

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.914

І.В. Кузьо, М.Л. Білявський, Ю.П. Шоловій
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра

ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ МАШИН У ПРОЦЕСІ ЇХНЬОГО ВИГОТОВЛЕННЯ

© Кузьо І.В., Білявський М.Л., Шоловій Ю.П., 2011

Розроблено математичну модель формування залишкових напружень у поверхневому шарі обробленої деталі за реалізації технології різання з попереднім пластичним деформуванням.

Algorithm of mathematic models and results of machining flat surface after plastic deforming by combined by special tool are defined.

Постановка проблеми. Відомо, що машини, які конструктивно однакові і виготовлені з одних матеріалів, часто мають різну надійність. Причиною цього здебільшого є різні технології виготовлення їхніх деталей і передусім на фінішних операціях процесів, за яких формуються кінцеві властивості і стан робочих поверхонь, що визначають їхні експлуатаційні показники. Сьогодні, як показує світовий досвід, пріоритетним напрямом розвитку науково-технічного прогресу в машинобудуванні є впровадження прогресивних технологій. Особливе значення має подальше вдосконалення технології механічної обробки, тому що ці процеси становлять понад 40 % від загальної трудомісткості виготовлення машин, а 80 % деталей підлягають механічній обробці. З вдосконаленням машин обсяг механічної обробки збільшуватиметься, а центр ваг переміститься в область фінішних методів обробки – такі прогнози спеціалістів міжнародної організації технологів-машинобудівників. При цьому точність і якість пов'язані із застосуванням нових, ефективних процесів обробки, зокрема комбінованих фізико-механічних з використанням інструментів з мінералокераміки та надтвердих матеріалів.

У сучасній технології машинобудування основним напрямом розвитку і застосування інструментів з цих матеріалів є високошвидкісне різання не тільки на чистових операціях (як було ще порівняно недавно), але і на напівчистових, а також попередніх за збільшення інтенсивності знімання припуску з заготовок з чавунів, сталей, алюмінієвих і кольорових сплавів від 50 – 100 до 1000 – 3000 см³/хв. За істотного розширення областей застосування інструментів із зазначених матеріалів помітно зменшиться витрата дефіцитного твердого сплаву.

Сьогодні високошвидкісне різання поширене під час фрезерування, тому що кінцеві і торцеві фрези, симетричні щодо своєї осі, мають прийнятні розміри і масу і легко піддаються балансуванню. Крім того, під час фрезерування відсутня проблема дроблення стружки.

Отже, розробка й освоєння нових видів продукції, підвищення її якості, покращання техніко-економічних показників – це засади, на яких ґрунтуються зростання продуктивності праці, економія матеріалів та енергії, зниження експлуатаційних витрат і капіталовкладень у споживачів продукції.

У роботах Г.Г. Карюка, Д.С. Кирюшина, Г.М. Виговського [1–3] встановлено, що під час оброблення залізобетонних сплавів інструментом, оснащеним композитом 10, зміна швидкості різання в інтервалі 180–660 м/хв істотно впливає на зміну шорсткості R_a обробленої поверхні. Такі результати дають підстави рекомендувати збільшити швидкість різання з метою підвищення ефективності механічної обробки. Проте зі зростанням швидкості різання збільшуються коливання технологічної системи, які призводять до зростання ударних навантажень інструментального

матеріалу, що призводить до зростання зношення інструмента, і як результат, формування залишкових напружень у поверхневому шарі та погіршення якості обробленої поверхні у 2 рази.

Встановлено, що під час оброблення аналогічних сплавів інструментом, оснащеним мінералокерамікою, швидкість різання також істотно впливає на R_a . Однак під час роботи гострими різцями висота мікронерівності R_a на 15–20 % нижча, ніж під час оброблення інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами [4–5]. Проте у процесі зношення інструмента, оснащеного мінералокерамікою, шорсткість зростає в 3–3,5 рази.

Аналізуючи роботи [1–5], слід відзначити, що за високих швидкостей різання значення сили різання залишається майже постійним. Металографічний аналіз [2] показав, що наслідком збільшення швидкості різання є зменшення наклепу на поверхневому шарі виробу. Якщо перед обробкою заготовка піддавалася операції зняття залишкових напруг, то за досить високої швидкості різання отримані характеристики зберігаються на обробленому виробі. Отже, перехід на високошвидкісне різання дає змогу підвищити якість поверхні, що дасть змогу у багатьох випадках виключити подальше шліфування і хонінгування.

Дуже часто високошвидкісне фрезерування ототожнюється з фрезеруванням за великих швидкостей обертання шпинделя. Це не завжди так, тому що під час фрезерування частота обертання шпинделя визначається швидкістю різання і діаметром фрези. Отже, чим більший діаметр, тим менша частота обертання за тієї самої швидкості різання, і навпаки. В такий спосіб інструмент великого діаметра, що обертається на малій швидкості, досягає такої ж швидкості різання, що і фреза малого діаметра на великій частоті обертання. Саме швидкість різання визначає, чи є фрезерування високошвидкісним.

Проте високошвидкісне різання не позбавлене і недоліків: робочий процес такої обробки супроводжується резонансними явищами у заготовці, інструменті, шпинделі та інших елементах технічної системи, що впливає на якість поверхні. У міру підвищення частоти обертання фрези відповідно і швидкості різання з'являються резонансні явища, які характеризуються інтенсивними вібраціями інструмента, поламками фрез і, як наслідок, появою дефектів на виробі. Як засіб виключення резонансних явищ рекомендується штучне накладення коливань з вищими частотами [2]. Можливо припустити, що за виключення резонансних явищ з'явиться можливість покращати якість поверхні.

У сучасному машинобудуванні існують технологічні способи обробки [6–8], які дають можливість одночасно з підвищенням оброблюваності матеріалів різанням забезпечити необхідну якість обробленої поверхні. Одне з провідних місць належить технології різання з попереднім пластичним деформуванням.

Питання розробки таких технологій різання розглядають роботи Подураєва В.М., Ярославцева В.М., Полянчикова Ю.М., Амбросімова С.К., Резанова А.І., Наумова Б.І., Усачьова Я.Г., Кодрика А.І., Крайнева Д.В., Меламеда В.І., Давидюка В.І., Посвятенка Е.К. та ін. [6–11]. Причому переважна більшість теоретичних та експериментальних досліджень забезпечення якості обробки поверхонь стосується операцій точіння, протягування та стругання інструментом, оснащеним твердим сплавом.

Можливість використання сучасних інструментальних матеріалів у технології різання з попереднім пластичним деформуванням плоских поверхонь та робочих процесів високошвидкісної механічної обробки не були достатньо вивчені та поширені.

Потенціал наукових досягнень всесвітньо відомих учених Новікова М.В., Мельничука П.П., Розенберга О.О., Клименка С.А., Мановицького О.С. [17–21] та інших в області технологічного забезпечення якості обробки залізвуглецевих сплавів інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, свідчить про пошук шляхів підвищення ефективності обробки та відхід від дискретних технологій обробки.

Отже, на підставі проведеного аналізу літературних джерел можливо висунути гіпотезу про можливість застосування технології різання з попереднім пластичним деформуванням у робочих процесах високошвидкісної механічної обробки з метою зменшення термосилових процесів в зоні обробки, зменшення загальної напруженості технологічної системи та поліпшення якості обробленої поверхні.

Формулювання мети дослідження полягає у розробленні математичної моделі формування залишкових напружень у поверхневому шарі обробленої деталі та на поверхні інструмента за реалізації технології різання з попереднім пластичним деформуванням.

Виклад основного матеріалу. Формування математичної моделі напружено-деформованого стану інструмента та поверхневого шару обробленої деталі ґрунтується на теорії малих пружних пластичних деформацій і робіт Б.А. Кравченка, які досліджують процес формування поверхневого шару деталей за механічного оброблення. У наведених нижче теоретичних дослідженнях прийняті такі допущення: 1) вплив пружного перерозподілу залишкових напружень невеликий; 2) величина залишкових напружень визначається у зоні, пов'язаній з вершиною різця, у перетині головної ріжучої кромки, яка відповідає максимальній глибині зміцнення поверхневого шару; напружено-деформований стан у цьому перетині буде приблизно відповідати плоскому напруженому станові (діаграма деформування оброблюваного матеріалу апроксимована двома прямими); 3) розглядається не одночасний вплив деформівного та різального інструмента на оброблювану поверхню; 4) вплив температури і швидкості різання на зміну фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу не враховується.

З врахуванням основних положень теорії малих пружних пластичних деформацій і робіт [2, 8, 10] глибина наклепу поверхневого шару після реалізації технології різання з попереднім пластичним деформуванням визначатиметься за математичною моделлю:

$$\begin{cases} h_n = [r + C_1 \cdot (A_R + K_R \cdot S_z \cdot s_m \cdot \sin l_k \cdot \sin j)] \cdot \cos l_k - r; \\ s_m = 3 \cdot HB = \frac{3 \cdot \sum_{i=1}^{m_d} R_{di}}{0,013 \cdot R_d^2}; \\ l_k = \arcsin \left[-\frac{r + C_1 \cdot A_R}{4C_1 \cdot K_R \cdot S_z \cdot \sin j} + \sqrt{\left(\frac{r + C_1 \cdot A}{4C_1 \cdot K_R \cdot S_z \cdot \sin j} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right]; \\ C_1 = \frac{2 \cos^2 \frac{w}{2}}{p \cdot s_r}, \end{cases} \quad (1)$$

де A_R , K_R – коефіцієнти залежності питомої рівнодіючої сили різання R від товщини зрізу, а $(R = A_R + K_R \cdot a)$; S_z – подача на зуб фрези; r – радіус при вершині різця; j – головний кут у плані; w – кут між рівнодіючою R і нормальною складовою сили різання; s_m – межа міцності оброблюваного матеріалу після попереднього пластичного деформування; HB – твердість поверхневого шару

після попереднього пластичного деформування; $\sum_{i=1}^{m_d} R_{di}$ – сумарне значення діючої сили

попереднього пластичного деформування залежно від кількості деформівних елементів m_d ; R_d – радіус деформівного елемента.

Математична модель залишкових напружень, що виникають в процесі різання з попереднім пластичним деформуванням, може бути представлена у вигляді:

$$\begin{cases} s_r = \frac{2 \cdot (A_R + K_R \cdot s_m \cdot S_z \sin l_k \sin j) \cdot \cos^2 \frac{w}{2} \cos l_k}{p \cdot (x + r - r \cdot \cos l_k)}; \\ s_m = 3 \cdot HB = \frac{3 \cdot \sum_{i=1}^{m_d} R_{di}}{0,013 \cdot R_d^2}. \end{cases} \quad (2)$$

З врахуванням сформованої залежностей (2) можливо провести обчислення залишкових напружень вздовж і поперек осі зразка за допомогою виразів:

$$\begin{cases} s_t = (s_r - s_m) \cdot \frac{E - E'}{E \cdot (1 - m^2)} \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cos^2 \frac{w}{2}\right) \cdot (m \sin^2 j + \cos^2 j) - \frac{1}{2} (\sin^2 j + m \cos^2 j); \\ s_o = (s_r - s_m) \cdot \frac{E - E'}{E \cdot (1 - m^2)} \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cos^2 \frac{w}{2}\right) \cdot (\sin^2 j + m \cos^2 j) - \frac{1}{2} (m \sin^2 j + \cos^2 j), \end{cases} \quad (3)$$

де E й E' – модулі пружності і зміцнення оброблюваного матеріалу; m – коефіцієнт Пуассона.

Отримані математичні залежності (2), (3) не враховують інтенсивність зношування різального інструмента на формування залишкових напружень на поверхні оброблюваної деталі, тому слід доповнити їх коефіцієнтом навантаження K згідно з розрахунковою схемою (рис. 1).

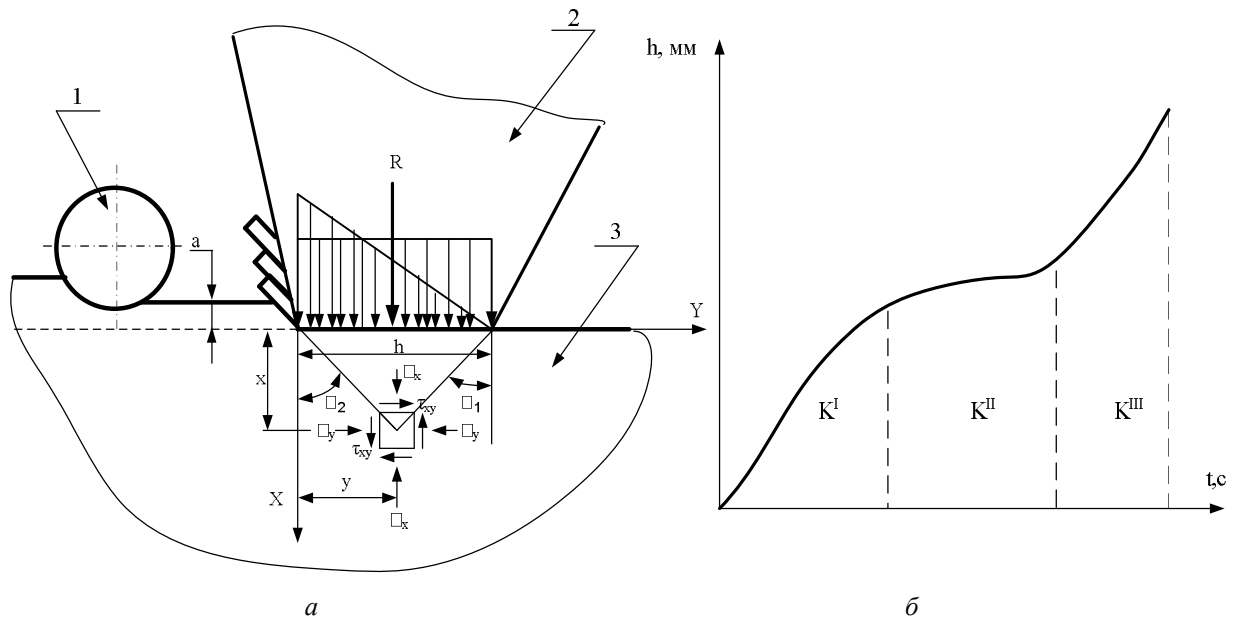


Рис. 1. Дослідження розподілу внутрішніх напружень у поверхневому шарі за реалізації технології різання з попереднім пластичним деформуванням: а – розрахункова схема; б – графік зміни поверхні зношення різального елемента; 1 – деформівний елемент; 2 – різальний елемент; 3 – деталь

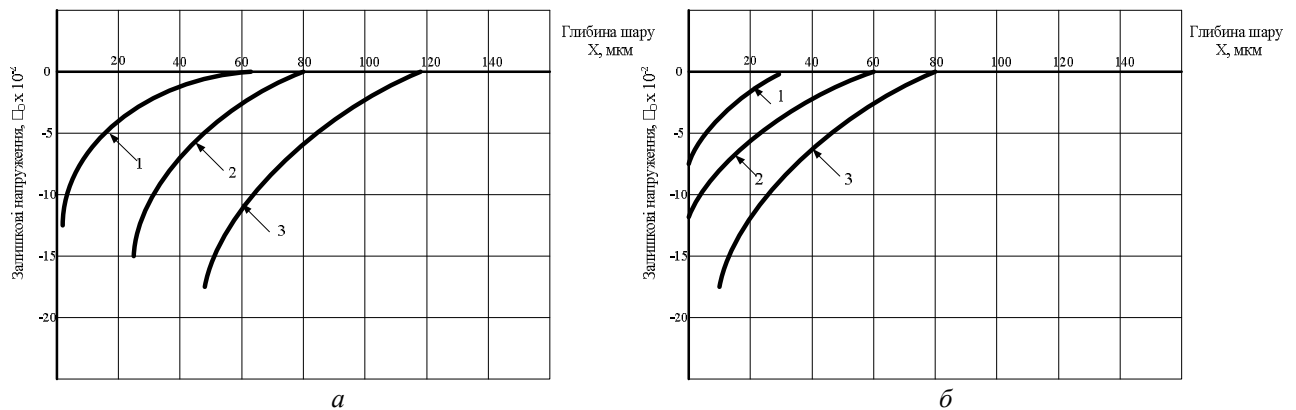


Рис. 2. Результати математичного моделювання формування залишкових напружень у поверхневому шарі деталі: а – траєкторії формують елементів ідентичні; б – деформівні елементи рухаються у напрямі, протилежному до різальних елементів; 1 – комбінована обробка інструментом, оснащеним НТМ; 2 – комбінована обробка інструментом, оснащеним ВК8; 3 – традиційна обробка ВК8

Оскільки поява фаски зношення на задній поверхні інструмента змінює форму навантаження до оброблюваної поверхні, то математична модель, яка визначатиме величину напружень, що виникають у поверхневому шарі, набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} s_r^1 = K \cdot s_r = \frac{2 \cdot (A_R + K_R \cdot s_m \cdot S_z \sin l_k \sin j) \cdot \cos^2 \frac{w}{2} \cos l_k}{p \cdot (x + r - r \cdot \cos l_k)}; \\ K = \frac{s_2}{s_1}, \end{cases} \quad (4)$$

де s_1 – радіальні напруження, що виникають у поверхневому шарі деталі на глибині x під дією зосередженої сили R ; s_2 – інтенсивність напружень, що виникають у поверхневому шарі від дії еквівалентного навантаження, розподіленої на поверхні контакту h .

$$\begin{cases} K^I = \frac{x_1}{2h} [(\Theta_2 - \Theta_1) + \sin(\Theta_2 - \Theta_1)]; \\ K^{II} = y^{max} \left\{ \frac{x^2}{h^2} \left[C - B \cdot \operatorname{tg} \Theta_1 + \sqrt{(A - C - D \operatorname{tg} \Theta_1)^2 + (B - D - A \operatorname{tg} \Theta_1)^2} \right] \right\}; \\ K^{III} = \frac{x_3}{2h} [(\Theta_2 - \Theta_1) + \sin(\Theta_2 - \Theta_1)]; \\ A = \frac{\operatorname{tg}^2 \Theta_2 - \operatorname{tg}^2 \Theta_1}{(1 + \operatorname{tg}^2 \Theta_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Theta_2)}, \quad B = \Theta_2 - \Theta_1, \quad C = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \Theta_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \Theta_1}; \\ D = \frac{\operatorname{tg} \Theta_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \Theta_2} - \frac{\operatorname{tg} \Theta_1}{1 + \operatorname{tg}^2 \Theta_1}, \quad \operatorname{tg} \Theta_1 = \frac{y - h}{x}, \quad \operatorname{tg} \Theta_2 = \frac{y}{x}. \end{cases} \quad (5)$$

В результаті узагальнення математичних залежностей (1)–(5) були проведені розрахунки залишкових напружень у поверхневому шарі деталі за реалізації різання з попереднім пластичним деформуванням, результати яких показано на рис. 2.

За результатами математичного моделювання (рис. 2) можливо зробити висновок про те, що використання траєкторії руху деформівних елементів, протилежної до траєкторії руху різальних елементів, дає змогу зменшити величину стискаючих напружень до 30 %, що приведе до поліпшення якості обробленої поверхні. За критерієм мінімального формування стискаючих залишкових напружень доцільніше реалізовувати технологію різання з попереднім пластичним деформуванням різальними елементами, оснащеними надтвердими матеріалами або мінералокерамікою.

Висновки:

1. Розроблена математична модель може бути використана під час оцінки забезпечення надійності відповідальних деталей та вузлів когенераційної машини та для оптимізації основних параметрів технології різання з попереднім пластичним деформування за критерієм зменшення стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі обробленої деталі.

2. Попереднє пластичне деформування зменшує термосилові процеси у зоні обробки та інтенсивність зношування різального інструмента, що приводить до зменшення стискаючих залишкових напруг і підвищення якості обробленої поверхні та експлуатаційних властивостей оброблених поверхонь, що дає змогу рекомендувати технологію різання з попереднім пластичним деформуванням для фінішної обробки відповідальних деталей когенераційної машини.

3. Під час теоретичних досліджень встановлено, що за комбінованого торцевого фрезерування значний вплив на залишкові напруження має розташування торцевої фрези стосовно деталі: найменші залишкові напруження формуються за найбільшого зсуву деталі від симетричного розташування. Рівень залишкових напружень при фрезеруванні у поперечному напрямі зразка нижчий, ніж за поздовжньої обробки, у зв'язку з цим пропонується, щоб деформівні елементи рухались у протилежному напрямі до різальних.

4. Передбачається, що використання різальних елементів із змінною жорсткістю дасть змогу знизити ударні навантаження і вібрації під час роботи комбінованої торцевої фрези та покращати якість обробленої поверхні.

5. У подальших дослідженнях планується розглянути можливість проектування різальних інструментів (торцеві, кінцеві фрези, розвертки) для високошвидкісної механічної обробки за модульним принципом; дослідити варіант розташування деформівного та різального інструмента в одній формоутворювальній касеті з метою підвищення ефективності технології різання з попереднім пластичним деформуванням в умовах робочого процесу високошвидкісної механічної обробки. Крім того, слід сформувати математичний апарат для дослідження формування залишкових напружень на поверхні різального інструмента в ході реалізації технології різання з попереднім пластичним деформуванням.

1. Карюк Г.Г. Технологические особенности механической обработки режущим инструментом из сверхтвёрдых материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 283 с. 2. Кирюшин Д.Е. Повышение производительности торцевого фрезерования титановых сплавов за счёт применения высокоскоростного резания: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08. – Саратов, 2007. – 204 с. 3. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь: автореф. дис. ... канд. техн. наук, – К.: НТУУ “КПІ”, 2000. – 16 с. 4. Крайнев Д.В. Повышение эффективности процесса резания сталей перлитного и аустенитного класса путем использования предварительного пластического деформирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Волгоград, 2006. – 167 с. 5. Цуканов В.Н. Разработка способа дробления стружки и выбор его эффективных технологических параметров при точении с опережающим пластическим деформированием специзделий из труднообрабатываемых сталей и сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Цуканов; Моск. высш. техн. уч-ще им. Н.Э. Баумана. – М., 1987. 6. Отений Я.Н. Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки ППД роликами: автореф. дис. канд. техн. наук. – Курган, 1988. 7. Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник машиностроения. – 1971. – № 4. – С. 64–65. 8. Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Влияние обработки резанием с опережающим пластическим деформированием на предел выносливости обработанных деталей. – М.: Изв. вузов, сер. Машиностроение, 1971. – С. 121–124. 9. Подураев В.Н., Ярославцев В.Н., Ярославцев Н.А. Эффективность обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник машиностроения, – 1972. – №12. – С. 58–61. 10. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. 11. Подураев В.Н. Автоматические регулированные и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с. 12. Подураев В.Н., Шатуров Г.Ф., Войтов В.В., Севастьянов П.В. Исследование и оптимизация процесса точения с опережающим пластическим деформированием // Всесоюзная научн.-техн. конф. "Повышение надежности и долговечности с/хозяйственных машин". – Красноярск, 1985. – С. 41. 13. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01. – К., 2002. – 456 с. 14. Новіков М.В., Шепелєв В.О., Клименко С.А., Лавріненко В.І. Технології механообробки інструментами з надтвердих матеріалів і твердих сплавів у ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2005. – Вип. 2. – С. 91–101. 15. Новиков Н.В., Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Перспективы развития процессов лезвийной обработки инструментами, оснащенными ПСТМ (начало) // Мир техники и технологий. – 2004. – №8. – С. 40–43. 16. Новиков Н.В., Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Перспективы развития процессов лезвийной обработки инструментами, оснащенными ПСТМ (окончание) // Мир техники и технологий. – 2004. – №9. – С. 32–34. 17. Новиков Н.В., Шепелєв А.А., Лавриненко В.І. О проекте программы, направленной на развитие инструментальной отрасли Украины // Инструментальный світ. – 2004 – №1 (21). – С. 4–6.