

УДК 621.9(075.8)

В.В. Ступницький, канд. техн. наук, Львів, Україна

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ, ЩО ФОРМУЮТЬСЯ В РЕЗУЛЬТАТІ ВИКОНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПЕРЕХОДУ ЛЕЗОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛІ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ**

*Деформаційна анізотропія оброблених поверхонь виробів може суттєво вплинути на міцність та корозійну стійкість виробу. Проведені імітаційні реологічні дослідження технологічних переходів механічного оброблення деталей з найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів доводять, що залежності глибини і ступеня наклепу від подачі мають екстремальний характер, тобто існує оптимальна подача, при якій наклеп поверхневого шару має найменше значення. Зниженню залишкових деформацій в цьому випадку можуть сприяти підвищення міцнісних і пониження пластичних властивостей сплавів та зменшення коефіцієнта тертя по задній поверхні різального інструменту.*

*Деформационная анизотропия обработанных поверхностей изделий может существенно повлиять на прочность и коррозионную стойкость изделия. Проведенные имитационные реологические исследования технологических переходов механической обработки деталей из наиболее репрезентативных машиностроительных материалов доказывают, что зависимости глубины и степени наклепа от подачи имеют экстремальный характер, то есть существует оптимальная подача, при которой наклеп поверхностного слоя имеет наименьшее значение. Снижению остаточных деформаций в этом случае могут способствовать повышение прочностных и понижение пластических свойств сплавов а также уменьшение коэффициента трения по задней поверхности режущего инструмента.*

*Deformation anisotropy of the machining surfaces can significantly affect the strength and corrosion resistance of the product. Conducted simulations rheological studies of mechanical machining technological operations of the most representative of engineering materials prove that according to the depth and degree of hardening of the filing are extreme in nature, i.e. there is an optimal flow, in which the residual deformation of the surface layer has the smallest value. Raising and lowering of the strength and plastic properties decrease the friction coefficient on the rear surface of the cutting tool reduces the residual strains.*

**Вступ.** Залишкові деформації (механічний наклеп) та неоднорідність властивостей, обумовлена, в першу чергу, нерівномірним розподілом накопиченої в результаті різання деформації. Деформаційна анізотропія, та пов'язані з цим залишкові макронапруження можуть суттєво знизити міцність виробу тих випадках, коли він в подальшому не підлягає термічному обробленню. Розрахунок залишкових напружень виконують за теоремою про розвантаження [2, 3, 6], згідно якого залишкові напруження після пластичної деформації дорівнюють різниці напружень при пластичній деформації і так званих розвантажувальних напружень, від яких матеріал позбавляється при розвантаженні. Якщо при розвантаженні відбуваються чисто пружні

деформації, то можна визначити розвантажувальні напруження методами теорії пружності. У роботі [1] сформульований і доведений варіаційний принцип відносно залишкових напружень, що виникають внаслідок різання, проте він не знайшов практичного використання у технології машинобудування [6].

Наклеп матеріалу поверхневого шару оброблених поверхонь деталей характеризується його мікротвердістю і рентгенографічними показниками (розширенням або розмиттям інтерференційних ліній), що свідчать про дроблення кристалічних блоків, зростання спотворень кристалічної ґратки і розвиток дислокацій. Процес наклепу металу поверхневого шару розвивається під дією сил в зоні різання. При механічному обробленні в зоні різання одночасно діють значні зусилля різання, що створює наклеп, і температура, що викликає розм'якшення металу. В процесі оброблення точінням наклеп поверхневого шару підвищується при збільшенні подачі і глибини різання у зв'язку із зростанням радіусу округлення різального леза і при переході від позитивних передніх кутів різця до негативних [5].

Одним з ефективних інструментів для оперативного дослідження локальних характеристик напружено-деформованого стану (НДС) в пластичній області є метод кінцевих елементів, який реалізований у таких відомих програмних продуктах світового рівня, як DEFORM, ABAQUS, LS DYNA, Advantage. Ці програмні продукти дозволяють з достатньою точністю зробити розрахунок сил різання, усадки стружки, конфігурації і площі контактної поверхні з інструментом і меж пластичної зони, провести розподіл силових та деформаційних показників, швидкостей деформацій і температур як в зоні стружкоутворення, так і в інструменті [7, 8].

У статті проаналізовані результати імітаційного моделювання реологічної картини різання ізоморфного пластичного матеріалу, отриманої моделюванням процесу в DEFORM 2D.

### **Виклад основного матеріалу статті.**

Однією з головних причин появи залишкових деформацій при механічному обробленні деталі слід вважати заокруглення леза інструменту. Насправді передня і задня поверхні зубів інструментів сполучаються не по лінії, а по поверхні, яка в перерізі є дугою кола радіусом  $r$  (рис.1). Оскільки площина зсуву  $CD$  буде дотичною до кола радіусом  $r$ , слід зазначити, що метал нижче лінії  $FE$  підминається різальним лезом і в стружку не переходить. Деформований шар після проходження різця визначає глибину наклепу  $h_3$ .

Швидкість різання і подача мають найбільший вплив на деформацію поверхневого шару, оскільки ці параметри режиму різання визначають в основному механотермічну дію на метал. Зі збільшенням швидкості різання підвищуються швидкості деформації і температура нагріву, але зменшуються тривалість дії напружень і час нагріву поверхневого шару заготовки.

Зростаюче нагрівання деформованого металу зі збільшенням швидкості різання підвищує дифузійну рухомість атомів, активізує процеси розм'якшення внаслідок рекристалізації, знижуючи цим інтенсивність деформаційного зміцнення поверхневого шару [10].

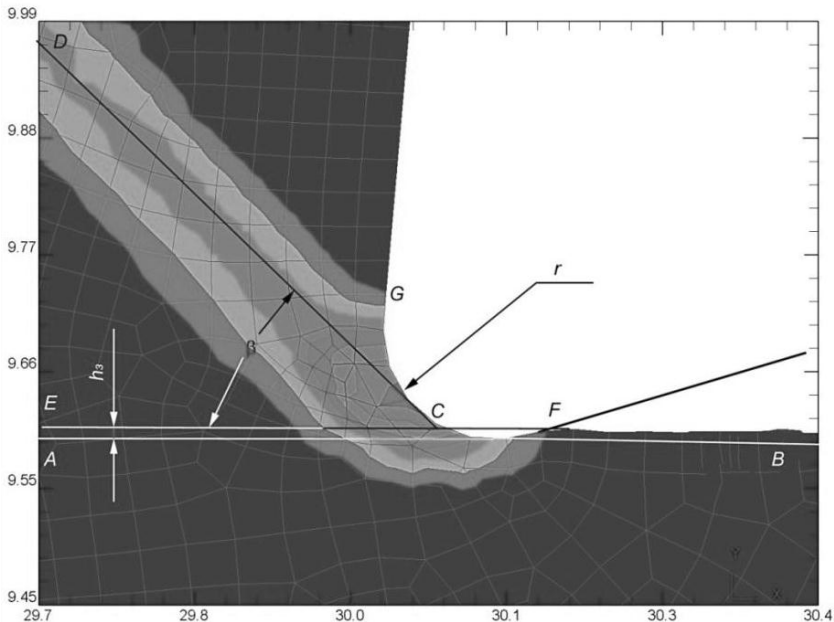


Рисунок 1 – Схема формування деформованого шару на обробленій поверхні деталі на хромограмі інтенсивності розподілу деформацій в зоні формоутворення

Якщо швидкість деформації перевершує швидкість рекристалізації, спостерігається лише часткове зняття деформаційного зміцнення, попри те, що деформація відбуватиметься при температурі, що перевищує температуру рекристалізації [9]. Проведені імітаційні реологічні дослідження технологічних переходів механічного оброблення деталей з найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів показують, що зі збільшенням швидкості різання посилюється теплова дія на деформований метал поверхневого шару і знижується його зміцнення.

В порівнянні з іншими параметрами режиму різання подача має найбільш суттєвий вплив на деформаційне зміцнення поверхневого шару. Залежності глибини і міри наклепу від подачі мають екстремальний характер, тобто існує оптимальна подача, при якій наклеп поверхневого шару має найменше значення. Оптимальна подача для жароміцних

сплавів  $S_0 \sim 0,1 \dots 0,15$  мм/об [4]. Збільшення деформаційного зміцнення при зменшенні подачі за межами оптимальних значень подач пояснюється впливом процесу ковзання різального леза, що створює додаткову деформацію поверхневого шару. Характер цих залежностей визначається силовим навантаженням і температурою нагріву металу в зоні різання. Подача має найважливіший вплив щодо силової дії на поверхневий шар. При точінні, струганні і протягуванні зі збільшенням глибини різання основні параметри деформаційного зміцнення зростають [5].

Передній кут різця також впливає на умови стружкоутворення, які зумовлюють формування поверхневого шару. За даними проф. А. Д. Макарова [10], при точінні сплаву ХН77ТЮР зі зміною переднього кута від +15 до -15 глибина наклепу збільшується в 3 рази, що пов'язане з підвищенням опору руху стружки по передній поверхні різця.

Реологічне моделювання технологічного переходу токарного оброблення жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718), визначеної на основі аналізу імітаційної моделі в системі Deform 2D показав зниження характеристик наклепу на 55 % у порівнянні з обробленням сталі 45 на режимах різання - подача  $S = 0,25$  мм; глибина різання  $t = 1$  мм швидкість різання  $V = 120$  мм/хв. Зниженню наклепу в цьому випадку можуть сприяти підвищення міцнісних і пониження пластичних властивостей сплавів і значне зменшення коефіцієнта тертя по задній поверхні різця.

Відомо, що ступінь наклепу визначається як відношення початкової  $H_0$  і новоствореної  $H$  твердості оброблюваного матеріалу заготовки до її початкового значення:

$$N = \frac{H - H_0}{H_0} \quad (1)$$

При точінні жароміцних і жаростійких матеріалів ступінь наклепу може бути підрахований за емпіричним рівнянням проф. Сіліна [5]:

$$N = 40h_3 \theta_0^{-0,72}, \quad (2)$$

де  $h_3$  – глибина наклепу, що визначається за результатами реологічного моделювання технологічних переходів механічного оброблення, мкм (приклад поданий на рис. 1);

$\theta_0$  - температура в зоні різання при роботі твердосплавним інструментом, що також визначається за результатами реологічного моделювання.

Пластична деформація і наклеп поверхневого шару металу протікають в протилежно орієнтованих зернах різного складу з різною інтенсивністю; причому феритні зерна деформуються інтенсивніше за перлітні. Це викликає нерівномірне підвищення енергії і різну зміну електродного потенціалу [6].

При точінні більш наклепані феритні зерна та мартенситні домени стають анодами, менш наклепані перлітні зерна – катодами. З тих же причин виявляється різним і спотворення атомних ґраток в різних кристалічних зернах.

Наклеп поверхневого шару у більшості випадках виявляється шкідливим і знижує експлуатаційні якості деталей машин. Це відбувається тому, що після пластичної деформації металу поверхневого шару при кімнатній температурі збільшується його питомий об'єм і зменшується густина, що сприяє швидшому протіканню дифузійних процесів при високій температурі і тим самим прискорює процеси, що знижують опір металу динамічному руйнуванню. Тривала дія високої температури на наклепаний метал швидко приводить до його інтенсивного розм'якшення, що знижує загальні експлуатаційні властивості деталей. Мікротвердість металу поверхневого шару відповідальної після її експлуатації при високій робочій температурі. Пониження густини наклепаного металу полегшує процес вигорання легуючих елементів жароміцних сплавів, яке призводить до зниження міцності сплавів [6]. Ознакою вигорання легуючих елементів може служити зміна параметра кристалічної ґратки жароміцного сплаву. Зі збільшенням міри і глибини наклепу жароміцних сплавів їх втомна міцність при роботі в середовищі з високою температурою значно знижується. Так, при глибині наклепу 190 мкм, що виникає при чорновому точінні, число циклів до руйнування сплаву при 700°C виявляється приблизно вдвічі нижчою, ніж після електрополірування, що не викликає наклепу. Різними експериментами було показано [6] істотне зменшення межі текучості жароміцного сплаву залежно від глибини наклепу, що виникає при різних видах оброблення.

На рис. 2 наведена розрахункова схема для визначення залишкових деформацій на 2D моделі технологічного переходу фрезерування деталі з інструментальної штампової сталі 4X5MФ1С (аналог AISI-H-13 (США)) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T  $\gamma = 8^\circ$ ,  $\alpha = 15^\circ$  ( $S = 0,1$  мм;  $t = 0,25$  мм;  $V = 120$  м/хв). З метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення загальний шлях інструменту по довжині обробленої частини деталі розділений на 22 діапазони, а по глибині – на 10 діапазонів вимірювань.

На рис. 3. наведена картина реологічного моделювання залишкових деформацій при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сталь 4X5MФ1С) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T  $\gamma = 8^\circ$ ,  $\alpha = 15^\circ$  ( $S = 0,1$  мм;  $t = 0,25$  мм;  $V = 120$  м/хв). В результаті термодинамічної релаксації із зростанням віддалі від вершини різального клину вздовж обробленої поверхні ці деформації експотенційно зменшуються до якогось усталеного значення в зоні термодформаційної стабілізації. Саме ця величина і є залишковою деформацією.

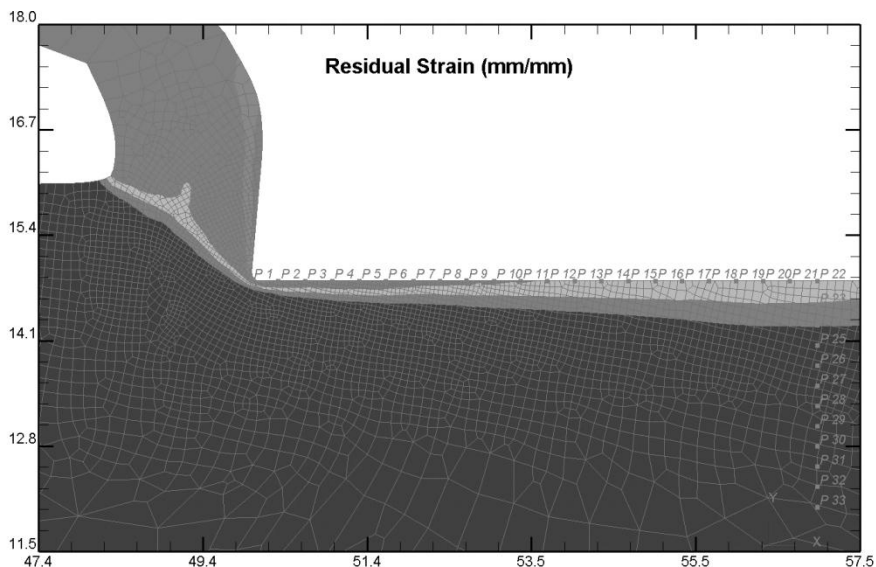


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення залишкових деформацій при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сталь 4X5MΦ1C) (S=0,1 мм; t=0,25 мм; V=120 м/хв)

Крива залишкових деформацій (рис. 3) відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних температурних, силових та фрикційних процесів, що виникають в процесі формоутворення деталі. Середньостатистичне значення залишкових деформацій в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно  $\varepsilon \approx 2,5$  (мм/мм) при обробленні деталі з штампової сталі 4X5MΦ1C фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T (S = 0,1 мм; t = 0,25 мм; V = 120 м/хв).

Методика визначення глибини залягання залишкових напружень є подібною – але тестові точки вимірювання деформацій розташовані не по довжині обробленої поверхні, а вглиб (рис. 2). Очевидно, що моделювання картини глибини залягання також слід робити в зоні термічної стабілізації обробленої поверхні. Результати моделювання наведені на рис. 4.

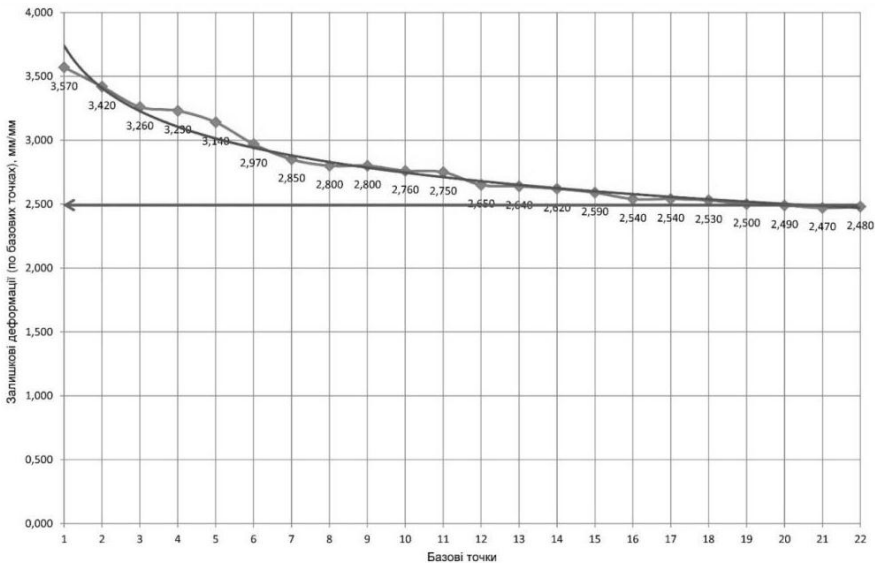


Рисунок 3 – Графічні залежності поверхневих залишкових деформацій, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сталі 4X5MΦ1С (S = 0,1 мм; t = 0,25 мм; V = 120 м/хв)

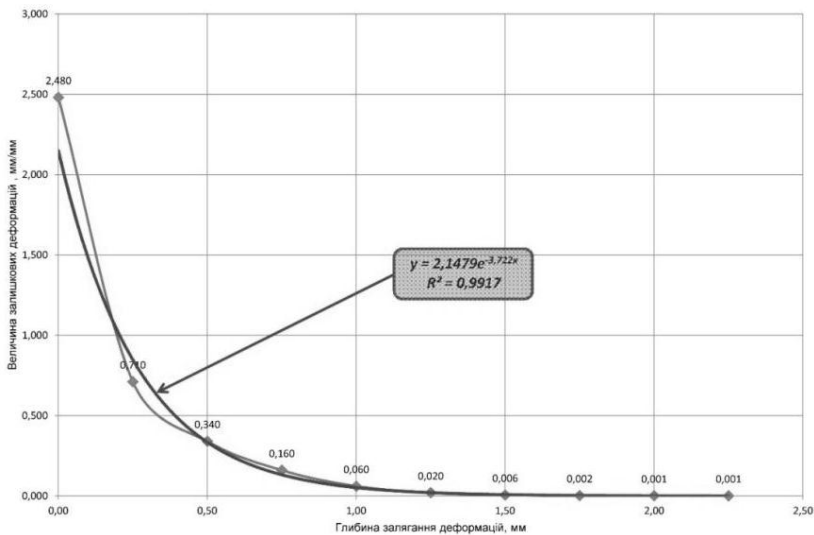


Рисунок 4 – Графічні залежності глибини залягання залишкових деформацій, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сталі 4X5MΦ1С (S=0,1 мм; t=0,25 мм; V=120 м/хв)

**Висновок.** Аналіз графічних залежностей (рис. 3-4) доводить експотенційний характер зменшення залишкових деформацій: якщо на поверхні деталі ця величина становила  $\varepsilon \approx 2,5$  (мм/мм), то на глибині 0,25 мм – вже  $\varepsilon \approx 0,7$ , а на глибині 1,0 мм деформація практично аніглюється і становить лише  $\varepsilon \approx 0,06$  (мм/мм). Якісний та кількісний характер розподілу деформацій доводить адекватність та ефективність запропонованих методик для формування аналітичної бази при побудові функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

**Список використаних джерел:** 1. Вествуд А. Влияние среды на процесс разрушения / А.Вествуд // Разрушение твердых тел. – М.: Металлургия, 1967. – С. 344–399. 2. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д.Дель. – М.: Машиностроение, 1978. — 174 с. 3. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г.Д. Дель. - М.: Машиностроение, 1971. – 199 с. 4. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н.Подураев.- М.: Высшая школа, 1974. – 587 с. 5. Силин С.С. Применение метода подобия для определения обрабатываемости резанием современных материалов / С.С. Силин // Труды Рыбинского авиационного технолог. ин-та, № 3. – Новые методы определения обрабатываемости материалов резанием и шлифованием. - Ярославль: изд. Ярославского политехн. ин-та, 1975.- С. 5-33. 6. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К.Старков.- М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. 7. Ступницький В.В. Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин під час їх механічного оброблення у зоні стружкоутворення / В.В. Ступницький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів». – Львів. – 2012. – №730. – С. 125-129. 8. Ступницький В.В. Імітаційне реологічне моделювання процесу стружкоутворення в зоні різання / В.В.Ступницький // Збірник наукових праць «Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии». - Краматорськ. – 2012. – № 1 (9Е). - С. 186-193 9. Суліма А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М.Суліма, В.А.Шулов, Ю.Д Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. 10. Ящерицын П.И. Теория резания / П.И.Ящерицын, Е.Э.Фельдштейн, М.А.Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vestvud A. Vlijanie sredy na process razrusheniya / A.Vestvud // Razrushenie tverdyh tel. M.: Metallurgija, 1967. S. 344–399. 2. Del' G.D. Tehnologicheskaja mehanika / G.D.Del'. M.: Mashinostroenie, 1978. — 174 s. 3. Del' G.D. Opredelenie naprjazhenij v plasticheskoj oblasti po raspredeleniju tverdosti / G.D.Del'. M.: Mashinostroenie, 1971.- 199 s. 4. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemyh materialov / V.N.Poduraev. M.: Vysshaja shkola, 1974. 587 s. 5. Silin S.S. Primenenie metoda podobija dlja opredelenija obrabatyvaemosti rezaniem sovremennyh materialov / S.S.Silin // Trudy Rybinskogo aviacionnogo tehnolog. in-ta, № 3. — Novye metody opredelenija obrabatyvaemosti materialov rezaniem i shlifovaniem. Jaroslavl': izd. Jaroslavskogo politehn.in.ta, 1975. S. 5—33. 6. Starkov V.K. Fizika i optimizacija rezaniya materialov / V.K.Starkov. M.: Mashinostroenie, 2009.-640 s. 7. Stupnic'kij V.V. Doslidzhennja napruzhenno-deformovanogo stanu detalej mashin pid chas ih mehanichnogo obrobrennja u zoni struzhkoutvorennja / V.V.Stupnic'kij // Visnik Nacional'nogo universitetu «L'viv's'ka politehnika» «Dinamika, micnist' ta proektuvannja mashin i priladiv». - L'viv.- 2012. №730.- S. 125-129. 8. Stupnic'kij V.V. Imitacijne reologichne modeljuvannja procesu struzhkoutvorennja v zoni rizannja / V.V.Stupnic'kij // Zbirk naukovih prac' «Nauchnyj vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii». Kramators'k.- 2012.- № 1 (9E). s. 186-193 9. Sulima A.M. Poverhnostnyj sloj i jekspluatacionnye svojstva detalej mashin /A.M.Sulima, V.A.Shulov, Ju.D Jagodkin. — M.: Mashinostroenie, 1988. —240 s. 10. Jashericyn P.I. Teorija rezanija /P.I.Jashericyn, E.Je.Fel'dshtejn, M.A.Kornievich. – Minsk: Novoe znanie, 2006.- 512 s.

*Поступила в редколлегию 22.07.2015*