

протилежності каченню являється следствием вырождения областей сцепления и перехода режима "качение с внешней касательной нагрузкой" в режим "качение с проскальзыванием".

Список литературы: 1. *Игнатищев Р.М.* Зубчатые передачи. Питтинг //Вестник машиностроения. – 2005. – №9. – С.59-61. 2. *Трубин Г.К.* Контактная усталость материалов для зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1962. – 404с. 3. *Орлов А.В., Черменский О.Н., Нестеров В.М.* Испытания материалов на контактную усталость. – М.: Машиностроение, 1980. – 110с. 4. *Пинегин С.В.* Трение качения в машинах и приборах. – М.: Машиностроение, 1976. – 261с. 5. Влияние внешних факторов на контактную прочность при качении / Под ред. С.В.Пинегина. – М.: Наука. 1972. – 102с. 6. Решение вариационными методами пространственных задач с проскальзыванием и сцеплением / *Р.В. Гольдштейн и др.* // Успехи механики. – Т.5, вып.34. – 1982. – С.61-102. 7. *Калкер Й.* Принцип минимума для закона сухого трения с приложением к задаче о качении упругих цилиндров. Основные положения // Прикладная механика. Труды Америк. Общества инженеров-механиков. – 1971. – С.160-166.

Поступила в редколлегию 14.04.11

621.83:621.9.06

С.І. ПАСТЕРНАК, аспірант ІМВ ШУ, Штутгарт, Німеччина
Ю.М. ДАНИЛЬЧЕНКО, д.т.н., проф., зав. кафедри ПМ НТУУ "КПІ", м. Київ
М.Г. СТОРЧАК, д.т.н., науковий співробітник ІМВ ШУ
А.В. КРИВОШЕЯ, к.т.н., старший науковий співробітник ІНМ НАНУ, м. Київ

СИЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТУРНОЇ ОБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ДИСКОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ

На базі раніш спорудженого стенда проведено експериментальне дослідження процесу контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом. Визначені складові сили різання та вплив на них параметрів заготовки і режимів різання під час обробки западин зубчастих коліс. Визначено потенціал та шляхи оптимізації процесу обробки.

На базе ранее созданного стенда проведены экспериментальные исследования процесса контурной обработки цилиндрических зубчатых колес дисковым инструментом. Определены величины составляющих силы резания и влияние на них параметров заготовки и режимов резания во время обработки впадин зубчатых колес. Установлен потенциал и пути для оптимизации процесса обработки.

On the basis of the previously constructed experimental stand, an experimental research of spur gears' contour machining with disk-shaped cutting tools was conducted. Values of the cutting force components and an influence of workpiece parameters and cutting conditions on them by the machining of tooth slots were defined. New potential and ways for the cutting process optimization were determined.

Методи обробки інструментами з профілем опосередковано залежним або ж зовсім не залежним від профілю оброблюваної деталі, такі як кінцеві і диско-

ві фрези заслуговують особливої уваги, оскільки вони характеризуються високою гнучкістю [1]. Вони дозволяють обробляти зубчасті колеса з різними профілями зубів інструментами простої форми як на сучасних універсальних, так і на спеціалізованих зубообробних верстатах [2-3].

У той час, коли контурна обробка зубчастих коліс кінцевими фрезами широко використовується в промисловості [3-4], контурна обробка зубчастих коліс дисковими фрезами рідко знаходить застосування, хоча вона характеризується коротшим штучним часом і довшим періодом стійкості інструмента [1-3, 5-7]. Причиною цього є неоптимальна реалізація відомих кінематичних схем контурної обробки дисковими фрезами і нестача або ж відсутність інформації щодо кінематичних, силових і техніко-економічних характеристик, таких як траєкторії руху, швидкості і прискорення інструменту і заготовки, сили різання, продуктивність зняття стружки, стійкість інструменту, шорсткість та точність обробки і т.д. Все це у свою чергу знижує рентабельність процесу обробки.

Тому постає необхідність в дослідженні і подальшій оптимізації контурної обробки зубчастих коліс дисковим інструментом з метою досягнення максимального економічного ефекту. Для цього було розроблено узагальнену математичну модель кінематики формоутворення, розраховано траєкторії рухів виконавчих органів верстата, визначено характер і діапазон змін кінематичних характеристик (переміщень, швидкостей та прискорень) цих рухів [8-10]. Також було споруджено експериментальний стенд і отримано перші результати по вимірюванню та оптимізації силових характеристик процесу [11]. Далі потрібно провести більш глибокі дослідження силових характеристик і визначити вплив на них параметрів процесу обробки, таких як форма оброблюваного профілю, фізико-механічні властивості заготовки та режими різання. Саме цьому присвячена ця стаття.

Метою роботи є визначення характеру зміни складових сили різання в залежності від параметрів заготовки та режимів різання під час контурної обробки западини циліндричного зубчастого колеса дисковим інструментом. Ця інформація необхідна для виявлення потенціалу для подальшої оптимізації процесу та підвищення його рентабельності.

Експериментальне дослідження впливу параметрів заготовки та режимів різання на силові характеристики процесу контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом було проведено в лабораторії Інституту металорізальних верстатів Штутгартського університету. При цьому обробка проводилась по раніш розробленій і теоретично дослідженій кінематичній схемі формоутворення. Згідно цієї схеми періодичні профілі (западини зубчастого колеса) отримуються шляхом поєднання зворотно-поступального руху y і неперервного обертального руху φ дискової фрези відносно заготовки. Для забезпечення процесу різання, а також обробки профілю на всю ширину деталі у схемі передбачені відповідно обертний рух дискового інструмента відносно своєї осі ψ і його періодичний поступальний рух z відносно заготовки [8-11]. Цю схему було реалізовано на чотирьохкоординатному оброблюва-

льному центрі Hermle мод. UFW 1202 Н з системою ЧПУ Heidenhain мод. TNC 426. Програми ЧПУ для експериментальної обробки зубчастих коліс були згенеровані з допомогою спеціальної САМ-програми, яка була розроблена на базі узагальненої математичної моделі кінематики формоутворення [9-10].

Обробка проводилась збірною дисковою відрізною фрезою діаметром $d_f=100\text{мм}$, шириною $b_f=4\text{мм}$ і числом зубів $z_f=12$ (по 6 зубів з кожної сторони фрези), обладнаною поворотними пластинками з твердого сплаву МР30. Заготовки діаметром $d_z=154\text{мм}$ і шириною $b_z=15\text{мм}$ виготовлялись із різних конструкційних матеріалів, включаючи конструкційну сталь С45 (загальне машинобудування), легований алюміній А1МgSі1 (авіабудування) і поліпропілен РР-Н (приладобудування). Складові сили різання під час обробки вимірювалися за допомогою чотирьохкомпонентного динамометра, на якому нерухомо кріпилася заготовка. При вимірюванні сигнали від динамометра подавалися через підсилювач на аналогово-цифровий перетворювач і ПЕОМ, на якому вони реєструвалися, оброблялися, і виводилися за допомогою спеціальної програми [11].

Складові сили різання досліджувалися при різних параметрах заготовки і зубчастого колеса, а також при різних режимах різання. Таким чином, поряд з різними матеріалами (С45, А1МgSі1 і РР-Н) і профілями бокових поверхонь зубів (евольвентним, циклоїдальним і профілем Новікова) змінювалася швидкість різання ($v_c \approx 126..188\text{м/хв}$), періодична осьова подача ($S_0=1..2\text{мм/об}$) і стала подача вздовж профілю ($S_m=100..400\text{мм/хв}$).

Виміряні ортогональні складові сили різання (P_x , P_y і P_z) використовувалися для визначення осьової P_a , радіальної P_r і тангенціальної P_t сили, які діють на лезо інструмента (рисунок 1). Так як в процесі обробки інструмент постійно обертається навколо осі динамометра та закріпленої на ньому заготовки, а також навколо своєї власної осі, то величини осьової, радіальної і тангенціальної складових сили різання розраховувалися з використанням кутів повороту φ і ψ (рисунок 1):

$$P_a = P_x \cos \varphi + P_y \sin \varphi; \quad (1)$$

$$P_r = P_z \sin \psi + (P_x \sin \varphi + P_y \cos \varphi) \cos \psi; \quad (2)$$

$$P_t = P_z \cos \psi - (P_x \sin \varphi + P_y \cos \varphi) \sin \psi. \quad (3)$$

Під час дослідження силові характеристики визначалися при всіх проходах, тобто при всіх положеннях інструмента відносно заготовки. Однак, у статті розглядаються лише складові сили різання виміряні при вертикальному положенні інструмента відносно заготовки $z=0$, оскільки у цьому положенні формоутворюється повний профіль западини зубчастого колеса і тому тут величина сили різання має особливо значущий вплив на процес обробки. При $z<0$ утворюється теж повний профіль западини, але значення компонентів сили різання значно менші, аніж при $z=0$. При $z>0$ профіль западини утворюється лише частково, а отже, і вплив сили різання на процес обробки і якість обробленої поверхні не такий важливий, хоча значення складових сили різання

при цьому можуть бути у два рази більшими.

Крім того, розглядаються лише середні значення сили різання і її компонентів при одному оберті інструменту або при 6 різках (рисунок 2), тому що їх поточні значення постійно змінюються, і через це їх складно передбачити і візуально чи чисельно представити. Зміна сили різання при одному різі (рисунок 4), пов'язана з характерною для фрезерування зміною параметрів різання, таких як ширина і товщина зрізаної стружки. Зміна її величини в залежності від одного чи іншого різі протягом одного обороту інструменту (рисунок 4) пов'язана з неточністю інструменту і нерівномірність його зносу.

Оскільки при обробці правої і лівої бокової поверхні западини, тобто при вході інструмента в западину і його виході з неї, вектори осьової і радіальної складових сили різання матимуть різний напрям, далі розглядаються лише їх абсолютні величини. Це у свою чергу дозволить спростити графічне представлення і сприйняття силових характеристик.

На рисунку 3 зображено розподіл експериментально визначених осьової P_a , радіальної P_r і тангенціальної P_t складових сили різання при обробці зубчастих западин з евольвентним (а), циклоїдальним профілем (б) та профілем Новікова (в). Усі западини фрезерувалися на заготовках із конструкційної сталі С45 при швидкості різання $v_c=188\text{м/хв}$ ($n=600\text{об/хв}$), періодичній осьовій подачі $S_0=2\text{мм/об}$ і сталій подачі вздовж профілю $S_m=200\text{мм/хв}$.

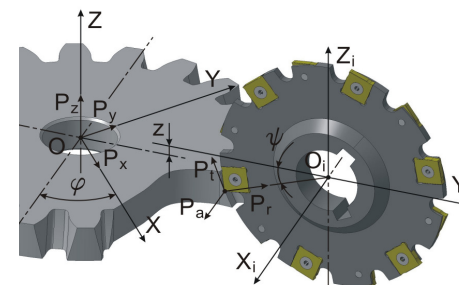


Рисунок 1 – Схема для перерахунку складових сили різання

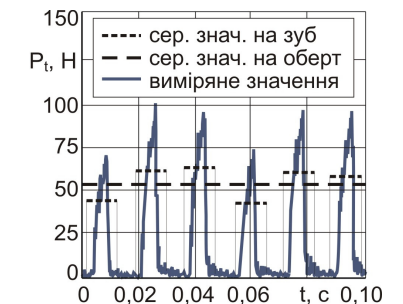


Рисунок 2 – Виміряні значення тангенціальної складової сили різання

Загалом, помітно, що величини усіх складових сили різання під час обробки западини біля ніжки зуба стрімко зростають, досягаючи свого піку, який у кілька разів перевищує їх середнє значення. Під час обробки западини біля голівки зуба вони є малими і змінюються в невеликому діапазоні. Цей пік сил викликає значні напруження та деформації інструменту, а також призводить до погіршення умов різання. Як результат, не лише знижується стійкість інструменту, але й зростає загроза його поломки. Тому постає потреба у оптимізації процесу обробки шляхом повного усунення чи зменшення цього піку сил. До того ж, при обробці правої бокової поверхні западини (тобто при вході інструмента) абсолютні значення осьової складової сили різання є меншими, ніж значення раді-

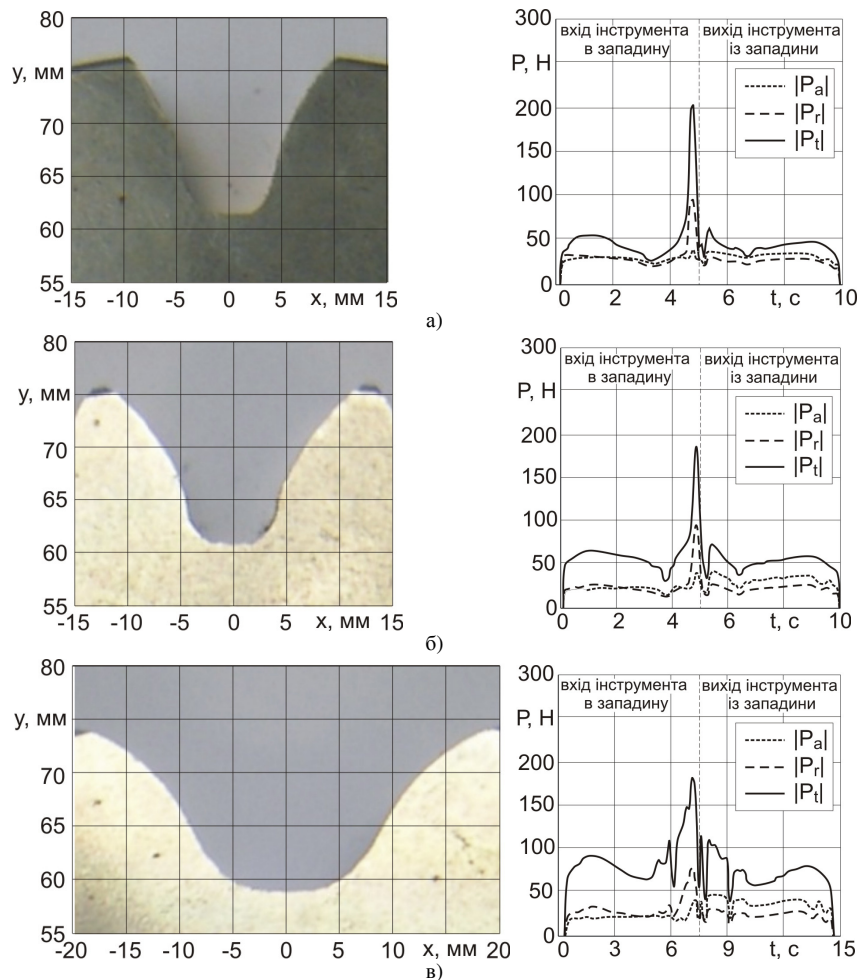


Рисунок 3 – Зміна складових сили різання при обробці зубчастих западин різних профілів дисковим інструментом

альної складової (рисунок 3), а при обробці лівої (при виході інструменту) навпаки – більшими (рисунок 3). Це обумовлено тим, що схеми зняття припуску у обох випадках значно відрізняються. Ця відмінність призводить до різних статичних, кінематичних та динамічних кутів різання, товщини і ширини стружки, а отже до різних величин складових сили різання і різної якості оброблених поверхонь. Таким чином постає потреба у виборі оптимальних схем зняття припуску для обох бокових поверхонь западини.

Як видно з рисунку 3, зв'язок між значеннями компонентів сили різання і формою профілю западини є неоднозначним. Максимальні значення радіальної і тан-

генціальної складових, які виникають в процесі обробки зуба біля дна западини, зменшуються при збільшенні ширини оброблюваної западини. Максимальні значення осьової складової сили різання при цьому навпаки зростають. Отже, можна розрахувати таку форму профілю зуба, при обробці якої виникали б мінімальні сили різання. Проте, профіль зубчастого зачеплення заздалегідь визначений конструктором і не може бути зміненим на стадії виробництва.

На рисунку 4 представлено експериментально встановлені тенденції зміни максимальних значень складових сили різання при обробці евольвентних зубчастих западин дисковою фрезою в залежності від фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу та режимів різання. Слід зазначити, що зміна цих параметрів процесу обробки не дозволяє уникнути піку сил при обробці біля дна западини, однак вона впливає на його величини.

Рисунок 4, а) показує зміну максимальних значень складових сили різання при контурній обробці різних матеріалів, зокрема, поліпропілену PP-H з межею міцності на розрив $\sigma=35$ МПа, легованого алюмінію AlMgSi1 з $\sigma=285$ МПа та конструкційної сталі С45 з $\sigma=700$ МПа. Режими різання при цьому були такими ж, як і в попередньому випадку – при обробці різних профілів. Як видно, значення всіх складових сили різання при збільшенні міцності матеріалу на розрив значно зростають, а отже контурна обробка дисковим інструментом з використанням описаної кінематичної схеми підходить більше для обробки м'яких матеріалів. Однак, матеріал заготовки вибирається конструктором і на стадії виробництва його фізико-механічні характеристики можуть бути змінені лише у вузькому діапазоні.

На рисунку 4, б) зображено зміну максимальних значень складових сили різання під час контурної обробки евольвентних зубчастих западин з різною швидкістю різання v_c , а саме в діапазоні від 126м/хв (400об/хв) до 188м/хв (600об/хв). Матеріал заготовки – С45. Величини осьової подачі і подачі вздовж профілю були сталими – $S_0=2$ мм/об і $S_m=200$ мм/хв. Помітно, що значення всіх складових сили різання плавно зменшуються при збільшенні швидкості різання. Однак, швидкість різання не можна нескінченно збільшувати, тому що після певної межі, яка визначається в залежності від матеріалу заготовки і інструменту, різко зростає знос інструменту і знижується його стійкість. Тому бажано проводити контурну обробку дисковим інструментом при максимальній швидкості, яка рекомендована його виробником.

На рисунках 4, в) і г) показано зміну максимальних значень складових сили різання під час контурної обробки евольвентних зубчастих западин при різних величинах подач. У першому випадку подача вздовж профілю западини S_m змінювалася в діапазоні від 100мм/хв до 400мм/хв. У другому – періодична осьова подача S_0 – від 1мм/об до 2мм/об. В обох випадках оброблялася сталь С45 зі швидкістю різання $v_c=188$ м/хв ($n=600$ об/хв). Як бачимо з графіків, значення всіх складових сили різання значно зростають при збільшенні як однієї так і іншої подачі. Одночасно погіршується шорсткість поверхні і зменшується час обробки. Отже, можливо визначити такі величини подач, при яких досягається мінімальний час обробки та забезпечується необхідна якість обробки, а величина сили рі-

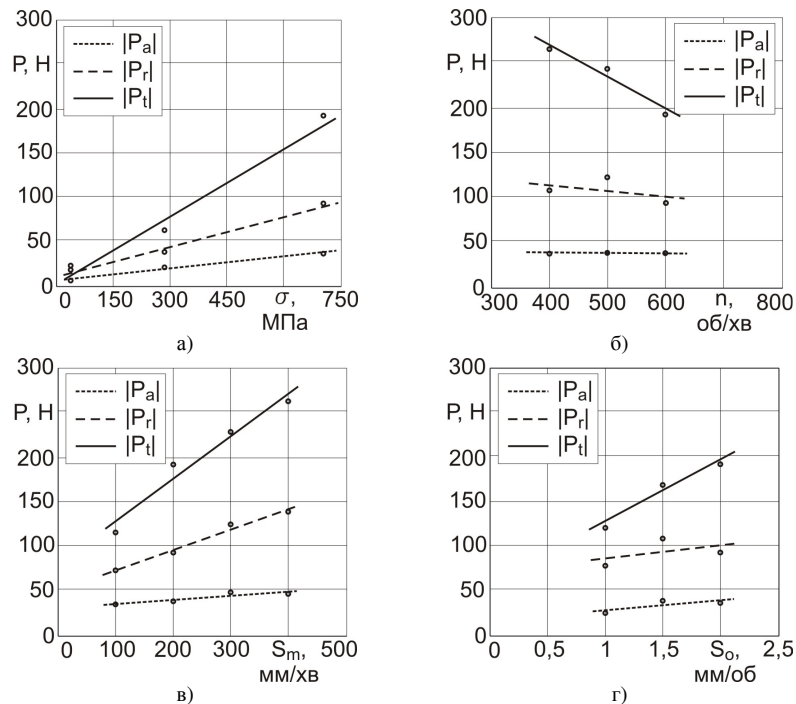


Рисунок 4 – Тенденції зміни максимальних значень складових сили різання при обробці евольвентних зубчастих западин в залежності від фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу та режимів різання

зання чи її складових не перевищує допустиме значення.

Зазвичай оптимізація процесів обробки здійснюється з метою зменшення собівартості виробництва. Цього можна досягнути зменшенням тривалості обробки при одночасному збереженні стійкості інструменту і якості обробки, тобто шляхом зміни параметрів процесу. Як впливає з проведених досліджень, найбільший потенціал для такої оптимізації мають збільшення подачі вздовж профілю і періодичної осьової подачі, оскільки вони можуть змінюватися в широкому діапазоні як перед обробкою так і під час неї і дозволяють значно скоротити час обробки. Однак, рівномірно збільшувати подачу перешкоджає різке зростання сили різання при обробці біля дна западини, а також відмінності між значеннями компонентів сили різання при вході і виході інструмента з западини. Ці недоліки контурної обробки дисковим інструментом за розробленою кінематичною схемою призводять не лише до значних напружень інструмента і його поломки, але й до зниження точності і шорсткості обробленої поверхні. Через це стали подачу вздовж профілю і періодичну осьову подачу не лише неможливо збільшити, але й необхідно у деяких випадках зменшувати. Це обмежує продуктивність процесу. Тому постає потреба у частковому чи повному усуненні цих недоліків.

Так, наприклад, різке зростання сили різання, викликане стрімким зростанням продуктивності зняття стружки виникає незалежно від параметрів заготовки і режимів різання, якщо вони при обробці залишаються сталими, може бути усунено шляхом попередньої обробки западин, або ж зміною режимів різання в залежності від зміни сили різання під час обробки. Відмінності між значеннями складових сили різання при вході і виході інструмента із западини, які пов'язані зі зміною схеми зняття припуску, можуть бути нівельовані шляхом удосконалення кінематичної схеми контурної обробки дисковим інструментом чи розробкою спеціальних фрез з оптимальною геометрією ріжучого клину. Це є метою подальших досліджень.

Висновки:

1. Під час контурної обробки зубчастих коліс дисковим інструментом по розробленій кінематичній різко зростають сили різання при обробці западини біля її дна і існує відмінність між значеннями осьової і радіальної складової при обробці правої і лівої бокової поверхні западини.
2. Для підвищення рентабельності і якості обробки зубчастих коліс необхідно частково чи повністю усунути виявлене підвищення сил різання.
3. Подальша оптимізація контурної обробки зубчастих коліс дисковим інструментом буде виконана при використанні отриманих залежностей між силовими характеристиками і параметрами процесу.

Список літератури: 1. Roth, K. Zahnradtechnik – Evolventen-Sonderverzahnungen zur Getriebeverbesserung: Evoloid-, Komplement-, Keilschräg-, Konische-, Konus-, Kronenrad-, Torus-, Wälzkolbenverzahnungen, Zahnrad-Erzeugungsverzahnungen. – Berlin: Springer Verlag, 1998. – 614с. 2. Пангелов И.Н., Метев Х.Ц., Куманов И.В., Динев С.Д. Нарязване на зъби на зъбни кола на върху обработващи центри // Известия на ТУ-Габрово. – Т.30, 2004. – С. 121-134. 3. Коганов И.А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. – Тула: Приокское книжн. изд-во, 1970. – 180с. 4. Schlossig, H-P. Wozu noch Spezialmaschinen // WB Werkstatt und Betrieb – Hanser, 2009. – №5. – С.67-70. 5. Груцай І.С., Благут Е.М., Яворський В.З. Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення // УИЦ "Наука. Техника. Технологія", – К., 2004. – С.47-50. 6. Пастернак С.І., Данильченко Ю.М., Сторчак М.Г., Кривошея А.В. Економічне обґрунтування методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2009. – №19. – С.118-126. 7. Heisel, U.; Pasternak, S.; Storchak, M., Stehle, T.: Jede Verzahnung mit einem Werkzeug herstellbar. dima, 2009, Nr. 5, 44-45. 8. Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Пастернак С.І., Короткий С.В. Кінематика формоутворення циліндричних зубчастих коліс з заданим профілем дисковим інструментом // Вестник НТУУ "КПІ", сер. Машиностроение. – 2005. – №46. – С.104-108. 9. Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Пастернак С.І. Математичне моделювання законів руху дискового інструменту при обробці зубчастих коліс довільного профілю // Вестник НТУУ "КПІ", сер. Машиностроение. – 2006. – №49. – С.104-108. 10. Heisel, U.; Danilchenko, Yu.; Pasternak, S.; Storchak, M. Modellieren des Verzahnens mit Scheibenwerkzeugen. ZWF (2010), Nr.7-8/2010, S.2-7. 11. Пастернак С.І., Данильченко Ю.М., Сторчак М.Г., Кривошея А.В. Експериментальне дослідження контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – №26. – С.94-101.