

## УМОВИ ЗНИЖЕННЯ СИЛОВОЇ ТА ТЕПЛОВОЇ НАПРУЖЕНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

*Розроблено уточнену математичну модель визначення умовного напруження різання 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. Це пов'язано з інтенсивним тертям зв'язки круга із оброблюваним матеріалом. Отже можливості підвищення продуктивності за умов забезпечення високої якості обробки при шліфуванні дуже обмежені. Для цього потрібно застосовувати сучасні технології високошвидкісної лезової обробки на високообертових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "оброблювальний центр", які, як встановлено в 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*

**Постановка проблеми.** 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 високоєфективної 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.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** 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 теоретичних досліджень енергоємності обробки та виявлення закономірностей її зменшення, що дозволить розробити практичні рекомендації з ефективного застосування технологій високошвидкісного різання на сучасних металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" та збірних твердосплавних і керамічних лезових інструментів зі зносостійкими покриттями.

**Мета роботи** – аналітичне визначення енергоємності обробки та умов її зменшення для створення ефективних технологій механічної обробки, що забезпечують суттєве зниження силової та теплової напруженостей процесу різання та підвищення техніко-економічних показників механічної обробки.

**Викладення основного матеріалу.** 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  $\sigma_{cm}$  – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м<sup>2</sup>;  $\beta$  – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу. Для визначення кута  $\beta$  при різанні слід скористатися відомою формулою професора Зворикіна К. О. [4]:  $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi) / 2$ , де  $\psi$  – умовний кут тертя стружки із передньою поверхнею різця ( $\operatorname{tg} \psi = f$  – коефіцієнт тертя);  $\gamma$  – позитивний передній кут різця. Однак, як показують розрахунки, формула професора Зворикіна К. О. приводить до завищених значень кута  $\beta$  – вони завжди більше експериментальних. Тому важливо уточнити залежність для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу  $\beta$  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;  $P = \tau \cdot v \cdot l$  – сила, що виникає в умовній площині зсуву ОА, Н;  $\tau$  – дотичне напруження, що виникає в умовній площині зсуву ОА, Н/м<sup>2</sup>;  $v$  – ширина зрізу, м;  $l = a_{зріз} / \sin \beta$  – довжина умовної площини зсуву ОА, м;  $a_{зріз}$  – товщина зрізу, м;  $\beta$  – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу, град.;  $\cos \beta = \Delta x / \Delta l$ ;  $\sin \beta = \Delta y / \Delta l$ .

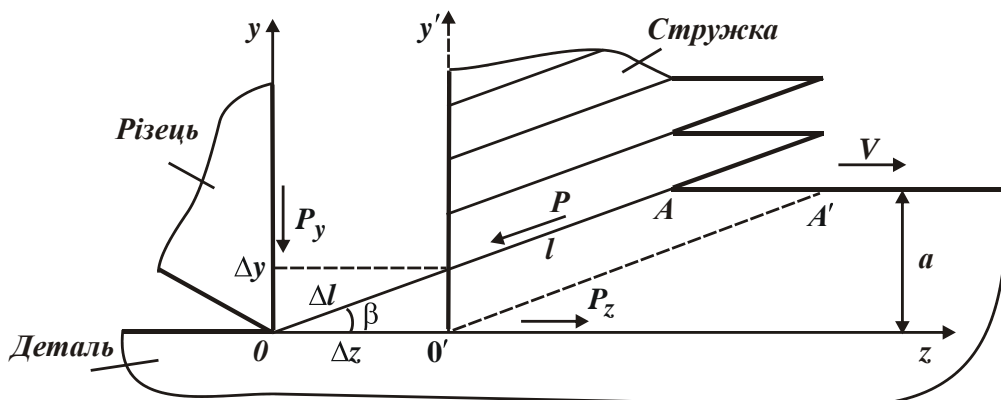


Рисунок 1 – Розрахункова схема параметрів процесу точіння

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  $OA_1$  (рис. 2).

Тоді складові сили різання  $P_z$  і  $P_y$  приймають вигляд:

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

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

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;

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

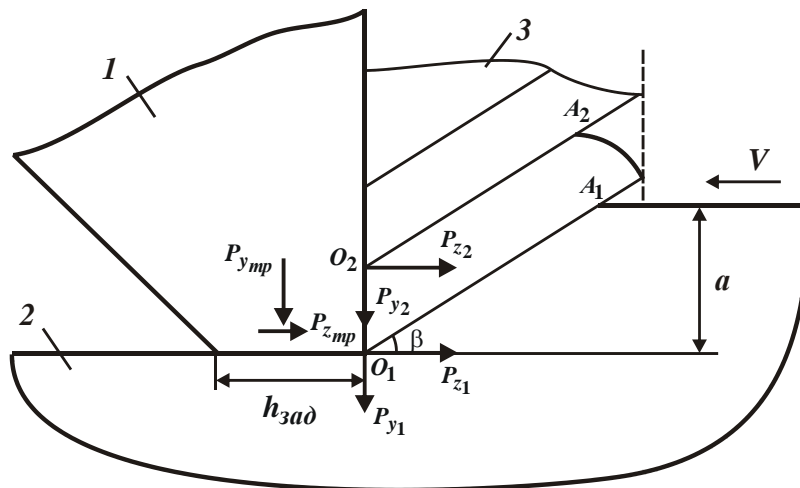


Рисунок 2 – Розрахункова схема параметрів силової напруженості процесу точіння:  
1 – різець; 2 – оброблювальний матеріал; 3 – стружка, що утворюється

В 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  $\beta$ , тому її можна не урахувувати в розрахунках кута  $\beta$ . Також в 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  $P = \tau \cdot v \cdot l$  та  $l = a / \sin \beta$  рівняння (6) набуває вигляду:

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

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

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

Після перетворень отримано:

$$\frac{P_{z1}}{P_{y1}} = 2 \cdot \operatorname{tg} 2\beta. \quad (9)$$

Друга похідна:

$$\tau''_\beta = \frac{1}{a \cdot \epsilon} \cdot (-2 \cdot P_{z1} \cdot \sin 2\beta - 4 \cdot P_{y1} \cdot \cos 2\beta) < 0. \quad (10)$$

Як видно, друга похідна  $\tau''_\beta$  – від'ємна величина, тому в точці екстремуму функції  $\tau$  має місце максимум. Це вказує на те, що кут  $\beta$ , який аналітично описується залежністю (10), визначає положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу в зоні різання. В цьому випадку кут  $\beta$  залежить лише від відношення  $P_{z1} / P_{y1} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$  [7]. Чим воно більше, тим більше кут  $\beta$  та менше силова напруженість процесу різання. Із урахуванням відношення  $P_{z1} / P_{y1} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$  залежність (9) приймає вигляд:

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

Розглядаючи закономірності формування кута  $\beta$  із урахуванням відношення  $P_z / P_y = P_{z1} / P_{y1}$ , 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  $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi) / 2$ . В результаті приходимо до формули професора Зворикіна К. О. Як уже відзначалося, розраховані за цією формулою значення кута  $\beta$  значно більші експериментальних значень.

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

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:  $\psi = 20^\circ$ ;  $f = \operatorname{tg} \psi = 0,364$ . 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  $\beta$  в даному випадку повинен приймати значення, більші  $20^\circ$ . 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  $P_z / P_y = P_{z1} / z \cdot P_{y1}$  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  $P_{z1}$  до її частини, яка приймає участь у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу  $\beta$ .

Із залежностей (13) і  $\sigma = \sigma_{cm} / \operatorname{tg} \beta$  випливає, що чим більше безрозмірна величина  $z$ , тим менше кут  $\beta$  та більше  $\sigma / \sigma_{cm}$  (рис. 3). Це вказує на те, що в умовах різання важкооброблюваних матеріалів, у яких експериментально встановлені значення кута  $\beta$  незначні (наприклад, на рівні  $10^\circ - 15^\circ$  і менше), слід розрахунки кута  $\beta$  виконувати за залежністю (13). Це дозволяє більш точно визначити кут  $\beta$  та умовне напруження різання при механічній обробці  $\sigma$  порівняно із експериментальними значеннями. Так, зі збільшенням кута  $(\psi - \gamma)$  кут  $\beta$  зменшується, а відношення  $\sigma / \sigma_{cm}$ , навпаки, збільшується більш інтенсивно зі збільшенням безрозмірної величини  $z$ , тобто більш інтенсивно порівняно з випадком  $z=1$ , який відповідає формулі професора Зворикіна К. О.

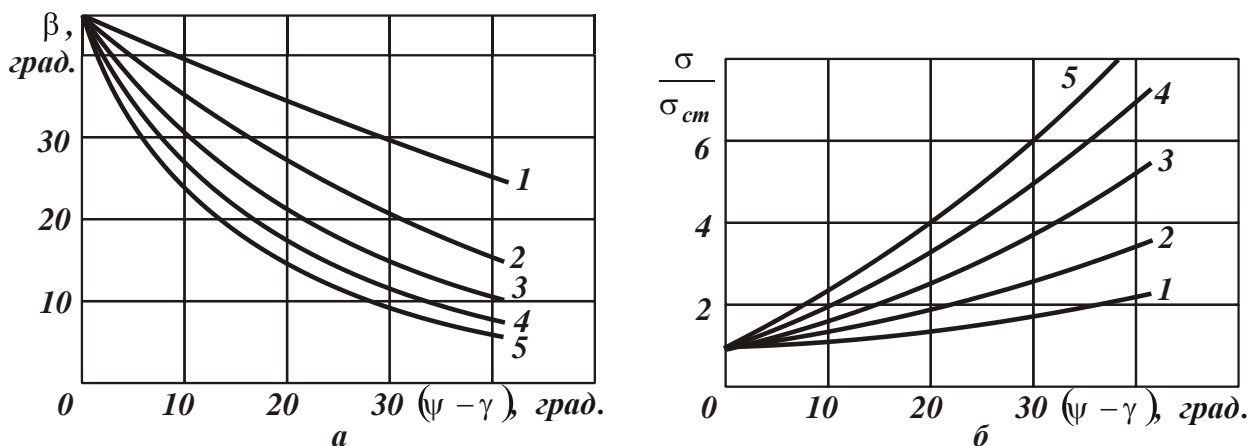


Рисунок 3 – Залежності кута  $\beta$  (а) та відношення  $\sigma / \sigma_{cm}$  (б) від кута  $(\psi - \gamma)$ : 1, ..., 5 –  $z = 1, \dots, 5$

Це вказує на суттєвий вплив умов тертя на передній поверхні різця на формування умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу  $\beta$ , який в даному разі дорівнює  $20^\circ$ . За умови відсутності тертя на передній поверхні різця (тобто для ідеальних умов обробки, що відповідають умовам одновісного стиску оброблюваного матеріалу) кут  $\beta$  дорівнював би  $45^\circ$ , а  $\sigma_{риз} \rightarrow \sigma_{cm}$ . Тому основною умовою зменшення енергоємності обробки слід розглядати зниження інтенсивності тертя в зоні різання та зносу інструменту за рахунок застосування сучасних збірних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями [9].

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 високооборотві 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, м/с<sup>3</sup>), яка співпадає із залежністю умовного напруження різання  $\sigma$ . Спочатку було визначено значення  $\sigma$  на операції плоского шліфування на плоскошліфувальному верстаті моделі 3Л723АФ2И абразивним кругом ПП450x80x203 64С 40СМ деталі зі сталі 3 із режимом різання: глибина шліфування  $t = 0,01$  мм; швидкість деталі  $V_{дет} = 15$  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  $Q = 3750$  мм<sup>3</sup>/хв (рис. 4). Тоді енергоємність обробки дорівнює  $A_{num} = N/Q = 22,4$  Дж/мм<sup>3</sup>, а умовне напруження різання  $\sigma = 22400$  Н/мм<sup>2</sup>. Як видно, умовне напруження різання  $\sigma$  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  $\theta$  було використано аналітичну залежність [10]:

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

де  $c$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·град);  $\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·град);  $R_{кр}$  – радіус шліфувального круга, м.

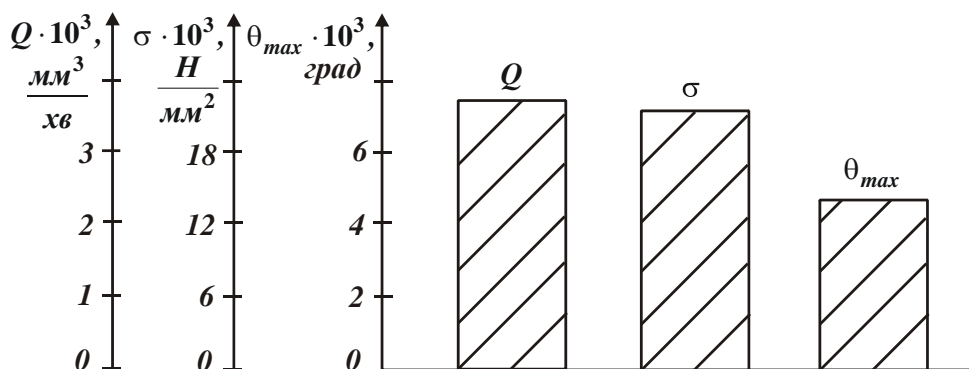


Рисунок 4 – Значення параметрів  $Q$ ,  $\sigma$  і  $\theta_{max}$  при плоскому шліфуванні деталі зі сталі 3

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/(м<sup>3</sup>·град);  $\lambda = 40,8$  Дж/(м·с·град). Розрахунками встановлено  $\theta_{max} = 4544$  °С, що значно перевищує температуру плавлення оброблюваного матеріалу. 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  $\theta / \theta_{max}$  і  $\theta$  дорівнюють: 0,08; 0,12 і  $\theta = 363,5$  °С;  $\theta = 545$  °С (рис. 5). У цьому випадку отримані відносно невеликі значення температури різання  $\theta$  обумовлені незначною продуктивністю обробки, а також тим, що використовується лише до 12 % теплового балансу шліфування. Зі збільшенням продуктивності обробки температура різання  $\theta$  може досягти рівня температури плавлення оброблюваного матеріалу.

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

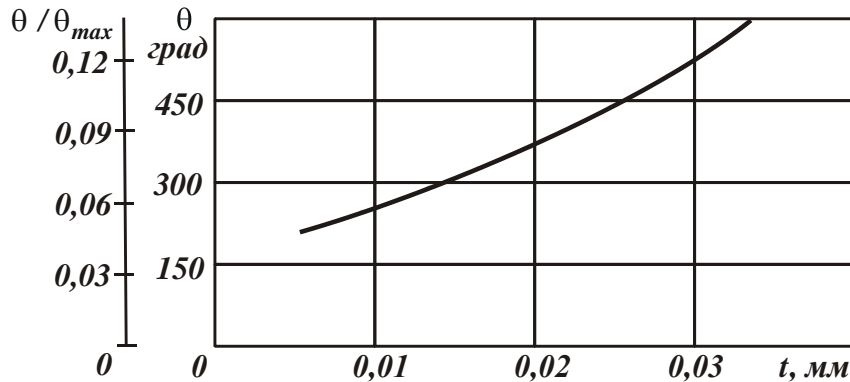


Рисунок 5 – Залежність температури різання  $\theta$  та відношення  $\theta/\theta_{max}$  від глибини шліфування  $t$

В 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 TRGX09020LDC100T, 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  $Q=V \cdot t \cdot S = 471$  мм<sup>3</sup>/хв. (рис. 6). Як видно, в даному випадку номінальна (задана) продуктивність обробки менше ніж при шліфуванні.

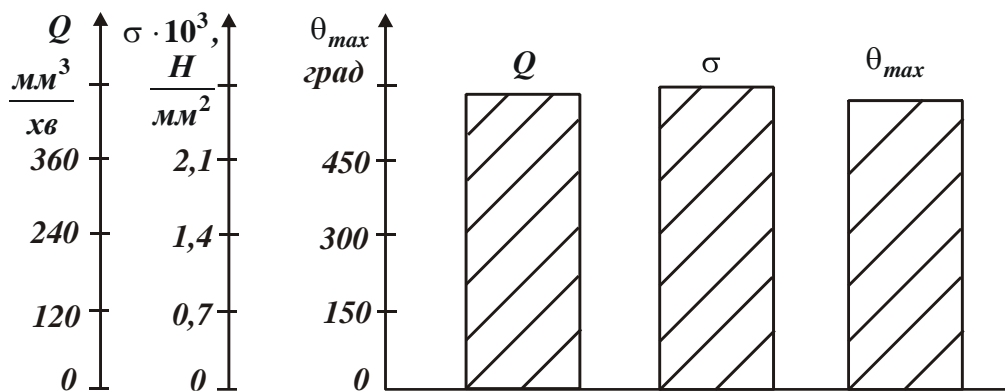


Рисунок 6 – Значення параметрів  $Q$ ,  $\sigma$  і  $\theta_{max}$  при розточуванні отворів

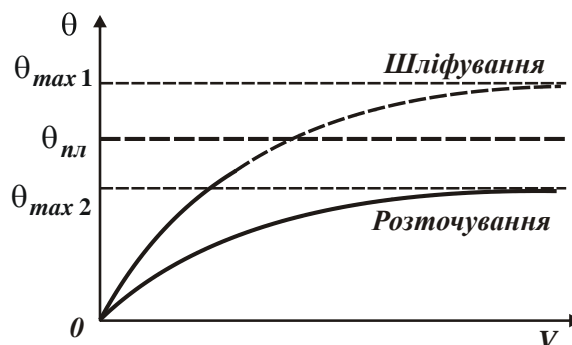


Рисунок 7 – Залежність температури різання  $\theta$  від швидкості різання  $V$

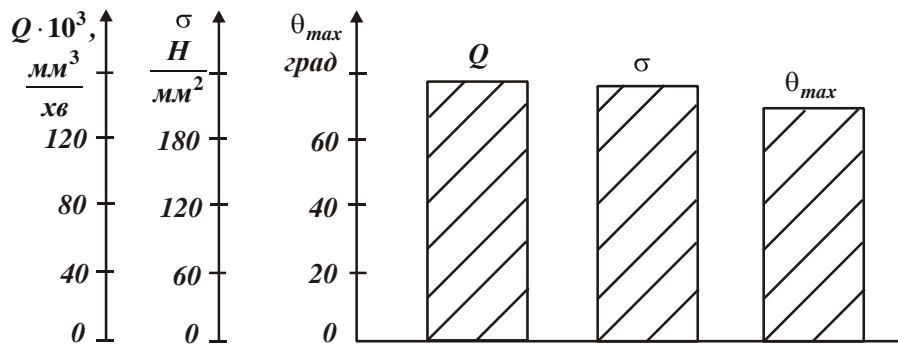


Рисунок 8 – Значення параметрів  $Q$ ,  $\sigma$  і  $\theta_{max}$  при точінні деталі "вал"

Експериментально встановлено  $N=22$  Вт. Відповідно,  $\sigma = N / Q = 2,8 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>, 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/(м<sup>3</sup>·град) для сталі 3 дорівнює  $\theta_{max} = 568$  °С. Як видно, отримане значення  $\theta_{max}$  значно менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. Відповідно, температура різання  $\theta$  приймає ще менше значення. За даних умов різання  $\theta / \theta_{max} = 0,75$ . Тоді  $\theta = 426$  °С. Це вказує на можливість суттєвого зниження теплової та силової напруженостей механічної обробки, забезпечення високої якості обробленої 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. В цьому випадку з'являється можливість суттєвого підвищення продуктивності обробки фактично без збільшення температури різання  $\theta$ , оскільки вона незначно відрізняється від максимальної температури різання  $\theta_{max}$  (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.

В 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/(м<sup>3</sup>·град); коефіцієнт температуропровідності –  $a = 32,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Режим різання:  $V = 175$  м/хв;  $t = 1,5$  мм;  $S = 0,6$  мм/об. Продуктивність обробки  $Q = V \cdot t \cdot S = 157,5 \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/хв. (рис. 8). Експериментально встановлено, що  $N = 600$  Вт. Відповідно, енергоємність обробки (питома робота різання) дорівнює:  $A_{num} = N / Q = 0,228$  Дж/мм<sup>3</sup>, а  $\sigma = 228$  Н/мм<sup>2</sup>. 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.

Розрахунками встановлено, що максимальна температура різання в цьому разі дорівнює  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho) = 71$  °С. Відповідно,  $\theta / \theta_{max} \approx 1$ ;  $\theta \approx 70$  °С. Ці значення  $\theta_{max}$  і  $\theta$  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  $\sigma$ ) і температуру різання щодо операції шліфування. При цьому температура різання  $\theta$  може досягати значення максимальної температури різання  $\theta_{max}$  (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  $\theta_{max}$ , що значно менше температури плавлення оброблюваного матеріалу.

В роботі проведено експериментальні дослідження операції фрезування деталі – фільера макаронна "мушля", виготовленої з латуні ЛС59, на сучасному верстаті FANUC ROBODRILL  $\alpha$ -D21iB. Інструмент – твердосплавна мікрофреза LNE0808,  $D=0,8$  мм. Для латуні ЛС59:  $c \cdot \rho = 3,23 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град);  $a = 32,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/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  $Q = D \cdot t \cdot S = 192$  мм<sup>3</sup>/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/мм<sup>3</sup>, а  $\sigma = 937$  Н/мм<sup>2</sup>. 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.

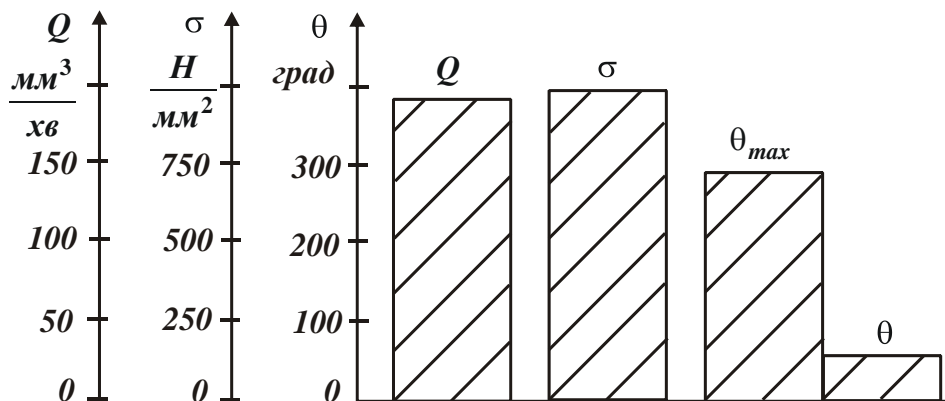


Рисунок 9 – Значення параметрів:  $Q$ ,  $\sigma$ ,  $\theta_{max}$  і  $\theta$  при фрезуванні деталі – фільера макаронна "мушля"

В 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 оброблених поверхонь. Також, завдяки застосуванню спеціально розроблених сучасних твердосплавних 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

Розроблено уточнену математичну модель визначення умовного напруження різання лезової обробки на основі встановлення аналітичної залежності для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу. Показано, що у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу 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. Показано, що зменшити силову і теплову напруженість операції шліфування дуже складно із-за інтенсивного тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом. Отже можливості підвищення продуктивності за умов забезпечення високої якості обробки при шліфуванні дуже обмежені. Для цього потрібно застосовувати сучасні технології високошвидкісної лезової обробки на високооберткових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "оброблювальний центр", які, як встановлено в роботі, характеризуються надзвичайно високими технологічними можливостями.

## Список використаних джерел:

1. Технология машиностроения / Якимов А. В. и др. – Киев – Одесса: 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. Армарего И. Дж. Обработка металлов резанием / И. Дж. Армарего, 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. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В. В. Швец. – Москва: Машиностроение, 1967. – 63 с.
6. Новиков Ф. В. Аналитическое определение технологических параметров механической обработки / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский // 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.

**Новиков Ф. В., Полянский В. И. Условия снижения силовой и тепловой напряженностей процесса механической обработки.** Показана определяющая роль условного напряжения резания в формировании параметров силовой напряженности процесса резания. Установлено, что условное напряжение резания при лезвийной обработке может до 10 раз и более превышать предел прочности на сжатие обрабатываемого материала. Это связано с интенсивным трением в зоне резания. Разработана уточненная математическая модель определения условного напряжения резания лезвийной обработки на основе установления аналитической зависимости для расчета условного угла сдвига обрабатываемого материала. Показано, что в формировании условного угла сдвига обрабатываемого материала преобладает радиальная составляющая силы резания, которая и приводит к его значительному уменьшению (в 1,5 раза) по отношению к расчетным значениям, полученным по известным аналогичным зависимостям. При этом в расчетах тангенциальной составляющей силы резания следует учитывать только ее часть, при которой в условной плоскости сдвига касательное напряжение достигает предела прочности на сдвиг обрабатываемого материала. Это позволило уточнить расчет параметров силовой и тепловой напряженностей механической обработки и обосновать условия их снижения путем снижения интенсивности трения в зоне резания. Также уточнена формула профессора Зворикина К. О. по определению условного угла сдвига обрабатываемого материала.

На основе проведенных экспериментальных исследований технологических операций механической обработки сложнопрофильной формирующей оснастки для пищевой промышленности установлено, что в условиях лезвийной обработки энергоемкость и максимальная температура резания принимают значительно меньшие значения, чем при шлифовании. Показано, что уменьшить силовую и тепловую напряженность операции шлифования очень сложно из-за интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом. Следовательно, возможности повышения производительности при обеспечении высокого качества обработки при шлифовании очень 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. Так, производительность обработки при этом увеличилась до 10 раз, что позволило эффективно перейти от крупносерийного к мелкосерийному и даже единичному производству сложнопрофильной формирующей оснастки для пищевой промышленности в соответствии с требованиями рынка.

*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. Conditions for reducing the power and thermal stresses of the machining process.** The determining role of the conditional cutting stress in the formation of the parameters of the force intensity of the cutting process is shown. It is established that the conditional cutting stress during blade machining can be up to 10 times or more higher than the compressive strength of the workpiece. This is due to intense friction in the cutting area. The specified mathematical model of definition of conditional stress of cutting of blade processing on the basis of establishment of analytical dependence for calculation of conditional angle of shift of the processed material is developed. It is shown that the radial component of the cutting force prevails in the formation of the conditional shear angle of the processed material, which leads to its significant reduction (1.5 times) relative to the calculated values obtained by known similar dependences. In the calculations of the tangential component of the cutting force should take into account only its part, at which in the conditional shear plane the tangential stress reaches the shear

strength of the workpiece. This allowed to clarify the calculation of the parameters of force and heat stresses of machining and to justify the conditions for their reduction by reducing the intensity of friction in the cutting zone. Also the formula of professor Zvorykin KO on definition of a conditional angle of shift of the processed material is specified.

On the basis of the conducted experimental researches of technological operations of mechanical processing of complex-forming forming equipment for the food industry it is established that in the conditions of blade processing energy consumption and the maximum cutting temperature take much smaller values than at grinding. It is shown that it is very difficult to reduce the force and thermal stresses of the grinding operation due to the intensive friction of the wheel connection with the processed material. Therefore, the possibilities of increasing productivity under conditions of high quality processing during grinding are very limited. This requires the use of modern technologies of high-speed blade processing on high-speed CNC machines such as "machining center", which, as established in the work, are characterized by extremely high technological capabilities. Thus, the productivity of processing has increased up to 10 times, which allowed to effectively move from large-scale to small-scale and even artificial production of complex molding equipment for the food industry in accordance with market requirements.

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

Рецензент: д-р техн. наук, проф. ГБУЗ "ПГТУ"

*Статья поступила 12.11.2021 г.*