

Веселовська Н. Р.

Турич В. В.

Руткевич В. С.

*Вінницький  
національний аграрний  
університет*

Veselovska N. R.

Turych V. V.

Rutkevych V. S.

*Vinnitsia National  
Agrarian University*

УДК 621.787

## КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ІНСТРУМЕНТА З ДЕТАЛЛЮ У ПРОЦЕСАХ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ З УЛЬТРАЗВУКОМ

*Представлений вдосконалений спосіб ультразвукового вигладжування з попереднім зазором, що дозволяє обробляти нежорсткі та з переривчастими поверхнями деталі, не дає завалів та напливів на торцях, а також наведена експериментальна установка, яка дозволяє провести дослідження контактної взаємодії інструмента з деталлю в процесі ультразвукового вигладжування з попереднім зазором.*

*Ключові слова:* ультразвукове вигладжування, інструмент, поверхнєве пластичне деформування, магнітострикційний перетворювач, деталь.

**Вступ.** Численними експериментами встановлено, що вплив ультразвукових коливань приводить до зниження статичних сил, необхідних для пластичного деформування матеріалів [1]. Цей ефект складає основу застосування ультразвуку для інтенсифікації ряду технологічних процесів, пов'язаних із пластичним деформуванням чи руйнуванням матеріалів, таких як волочіння, вигладжування, ультразвукова обробка крихких матеріалів, різання металів з накладанням ультразвукових коливань на інструмент і інші [2].

Зниження статичних сил деформування, що досягається в окремих експериментах на 85% і більш [1] послужило підставою для розробки ряду гіпотез про механізми впливу ультразвуку на матеріал. В одних гіпотезах передбачається вплив ультразвуку на внутрішню структуру матеріалу, розподілу і рухливості дислокацій. В інших підвищення пластичності зв'язують з тепловими ефектами, викликаними розсіюванням енергії при збудженні високочастотних коливань зразків. Однак подібні гіпотези не дозволяють з достатнім ступенем наближення пояснити ефекти, що спостерігаються, і хоча зазначені причини не можна відкидати категорично, у розглянутих процесах вони можуть зіграти, напевно, лише другорядну роль.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Взаємодія інструмента з

поверхнею, що обробляється при вигладжуванні та вібровигладжуванні достатньо повно описана в роботах [1-3]. Взаємодія інструмента з деталлю в процесі ультразвукового алмазного вигладжування викладена в роботі [4]. В цій роботі показано, що застосування ультразвукових коливань при алмазному вигладжуванні зменшує статичну силу вигладжування, покращує якість поверхні.

Процес вигладжування, запропонований у [2] здійснюється при безперервній взаємодії інструмента з поверхнею, що обробляється. В той же час, встановлено [4], що в процесах пластичного деформування з накладанням ультразвукових коливань найбільш ефективним є імпульсний режим деформування, тобто такий режим, при якому робоча поверхня інструмента періодично відокремлюється від поверхні деталі. В цьому випадку можливе зниження статичної сили деформування до 90% [3]. Крім того, як показано в [5] такий режим сприяє збільшенню "фіктивної" жорсткості деталі. Однак, в більшості випадків, на практиці такий режим не реалізується, тому, що пружні деформації оброблюваної поверхні перевищують амплітуду коливань інструмента.

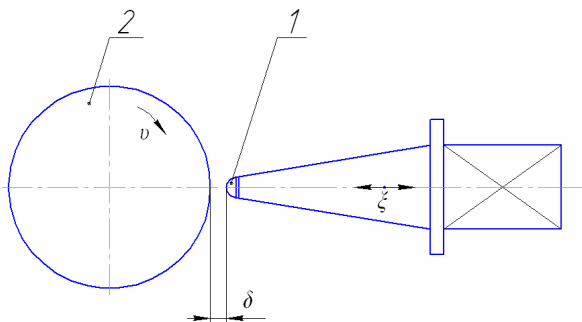
**Постановка завдання.** З метою зниження статичних сил, необхідних для пластичного деформування необхідно розробити нові способи обробки поверхонь деталей, обґрунтувати раціональні та силові параметри, а також провести лабораторні



дослідження на експериментальному стенді з дослідженням контактної взаємодії інструмента з деталлю в процесі ультразвукового вигладжування з попереднім зазором.

**Методи дослідження.** Для опису різних процесів пластичного деформування при дії ультразвукових коливань ми використали єдиний підхід, заснований на використанні реологічних моделей матеріалів, успішно застосовуваний при дослідженні коливань пружно-пластичних тіл і ударних явищах. На основі цього підходу виявимо ефекти зниження статичних сил, необхідних для пластичного деформування, знайдемо залежності цих сил від пружно-пластичних властивостей матеріалу й параметрів вібрацій, покажемо зміну характеру пластичного плину стосовно статичного навантаження.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації режиму імпульсного деформування, і як наслідок, отримання переваг такого режиму, нами запропоновано спосіб ультразвукового вигладжування [6-7], суть якого в тому, що між деталлю 2 та інструментом 1 (рис.1) встановлюється попередній зазор  $\delta$ . Інструменту 1 у вигляді сферичного наконечника, закріпленого до концентратора магнітострикційного перетворювача, надають рух подачі і коливальний рух із частотою  $f$  і амплітудою  $\xi$  по нормалі до поверхні, що обробляється.



**Рис.1. Схема ультразвукового вигладжування з попереднім зазором: 1 – інструмент; 2 – деталь**

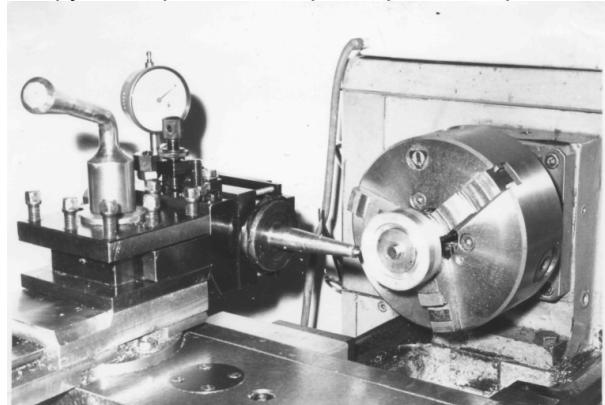
Зазор  $\delta$  повинен бути менше ніж амплітуда коливань  $\xi$ . У процесі обробки, інструмент періодично впроваджується в поверхню деталі на глибину

$$h = \xi - \delta - h_{пр}, \quad (1)$$

де  $h_{пр}$  – пружне відтиснення деталі.

Після здійснення впровадження інструмент відокремлюється від оброблюваної поверхні. На деталь діє тільки динамічне навантаження. Такий спосіб дозволяє обробляти нежорсткі та з переривчастими поверхнями деталі, не дає завалів та напливів

на торцях. В літературних джерелах відсутні дослідження подібної схеми поверхневого пластичного деформування. Тому для визначення умов, при яких проходить поверхневе пластичне деформування необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження контактної взаємодії інструмента з деталлю в процесі ультразвукового вигладжування з попереднім зазором. Для проведення досліджень нами розроблено стенд (рис.2) на базі токарно – гвинторізного верстата особливо високої точності 16Б05АФ10. Всі додаткові пристрої та інструмент кріпляться в різцетримачі верстата.



**Рис. 2. Загальний вигляд стенда для вигладжування**

Одним із найважливіших елементів технологічного процесу є призначення припусків на обробку. Особливо важливо це при обробці точних деталей. По даним [5] розмір деталей після алмазного вигладжування може змінюватись на 3 – 5 мкм. В [1] відзначається, що при ультразвуковому вигладжуванні практично не змінюється розмір деталі. Величина припуску для цієї операції визначається за формулою

$$\Delta D = b \cdot R_{авих}, \quad (2)$$

де  $\Delta D$  – припуск на діаметр, мкм;  $b$  – коефіцієнт, який залежить від матеріалу деталі (для сталі 45  $b = 4,6$ );  $R_{авих}$  – середнє арифметичне відхилення вихідного профілю поверхні, мкм.

В [2] показано, що пластична деформація при вигладжуванні визначається наступною залежністю:

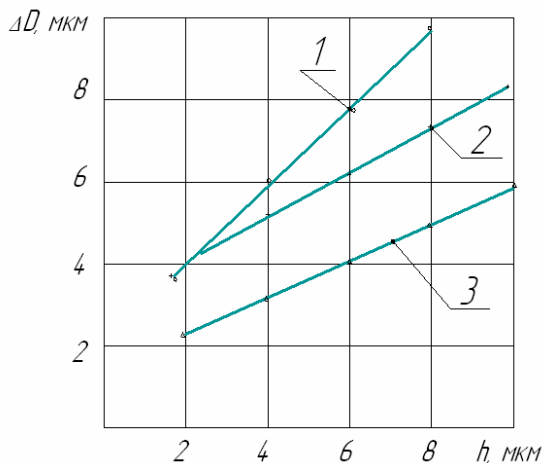
$$U = 0,05 \cdot P - 0,5, \quad (3)$$

де  $P$  – сила вигладжування.

Як видно з наведених (2, 3) залежностей у них безпосередньо не враховуються механічні характеристики матеріалу деталі, радіус інструмента, глибина впровадження інструмента в деталь. Тому для вивчення впливу режимів обробки на зміну розмірів

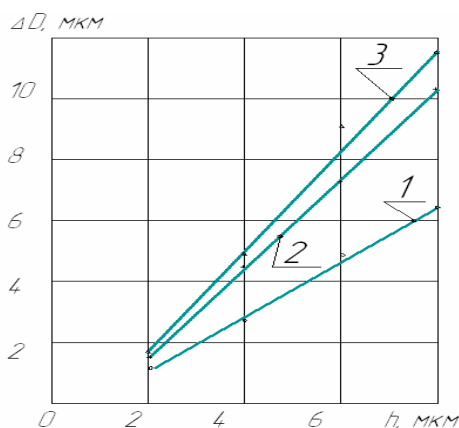


деталей провели ряд дослідів. Досліди проводились на зразках із сталей 10 (100 HB), 45 (150 HB, 50 HRC), ШХ15 (210 HB, 55 HRC), алюмінієвих сплавів Д16Т (120 HB), В95 (190 HB). Вигладжування проводилось інструментом із наконечником із твердого сплаву ВК15 із радіусом сфери 1, 2, 4 і 6 мм. Розміри деталей вимірювались до та після обробки на вимірювальній машині фірми "Оліветі", а також важільною скобою з ціною поділки 1 мкм. На рисунку 3 показані залежності зміни діаметру деталі від глибини впровадження наконечника інструменту при обробці алюмінієвих сплавів.



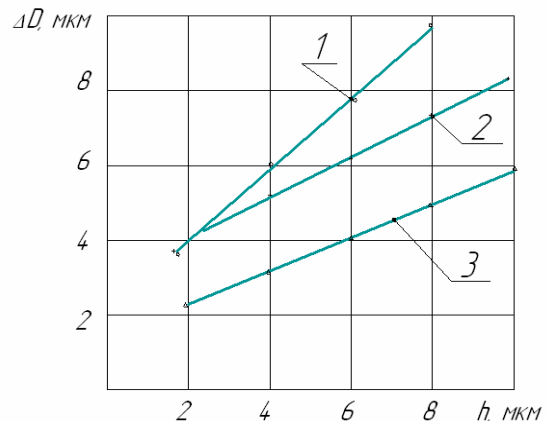
**Рис. 3. Залежність зміни діаметра деталі від глибини впровадження:**  
1 – Д16Т; 2 – В95; 3 – ПВ90

Як видно з наведених залежностей, зміна діаметра залежить від твердості матеріалу деталі. Чим вище твердість, тим менше зміна. Вихідна шорсткість оброблюваної поверхні також суттєво впливає на зміну діаметра після обробки (рис. 4).



**Рис. 4. Залежність зміни діаметра деталі від глибини впровадження індентора при різній вихідній шорсткості оброблюваній матеріал – Д16;  $\xi$  – 12 мкм; S – 0,01 мм/об; R – 2 мм; 1 –  $R_a$  0,01; 2 –  $R_a$  0,07; 3 –  $R_a$  1,5**

При малих глибинах проникнення цей вплив зменшується, тому, що змінюються лише вершини мікронерівностей. Із збільшенням глибини проникнення більш високі вершини змінюються інтенсивніше, так як у зоні контакту виникають значні контактні тиски, внаслідок малої фактичної площі контакту. Для всіх досліджених матеріалів ці залежності мають однаковий характер. Зміна діаметра деталі після обробки наконечниками з різними радіусами сфери показана на рисунку 5.



**Рис. 5. Залежність зміни діаметра деталі від радіуса сфери наконечника оброблюваний матеріал – Д16;  $\xi$  – 12 мкм; S – 0,01 мм/об; V – 1,33 м/с**  
1 – R=2 мм; 2 – R=4 мм; 3 – R=6 мм

При обробці інструментом із меншим радіусом сфери наконечника діаметр деталі зменшується більше ніж при обробці інструментом із більшим радіусом, при однаковій глибині впровадження. Це пояснюється тим, що контактні тиски пов'язані з площею контакту інструмента з деталлю. Очевидно, що для інструмента з меншим радіусом сфери наконечника площа контакту менша, а, відповідно, контактні тиски більше ніж для інструмента з більшим радіусом робочої сфери.

З ціллю виведення залежностей для визначення зміни діаметра деталі після обробки провели повний факторний експеримент. В якості змінних факторів було прийнято:

- твердість матеріалу деталі HB 100 – 200;
- глибина впровадження  $h = 2 - 8$  мкм;
- радіус робочої сфери інструмента  $R = 2 - 6$  мм;
- вихідна шорсткість поверхні  $R_a = 0,4 - 4$  мкм

Цільова функція має вигляд

$$h_{nl} = C_0 \cdot HB^m \cdot h^n \cdot R^p \cdot R_a^t, \quad (4)$$



де  $C_0$  – постійний коефіцієнт;  $m, n, p, t$  – невідомі показники степені.

Ця залежність нелінійна по факторах. Логарифмуючи, зведемо її до лінійного вигляду

$$\ln h_{nl} = \ln C_0 + m \ln HB + n \ln h + p \ln R + t \ln R_a \quad (5)$$

Уведемо позначення  $\ln h_{pl} = \hat{y}$ ;

$\ln C_0 = b_0$ ;  $m = b_1$ ;  $HB = \bar{X}_1$ ;  $n = b_2$ ;  $h = \bar{X}_2$ ;  $p = b_3$ ;

$R = \bar{X}_3$ ;  $t = b_4$ ;  $R_a = \bar{X}_4$ .

Тоді

$$y = b_0 + b_1 \cdot \ln \bar{x}_1 + b_2 \cdot \ln \bar{x}_2 + b_3 \cdot \ln \bar{x}_3 + b_4 \cdot \ln \bar{x}_4$$

Для визначення коефіцієнтів цього рівняння використаємо повний факторний експеримент типу  $2^4$ .

Перетворимо незалежні змінні  $\bar{x}_i$  в безрозмірні

$$x_i = \frac{2(\ln \bar{x}_i - \ln \bar{x}_{i \max})}{\ln \bar{x}_{i \max} - \ln \bar{x}_{i \min}} + 1 \quad (6)$$

Результати кодування змінних факторів і рівні їх варіювання наведено у таблицю 1.

Таблиця 1

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання

Рівні факторів	HB		h, мкм		R, мм		R <sub>a</sub> , мкм	
	$\bar{x}_1$	$\ln \bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\ln \bar{x}_2$	$\bar{x}_3$	$\ln \bar{x}_3$	$\bar{x}_4$	$\ln \bar{x}_4$
Верхній, + 1	200	5,19	8	2,08	6	1,79	4	1,39
Основний, 0	150	-	5	-	4	-	2,2	-
Нижній, - 1	100	4,70	2	0,69	2	0,69	0,4	-0,92

Рівняння з уведенням членів, які враховують взаємовплив факторів, запишемо в кодових змінних наступним чином

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + b_{124} x_1 x_2 x_4 + b_{234} x_2 x_3 x_4 + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 \quad (7)$$

Модель повинна забезпечувати добру відтворюваність результатів дослідів. Тому вибрана кількість повторних експериментів  $r = 2$ . При проведенні експериментів використана матриця повного факторного експерименту типу  $2^4$ . Коефіцієнти моделі обчислювали за формулою [8]:

$$b_i = \frac{\sum_{v=1}^n x_{iv} \bar{y}_v}{n} \quad (8)$$

де  $i$  – номер фактора;  $n$  – число дослідних точок у плані;

$$\bar{y}_v = \frac{\sum_{i=1}^r y_i}{r} \quad \text{– середній відгук по числу}$$

повторних дослідів в точці з номером  $v$ , де  $r$  – число повторних дослідів.

Значення коефіцієнтів представлені нижче:

$$b_0 = 0,58; b_1 = -0,419; b_2 = 0,704;$$

$$b_3 = -0,277; b_4 = 0,217; b_{12} = 0,222;$$

$$b_{13} = -0,027; b_{14} = 0,061; b_{23} = -0,053;$$

$$b_{24} = -0,007; b_{34} = 0,102; b_{123} = 0,061;$$

$$b_{124} = 0,016; b_{234} = -0,022; b_{1234} = 0,011.$$

Дисперсію відтворюваності дослідів визначали за формулою:

$$S^2 \{y\} = \frac{\sum_{V=1}^N \sum_{j=1}^r (y_{vj} - \bar{y}_v)^2}{N(r-1)}$$

Для  $f = r - 1 = 1$ ;  $N = 16$  при  $\alpha = 0,05$   $G_{кр} = 0,4546$ .  $G < G_{кр}$ .

Гіпотеза про однорідність дисперсій приймається.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії:

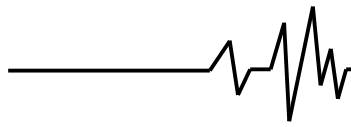
$$S^2 \{b_i\} = \frac{S^2 \{y\}}{N \cdot r} = \frac{0,111}{16 \cdot 2} = 3,47 \cdot 10^{-3}.$$

$$S \{b_i\} = \pm 0,059.$$

Критичне значення критерію Стьюдента для  $f = N(r - 1) = 16$  і  $\alpha = 0,05$  знаходимо по таблиці [8]  $t_{кр} = 2,12$ . Половина довжини довірчого інтервалу

$$\Delta b_i = t_{кр} \cdot S \{b_i\} = 2,21 \cdot 0,059 = 0,125.$$

Коефіцієнт значущий, якщо  $|b_i| \geq \Delta b_i$ . В результаті, в кодових змінних модель буде мати наступний вигляд:



$$\hat{y} = 0,58 - 0,419x_1 + 0,704x_2 - 0,277x_3 + 0,217x_4 + 0,222x_1x_2 \quad (9)$$

Перевірка адекватності моделі. Дисперсія адекватності [8]:

$$S_{ad}^2 = \frac{r}{N - m} \sum_{v=1}^{16} (\bar{y}_v - \hat{y}_v)^2,$$

де  $m = 6$  – число членів полінома.

Підставив у формулу (9) значення (+1) і (-1) у відповідності з матрицею планування, отримаємо розрахункове значення  $\hat{y}_v$ .

$$S_{ad}^2 = \frac{2}{16 - 6} \cdot 0,301 = 0,0603.$$

Критерій Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}} = \frac{0,0603}{0,111} = 0,54.$$

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 0,58 - 0,419(4,08 \ln HB - 20,18) + 0,704(1,44 \ln h - 1,99) - \\ & - 0,277(1,82 \ln R - 2,25) + 0,217(0,87 \ln R_a - 0,2) + \\ & + 0,222(4,08 \ln HB - 20,18)(1,44 \ln h - 1,99), \end{aligned} \quad (10)$$

або

$$\ln h_{nl} = \ln e^{17,213} + \ln HB^{-3,512} + \ln h^{1,305 \ln HB - 5,43} + \ln R^{-0,504} + \ln R_a^{0,189} \quad (11)$$

Потенціуючи, отримаємо

$$h_{nl} = 29,89 \cdot 10^6 \cdot HB^{-3,512} \cdot R^{-0,504} \cdot R_a^{0,189} \cdot h^{1,305 \ln HB - 5,43} \quad (12)$$

Рівняння (12) дає можливість розрахувати величину пластичної деформації при ультразвуковому вигладжуванні з попереднім зазором, а, отже і зміну розмірів деталей після обробки.

Аналогічно вивели рівняння для розрахунку зміни розмірів деталей після ультразвукового вигладжування загартованих сталей твердістю HRC 50...55. Воно має наступний вигляд

$$h_{nl} = 0,0165 \cdot R^{-0,55} \cdot R_a^{0,15} \cdot h^{2,198} \quad (13)$$

Границі змінних факторів у залежності (13) такі ж, як і в (12). Розрахунки коефіцієнтів регресії проводили на ПЕОМ за допомогою програми EXCEL 2000.

Рівняння (12), (13) дають можливість розрахувати припуск на обробку циліндричних деталей, в цьому випадку

$$\Delta D = 2h_{nl}. \quad (14)$$

Однак, у процесі обробки можлива нерівномірна твердість металу заготовки, шорсткість поверхні, а також глибина впровадження інструмента в деталь за рахунок, наприклад, конусності заготовки. Це призведе

до зміни діаметра деталі повздовж твірної. При обробці точних деталей ця зміна може перебільшити межу допуску. Тому розміри таких деталей необхідно контролювати в процесі обробки. Розглянемо як можливо здійснити такий контроль.

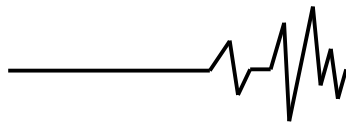
Переміщення інструменту запишемо у вигляді

$$u(t) = \zeta \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (15)$$

де  $\omega = 2\pi \cdot f$  – колова частота коливань, тут  $f$  – частота коливань. Згідно рис. 1 до початку контактування з поверхнею деталі інструмент пройде шлях  $\delta$  за час  $t_1$ . Рівняння руху інструмента за цей проміжок часу запишемо як

$$\zeta \cdot \sin \omega \cdot t_1 = \delta. \quad (16)$$

Після досягнення інструментом поверхні деталі він згідно (1) впровадиться в деталь на глибину  $h = \zeta - h_{np}$ , а загальне, з початку періоду коливань, переміщення дорівнює амплітуді коливань  $\zeta$ . Це переміщення проходить за проміжок часу  $t_2$ . Рівняння руху в цьому проміжку часу виглядає наступним чином



$$\zeta \cdot \sin \omega \cdot t_2 = \zeta. \quad (17)$$

В цей період здійснюється пружна й пластична деформація поверхні деталі. Враховуючи періодичний характер руху, на наступному етапі напрям вектора швидкості змінюється на протилежний і інструмент рухається від поверхні деталі, знаходячись у контакті з деталлю на шляху, який дорівнює пружному відновленню самої деталі  $h_{np}$  та її

деформованої поверхні  $h_{nпн}$  на протязі часу  $t_3$ .

Якщо знехтувати величиною пружного відновлення деталі  $h_{np}$ , то рівняння руху за цей період виглядає наступним чином

$$\zeta \cdot \sin \omega \cdot t_3 = h_{nпн} \quad (18)$$

Очевидно, що час контакту інструмента з деталлю рівний

$$t_k = t_2 - t_1 + t_3 \quad (19)$$

З (16), (17), (18) визначимо

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{\delta}{\zeta}; \quad (20)$$

$$t_2 = \frac{\pi}{2\omega}; \quad (21)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{h_{nпн}}{\zeta}. \quad (22)$$

Підставивши (20), (21), (22) в (19) і, зробивши нескладні перетворення, отримаємо

$$t_k = \frac{1}{\omega} \left( \arccos \frac{\delta}{\zeta} + \arcsin \frac{h_{nпн}}{\zeta} \right). \quad (23)$$

При вигладжуванні деталей з попередньою шорсткістю поверхні  $R_a \geq 1,25 \dots 0,63$  мкм для першого навантаження, звичайно, переважає пластична деформація виступів [9]. В цьому випадку матеріал поводить себе як жорстко-пластичний, а вираз (23) для цього випадку має вигляд

$$t_k = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{\delta}{\zeta}. \quad (24)$$

З (23) можна визначити величину пружної деформації поверхні деталі  $h_{np}$

$$h_{np} = \zeta \cdot \sin \left( \omega \cdot t_k - \arccos \frac{\delta}{\zeta} \right). \quad (25)$$

Якщо знехтувати пружним відтисненням деталі в процесі обробки, то величина

пластичної деформації поверхні деталі становить

$$h_{nl} = \xi - \delta - h_{nпн} \quad (26)$$

Підставивши (25) в (26) і, зробивши нескладні перетворення, отримаємо

$$h_{nl} = \xi \left[ 1 - \sin \left( \omega \cdot t_k - \arccos \frac{\delta}{\zeta} \right) \right] - \delta. \quad (27)$$

Для жорстко-пластичних матеріалів

$$h_{nl} = \zeta (1 - \cos \omega \cdot t_k). \quad (28)$$

З урахуванням (27), (28) зміна діаметра циліндричної поверхні

$$\Delta D = 2 \left[ \zeta (1 - \sin (\omega \cdot t_k - \arccos \delta / \zeta)) - \delta \right]; \quad (29)$$

$$\Delta D = 2 \zeta (1 - \cos \omega \cdot t_k). \quad (30)$$

Таким чином, використовуючи вищевикладене можливо контролювати розміри деталі в процесі обробки, контролюючи час контакту інструмента з деталлю. Це дає можливість автоматизувати процес вигладжування з попереднім зазором.

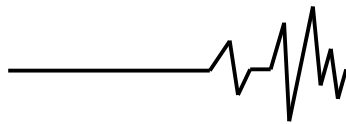
При розрахунку часу контакту інструмента з деталлю було прийняте припущення, що інструмент упроваджується в поверхню деталі на глибину  $h$ , яка дорівнює різниці амплітуди коливань  $\zeta$  і зазору  $\delta$ . Для перевірки цього припущення використали результати експериментів по вигладжуванню деталей з алюмінієвих сплавів Д16Т (НВ 120), В95 (НВ 180) та загартованої сталі 45 (HRC 50). Деталі із алюмінієвих сплавів вигладжували твердосплавним наконечником із радіусом сфери наконечника 2 мм при глибині впровадження 2, 4 та 6 мкм. При вигладжуванні сталі 45 використовувався інструмент з радіусом робочої частини 1 мм із глибинами впровадження 4, 6 та 8 мкм. В експериментах визначали величину пластичної деформації  $h_{nпн}$ . По отриманому значенню пластичної деформації за залежністю (31) [9] розраховували нормальну силу вигладжування  $N$

$$h_{nl} = \frac{N}{2\pi R C \sigma_s} - \frac{3}{8} I (N \pi C \sigma_s)^{1/2}, \quad (31)$$

де  $C$  – стала величина ( $C \approx 3$ );  $\sigma_s$  – межа текучості матеріалу деталі;

$$I = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad \text{тут } \mu_1, \mu_2 - \text{ коефіцієнт}$$

Пуассона матеріалу інструмента та деталі відповідно;  $E_1, E_2$  – модуль пружності матеріалу інструменту та деталі відповідно.



По отриманому з (31) значенню  $N$  розраховували величину пружної деформації по залежності (32) [9].

$$h_{прп} = 0,75I\sqrt{N \cdot \pi \cdot C \cdot \sigma_s} \quad (32)$$

Результати експериментів та розрахунків представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Експериментальні та розрахункові значення деформації**

Матеріал деталі	Експериментальні та розрахункові параметри	Глибина впровадження, мкм		
		2	4	6
Д16Т, HB 120	$h_{пл}$ експериментальне, мкм	2	3	5
	$h_{прп}$ , розрахункове за (32), мкм	4	5	6
	$\sum(h_{пл} + h_{прп})$ , мкм	6	8	11
В95, HB 180	$h_{пл}$ експериментальне, мкм	0,5	2	4
	$h_{прп}$ , розрахункове за (32), мкм	5,3	7	9
	$\sum(h_{пл} + h_{прп})$ , мкм	5,8	9	13
Сталь 45, HRC 50	$h_{пл}$ експериментальне, мкм	4	6	8
	$h_{прп}$ , розрахункове за (32), мкм	0,5	1	2
	$\sum(h_{пл} + h_{прп})$ , мкм	4,3	5	6
		4,8	6	8

**Висновки**

Як видно з розрахунків та експериментальних даних сума пружної та пластичної деформацій у всіх випадках перевищує глибину впровадження інструмента в поверхню деталі. Отже, припущення, що інструмент упроваджується в деталь на глибину, яка дорівнює різниці амплітуди коливаний і попереднього зазору вірні.

**Список використаних джерел**

1. Канарчук В. Є. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів; сучасний стан і перспективи / В. Є. Канарчук, Е. К. Посвятенко, Л. А. Лопата // Вісник НТУ, ТАУ. – 2000. – Вип. 4 – С. 3-14.
2. Посвятенко Е.К. Модифікування поверхні деталей машин ультразвуковим методом / Е. К. Посвятенко, В.В. Турич, В. І. Шевченко // Вісник НТУ. – 2003. № 8 – С. 28-33.
3. Асташев В.К. О влиянии высокочастотных вибраций на процессы пластического деформирования / В.К. Асташев. – Машиноведение. – 1983. № 2. – С. 3-12.
4. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
5. Турич В.В. Качество поверхности деталей, обработанных деформирующим протягиванием с наложением ультразвука. / В.В. Турич, В.К. Асташев // Повышение

эффективности протягивания. Рига: Риж. политехн. ин-т, 1986. – С.131-135.

6. Деклараційний патент України на корисну модель № 70985 У, МПК В24В 39/00 / Спосіб ультразвукової зміцнюючої обробки / Турич В.В., Руткевич В.С.; заявник та патентовласник Вінницький національний аграрний університет. – № u 2012 00461; заявл. 16.01.12; опубл. 25.06.2012, Бюл. №12.

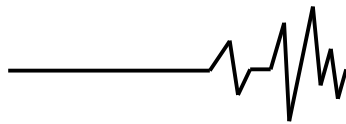
7. Деклараційний патент України на корисну модель № 101967 У, МПК G01Н 1/08 / Пристрій для вимірювання параметрів ультразвукових коливаний / Турич В.В., Руткевич В.С.; заявник та патентовласник Вінницький національний аграрний університет. – № u 2015 03354; заявл. 10.04.15; опубл. 12.10.2015, Бюл. №19.

8. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: «Наука», 1976. – 278 с.

9. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В.. Рыжов.– М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

**Список джерел в транслітерації**

1. Kanarchuk V. Іe. Inzheneriia poverkhnii detalei transportnykh zasobiv; suchasnyi stan i perspektyvy / V. Іe. Kanarchuk, E. K. Posviatenko, L. A. Lopata // Visnyk NTU, TAU. – 2000. – vup. 4 – S. 3 – 14.



2. Posviatenko E. K. Modyfikuvannia poverkhni detalei mashyn ultrazvukovym metodom / E. K. Posviatenko, V. V. Turych, V. I. Shevchenko // Visnyk NTU. – 2003. № 8 – S. 28 – 33.

3. Astashev V.K. O vliianii vysokochastotnykh vibratsii na protsessy plasticheskoho deformirovaniia / V. K. Astashev // Mashinovedeniie. – 1983. № 2. – S. 3-12.

4. Markov A.I. Ultrazvukovaia obrabotka materialov / A.I. Markov. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 237 s.

5. Turych V.V. Kachestvo poverkhnosti detalei, obrabotannykh deformiruiushchim protiahivaniem s nalozheniim ultrazvuka / V. V. Turych, V. K. Astashev // Povysheniie effektivnosti protiahivaniia. Riha: Ryzh. politekhn. in-t, 1986. – S. 131-135.

6. Deklaratsiinyi patent Ukrainy na korysnu model № 70985 U, МПК В24В 39/00 / Sposib ultrazvukovoi zmitsniuiuchoi obrobky / Turych V. V., Rutkevych V.S.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Vinnytskyi natsionalnyi agrarnyi universytet – № u2012 00461; zaiavl.. 16.01.12; opubl. 25.06.2012, Byul. № 12.

7. Deklaratsiinyi patent Ukrainy na korysnu model № 101967 U, МПК G01H 1/08 / Prystrii dlia vymiriuvannia parametriv ultrazvukovykh kolyvan / Turych V.V., Rutkevych V.S.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Vinnytskyi natsionalnyi agrarnyi universytet – № u 2015 03354; zaiavl.. 10.04.15; opubl. 12.10.2015, Byul. № 19.

8. Adler, Yu.P. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovii / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Hranovskii. – M.: «Nauka», 1976. – 278 s.

9. Demkin, N.B. Kachestvo poverkhnosti i kontakt detalei mashin / N.B. Demkin, E. V. Ryzhov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 244 s.

## КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНСТРУМЕНТА С ДЕТАЛЬЮ В ПРОЦЕССЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОМ

**Аннотация.** Представлен усовершенствованный способ ультразвукового выглаживания с пришедшим зазором, позволяющим обрабатывать нежесткие и с прерывистыми поверхностями детали, не дает завалов и наплывов на торцах, а также приведена экспериментальная установка, которая позволяет провести исследования контактного взаимодействия инструмента с деталью в процессе ультразвукового выглаживания с пришедшим зазором.

**Ключевые слова:** ультразвуковое выглаживание, инструмент, поверхностное пластическое деформирование, магнитострикционный преобразователь, деталь.

## CONTACT INTERACTION OF THE TOOL WITH THE DETAIL IN THE PROCESS OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION WITH ULTRASOUND

**Annotation.** An improved method of ultrasonic burnishing with a previous gap allowing processing of non-rigid and intermittent surfaces of a part is presented, and no blockages or incisions at the ends are provided, and an experimental setup is provided that allows to conduct studies of the contact interaction of the tool with the workpiece during the ultrasonic burnishing with the previous gap.

**Key words:** ultrasonic burnishing, tool, surface plastic deformation, magnetostrictive transducer, detail.