

## КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ІНСТРУМЕНТА З ДЕТАЛЛЮ В ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУЮЧОГО ПРОТЯГУВАННЯ З УЛЬТРАЗВУКОМ

### CONTACT INTERACTION TOOL WITH DETAIL DURING DEFORMING BROACHING WITH ULTRASOUND

**Мета.** Метою роботи є вдосконалення процесу обробки поверхонь порожнистих деталей машин типу гільз та циліндрів деформуючим протягуванням з ультразвуком та визначення теоретичних залежностей для розрахунку сил прошивання при контактній взаємодії інструмента з деталлю.

**Методи дослідження.** Для опису процесу контактної взаємодії інструмента з деталлю використано єдиний підхід, заснований на використанні реологічної моделі матеріалу.

**Результати дослідження.** Проаналізовано процес контактної взаємодії інструмента з виробом при деформуючому протягуванні з накладанням ультразвуку, виявлено залежності які надають можливість розрахувати силу протягування, що спостерігається, у різних умовах контактної взаємодії. Показано достатньо близьке співпадання експериментальних і розрахункових значень сил деформуючого протягування з ультразвуком.

**Висновки.** Отримані теоретичні залежності для розрахунку сил прошивання при обробці поверхонь деталей з накладанням ультразвуку. Запропоновано конструкцію деформуючих прошивок для прошивання порожнистих деталей машин типу гільз та циліндрів з накладанням ультразвуку.

**Ключові слова:** деформуюче протягування, інструмент, ультразвук, контактна взаємодія, мікрошліф, надійність, довговічність, гідроциліндр.

#### Вступ

Сучасний рівень розвитку гідроциліндрів вимагає від їх розробників подальшого підвищення показників технічного рівня, конкурентоспроможності, розширення функціональних можливостей. Зростають вимоги до стану робочих поверхонь гідроциліндрів — точності отвору по допустимих відхиленнях від прямолінійності осі та некругlosti, шорсткості робочої поверхні, мікрорельєфу поверхні, а також до підвищення робочих тисків. Ці вимоги успішно можна забезпечити технологічним процесом, заснованим на деформуючому протягуванні з ультразвуком. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки технологій виготовлення гільз гідроциліндрів.

#### Сучасний стан питання та завдання дослідження

Проблема підвищення точності обробки поверхонь порожнистих деталей машин типу гільз та циліндрів висвітлюється багатьма авторами [1-3]. Однак з позиції ресурсозбереження, що є надзвичайно актуальним для економіки України, дані процеси вивчено недостатньо. Оскільки адгезійні явища в процесах обробки матеріалів холодним пластичним деформуванням є безумовно шкідливими, чимало дослідників процесів рекомендують

застосовувати мастила з високими екрануючими властивостями, тобто антиадгезійні матеріали, наповнювачами в яких є дисульфід молібдену, графіт та інші подібні речовини, які здатні витримувати високий контактний тиск, забезпечують надійне розділення поверхонь деталі та інструменту при обробці і низькі значення коефіцієнта зовнішнього тертя (0,07–0,1). Проте такий шлях боротьби з адгезією є непридатним для чистових процесів холодного пластичного деформування, оскільки не дає можливості знизити шорсткість поверхні деталі, отримати високі значення деформаційного зміцнення, текстуру та корисні стискуючі напруження у поверхневому шарі.

У роботах [3, 4] показано, що в процесі холодного пластичного деформування із застосуванням ультразвукових коливань (УЗК), тобто при періодичному примусовому роз'єднанні інструмента і деталі при обробці, значно поліпшується якість та знижуються напруженість операції, періодичне його заглиблення в поверхню деталі і миттєве розірвання контакту поверхонь інструмента і деталі.

Для вирішення практичних задач застосування таких методів актуальними є проведені дослідження.

Мета роботи полягає у підвищенні точності обробки поверхонь порожнистих деталей в процесі деформуючого

протягування з ультразвуком за рахунок оптимізації контакту взаємодії інструмента з деталлю.

### Виклад основного матеріалу

Використання операцій деформуючого протягання дозволяє знизити трудомісткість обробки, а також підвищити надійність і довговічність гідропривода за рахунок поліпшення якості отвору гідроциліндра.

Застосування ультразвуку дозволяє розширити технологічні можливості деформуючого протягання, а саме: підвищити точність отвору, прямолінійність осі гідроциліндра, створювати на внутрішній поверхні мікрорельєф для утримання змащення [4].

Для розробки такого технологічного процесу розглянемо контактну взаємодію інструмента з деталлю при деформуючому протяганні з накладенням ультразвуку. На рис.1 показана схема деформуючого протягання з накладенням ультразвуку.

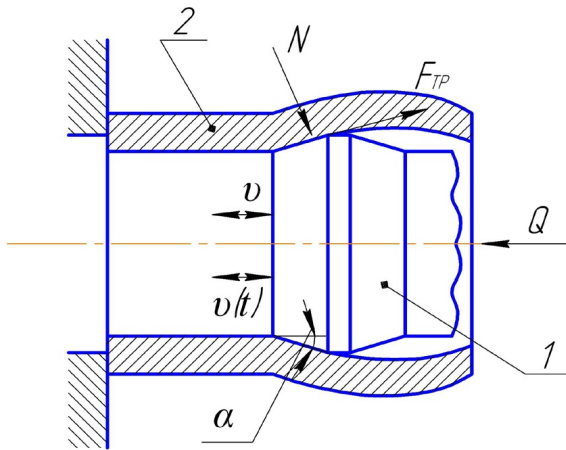


Рисунок 1 — Схема протягання з ультразвуком

Деформуючий елемент 1 здійснює гармонічні коливання з амплітудою  $\xi$  і продавлюється через отвір деталі 2 статичною силою  $Q$ . Рівняння руху деформуючого елемента можна представити у вигляді

$$u(t) = v + \xi \sin \omega t, \quad (1)$$

де  $v$  — швидкість руху інструмента;  $t$  — час;  $\omega = 2\pi f$ , тут  $f$  — частота коливань.

Переміщення деформуючого елемента призводить до зсуву поверхонь контакту інструмента й деталі по нормалі до твірної робочого конуса інструмента:

$$u_n(t) = u(t) \sin \alpha \quad (2)$$

і до зсуву по дотичній

$$u_\tau(t) = u(t) \cos \alpha \quad (3)$$

де  $\alpha$  — кут нахилу твірної робочого конуса деформуючого елемента.

Переміщення (2), (3) спричиняють нормальні напруження  $q_n$  з рівнодіючою  $N$  і дотичні напруження  $q_\tau$  з рівнодіючою  $F_{TP}$ .

Через те, що функції (2), (3) мають періодичний характер, то упродовж деформуючого протягання матимуть місце три періоди деформації, а саме: пружної, пластичної і розвантаження. За аналогією з [5] розглянемо діаграму навантаження ідеального пружно-пластичного матеріалу. Діаграма навантаження показана на рисунку 2, а.

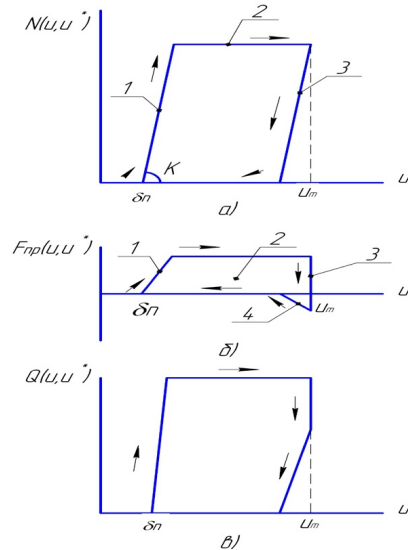


Рисунок 2 — Діаграма навантаження при  $F_{TP} = \eta \cdot N$   
На діаграмі показано: 1 — зона пружного навантаження, 2 — зона пластичної деформації, 3 — зона розвантаження

З урахуванням (2), (3) вираз для характеристики навантаження набуває вигляду

$$N(u_n, \dot{u}_n) = \begin{cases} 0 & \\ k_n(u_n - \Delta_n) \sin \alpha & \\ N & \\ N - k_n(u_m - u_n) \sin \alpha & \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

$$u_n \leq \Delta_n \quad \dot{u} \geq 0$$

$$\Delta_n \leq u_n \leq \Delta_n + S \quad \dot{u} \geq 0$$

$$\Delta_n + S \leq u_n \leq u_m \quad \dot{u} \geq 0$$

$$u_m - S \leq u_n \leq u_m \quad \dot{u} \leq 0$$

$$u_n \leq u_m - S \quad \dot{u} \leq 0$$

де  $k_n$  — жорсткість лінійної ділянки характеристики в нормальному напрямку;  $N$  — нормальна сила при пластичному деформуванні;  $\Delta$  — координата початку контактування поверхонь інструменту і деталі;  $u_{nm}$  — максимальне протягом одного періоду значення функції (1);  $S = N/k_n \sin \alpha$  — переміщення деформуючого елемента до досягнення нормальної сили  $N$ , що відповідної пластичному деформуванню.

Врахуємо, що між робочою поверхнею інструмента й оброблюваною поверхнею при їхньому відносному дотичному переміщенні виникає сила тертя

$$|F_{mp}| \leq \eta N \quad (5)$$

спрямована у бік, протилежний швидкості переміщення. Знак рівності в (5) має місце при прослизанні. При відсутності ковзання сила тертя дорівнює пружній дотичній силі. З урахуванням сказаного варто розглядати три випадки.

I. Сила тертя  $|F_{mp}| \leq \eta N$

Характеристика дотичної взаємодії має наступний вигляд

$$F_{mp}(u, \dot{u}) = \eta N(u, \dot{u}) \operatorname{sign} \dot{u} \quad (6)$$

Характеристика сили тертя в напрямку руху має вигляд:

$$F_{mpv}(u, \dot{u}) = \eta N(u, \dot{u}) \cos \alpha \operatorname{sign} \dot{u} \quad (7)$$

У виразі (7)  $F_{mpv}$  приймає наступні значення

$$\eta N(u, \dot{u}) \cos \alpha \operatorname{sign} \dot{u} = \begin{cases} \eta N(u, \dot{u}) \cos \alpha & \dot{u} \geq 0 \\ -\eta N(u, \dot{u}) \cos \alpha & \dot{u} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Сумарна характеристика в напрямку руху, тобто сила протягування

$$Q(u, \dot{u}) = N(u, \dot{u}) \sin \alpha + F_{\partial}(u, \dot{u}) \cos \alpha \quad (9)$$

На рисунку 2, б показано залежність (8). На ділянках 1, 2 характеристики сили тертя (рисунку 2, б), що відповідають навантаженню, відбувається ковзання поверхонь, на ділянці 3 розвантаження з наступним пружним негативним натягом, на ділянці 4 — розвантаження з ковзанням. На рисунку 2 в суцільною лінією показано сумарну характеристику. Сумарна характеристика описує всі можливі ситуації (рисунку 2, в).

Описаний вище випадок можна розглядати як граничний перехід, оскільки відносно ковзання інструмента й деталі передусе зрушення оброблюваної поверхні разом з інструментом [6]. Розрахунок за вищевикладеною методикою, що не враховує попереднього зрушення поверхні, даватиме похибку, особливо при малих амплітудах коливань інструмента.

Для врахування попереднього зрушення прийемо, що оброблювана поверхня деталі має також зсувну жорсткість  $k_{\tau}$  у напрямку твірної робочого конуса деформуючого елемента.

З урахуванням вищесказаного розглянемо наступні ситуації.

II. Коефіцієнт тертя

$$\eta \leq k_{\tau} \operatorname{ctg} \alpha / k_n \quad (10)$$

Характеристика дотичної взаємодії для цього випадку має наступний вигляд:

$$F_{mp}(u, \dot{u}) = \begin{cases} \eta N \\ \eta N - k_{\tau}(u_m - u) \cos \alpha \\ -\eta(N - k_{\tau}(u_m - u)) \sin \alpha \\ 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{u} \geq 0$$

$$u_m - \frac{2S}{1+m} \leq u \leq u_m \quad \dot{u} \leq 0$$

$$u_m - S \leq u \leq u_m - \frac{2S}{1+m} \quad \dot{u} \leq 0$$

$$u_m - S \leq u$$

де  $m = \frac{k_{\tau}}{k_n} \operatorname{ctg} \alpha$ .

Сумарна характеристика в напрямку руху аналогічна (9).

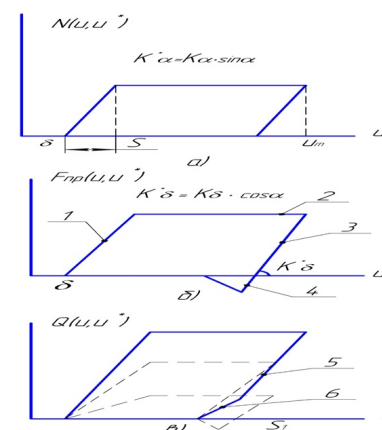


Рисунок 3 — Діаграма навантаження при  $\eta \leq \frac{k_{\tau}}{k_n} \operatorname{ctg} \alpha$

На рисунках 3, а, б показано залежності (4) і (11). На ділянках 1, 2 характеристики сили тертя (рисунку 3, б), що відповідають навантаженню, відбувається ковзання поверхонь, на ділянці 3 — пружне розвантаження з наступним пружним негативним натягом унаслідок тертя, на ділянці 4 — розвантаження з прослизанням.

На рисунку 3, в суцільною лінією показано сумарну характеристику, а штриховими — її складові:  $N(u, \dot{u})$ ,  $F_{mp}(u, \dot{u})$ .

Якщо амплітуда коливань інструмента  $\xi \leq S_1/2$  відбувається чисто пружна взаємодія, що встановлюється після перехідного процесу (ділянка 5, рисунок 3, в). Тут матеріал поводить як пружно-пластичний з коефіцієнтом жорсткості

$$k = k_n \sin^2 \alpha + k_{\tau} \cos^2 \alpha \quad (12)$$

Зазначимо, що згідно (11)

$$S_1 = 2S/(1+m) \quad (13)$$

Як видно з (12), (13)  $k_t$  і  $\eta$  мають велике значення при розрахунку загального коефіцієнта жорсткості. Наприклад, при  $\alpha = 5^\circ$   $k \approx 0,0076k_n + 0,9 k_t$ .

При цих умовах справедливі усі висновки [7], згідно яких

$$Q_y = Q - \xi k \quad (\text{при } \xi \leq S_1), \quad (14)$$

де  $Q_y$ ,  $Q$  — сили протягування з ультразвуком та без ультразвуку, відповідно.

При великих амплітудах починаються нелінійні перекручування, пов'язані із заходом на гілку характеристики, позначену ділянкою б на рисунку 3, в. При цьому відбувається прослизання і втрати на тертя по поверхні контакту інструмента й деталі.

III. Якщо коефіцієнт тертя

$$\eta \geq k_t \text{ctg} \alpha / k_n, \quad (15)$$

характеристика дотичної взаємодії має вигляд

$$F_\delta(u, \dot{u}) = \begin{cases} 0 \\ k_t(u - \Delta) \cos \alpha, \\ \eta N \\ \eta N(u, \dot{u}) \end{cases}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u \leq \Delta & \quad \dot{u} \geq 0 \\ u \leq \Delta + S/m & \quad \dot{u} \geq 0 \\ \Delta + S/m \leq u \leq u_m & \quad \dot{u} \geq 0 \\ \dot{u} \leq 0 & \end{aligned}$$

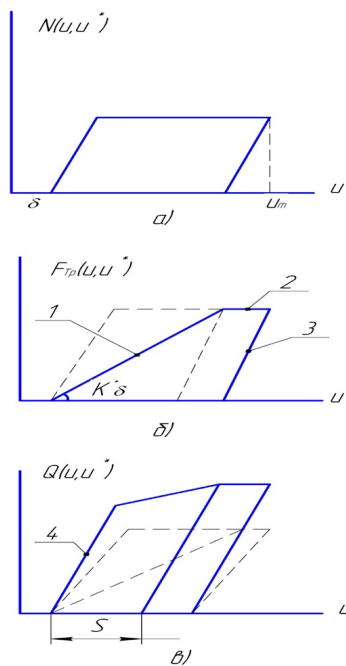


Рисунок 4 — Діаграма навантаження при  $\eta \geq \frac{k_t}{k_n} \text{ctg} \alpha$

На рисунку 4 а, б показано характеристики (4), (16). На ділянці 1 (рисунок 4, б) дотичної характеристики (16) відбувається пружна деформація, 2 — ковзання, 3 — розвантаження з прослизанням. Сумарну характеристику представлено на рисунку 4, в. Тут зона пружного деформування обмежена лінією 4.

Для усіх трьох випадків при  $\xi \geq S_1$  з допомогою теореми імпульсів, підставляючи в (17) відповідні характеристики нормальної і дотичної взаємодії, можна одержати співвідношення, що зв'яже постійну статистичну силу з параметрами руху інструмента і характеристиками оброблюваного матеріалу

$$Q_y = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} (N(u, \dot{u}) \sin \alpha + F_{\text{тп}}(u, \dot{u}) \cos \alpha) dt \quad (17)$$

Для перевірки отриманих залежностей було проведено експерименти з протягування втулок зі сталі 10 із розмірами (мм): зовнішній діаметр — 30, діаметр отвору — 10, натяг на деформуючий елемент — 0,2. Втулки оброблялися твердосплавними деформуючими елементами з кутом нахилу твірної робочого конуса  $5^\circ$ . Як змащення застосовувався сульфозфрезол.

Жорсткість лінійної ділянки характеристики в нормальному напрямку визначали за методикою, викладеною в [4]. Для досліджуваних деталей вона складала  $k_n = 5,92 \cdot 10^6$  МН/м. Дотичну жорсткість визначали в такий спосіб. З обробленої втулки виготовляли мікрошліфи, які фотографували. На знімку зерна металу мають характерну, яскраво виражену текстуру, тобто витягнутість і нахил зерен у напрямку протягування. На декількох ділянках мікрошліфів вимірювали величину витягнутості зерна, а потім визначали середнє значення витягнутості  $X_0$ . За методикою [8] визначали нормальну силу й силу тертя. Значення дотичної жорсткості визначали як відношення сили тертя до  $X_0$ :

$$k_t = F_\delta / X_0 \quad (18)$$

Для умов здійснення експериментів вона складала  $k_n = 6,02 \cdot 10^5$  МН/м.

Оскільки протягування проводилось з максимальними амплітудами коливань до 15 мкм, а значення  $S_1/2$  складало 17 мкм, то силу протягування визначали за залежністю (14). Експериментальні і розрахункові значення сил добре збіглися, розбіжність складала не більш 15%.

Проведений аналіз засвідчує ясну картину контактної взаємодії інструмента з виробом при деформуючому протягуванні з накладенням ультразвуку, та також дає можливість розрахувати силу протягування, що спостерігається, у різних умовах контактної взаємодії.

### Висновки

1. Отримані теоретичні залежності для розрахунку сил прошивання при обробці з накладенням ультразвуку,



свідчать про те, що механізм впливу ультразвуку на зниження сил прошивання проявляється в накопиченні малих пластичних деформацій, які збільшуються від періоду до періоду коливань за рахунок сумарного поступального і коливального рухів інструменту, а також зниження сил тертя за рахунок зміни кінематики ковзання.

2. Встановлено, що вид контактної взаємодії інструменту з деталлю робить вирішальний вплив ультразвуку на зниження сил прошивання. При імпульсній взаємодії (з розривом контактних поверхонь інструменту і деталі) сила прошивання знижується до мінімуму, прагнучи до нуля, а в безперервному (без розриву контактних поверхонь) – на 60-70% в порівнянні з силою прошивання без накладення ультразвуку.

Запропоновано конструкцію деформуючих прошивок для прошивання з накладенням ультразвуку.

## Література

1. Розенберг, О.А. Обработка отверстий гидроцилиндров протяжками / О.А. Розенберг, И.Т. Прокопов, Э.К. Посвятенко // Синтетические алмазы. — 1975. — Вып. 3. — С.44-46.

2. Посвятенко, Э.К. Обработка гидроцилиндров строительных и дорожных машин протягиванием / Э.К. Посвятенко, И.В. Лунгол, И.Н. Голобородый // Строительные и дорожные машины. — 1987. — №7. — С. 8—9.

3. Проскураков, Ю.Г. Объемное дорнование отверстий / Ю.Г. Проскураков, В.Н. Романов, А.Н. Исаев. — М.: Машиностроение, 1984. — 224 с.

4. Пат. 89285 Україна, МПК В23D 43/00. Збірна деформуюча прошивка для обробки отворів з накладанням поздовжніх ультразвукових коливань / В.В. Турич, В.С. Руткевич; заявник і патентовласник Вінницький національний аграрний університет. — № u 2013 14313; заявл. 09.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. №7.

5. Турич, В.В. Качество поверхности деталей, обработанных деформирующим протягиванием с наложением ультразвука / В.В. Турич, В.К. Асташов // Повышение эффективности протягивания. — Рига: Риж. политехн. институт. — 1986. — с. 131—135.

6. Вейлер, С.Я. Действие смазок при обработке металлов давлением / С.Я. Вейлер, В.И. Лихтман. — М.: Изд-во АН СССР. — 1980. — 232 с.

7. Асташев, В.К. О влиянии высокочастотных вибраций на процессы пластического деформирования / В.К. Асташев // Машиноведение. — 1983. — №2 — С.3—12.

8. Крицкий, А.Д. Особенности разработки твердосплавных деформирующих протяжек для обработки отверстий в деталях из труднообрабатываемых металлов и сплавов: Автореф. дис... канд.техн.наук: 05.03.01/ИСМ АН УССР. — К., 1983. — 26 с.

## References

1. Rozenberg, O.A. Obrabotka otvierstii gidrotsylindrov protiazhkamy / O.A. Rozenberh, I.T. Prokopov, E.K. Posviatenko // Sinteticheskie almazы. — 1975. — Vyp. 3. — S. 44—46.

2. Posviatenko, E.K. Obrabotka gidrotsilindrov stroitelnykh i dorozhnykh mashin protiaživaniem / E.K. Posviatenko, I.V. Lungol, I.N. Goloborodyi // Stroitelnyie i dorozhnye mashyny. — 1987. — №7. — S. 8—9.

3. Proskuriakov, Yu.G. Obiomnye dornovannye otvers-tiy/ Yu. H. Proskuriakov, V.N. Romanov, A.N. Isaiev. — M.: Mashinostroenie, 1984. — 224 s.

4. Pat. 89285 Ukraina, MPK B23D 43/00. Zbirna deformuiucha proshivka dlia obrobky otvoriv z nakladanniam pozdovzhnykh ultrazvukovykh kolyvan / V.V. Turych, V.S. Rutkevych; zaiavnyk i patentovlasnyk Vinnytskyi natsionalnyi agrarnyi universytet. — № u 2013 14313; zaiavl. 09.12.2013; opubl. 10.04.2014, Biul. №7.

5. Turych, V.V. Kachestvo poverkhnosti deralei obrabotannykh deformiruiushchim protiaživaniem s nalozheniem ultrazvuka / V.V. Turych, V.K. Astashov // Povysheniye effektivnosti protiaživaniya. — Riga: Rzh. politekh. institut, 1986. — S.131—135.

6. Veilier, S.Ya., Likhtman, V.I. Dieistvie smazok pri obrabotke metallov davleniem / S.Ya. Veilier, V.I. Likhtman.. — M.: AN SSSR. — 1980.— 232 s.

8. Astashev, V.K. O vliianii vysokochastotnykh vibratsii na protsessy plastichieskoho deformirovaniia // Mashinovedeniie. — 1983. — № 2 — S. 3—12.

9. Kritskiy, A.D. Osobennosti razrabotki tvierdosplavnykh deformiruiushchikh protiazhek dlia obrabotki otvierstiy v detaliakh iz trudnoobrabatyvaiemykh metallov i splavov: Avtoref. dis... kand.tiekh.nauk: 05.03.01/ISM AN USSR. — K., 1983. — 26 s.

*Надійшла 23.12.2016 року*

УДК 621.919.2

## Контактное взаимодействие инструмента с деталью в процессе деформирующего протягивания с ультразвуком

**В.В. Турич, В.С. Руткевич**

**Цель.** Целью работы является совершенствование процесса обработки поверхностей полых деталей машин типа гильз и цилиндров деформирующим протягиванием с ультразвуком и определение теоретических зависимостей для расчета сил прошивки при контактном взаимодействии инструмента с деталью.

**Методы исследования.** Для описания процесса контактного взаимодействия инструмента с деталью использован единый подход, основанный на использовании реологической модели материала.

**Результаты исследования.** Проанализирован процесс контактного взаимодействия инструмента с изделием

при деформирующем протягивании с наложением ультразвука, выявлено зависимости позволяющие рассчитать силу протягивания наблюдаемую в различных условиях контактного взаимодействия. Показано достаточно близкое совпадение экспериментальных и расчетных значений сил деформирующего протягивания с ультразвуком.

**Выводы.** Полученные теоретические зависимости для расчета сил протягивания при обработке поверхностей деталей с наложением ультразвука. Предложена конструкция деформирующих прошивок для прошивки полых деталей машин типа гильз и цилиндров с наложением ультразвука.

*Ключевые слова:* деформирующее протягивание, инструмент, ультразвук, контактное взаимодействие, микрошлиф, надежность, долговечность, гидроцилиндр.

UDC 621.919.2

## Contact interaction tool with detail during deforming broaching with ultrasound

V.V. Turych, V.S. Rutkevych

**Goal.** The aim of this article is to improve the processing of hollow surfaces machine parts (for example, sleeves and

cylinders) by means of deforming broaching with ultrasound and to determine the theoretical dependencies for calculating insertion forces during the contact interaction of the tool with the workpiece.

**Research methods.** To describe the process of contact interaction of the tool with workpiece a common approach based on the implementation of rheological model material was used.

**Research results.** The process of contact interaction of the tool with the product by means of in deforming broaching overlaying ultrasound was analyzed. The dependencies enabling to calculate the pulling force (observed in different conditions of contact interaction) were determined. The sufficiently close matches and experimental and calculated deforming pulling forces (using the ultrasound).

**Conclusions.** The theoretical dependencies for calculating insertion forces working on the surfaces of the details (overlaying ultrasound) are received. The construction of deforming firmware for insertion of hollow type of machine parts (for example, sleeves and cylinders) is proposed.

*Keywords:* deforming broaching tool, ultrasound, contact interaction, microsections, reliability, durability, hydraulic cylinder.