,23 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град); коефіцієнт температуропровідності $-a = 32,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Режим різання: $V = 175$ м/хв; $t = 1,5$ мм; $S = 0,6$ мм/об. Продуктивність обробки $Q = V \cdot t \cdot S = 157,5 \cdot 10^3$ мм³/хв. (рис. 8). Експериментально встановлено, що $N = 600$ Вт. Відповідно, енергоємність обробки (питома робота різання) дорівнює: $A_{\text{пит}} = N / Q = 0,228$ Дж/мм³, а $\sigma = 228$ Н/мм². Отже операція точіння характеризується невеликою енергоємністю обробки, а умовне напруження різання лише незначно перевищує межу міцності на стиск оброблюваного матеріалу. Цим показано, що основну частину енергетичного балансу точіння складає енергія "чистого" різання, яка більше енергії, що витрачається на подолання сил тертя в зоні різання.

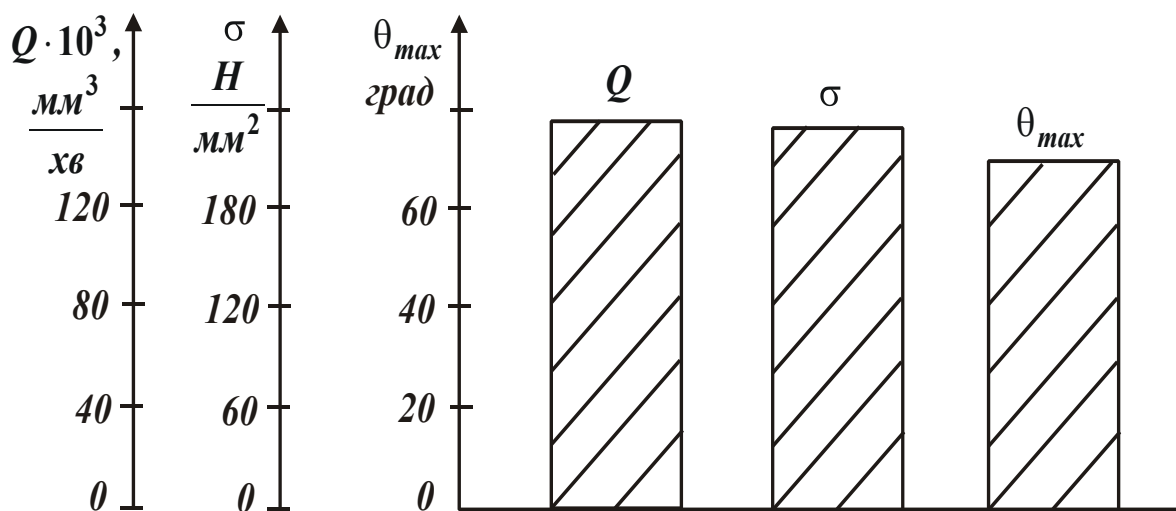


Рисунок 8 – Значення параметрів Q , σ і θ_{max} при точінні деталі "вал"

Розрахунками встановлено, що максимальна температура різання в цьому разі дорівнює $\theta_{\text{max}} = \sigma / (c \cdot \rho) = 71$ °С. Відповідно, $\theta / \theta_{\text{max}} \approx 1$; $\theta \approx 70$ °С. Ці значення θ_{max} і θ значно менше температури плавлення оброблюваного матеріалу (латуні ЛС59), яка дорівнює 900 °С. Це є ще одним підтвердженням того, що в енергетичному балансі обробки лезовим інструментом переважає енергія "чистого" різання над енергією тертя, яке виникає в зоні різання.

Таким чином встановлено, що на операції точіння сучасним різальним інструментом можна суттєво підвищити продуктивність та знизити енергоємність обробки (умовне напруження різання σ) і температуру різання щодо операції шліфування. При цьому температура різання θ може досягати значення максимальної температури різання θ_{max} (рис. 7), чого неможливо досягти при шліфуванні. Це дозволяє значно збільшити продуктивність обробки фактично без збільшення температури різання, яка може досягати

значення максимальної температури різання θ_{max} , що значно менше температури плавлення оброблюваного матеріалу.

У роботі проведено експериментальні дослідження операції фрезування деталі – фільєра макаронна "мушля", виготовленої з латуні ЛС59, на сучасному верстаті FANUC ROBODRILL α -D21iB. Інструмент – твёрдосплавна мікрофреза LNE0808, $D=0,8$ мм. Для латуні ЛС59: $c \cdot \rho = 3,23 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град); $a = 32,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Режим різання: $V = 50$ м/хв; $n = 20000$ об./хв.; $t = 0,2$ мм; $S = 1200$ мм/хв.; ширина фрезування дорівнює діаметру мікрофрези $D = 0,8$ мм. Продуктивність обробки $Q = D \cdot t \cdot S = 192$ мм³/хв. (рис. 9). При цьому експериментально встановлено, що $N=3$ Вт. Відповідно, енергоємність обробки (питома робота різання) дорівнює: $A_{num} = N/Q = 0,937$ Дж/мм³, а $\sigma = 937$ Н/мм². Таким чином, умовне напруження різання незначно перевищує межу міцності на стиск оброблюваного матеріалу, тобто основну частину енергетичного балансу при фрезуванні складає енергія "чистого" різання. Розрахунками встановлено, що $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho) = 290$ °С; $\theta / \theta_{max} = 0,2$. Відповідно, $\theta = 58$ °С. Як видно, температура різання при фрезуванні деталі, виготовленої із латуні ЛС59, значно вище, ніж при розточуванні. Це пов'язано із підвищенням інтенсивності тертя в зоні різання. Тому для зменшення температури різання при фрезуванні необхідно застосовувати охолоджувальну рідину.

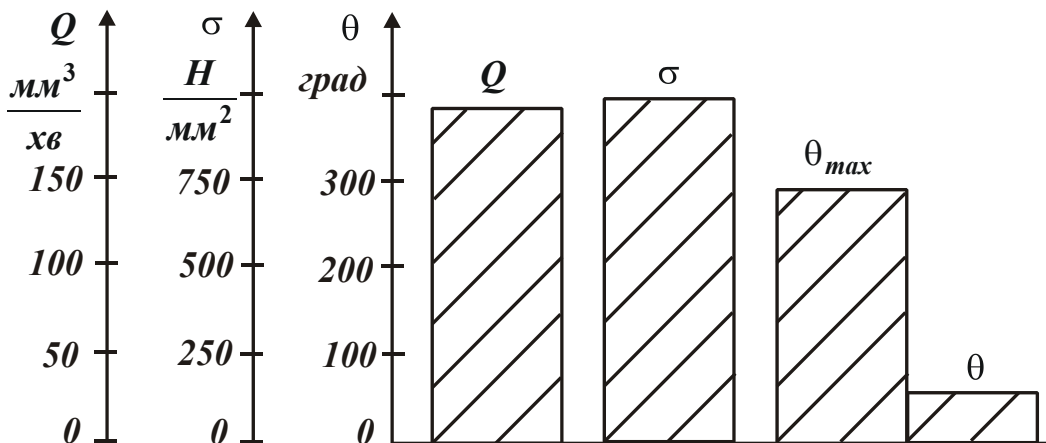


Рисунок 9 – Значення параметрів: Q , σ , θ_{max} і θ при фрезуванні деталі – фільєра макаронна "мушля"

У результаті застосування нових розроблених технологій лезової обробки вдалося суттєво – до 10 разів підвищити продуктивність і приблизно в стільки ж разів зменшити трудомісткість обробки при одночасному підвищенні якості та точності оброблюваних поверхонь. Також, завдяки застосуванню спеціально розроблених сучасних твёрдосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями, вдалося скоротити на 90 % персонал слюсарів – складальників, фахівців із ручного доведення поверхонь деталей, які займалися виконанням традиційних технологій механічної обробки.

Висновки. Показано визначальну роль умовного напруження різання у формуванні параметрів силової напруженості процесу різання. Встановлено, що умовне напруження різання при лезовій обробці може до 10 разів і більше перевищувати межу міцності на стиснення оброблюваного матеріалу. Це пов'язано з інтенсивним тертям у зоні різання. Розроблено уточнену математичну модель визначення умовного напруження різання під час лезової обробки на основі встановлення аналітичної залежності для розрахунку умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу. Показано, що у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу переважає радіальна складова сили різання, яка призводить до його значного зменшення (в 1,5 рази) щодо розрахункових значень, отриманих за відомими аналогічними залежностями. При цьому в розрахунках тангенціальної складової сили різання слід враховувати тільки її частину, при якій в умовній площині зсуву дотичне напруження досягає межі міцності на зсув оброблюваного матеріалу. Це дозволило уточнити розрахунок параметрів силової й теплової напруженостей механічної обробки та обґрунтувати умови їх зменшення шляхом зменшення інтенсивності тертя у зоні різання. Також уточнено формулу професора Зворікіна К. О. щодо визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу.

На основі проведених експериментальних досліджень технологічних операцій механічної обробки складнопрофільного формуючого оснащення для харчової промисловості встановлено, що в умовах лезової обробки енергоємність та максимальна температура різання приймають значно менші значення, ніж при шліфуванні. Показано, що зменшити силову та теплову напруженість операції шліфування дуже складно через інтенсивне тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Отже, можливості підвищення продуктивності за умови забезпечення високої якості обробки при шліфуванні дуже обмежені. Для цього потрібно застосовувати сучасні технології високошвидкісної лезової обробки на високооборотних металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр", які, як встановлено у роботі, характеризуються надзвичайно високими технологічними можливостями. Так, продуктивність обробки при цьому збільшилася до 10 разів, що дозволило ефективно перейти від великосерійного до дрібносерійного і навіть одиничного виробництва складнопрофільної оснастки для харчової промисловості відповідно до вимог ринку.

Список літератури:

1. Технологія машиностроєння / Якимов А. В. і др. – Київ – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.
2. Резников А. Н. Основы расчета тепловых процессов в технологических расчетах : учеб. пособие / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Куйбышев: Ку.А.И., 1986. – 153 с.
3. Армареги И. Дж. Обработка металлов резанием / И. Дж. Армареги, Р. Х. Браун. – Москва: Машиностроение, 1977. – 327 с.
4. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 343 с.
5. Швеца В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В. В. Швеца. – Москва: Машиностроение, 1967. – 63 с.
6. Новиков Ф. В. Аналітичне визначення технологічних параметрів механічної обробки / Ф. В. Новиков, В. І. Полянський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – № 8 (1333) 2019. – С. 239–244.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. Т. 1. Механика резания материалов. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
8. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. Т. 3. Резание материалов лезвийными инструментами. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с.
9. Жовтобрюх В. О. Підвищення ефективності механічної обробки деталей гідравлічних систем шляхом вибору раціональних параметрів операцій за критерієм собівартості: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – технологія машинобудування. – Маріуполь: ПДТУ, 2012. – 21 с.
10. Полянський В. І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 – технологія машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2021. – 40 с.

Bibliography (transliterated):

1. Tekhnologiya mashinostroyeniya / Yakimov A. V. i dr. – Kiyev – Odessa: Astroprint, 2001. – 608 s.
2. Reznikov A. N. Osnovy rascheta teplovykh protsessov v tekhnologicheskikh raschetakh : ucheb. posobiye / A. N. Reznikov, L. A. Reznikov. – Kuybyshev: Ku.A.I., 1986. – 153 s.
3. Armarego I. Dzh. Obrabotka metallov rezaniyem / I. Dzh. Armarego, R. KH. Braun. – Moskva: Mashinostroyeniye, 1977. – 327 s.
4. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov. M.: Mashinostroyeniye, 1975. 343 s.
5. Shvets V. V. Nekotoryye voprosy teorii tekhnologii mashinostroyeniya / V. V. Shvets. – Moskva: Mashinostroyeniye, 1967. – 63 s.
6. Novikov F. V. Analiticheskoye opredeleniye tekhnologicheskikh parametrov mekhanicheskoy obrabotki / F. V. Novikov, V. I. Polyanskiy // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Matematychno modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh: zb. nauk. pr. – Kharkiv: NTU "KHPI", 2019. – № 8 (1333) 2019. – S. 239–244.
7. Physico-mathematical theory of material processing processes and mechanical engineering technology / ed. ed. F. V. Novikova and A. V. Yakimov. In ten volumes. T. 1. Mechanics of cutting materials. - Odessa: ONPU, 2002. - 580 p.
8. Physico-mathematical theory of material processing processes and mechanical engineering technology / ed. ed. F. V. Novikova and A. V. Yakimov. In ten volumes. V. 3. Cutting materials with blade tools. - Odessa: ONPU, 2003. - 546 p.
9. Zhovtobryukh V. O. Increasing the efficiency of mechanical processing of parts of hydraulic systems by choosing rational parameters of operations according to the criterion of cost: autoref. thesis ... candidate technical Sciences: 05.02.08 – mechanical engineering technology. – Mariupol: PDTU, 2012. – 21 p.
10. Polyanskiy V. I. Basics of quality assurance and labor-intensive reduction of mechanical processing of complex-profile forming equipment for the food industry: autoref. thesis ... Dr. technical Science: 05.02.08 - mechanical engineering technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021. – 40 p.

Поступила (received) 01.08.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivych) – доктор технічних наук, професор кафедри "Технології і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: novikovfv@i.ua
ORCID: 0000-0001-6996-3356

Полянський Володимир Іванович (Полянський Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – док-тор технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com, ORCID: 0000-0003-2841-9455