

П.П. Мельничук, д.т.н., проф.
В.Ю. Лосєв, к.т.н., доц.
Є.В. Салогуб, аспір.

Житомирський державний технологічний університет

**ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ
 КОМБІНУВАННЯМ РІЗАННЯ, ЛЕГУВАННЯ ТА ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО
 ДЕФОРМУВАННЯ
 (I частина)**

Стаття присвячена обговоренню передумов, особливостей і шляхів впровадження однієї з можливих технологій комбінованої фінішної обробки плоских поверхонь деталей машин, що включає в себе лезову обробку з одночасним поверхневим легуванням та ППД.

Вступ. В машинобудуванні та у тих галузях господарства, що споживають продукцію машинобудування, дуже важливими проблемами є підвищення надійності машин і механізмів, їх економічної ефективності як у виробництві, так і в подальшій експлуатації. Очевидно, що надійність машин і механізмів, в разі правильної їх експлуатації, залежить від якості деталей, з яких вони зібрані.

Поняття якості є комплексним показником, що включає відповідність форми, точність розмірів, шорсткість, твердість та інші механічні характеристики основного матеріалу і поверхневого шару зокрема.

В поверхневому шарі в результаті механічної обробки за дуже короткий час виникають залишкові напруження різних знаків та інтенсивності, а також наклеп, які обумовлюють геометричні і фізико-механічні властивості поверхні і тим самим можуть запобігти або прискорити руйнування деталей [1].

В поверхневому шарі відбувається значне зростання густини дислокацій, що, в свою чергу, є вагомою причиною підвищення рівня поверхневої енергії. Завдяки цьому ювенільна поверхня, яка утворюється безпосередньо після лезової обробки, є енергетично активною. Це дає можливість впливати на фізико-хімічні параметри поверхневого шару оброблюваної деталі, свідомо формуючи потрібні експлуатаційні характеристики [2, 3].

Виходячи з зазначеного вище, актуальним, на наш погляд, є вирішення таких задач:

- 1) розрахунок тривалості релаксаційних процесів, що характерні для ювенільної поверхні та оцінка часу її існування;
- 2) розрахунок приросту поверхневої енергії, пов'язаний з надлишком дислокацій, що виникають в поверхневому шарі деталі після її лезової обробки;
- 3) підбір легуючих елементів з урахуванням їх поверхневої активності;
- 4) оптимізація конструкції комбінованого інструменту.

Основна частина.

Розрахунок тривалості релаксаційних процесів, що характерні для ювенільної поверхні та оцінка часу її існування.

Поверхня, яка утворюється безпосередньо після лезової обробки, є ювенільною. Час її існування дуже малий і сумірний з часом релаксації короткотривалих релаксаційних процесів [2]. Нами в попередніх статтях [2, 3] розраховані часи релаксації Зінера та Снука. Так, методом „ширини піка” для часу релаксації Зінера отримана формула:

$$\tau = 0,682 \cdot 10^{-14} \exp\left(\frac{142771}{8,31 \cdot T}\right), \quad (1)$$

де T – абсолютна температура.

Для часу релаксації Снука, використавши його зв'язок з коефіцієнтом дифузії, одержимо такий вираз:

$$\tau = \frac{a^2}{72 \cdot 2,86 \cdot 10^{-17} \exp(0,0135(T - 273))}, \quad (2)$$

де a – стала кристалічної ґратки.

Використавши (1, 2), одержимо, що час релаксації Зінера при температурі різання 1000–1200 °С складає близько 10^{-9} с, а час релаксації Снука – близько 10^{-8} – 10^{-7} с.

Нами також отримана формула (3) і здійснено розрахунок часу існування ювенільної поверхні в газовому середовищі.

$$t = (2\pi M_{\text{заву}} kT)^{1/2} \rho_{\text{мет}}^{2/3} N_A^{1/6} P^{-1} M_{\text{мет}}^{-2/3}. \quad (3)$$

При температурі різання 1000–1200 °С і нормальному атмосферному тиску в повітряному середовищі цей час складатиме близько 10^{-8} с.

Бачимо, що, як відмічалось в [2], час існування ювенільної поверхні сумірний з часом релаксації Зінера та Снука. Реально час існування ювенільної поверхні може бути більшим. Так, згідно з [1] швидкість утворення моноатомного шару окислів на ювенільній поверхні триває протягом тисячних долей секунди. При цьому товщина утворення окисних плівок може бути дуже малою, наприклад, 10–30 Å, за даними різних дослідників, зате їх мікротвердість може досягати п'ятикратної величини порівняно з основним металом.

Розрахунок приросту поверхневої енергії, пов'язаний з надлишком дислокацій, що виникають в поверхневому шарі деталі після її лезової обробки.

Аналізуючи деформацію, руйнування та зміцнення металів, можна вважати, що з різних дефектів утвореної структури основний вклад в приховану енергію деформації дають дислокації, густина яких на ювенільній поверхні є максимальною [4, 5].

Поверхнева енергія є важливою характеристикою ювенільної поверхні. Надлишок поверхневої енергії та її здатність з плином часу набувати мінімального рівноважного значення обумовлює підвищену активність ювенільної поверхні. У зв'язку з цим актуальною є задача знаходження приросту поверхневої енергії, пов'язаної з надлишком дислокацій. Така задача розглянута в [4]. Нами одержаний вираз для розрахунку сумарної питомої енергії дислокацій на поверхні:

$$E_{\text{дисл.}} = \frac{G b^2 N^{2/3}}{16\pi} \left(\frac{2-\nu}{1-\nu} \right) \left(1,1 \ln \frac{R_{\text{max}}}{r_0} + 1,05 \ln \frac{R_{\text{min}}}{r_0} \right), \quad (4)$$

де G – модуль зсуву; ν – коефіцієнт Пуассона; r_0 – радіус ядра дислокації; R – відстань від осі дислокації, на яку розповсюджується поле напружень дислокації; b – вектор Бюргерса; N – густина дислокацій.

Одержані числові значення для питомої енергії поверхневих дислокацій сталі 45, сталі 40X і чавуну СЧ 32 для двох випадків: у звичайному стані, густина дислокацій звичайна і у випадку ювенільної поверхні, густина дислокацій максимальна. Ці дані наведені в табл. 1:

Таблиця 1

Значення питомих енергій поверхневих дислокацій для деяких конструкційних матеріалів

Матеріал	Питома енергія поверхневих дислокацій при їх звичайній густині, Дж/м ²	Питома енергія поверхневих дислокацій при їх максимальній густині, Дж/м ²
Сталь 45	0,62	182,12
Сталь 40X	0,64	187,34
Чавун СЧ32	0,35	101,66

Як бачимо з одержаних результатів, приріст поверхневої питомої енергії, пов'язаний з надлишком дислокацій, що виникають в поверхневому шарі деталі після її лезової обробки, значний. 95 % цієї енергії на кінцевій стадії деформації розсіюється у вигляді тепла. Це явище пов'язане з анігіляцією раніше утворених дислокацій. Саме в цей період поверхневий шар є найбільш активним. Це можна ефективно використати при фінішній обробці комбінованим інструментом на етапі легування.

Підбір легуючих елементів з урахуванням їх поверхневої активності.

В першу чергу вибір матеріалу легуючого елемента залежить від того, якими властивостями має володіти поверхня, що обробляється, а властивості визначаються необхідними експлуатаційними характеристиками поверхні у виробі (зносостійкість, ерозійна стійкість, корозійна стійкість, каталітична активність, жаростійкість тощо) (див. табл. 2, 3).

При підборі легуючого елемента необхідно виходити з наступних вимог до нього:

- 1) легуючий елемент повинен мати такий хімічний склад, щоб в результаті легування можна було б одержати необхідні хімічні та фізичні характеристики поверхневого шару;
- 2) легуючий елемент має бути в такому фізичному стані (твердому, рідкому, газоподібному, у вигляді пасти, суспензії, порошку тощо), щоб процес легування був ефективним і зручним;
- 3) при поверхневому легуванні легуючий елемент повинен бути поверхнево-активним, саме це забезпечить якість легування.

Цю задачу можна розв'язати експериментально. Експериментальне визначення поверхневої активності легуючих елементів відносно сталі є досить важким [6]. Наведені в літературі дані з цього питання неоднозначні і носять відносний характер. Разом з тим, можливо аналітично визначити значення

поверхнево-активних властивостей даного елемента відносно розчинника (сталі) [6]. Існує декілька методів розрахунку:

1) знаходиться різниця між статистичним узагальненим моментом [7] розчинника та легуючої добавки, і якщо виконується нерівність (5), то легуюча речовина є поверхнево-активною;

$$\Delta m = m_p - m_o > 0 ; \tag{5}$$

2) поверхнево-активними є такі легуючі елементи, у яких температура плавлення менша, ніж температура плавлення розчинника, тобто:

$$T_p - T_o > 0 ; \tag{6}$$

3) за характеристику поверхневої активності можна використовувати величину ентропії. Якщо виконується (7), то добавка поверхнево-активна;

$$\Delta S = S_o - S_p > 0 ; \tag{7}$$

4) поверхневу активність речовини можна розрахувати за значеннями вільної поверхневої енергії σ або за значеннями питомої поверхневої енергії Π . Легуюча речовина вважається поверхнево-активною, якщо виконується (8);

$$\Delta \sigma = \sigma_p - \sigma_o > 0 ; \tag{8}$$

$$\Delta \Pi = \Pi_p - \Pi_o > 0 ;$$

5) за критерій поверхневої активності пропонується також використовувати енергію зчеплення Ψ між атомами [8]. Якщо виконується (9), то легуюча добавка є поверхнево-активною.

$$\Delta \Psi = \Psi_p - \Psi_o > 0 . \tag{9}$$

Провівши розрахунки за вказаними методами, можна зробити висновок про поверхневу активність легуючих елементів відносно сталі. Так, наприклад, найбільш поверхнево-активним є марганець Mn, для якого виконуються всі зазначені вище вимоги. Поверхнево-активними є також магній Mg, алюміній Al. Деякі елементи, які можна використовувати як легуючі, задовольняють більшість вказаних параметрів, наприклад, нікель Ni, титан Ti. Слід зауважити, що по відношенню до ювенільної поверхні абсолютна більшість легуючих елементів є поверхнево-активними, оскільки, як показують розрахунки [4], її поверхнева енергія значно більша в порівнянні з енергією звичайної поверхні.

ППД застосовується майже в усіх комбінованих методах обробки і зміцнення в якості остаточної операції [5]. В нашому випадку ППД доцільно провести відразу після поверхневого легування. Це обумовлено наступним:

1) ППД викликає значний приріст поверхневої енергії за рахунок зростання густини дислокацій, що, в свою чергу, збільшує фізико-хімічну активність поверхні, на яку вже нанесений легуючий матеріал;

2) ППД сприяє проникненню легуючої добавки в мікропори та інші неоднорідності поверхні;

3) ППД створює можливість більш рівномірного розподілу легуючого матеріалу по поверхні;

4) Після ППД утворюється направлена структура піків мікрорельєфу основного матеріалу, яка забезпечує постійний щільний, довготривалий контакт легуючих частинок з поверхнею. Це створює необхідні умови для повноцінного легування.

Таблиця 2

Вплив складу легуючих елементів на характеристики поверхонь деталей, що пройшли відповідне поверхневе легування

Легуючий елемент	Механічні характеристики поверхонь тертя				
	Вміст за масою, %	Мікротвердість, Мпа	Пластичність, %	Пружність, %	Повзучість, %
Нікель	1,97	1920	66	34	6,9
	3,95	1990	69	31	7,2
	7,99	2210	65	35	6,6
Мідь	0,57	1720	62	38	6,0
	0,95	1820	60	40	3,0
Марганець	1,44	2250	53	47	6,4
	2,92	2330	50	50	6,0
	4,68	2480	52	48	6,2

Хром	0,88	1960	56	44	7,1
	2,45	2010	54	46	7,2
	5,96	2160	50	50	7,0
Молибден	1,07	1980	63	37	7,0
	2,88	2060	61	39	7,0
	5,05	2190	55	45	6,0
Ванадій	2,83	1720	60	40	6,3
	4,90	1830	55	45	6,0
Титан	2,65	2730	65	35	5,1
	4,51	2900	68	32	4,7
Вуглецева сталь		1780	68	32	7,9

Таблиця 3

Вплив виду легуючих елементів на поліпшення експлуатаційних характеристик поверхонь деталей, що пройшли відповідне поверхнєве легування

Легуючий елемент	Вплив на експлуатаційні характеристики поверхневого шару
Марганець	Зростає твердість, зносостійкість
Хром	Зростає твердість, зносостійкість, корозійна стійкість, опір втоми, жаростійкість, жароміцність
Алюміній	Зростає окислостійкість, зносостійкість; зменшення схвачування (зчеплення) поверхонь; зростає захист від корозії в середовищах, що містять сірку, азот та вуглець
Цинк	Зростає твердість, зносостійкість, корозійна стійкість, опір втоми
Кремній	Зростає жаростійкість, зносостійкість, корозійна стійкість

Оптимізація конструкції комбінованого інструменту.

Авторами розроблена технологія комплексної обробки плоских поверхонь деталей лезовим інструментом з одночасним поверхневим легуванням і ППД [9].

Якісний аналіз будови і роботи відповідного інструменту можна провести, розглянувши рис. 1.

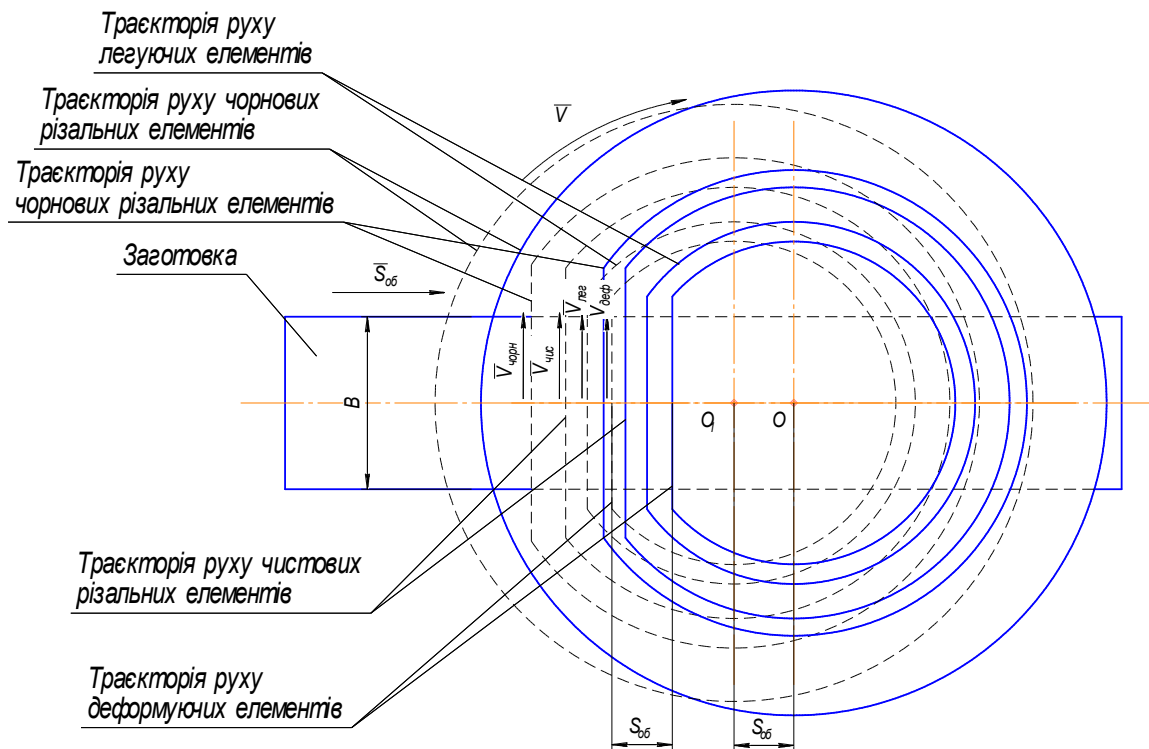


Рис. 1. Схема роботи інструмента (траєкторія руху чорнових і чистових різальних елементів, легуючих та деформуючих елементів відносно заготовки)

На цьому рисунку зображено два положення торцевої фрези відносно оброблюваної площини деталі шириною B на відстані поздовжньої подачі $S_{об}$, а також траєкторії руху чорнових і чистових різальних елементів та легуючих і деформуючих елементів відносно деталі:

- чорнових різальних елементів – за коловою траєкторією зі швидкістю \bar{V} ;
- чорнових і чистових різальних елементів та легуючих і деформуючих елементів – за прямолінійною траєкторією, перпендикулярною до вектора поздовжньої подачі $S_{об}$ зі швидкостями $\bar{V}_{чорн}$, $\bar{V}_{чис}$, $\bar{V}_{лег}$ та $\bar{V}_{деф}$ відповідно.

Послідовність процесу такого торцевого фрезерування наступна:

- Найбільшу частину припуску знімають чорновими різальними елементами, які нерухомо закріплені відносно корпуса фрези, який рухається за коловою траєкторією;
- Також припуск на чорнову обробку знімають чорновими різальними елементами, які рухаються за прямолінійною траєкторією перпендикулярно до вектора поздовжньої подачі і розташовані в радіальному напрямку на меншій відстані від осі фрези з більшим вильотом відносно нерухомо закріплених в корпусі фрези чорнових різальних елементів і на більшій відстані від осі фрези з меншим вильотом відносно чистових різальних елементів;
- Чистовий припуск видаляють чистовими різальними елементами, які розташовані в радіальному напрямку на меншій відстані від осі фрези з більшим вильотом відносно чорнових різальних елементів і рухаються за прямолінійною траєкторією перпендикулярно до вектора поздовжньої подачі;
- Виконують легування поверхневого шару деталі за допомогою легуючих елементів, які рухаються за прямолінійною траєкторією перпендикулярно до вектора поздовжньої подачі і пружно закріплені в корпусі фрези на меншій відстані від осі фрези в радіальному напрямку з більшим вильотом відносно чистових різальних елементів;
- Виконують кінцеве формування поверхневого шару оброблюваної плоскої поверхні шляхом пластичного деформування за допомогою деформуючих елементів, які пружно закріплені в корпусі

фрези на меншій відстані в радіальному напрямку від осі фрези з більшим вильотом відносно легуючих елементів і рухаються за прямолінійною траєкторією перпендикулярно до вектора поздовжньої подачі.

У запропонованому методі поверхневого легування чистовий формоутворюючий і легуючий елементи рухаються за прямолінійною траєкторією, що перетворена з кругової (колової) траєкторії руху торцевого комбінованого інструмента. Таке кінематичне перетворення забезпечує також ще й провертання легуючого елемента відносно оброблюваної поверхні, що, в свою чергу, сприяє рівномірності та інтенсивності процесу легування (рис. 2).

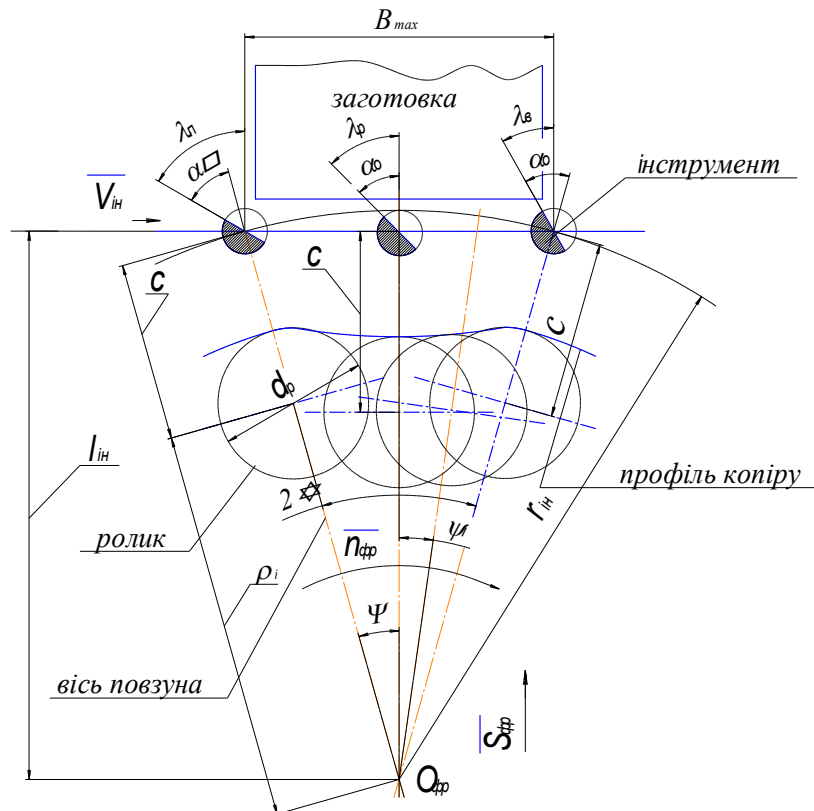


Рис. 2. Схема кінематичного перетворення колового руху торцевого інструмента у прямолінійний рух чистового різця, легуючого елемента і вигладжувача

Оптимізація конструктивних параметрів торцевого інструмента для забезпечення якісного проведення поверхневого легування пов'язана перш за все у забезпеченні послідовності і своєчасності виконання чистового проходу, легування і вигладжування.

Вихідними параметрами для розрахунків прийняті:

1. Швидкість різання. Приймаючи до уваги, що чистовий формоутворюючий елемент оснащений НТМ (Гексаніт - Р), $V = 10$ м/с при обробці заготовки зі сталі 45 (40Х), загартованої до HRC 48...50.
2. Попередня успішно випробувана конструкція торцевого інструмента з кінематично перетвореним прямолінійним рухом чистового і вигладжуючого елементів [10].
3. Ширина оброблюваної поверхні $B = 90$ мм. Більшість напрямних металообробних верстатів середнього типорозміру мають ширину, що не перевищує цю величину.
4. Розташування оброблюваної поверхні відносно осі шпинделя (торцевого інструмента) симетричне.

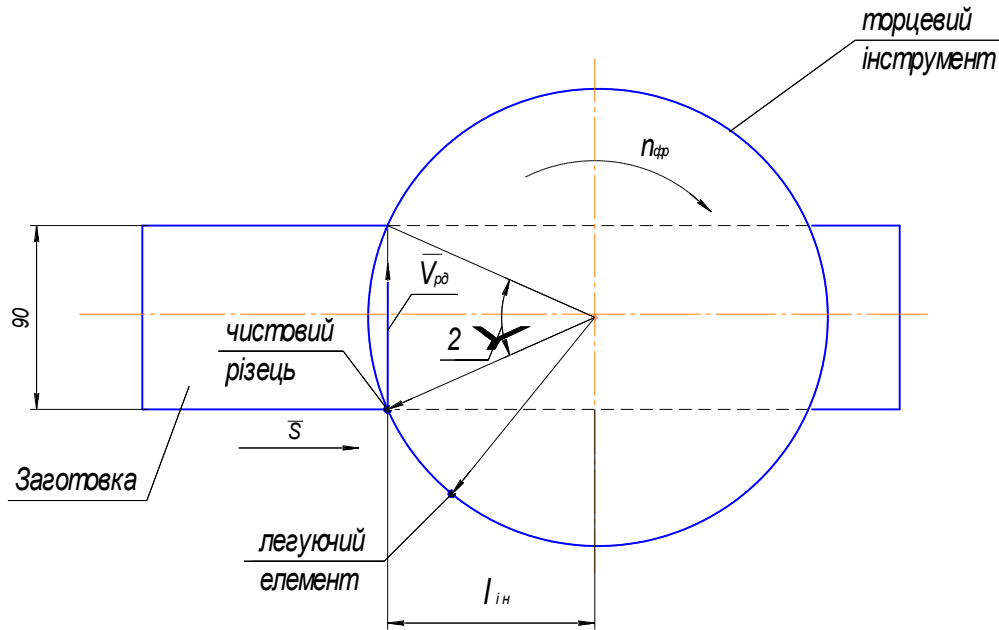


Рис. 3. Схема до розрахунків взаємного розташування чистового різця і легуючого елемента

$$V_{p0} = \frac{\pi \cdot l_{in} \cdot n_{fr}}{500 \cdot 60 \cdot \cos^2 \psi}, \quad (10)$$

де l_{in} – відстань від осі шпинделя (торцевого інструмента до траєкторії руху чистового різця). Конструктивно $l_{in}=120$ мм.

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{B}{2l_{in}}.$$

В разі $V_{p0}=10$ м/с, $n_{fr} \approx 800$ об/хв, $\psi = \operatorname{arctg} \frac{B}{2l_{in}} = \operatorname{arctg} \frac{90}{2 \cdot 120}$, $\psi \approx 20,5^\circ$, $2\psi = 41^\circ$.

Час утворення ювенільної поверхні за один оберт інструмента складе:

$$t_y = \frac{2\psi \cdot 60}{360 \cdot n_{fr}} = 0,0009 \text{ с} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (11)$$

Теоретично найбільш доцільним з точки зору використання енергії ювенільної поверхні є розташування легуючого елемента безпосередньо за чистовим різальним елементом, що утворює цю поверхню. В той же час конструктивно є тільки декілька способів наближення до вирішення цього питання:

- суміжне жорстке закріплення чистового різального елемента на меншій відстані від осі обертання інструмента порівняно з чорновими, і легуючого елемента на відстані дещо меншій або рівній відстані чистового елемента;

- чистовий різальний і легуючий елементи закріплюються на окремих повзунах, що перетворюють коловий рух у прямолінійний, перпендикулярний до вектора подачі, з різницею відстаней від осі обертання в залежності від подачі і радіусів при вершині кожного з них.

Плануванням експериментів передбачається випробування двох варіантів конструкції.

Висновок. Базуючись на результатах проведених розрахунків та аналізу, можна зробити наступні висновки:

- 1) час існування ювенільної поверхні досить малий, сумірний з часом релаксації короткотривалих релаксаційних процесів;

- 2) ювенільна поверхня володіє значним надлишком поверхневої енергії, основний вклад в яку вносять дислокації, які виникають внаслідок механічної дії на поверхневий шар. Короткий термін існування ювенільної поверхні та надлишок її поверхневої енергії дозволяє свідомо формувати необхідні властивості поверхневого шару деталей;

- 3) по відношенню до ювенільної поверхні більшість легуючих елементів є поверхнево-активними, що пояснюється її надлишковою поверхневою енергією;

4) найбільш ефективною реалізацією запропонованої технології фінішної обробки плоских поверхонь деталей є застосування відповідного комбінованого інструменту, який забезпечив би таку послідовність операцій: лезову обробку, легування і ППД.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Вульф А.М. Резание металлов. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 496 с.
2. Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Є.В. Визначення можливостей зміцнення поверхневого шару деталей використанням активності поверхні при її механічній обробці //Вісник ЖДТУ/ Технічні науки. – 2006. – № 4 (39). – С. 44–56.
3. Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Є.В., Кур'ята П.В. Релаксаційні процеси і енергія поверхневого шару деталі після її лезової обробки інструментом з НТМ //Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – ЖДТУ. – 2007. – Вип. 5 (Ч. 1). – С.100–117.
4. Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Є.В. Рівень енергії дислокацій в загальній енергії поверхневого шару деталі після її лезової обробки //Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 8-го Международного научно-технического семинара, 26–28 февраля 2008 г., г. Свалява. – Киев: АТМ України, 2008 – С. 164–166.
5. Дьяченко С.С., Рабухин В.Б. Физические основы прочности металлов. – Харьков: Вища школа, 1982. – 200 с.
6. Браун М.П. Микролегирование стали. – Киев: Наук. думка, 1982. – 303 с.
7. Давыдов А.С. Квантовая механика. – М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 748 с.
8. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел. – М: Наука, 1967. – 491 с.
9. Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Є.В. Визначення можливості використання активності поверхні при її механічній обробці з метою легування поверхневого шару деталей//Матеріали сьомої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції „Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво” м. Одеса. – 2007 – С. 37–38.
10. Лоев В.Ю. Удосконалення фінішної обробки плоских поверхонь деталей комбінуванням різання з поверхневим пластичним деформуванням: Дис. канд. техн. наук. – Київ, 2005.

МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем, ректор Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування.

ЛОЄВ Володимир Юхимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування;

– комплексні та комбіновані методи обробки плоских поверхонь деталей машин;

– конструювання металообробних верстатів та інструментів.

САЛОГУБ Євген Вікторович – аспірант, асистент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування;

– властивості поверхневого шару металевих конструкційних матеріалів.

Подано 10.04.2008

Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Е.В. Особенности технологии финишной обработки плоских поверхностей деталей комбинированием резания, легирования и поверхностного пластического деформирования (I часть)

Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Е.В. Особливості технології фінішної обробки плоских поверхонь деталей комбінуванням різання, легування та поверхневого пластичного деформування (I частина)

Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Е.В. Peculiarities of finish machining technology of flat surfaces of parts by combining of cutting, alloying of superficial plastic deformation (I part)

УДК 629.3.027+ 621.795

Особенности технологии финишной обработки плоских поверхностей деталей комбинированием резания, легирования и поверхностного пластического деформирования (I часть) / П.П. Мельничук, В.Ю. Лоев, Е.В. Салогуб

Статья посвящена обсуждению условий, особенностей и путей внедрения одной из возможных технологий комбинированной финишной обработки плоских поверхностей деталей машин, которая включает в себя лезвийную обработку с одновременным поверхностным легированием и ППД.

УДК 629.3.027+ 621.795

Peculiarities of finish machining technology of flat surfaces of parts by combining of cutting, alloying of superficial plastic deformation (I part)/

The article considers conditions, peculiarities and ways of introducing one of possible technologies of the combined finish machining of flat surfaces of part of machines, which includes cutting treatment with simultaneous superficial alloying and plastic deformation.