

## МАШИНОЗНАВСТВО. ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.914

**Г.М. Виговський, к.т.н., доц.**  
*Житомирський державний технологічний університет*

### ВИСОКОШВИДКІСНА ОБРОБКА. СТРУЖКОУТВОРЕННЯ

*На основі розгляду існуючих досліджень процесів стружкоутворення при високошвидкісній обробці поверхонь визначені напрямки розвитку подальших досліджень.*

**Актуальність проблеми.** Серед багатьох методів виготовлення деталей машин та обладнання обробка різанням складає переважну долю, 60–95 %, у загальній трудомісткості обробки деталей. Тому значної актуальності набуває проблема підвищення продуктивності обробки різанням при заданій точності та якості оброблених поверхонь деталей.

Одним із шляхів суттєвого підвищення продуктивності процесів є високошвидкісна обробка (ВШО), але при цьому мають місце суттєві відмінності процесу різання та процесів формоутворення, що викликає необхідність розгляду особливостей процесів стружкоутворення на основі існуючих даних. Суттєвим фактором, який обмежує використання сучасних інструментальних матеріалів та високопродуктивних режимів різання при ВШО, є висока теплова напруженість процесу різання. Тому розгляд факторів, які впливають на процеси стружкоутворення та теплову напруженість процесів різання при ВШО, є дуже важливим для подальшого розвитку процесів різання.

**Мета роботи.** Полягає в розгляді існуючих досліджень процесу стружкоутворення при високошвидкісній обробці металів і сплавів та визначення основних проблем, які необхідно вирішити для його широкого застосування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота пов'язана з виконанням НДР Житомирського державного технологічного університету "Удосконалення процесів обробки плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням" РК № 01060013148 та "Прогресивні інструменти та технологічні процеси для виготовлення деталей верстатів" РК № 01060013149.

**Основна частина.** Прийнято вважати [1], що при ВШО внаслідок великої інтенсивності тепловиділення при контактних шарів заготовки та інструменти нагріваються практично миттєво, час контакту досить малий ( $10^{-6}$ – $10^{-8}$  с) і процес надшвидкісного різання є адиабатичним.

З точки зору термодинамічних уявлень про процес деформації та руйнування оброблюваного матеріалу, необернено поглинену енергію деформації можна поділити на дві складові [2]. Перша, досить невелика частина цієї енергії, обумовлена накопичуванням у деформуючих об'ємах схованої енергії  $\bar{\Psi}_s(\tau)$ , що пов'язано із зародженням і накопичуванням у деформуючих об'ємах різноманітного роду дефектів і пошкоджень. Схована (накопичена) енергія впливає в основному на зміцнення і розміцнення матеріалу і є, таким чином, однозначною, інтегральною та кількісною характеристикою його пошкодженості в процесі деформації.

Друга, основна частина енергії пластичної деформації (до 98 % [2]), за рахунок коливального руху дефектів і процесу повернення (знищення субмікро- і мікротріщин) необернено трансформується в теплову енергію, яка накопичується в деформуючих об'ємах матеріалу у вигляді тепломісткості  $\Delta H_T$ , підвищуючи температуру контакту, і розсіюється в навколишнє середовище за рахунок тепловиділення і теплообміну.

При пластичній деформації формується дислокаційна субструктура, обумовлена самоорганізацією. Рушійною силою процесу є прагнення системи до локального зниження ентропії шляхом обміну енергією з навколишнім середовищем.

Дисипативна функція  $\bar{\Psi}_d$  процесу пластичної деформації оброблюваного матеріалу в зоні різання визначена [3]:

$$\bar{\Psi}_d = C_d \Delta \tau_p \Delta \varepsilon \varepsilon', \quad (1)$$

де  $C_d$  – коефіцієнт, який враховує граничну густину дислокацій в одиниці активаційного об'єму;  $\Delta \tau_p$  – зміцнення деформованого матеріалу;  $\Delta \varepsilon$  – приріст ступеня пластичної деформації в зоні обробки;  $\varepsilon'$  – швидкість пластичної деформації в при контактних шарах оброблюваного матеріалу.

Встановлено [3], що зміцнення і ступінь пластичної деформації можуть бути виражені функцією температури, модифікованою за швидкістю деформації:

$$\Theta_m = \Theta \left( 1 - k_1 \ln \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} \right), \quad (2)$$

де  $k_1$  – постійна, яка вибирається таким чином, щоб зміни напружень  $\Delta\tau_p$  при температурі  $\Theta_0$  і швидкості деформації  $\varepsilon'_0$  були такими самими, як при швидкості  $\varepsilon'$  і температурі  $\Theta_m$ .

Таким чином, швидкість пластичної деформації поряд з температурою різання є одним з основних факторів, що визначає процес дисипації механічної енергії в теплову.

Швидкість деформації:

$$\varepsilon' = v_c / C_{cp},$$

де  $v_c$  – швидкість сходу стружки по передній поверхні інструмента, дорівнює  $v/K_a$ ;  $C_{cp}$  – товщина загальмованого шару стружки в зоні її пластичного контакту з передньою поверхнею інструмента.

Встановлено [3], що  $C_{cp}$  є термічно активованим параметром, який експоненціально знижується зі зростанням середньої температури різання:

$$C_{cp} = C'_{cp} f(\Theta), \quad (3)$$

де  $C'_{cp}$  – товщина так званого ламінарного [4] прирізцевого шару стружки з максимальною кривизною лінії текстури, дорівнює  $C_s a \frac{\cos(\beta-\gamma)}{\sin\beta}$ ;  $C_s$  – постійна, дорівнює 0,1–0,125;  $\beta$  – кут зсуву.

Відомо, що в ламінарному потоці поле швидкостей відносного ковзання, що визначає швидкість деформації зсуву, подібно температурному полю [5], яке в напрямі координати  $Z$ , перпендикулярної до передньої поверхні інструмента, описується рівнянням:

$$\Theta_z = \Theta_n \exp\left(-\frac{v_z \cos \gamma z}{\omega}\right), \quad (4)$$

де  $\Theta_n$  – температура на межі поділу стружки (її мінімального шару) та передньої поверхні інструмента (при  $z=0$ );  $v_z$  – швидкість руху шарів стружки;  $\omega$  – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу.

З рівняння (4) швидкість деформації приконтактних шарів стружки:

$$\varepsilon' = \frac{dv}{dz} = \frac{\omega}{\cos \gamma z^2} \ln\left(\frac{\Theta_z}{\Theta_n}\right) - \frac{\omega}{\cos \gamma z} \frac{d \ln \Theta_z}{dz}. \quad (5)$$

Зміна швидкостей руху металу в зоні вторинних деформацій за напрямком  $z$ , перпендикулярним до передньої поверхні інструмента, при  $z \leq C'_{cp}$  розраховується:

$$v_z = v_c \left( \frac{z}{C'_{cp}} \right)^n, \quad (6)$$

де  $v_c$  – швидкість сходу стружки за межами контакту;  $n$  – показник ступеня.

В цьому випадку з рівняння (5) з врахуванням концентрації теплоти в ламінарному шарі зони пластичного контакту може бути визначено співвідношення:

$$\frac{d \ln \Theta_z}{dz} = \frac{\Theta_n}{\Theta_z} \left( -\frac{v_z \cos \gamma}{\omega} \right) (n+1) \exp(-k_d), \quad (7)$$

де  $k_d$  – коефіцієнт концентрації теплоти в ламінарному шарі, рівний  $\frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{0,43 \rho c \sqrt{v a \cos(\beta-\gamma)}}{\sqrt{(\lambda \rho c)_p} + \sqrt{\lambda \rho c (1 + \sin \gamma)}}$ ;  $\lambda$ ,

$\rho$ ,  $c$  – коефіцієнт теплопровідності, густина і теплоємність відповідно матеріалів різця (з індексом “ $p$ ”) і деталі.

Місце пластичного контакту інструмента зі стружкою характеризується найбільшим значенням температури в зоні різання. Середнє значення цієї температури  $\Theta_n$ , очевидно, повинно бути близьке до температури різання, вимірюваної методом природної термопари, тобто середньої температури різання [5]. Середнє значення товщини ламінарного (загальмованого) шару, за межами якого відбувається стабілізація швидкостей течії стружки при  $v_z = v_c$ , за даними [4], дорівнює:  $z = C'_{cp} = 0,215 a_c$ . У межах цієї зони відбувається зміна температури за товщиною стружки від  $\Theta_z = \Theta_n = \Theta$  при  $z = 0$  до  $\Theta_z = \Theta_A = 0,215 \Theta_n$  [5] при  $z = C'_{cp}$ .

Таким чином, з урахуванням викладених вище припущень можуть бути прийняті граничні умови:

$$\begin{aligned} v_z &= 0; \Theta_z = \Theta \text{ при } z = 0, \\ v_z &= v_z; \Theta_z = \Theta_A \text{ при } z = C'_{cp}. \end{aligned} \quad (8)$$

Середня швидкість деформації в зоні пластичного контакту стружки з передньою поверхнею з рівняння (5) із врахуванням виразів (7) і (8) може бути визначена:

$$\varepsilon' = \frac{v_c}{C'_{cp}} \left[ \frac{\Theta}{\Theta_A} (n+1) \exp(-k_d) - \frac{\omega}{v_c C'_{cp} \cos \gamma} \ln \left( \frac{\Theta}{\Theta_A} \right) \right], \quad (9)$$

де  $\Theta_A$  – максимальна температура в зоні стружкоутворення ( $0,215\Theta_{nl}$ ).

Враховуючи, що температура різання зі збільшенням швидкості різання прагне до граничного значення температури плавлення  $\Theta_{nl}$  оброблюваного матеріалу, експериментальним і розрахунковим шляхом встановлено [5]:

$$\exp(-k_d) \cong \frac{\Theta_{nl} - \Theta}{\Theta_{nl}}. \quad (10)$$

З урахуванням цього виразу середня швидкість деформації в зоні максимального тепловиділення на передній поверхні інструмента може бути визначена [5]:

$$\varepsilon' = \frac{v_c}{C'_{cp}} \left[ 4,65 \frac{\Theta(\Theta_{nl} - \Theta)}{\Theta_{nl}^2} (n+1) - \frac{\omega}{v_c C'_{cp} \cos \gamma} \ln \left( \frac{4,65\Theta}{\Theta_{nl}} \right) \right]. \quad (11)$$

При  $n=1$

$$\varepsilon' = \frac{v}{0,215ak^2} \left[ 9,3 \frac{\Theta(\Theta_{nl} - \Theta)}{\Theta_{nl}^2} (n+1) - \frac{4,65}{P \cos \gamma} \ln \left( \frac{4,65\Theta}{\Theta_{nl}} \right) \right], \quad (12)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon'_d f_{\Theta}, \quad (13)$$

де  $f_{\Theta}$  – безрозмірна функція, яка враховує вплив температури, градієнта швидкостей, товщини зрізу і температуропровідності оброблюваного матеріалу і дорівнює  $9,3 \frac{\Theta(\Theta_{nl} - \Theta)}{\Theta_{nl}^2} - \frac{4,65}{P \cos \gamma} \ln \left( \frac{4,65\Theta}{\Theta_{nl}} \right)$ ;  $\varepsilon'_d$  – середня швидкість деформації, дорівнює  $\frac{v}{0,215ak^2}$  [4].

Таким чином, отримана залежність розрахунку швидкості пластичної деформації враховує закономірність розподілу швидкостей руху деформованого матеріалу в межах товщини застійної зони, вплив температури та умов її локалізації в приконтактних шарах стружки, а також деякі теплофізичні параметри матеріалів деталі й інструмента ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $\omega$ ,  $\Theta_{nl}$ ).

На рис. 1 представлено [5] вплив величини і знака прискорення різання на рівень та характер зміни функції  $f_{\Theta}$  і температуру різання при точінні сплаву ХН73МБТЮ різцем ВК8 у діапазоні раціональних швидкостей різання при обробці жароміцних нікелевих сплавів.

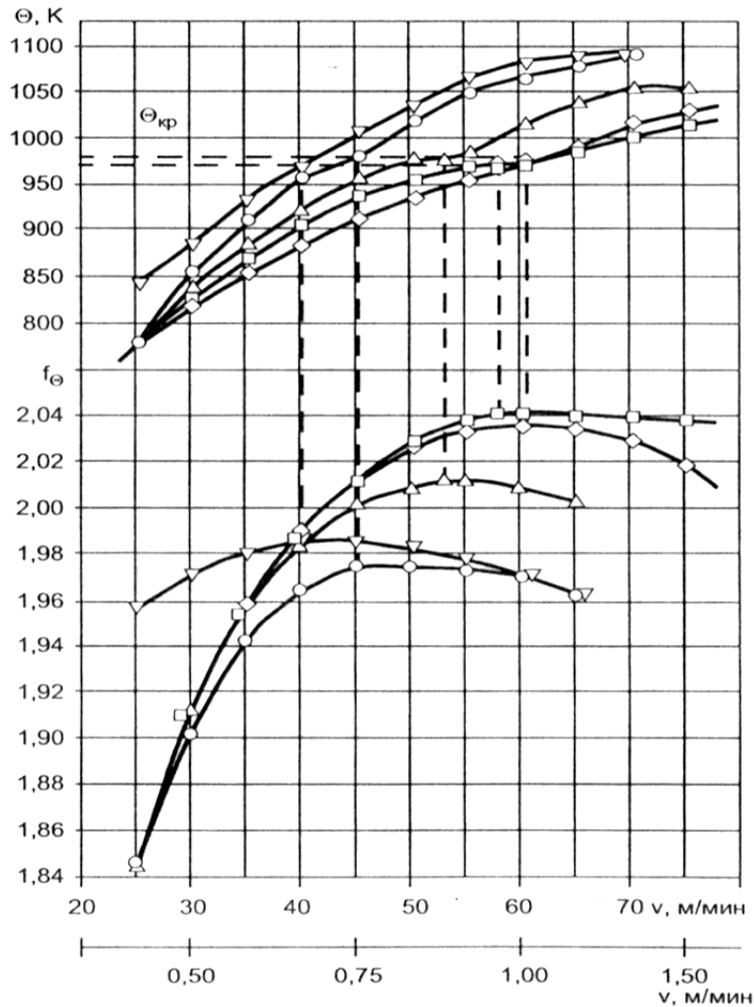


Рис. 1. Вплив швидкості, величини та знака прискорення різання на рівень і характер поведінки функції  $f_{\Theta}$  та температуру різання при точінні сплаву ХН73МБТЮ різцем ВК8 ( $S = 0,09$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм,  $\circ - a_v = 0$ ;  $\Delta - 2,7$  м/хв.<sup>2</sup>;  $\diamond - 6,0$  м/хв.<sup>2</sup>,  $\nabla - 3,6$  м/хв.<sup>2</sup>,  $\square - 3,6$  м/хв.<sup>2</sup> [5])

Як загальну закономірність слід зазначити, що для позитивних прискорень різання зі збільшенням величини  $a_v$  зростає швидкість різання  $v_{кр}$ , при якій спостерігається максимум функції  $f_{\Theta}$ , але температура різання  $\Theta_{кр}$ , що відповідає цьому максимуму, залишається практично постійною (980–990° К). Для негативного прискорення  $a_v = -3,6$  м/хв.<sup>2</sup> максимум функції  $f_{\Theta}$  спостерігається при більшій температурі  $\Theta_{кр} = 1090^{\circ}$  К, що відповідає викладеним вище уявленням про структурно-термічну активацію при контактних шарів матеріалів деталі та інструмента в цьому температурному діапазоні.

Прискорення різання впливає на рівень залежності  $f_{\Theta}(v)$ , який визначається швидкістю дисипації механічної енергії та перетворення її на теплову енергію, що відводиться із зони контакту. Зі збільшенням швидкості різання функція  $f_{\Theta}$  зростає інтенсивно, досягаючи максимуму при  $\Theta_{кр}$ . У зоні швидкостей (температур) різання вище  $v_{кр}(\Theta_{кр})$  спостерігається менш інтенсивне зниження  $f_{\Theta}$ , при цьому слід зазначити, що існує прискорення  $3,6$  м/хв.<sup>2</sup>, при якому забезпечується максимальний рівень і стабілізація значень  $f_{\Theta}$  у значному діапазоні швидкостей різання. Встановлено [3], що в цьому діапазоні прискорень різання підвищується інтенсивність джерела теплоти  $q_{II}$  на передній поверхні інструмента в порівнянні з високими прискореннями (6,0 м/хв.<sup>2</sup>) або стаціонарним різанням. Разом з тим, при цьому

забезпечується і найменший рівень інтенсивності тепловиділення на передній  $q_H$  і задній  $q_3$  поверхнях інструмента в порівнянні з інтенсивністю джерела  $q_A$  в зоні зсуву.

Значний інтерес становить вплив високих і надвисоких швидкостей різання на процеси деформації і теплоутворення в зоні обробки. За даними [5] розраховані значення  $\varepsilon'$  і  $f_\Theta$  надшвидкісного різання деформуючих алюмінієвих сплавів (рис. 2) у співставленні з температурою різання, виміряною методом природної термопари. Видно, що температура зі збільшенням швидкості різання збільшується, асимптотно наближаючись до температури плавлення оброблюваного матеріалу ( $923^\circ\text{K}$ ).

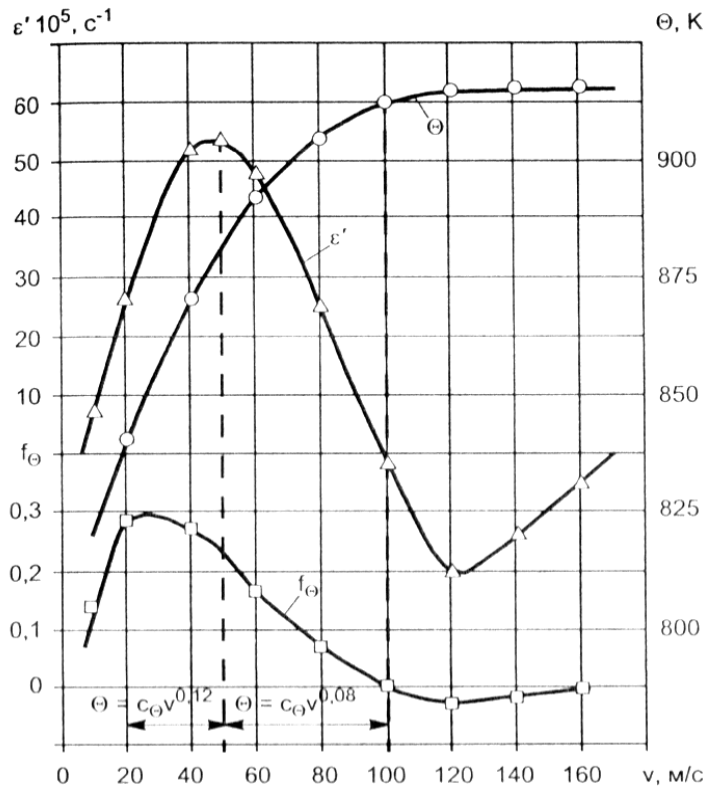


Рис. 2. Залежність температури різання і швидкості деформації при надшвидкісному різанні деформуючого алюмінієвого сплаву (128 НВ) від швидкості різання [5] (різець ВК8,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $t = 2$  мм,  $S = 0,08$  мм/об.)

Залежності  $f_\Theta$  і  $\varepsilon'$  є більш складними. Функція  $f_\Theta$  має максимум при швидкості 20 м/с і потім знижується до мінімуму при  $v = 120$  м/с, проходячи через нульове значення при швидкості 100 м/с. Швидкість деформації максимальна при  $v = 45 \div 50$  м/с, при цьому відбувається помітне зниження росту температури різання [5]. При подальшому збільшенні швидкості різання  $\varepsilon'$  знижується до нуля при  $v = 100$  м/с, що відповідає умові стабілізації температури. При  $v > 100$  м/с швидкість деформації набуває негативного значення, що відповідно до прийнятих для отримання залежності (12) умов подібності температурного поля і поля швидкостей течіїв приконтактних шарах стружки відповідає зміні напрямку теплового потоку і його концентрації в тонких шарах різального інструмента та збільшенню тепловідводу через задню поверхню різального клина в деталь. Таким чином [5], умовною межею високошвидкісного різання, при якому настає різке зниження інтенсивності зростання температури різання, можна вважати швидкість різання, що відповідає максимуму швидкості деформації приконтактних шарів стружки, а надшвидкісне різання як адіабатичний процес здійснюється при швидкостях (температурах) різання, забезпечуючи  $\varepsilon' \leq 0$ .

Результати розрахунків [5], виконаних для обробки жароміцного сплаву ХН73МБТЮ, коефіцієнт температуропровідності якого більш ніж у 20 разів менший, ніж алюмінієвого сплаву, наведені на рис. 3. Встановлено, що максимум швидкості деформації буде забезпечуватися при температурі  $\Theta = 0,850\Theta_{пл} = 1383^\circ\text{K}$ , межею високошвидкісного різання будуть швидкості порядку 4,5–5,0 м/с, а

надшвидкісне різання – при швидкості більш 10 м/с і температурі, близькій до температури плавлення жароміцних нікелевих сплавів (порядку 1620–1630° К).

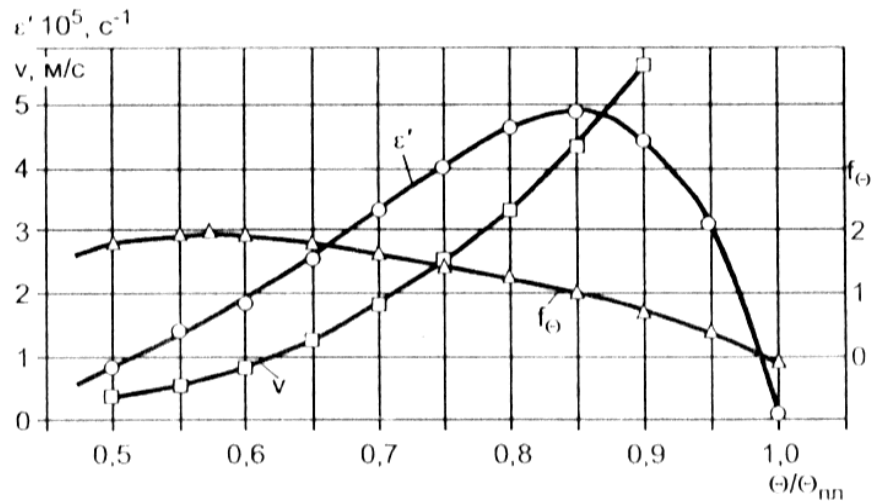


Рис. 3. Вплив відносної температури на швидкість деформації приконтактних шарів стружки при точінні сплаву ХН73МБТЮ різцем ВК8 ( $S = 0,4$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм) [5]

Стандартні тверді сплави зберігають свої різальні властивості до температури 1200–1300° К, що дозволяє оброблювати алюмінієві сплави на швидкостях близько 200 м/с і більше, але такі швидкості не можуть бути використані для обробки жароміцних нікелевих і титанових сплавів. Для цього випадку необхідні дослідження з використання нових сучасних інструментальних матеріалів, таких, як мінералокераміка, сибарит та інших надтвердих матеріалів, які мають високу температуру червоностійкості та малу хімічну спорідненість з оброблюваними матеріалами. Одним із перспективних напрямів в області високо- і надшвидкісного різання є використання ефективних технологічних мастил і методів охолодження, які можуть знизити межу високошвидкісного різання до рівня раціональних або граничних температур експлуатації інструментальних матеріалів.

#### Висновки:

1. Наведені дослідження дозволяють зробити висновок, що ефективність методу обробки при ВШО значною мірою залежить від інтенсивності термомеханічних явищ і пружно-пластичних деформацій.

2. Дослідженнями [1–5] встановлено, що швидкість пластичної деформації поряд з температурою різання є одним з основних факторів, який визначає процес дисипації механічної енергії в теплову.

3. Отримані залежності швидкості пластичної деформації дають можливість аналізу процесу високошвидкісного різання для раціонального вибору режимів обробки з урахуванням процесів дисипації механічної енергії в теплову.

4. Розроблені математичні залежності дозволяють встановити межі процесів швидкісного та надшвидкісного різання для різних оброблюваних матеріалів.

5. Виникає необхідність аналізу процесів різання при високошвидкісній обробці сучасними інструментами, які оснащені надтвердими полікристалічними матеріалами, з використанням методик, наведених вище.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Шустер Л.Ш. Влияние элементов режима резания на температурно-скоростные условия пластической деформации обрабатываемого материала / Л.Ш. Шустер, В.В. Постнов // Технология машиностроения. – 2003. – № 6. – С. 16–20.
2. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. – М. : Наука, 1992. – 160 с.
3. Постнов В.В. Процессы на контактных поверхностях, износ режущего инструмента и свойства обработанной поверхности : учеб. пособие / В.В. Постнов, Б.У. Шарипов, Л.Ш. Шустер. – Свердловск : Уральский государственный университет, 1988. – 224 с.

4. *Лоладзе Т.Н.* Износ режущего инструмента / *Т.Н. Лоладзе.* – М. : Машгиз, 1958. – 354 с.
5. Тепловые явления и обрабатываемость резанием авиационных материалов / под ред. П.И. Бобрика. – М. : Машиностроение, 1966. – Вып. 64. – 179 с.

ВИГОВСЬКИЙ Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка металів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Подано 12.01.2010