

УДК 621.919

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-422-428

**С. Є. Шейкін<sup>1</sup>, І. М. Погрелюк<sup>2</sup>**, доктори технічних наук; **С. Ф. Студенець<sup>1</sup>, В. В. Люховець<sup>3</sup>, С. М. Лаврись<sup>2</sup>, І. Ю. Ростоцький<sup>1</sup>**, кандидати технічних наук; **Т. М. Дідковський, інж.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, 04074 м. Київ, e-mail: otdel20@ukr.net

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060 м. Львів, e-mail: rtmnasu@ipm.lviv.ua

<sup>3</sup> Подільський науковий фізико-технологічний центр Хмельницького національного Університету, вул. Інститутська 11, 29016 м. Хмельницький, e-mail: nauka@khnu.km.ua

## ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ХОЛОДНИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Метою цієї роботи є розробка методу зменшення схильності до захоплення оброблюваної поверхні виробів з високоміцних титанових сплавів з твердосплавним інструментом при обробці холодним пластичним деформуванням в умовах високих нормальних та дотичних контактних напружень, а саме, за технологічною схемою деформуючого протягування.

У дослідженні використовували методи тензометрії та профілометрії. Застосовували технології азотування у тліючому розряді та термодифузійного азотування.

Показано, що модифікування оброблюваної поверхні деталей азотуванням дозволяє виконувати сім циклів деформування при контактному тиску до 4 ГПа без захоплення. При цьому шорсткість обробленої поверхні зменшується у 2-5 разів.

Отримані результати можуть бути застосовані у подальших дослідженнях, спрямованих на розробку високопродуктивних технологій фінішної обробки внутрішніх поверхонь трубчастих виробів з високоміцних титанових сплавів. Конкретно вони можуть лягти в основу технологій фінішної обробки корпусів авіаційних гідроциліндрів та інших виробів, в тому числі спеціального призначення.

Оригінальність підходу полягає у використанні азотування оброблюваної поверхні виробів не для підвищення їх поверхневої міцності, а для надання їм антифрикційних властивостей, що забезпечують необхідний рівень їх стійкості проти захоплення з інструментом в ході операцій деформуючого протягування.

**Ключові слова:** високоміцні титанові сплави, холодне пластичне деформування, деформуюче протягування, термодифузійне азотування, азотування в тліючому розряді, захоплення, антифрикційні властивості.

### Вступ

Завдяки високій міцності, низькій густині та теплопровідності, стійкості до корозії та ерозії в морській воді, великій теплоємності, малому коефіцієнту термічного розширення тощо, титанові сплави займають вагоме місце серед матеріалів сучасної техніки. Промислові титанові сплави зі  $\sigma_b = 1000 - 1100$  МПа мають питому міцність, яка у 1,7–1,8 разів перевищує аналогічний показник сталей із тією ж межею міцності.

Титан та його сплави можуть оброблятися тиском всіма відомими способами гарячого пластичного деформування: куванням, прокаткою, штампуванням, витяжкою, згинанням, пресуванням. Але висока схильність до контактного захоплення при терті з майже з усіма інструментальними матеріалами [1, 2] унеможливорює використання для їх обробки високопродуктивних технологічних схем холодного пластичного деформування (ХПД), в

основі яких лежить ковзання в умовах високих нормальних та дотичних контактних напружень. Тонка оксидна плівка на титані легко руйнується при контактній взаємодії з інструментом, внаслідок чого відбувається схоплювання.

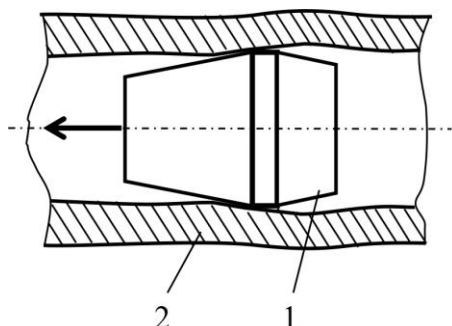


Рис. 1. Схема деформуючого протягування: 1 – деформуючий інструмент; 2 – оброблювана деталь

Завдяки своїм властивостям, титанові сплави широко використовуються у сучасній аерокосмічній промисловості для виготовлення деталей літальних апаратів, в тому числі деталей гідроциліндрів. Вимоги до точності та якості внутрішньої поверхні цих деталей достатньо високі. Для фінішної обробки внутрішньої поверхні корпусів авіаційних гідроциліндрів сьогодні використовують хонінгування, яке має невисоку продуктивність. Застосування холодного пластичного деформування (ХПД), а саме технологічної схеми деформуючого протягування (прошивання) (ДП) для фінішної обробки внутрішньої поверхні таких виробів, могло б забезпечити високу продуктивність, точність

отвору та якість обробленої поверхні. Однак, внаслідок підвищеної схильності титанових сплавів до схоплювання з твердосплавним інструментом, її застосування неможливо.

ДП – процес обробки отворів в деталях методом холодного ступінчастого пластичного деформування (рис. 1).

При його реалізації має місце тертя ковзання інструмента по оброблюваній поверхні. Характерним для процесу є наявність високих контактних нормальних і дотичних напружень в зоні взаємодії інструмента з оброблюваним виробом. Нормальні напруження можуть досягати значень до  $8\sigma_T$  оброблюваного металу [3].

Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку технологічних методів підвищення стійкості титанових сплавів до контактного схоплювання при терті та покращення їх оброблюваності ХПД, є актуальними.

В [2] автори вказують, що обробка деталей з титанових сплавів методами ХПД, заснованими на терті, неможлива без модифікації оброблюваної поверхні.

Одним з найефективніших способів покращення антифрикційних властивостей поверхонь деталей з титанових сплавів є модифікування поверхневих шарів азотуванням. Дослідження, проведені різними авторами, свідчать, що застосування азотування для модифікації поверхні титанового компоненту пари тертя істотно підвищує його антифрикційні властивості за рахунок оптимального поєднання міцності та адгезійної інертності [4-9 та ін.].

У цій роботі досліджували вплив азотування на оброблюваність титанового сплаву ВТ 22 ХПД при ДП трубчастих деталей.

В експериментах використовували втулки з титанового сплаву ВТ22 ( $HB\ 300$ ) зовнішнім діаметром  $D = 50^{-0.1}$ , внутрішнім  $d = 35^{+0.05}$ , довжиною 50 мм. Перед механічною обробкою деталі піддавали відпалу при температурі  $750\ ^\circ C$ .

Як технологічне середовище використовували мастило, розроблене в ІНМ НАН України, яке являє собою рідкокристалічну термотропну композицію алілових олігоестерів із заданим молекулярно-масовим розподілом та має високу екрануючу здатність<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Мастило розроблене у співпраці відділів 6 та 20 ІНМ НАН України.

ДП проводили на гідравлічному пресі, здатному розвивати зусилля 100 кН. Осьову силу вимірювали спеціальним тензометричним динамометром з виводом сигналу на ПК.

Використовували деформуючі інструменти з робочим кутом  $4^\circ$  на сторону, виготовлені з твердого сплаву ВК15, який має оптимальне поєднання міцності та зносостійкості [3].

Розрахунок середнього контактного тиску проводили за залежністю

$$q = \frac{P}{\pi} \times D_K \times l_K,$$

де  $P$ ,  $D_K$ ,  $l_K$  – радіальна сила, діаметр деформуючого елемента, довжина контакту інструменту з оброблюваним виробом відповідно. В цьому випадку використання радіальної сили замість нормальної цілком виправдано, оскільки робочий кут інструмента малий.

Радіальну силу розраховували за емпіричною формулою, отриманою в [10]:

$$P = 0,049d_0^{0,3} t_0^{1,282} a^{0,186+0,093 \lg d_0} \times HB_0 \left( \sum_1^n \xi \right)^{0,224-(0,178 \lg d_0 - 0,213) \lg a}$$

де  $d_0$  – вихідний діаметр отвору втулки;  $t_0$  – вихідна товщина стінки оброблюваної деталі;  $HB_0$  – вихідна твердість оброблюваної деталі;  $\sum_1^n \xi$  – сумарна деформація, що передуює проході, на якому визначається радіальна сила;  $a$  – натяг.

Для визначення довжини контакту інструменту з оброблюваною деталлю використовували метод, розроблений в ІНМ НАН України [3]. На оброблювану поверхню деталі діаметрально протилежно наносили дві алмазовмісні плями діаметром 2–3 мм. Далі деталь висушували та обробляли ДП. Довжину контакту визначали вимірюванням довжини подряпин на робочій частині інструменту, залишених алмазами.

Коефіцієнт тертя розраховували за залежністю, отриманою за умови рівноваги сил, прикладених до деформуючого інструменту [3]:

$$f = \frac{P - Q \times \tan \alpha}{Q \times \tan \alpha + P}$$

де  $P$ ,  $Q$ ,  $\alpha$  – радіальна сила ДП, осьова сила ДП та робочий кут інструменту на сторону відповідно.

Шорсткість обробленої поверхні вимірювали на приладі MICROTCH BASE RT 10.

Для модифікації оброблюваної поверхні використовували дві технології азотування: азотування у тліючому розряді (АТР) та термодифузійне азотування (ТДА). Перше проводили у Хмельницькому національному університеті, друге - у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України. Дослідження оброблюваності деталей з ВТ22 деформуючим прошиванням проводили в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

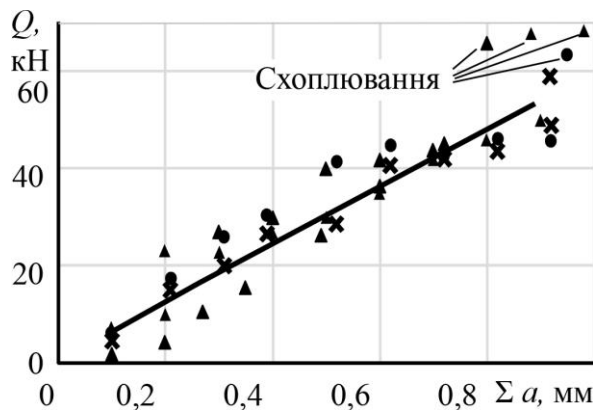


Рис. 2. Залежність осьової сили прошивання від сумарного натягу:  $\blacktriangle$  – титанових зразків після ТДА,  $\bullet$  – титанових зразків після АТР,  $\times$  – зразків 38X2MЮA (HB 300)

На рис. 2 наведено значення осьових сил прошивання в залежності від сумарного натягу. Для порівняння на рисунку наведено значення сил прошивання при обробці деталей зі сталі 38X2MЮA (HB 300).

З наведених даних видно, що модифікація оброблюваної поверхні азотуванням за двома технологіями гарантовано дозволяє проводити сім циклів обробки деталей деформуючим протягуванням.

Необхідно відзначити, що значення осьових сил при обробці титанових зразків близькі до значень

при ДП зразків з конструкційної сталі відповідної твердості.

На рис. 3 наведено значення контактного тиску на кожному циклі деформування при ДП. Відповідно до наведених даних, контактний тиск збільшується від 2,1 ГПа на першому циклі до 3,8 ГПа на сьомому.

На рис. 4 наведено значення шорсткості обробленої поверхні зразків у залежності від сумарного натягу. Як видно, при ДП деталей з оброблюваною поверхнею, модифікованою за технологією ТДА, відносна шорсткість зменшується більш ніж у 5 разів. При ДП деталей з поверхнею, модифікованою за технологією азотування у тліючому розряді, шорсткість зменшується майже у 2 рази. Цей факт потребує окремого дослідження.

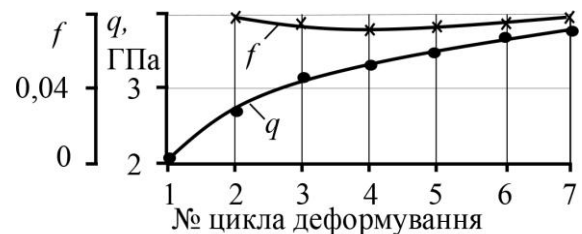


Рис. 3. Значення контактного тиску та коефіцієнту тертя при ДП

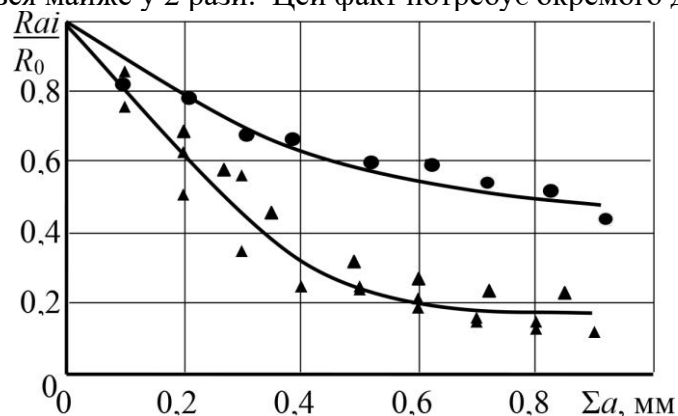


Рис. 4. Залежність відносної шорсткості обробленої поверхні від сумарного натягу при ДП зразків:  $\blacktriangle$  – після ТДА  $\bullet$  – після АТР

Необхідно відзначити, що в реальному виробництві зазвичай використовують деформуючі протяжки з 4–5 робочими елементами. Окрім цього, використовують натяги значно більші,

тобто, у цих умовах контактний тиск в зоні взаємодії інструменту з оброблюваною заготовкою буде меншим. Малі натяги використовують лише на останніх робочих елементах для калібрування та забезпечення необхідної шорсткості.

### **Висновки**

1. Модифікація оброблюваної поверхні азотуванням суттєво покращує оброблюваність титанових сплавів методами холодного пластичного деформування, що базуються на терті ковзання.

2. Отримані результати свідчать про можливість використання високопродуктивної, енергозберігаючої технологічної операції ДП при обробці отворів у трубчастих виробах з титанових сплавів.

3. Враховуючи актуальність вирішення проблеми обробки титану методами ХПД, які базуються на терті ковзання, дослідження в цьому напрямку необхідно продовжити.

**S. Ye. Sheikin<sup>1</sup>, I. M. Pohreliuk<sup>2</sup>, S. F. Studenets<sup>1</sup>, V. V. Liukhovets<sup>3</sup>,  
S. M. Lavrys<sup>2</sup>, I. Yu. Rostotskiy<sup>1</sup>, T. M. Didkovskiy<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine*

<sup>2</sup>*H. V. Karpenko Institute of Physics and Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine*

<sup>3</sup>*Podilskyi Scientific Physics and Technology Center of Khmelnytskyi National University*

### **SOME FEATURES OF THE PROCESSING OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOYS BY COLD PLASTIC DEFORMATION**

*The purpose of this work is to develop a method for reducing the tendency of the machined surface of products made of high-strength titanium alloys with a carbide tool when processed by cold plastic deformation under conditions of high normal and tangential contact stresses, namely, according to the technological scheme of deforming broaching.*

*The study used the methods of strain measurement and profilometry. The technologies of glow discharge nitriding and thermal diffusion nitriding were used.*

*It is shown that modifying the machined surface of parts by nitriding allows seven deformation cycles to be performed at a contact pressure of up to 4 GPa without setting. At the same time, the roughness of the machined surface is reduced by 2-5 times.*

*The results obtained can be used in further research aimed at developing high-performance technologies for finishing the internal surfaces of tubular products made of high-strength titanium alloys. Specifically, they can form the basis of technologies for finishing aircraft hydraulic cylinder housings and other products, including special-purpose ones.*

*The originality of the approach lies in using nitriding of the treated surface of the products not to increase their surface strength, but to provide them with antifriction properties that provide the necessary level of their resistance to seizing with the tool during deformation broaching operations.*

**Key words:** *high-strength titanium alloys, cold plastic deformation, deformation broaching, thermal diffusion nitriding, glow discharge nitriding, seizing, antifriction properties.*

### **Література**

1. Миллер П.Д., Холлидэй И. В. Трение и износ титана. Машиностроение за рубежом. Сб. пер. и обзоров иностр. лит. № 6. М.: Машиностроение, 1959. С. 10–20.
2. Хворостухин Л. А., Шишкин С. В., Ковалев И. П., Ишмаков Р. А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением М.: Машиностроение, 1988. 144 с.
3. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента при деформирующем протягивании. К.: Наукова думка, 1981. 288 с.

4. В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, Азотування титану та його сплавів. К.: Наук. думка, 1995. С. 107–146.
5. Budilov V. V., Ramazanov K. N., Zolotov I. V., Khucnutdinov R. F., Starovoitov S. V. Ion Nitriding of Titanium Alloys with a Hollow Cathode Effect Application. *Journal of Engineering Science and Technology – Review*. 2015. Vol. 8, N 6. P. 22–24.
6. Kang J., Wang M., Yue W., Fu Z., Zhu L., She D., Wang C. Tribological Behavior of Titanium Alloy Treated by Nitriding and Surface Texturing Composite Technology. *Materials*. 2019. Vol. 301, N 12. P. 2–12.
7. Mashovets N. S. Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy. *Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24, N 3/93. P. 39–44.
8. Czarnowska E., Wierzchon T., Maranda-Niedbala A., Karczarewicz E. Improvement of titanium alloy for biomedical applications by nitriding and carbonitriding processes under glow discharge conditions. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2000. Vol. 11. P. 77 – 81.
9. Liu X., Chu P.K., Ding C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering*. 2004. Vol. 47. P. 49–121.
10. Крицкий А.Д. Особенности разработки твердосплавных деформирующих протяжек для обработки отверстий в деталях из труднообрабатываемых деталей и сплавов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Киев, 1983. 26 с.
11. Семенов А.П. Схватывание металлов. М.: Машгиз, 1958. 280 с.

Надійшла 02.09.25

## References

1. Miller, P. D., & Holliday, J. W. (1959). Treniye i iznos titana [Friction and Wear Properties of Titanium]. *Mashinostroenie za rubezhom. Sbornik perevodov i obzorov inostrannoi literatury – Mechanical engineering abroad. A collection of translations and reviews of foreign literature* (6nd Issue, p. 10–20). Mashinostroenie [in Russian].
2. Khvorostukhin, L. A., Shishkin, S. W., Kovalev, I. P., & Ishmakov, R. A. (1988). *Povyshenie nesushchei sposobnosti detalei mashin poverkhnostnym uprochneniyem* [Increasing the load-bearing capacity of machine parts by surface hardening]. Mashinostroenie [in Russian].
3. Rozenberg, O. O. (1981). *Mekhanika vzaimodeystviia instrumenta pri deformiruiushchem protyahivanii* [Mechanics of tool interaction during deforming drawing]. Naukova dumka [in Russian].
4. Fedirko, V. M., & Pohreliuk, I. M. (1995). *Azotuvannia tytanu ta yoho splaviv* [Nitriding of titanium and its alloys]. Naukova dumka [in Ukrainian].
5. Budilov, V. V., Ramazanov, K. N., Zolotov, I. V., et al. (2015). Ion Nitriding of Titanium Alloys with a Hollow Cathode Effect Application. *Journal of Engineering Science and Technology*, 8(6), 22–24.
6. Kang, J., Wang, M., Yue, W., et al. (2019). Tribological Behavior of Titanium Alloy Treated by Nitriding and Surface Texturing Composite Technology. *Materials*, 301(12), 2–12.
7. Mashovets, N. S. (2019). Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy. *Problems of Tribology*, 24(3/93), 39–44.
8. Czarnowska, E., Wierzchon, T., Maranda-Niedbala, A., & Karczarewicz E. (2000). Improvement of titanium alloy for biomedical applications by nitriding and carbonitriding

- processes under glow discharge conditions. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 11, 77–81.
9. Liu, X., Chu, P.K., Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering R*, 47, 49–121.
  10. Kritsky, A. D. (1983). *Osobennosti razrabotki tverdospлавnykh deformiruyushchikh protyazhek dlya obrabotki otverstii v detalyakh iz trudnoobrabatyvayemykh detaley i сплавов [Features of the development of carbide deforming broaches for processing holes in parts made of difficult-to-machine parts and alloys]. [Extended abstract of candidate's thesis]. Kyiv [in Ukrainian].*
  11. Semenov, A. P. (1958). *Skhvatyvaniye metallov [Metal Seizure]. Mashhiz [in Russian].*

УДК 699.058

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-428-436

**С.А. Клименко**, член-кор. НАН України; **І.В. Бондар**, канд. техн. наук,  
**Г.Я. Жаровский**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074, Київ, e-mail: atmi@meta.ua*

## **МОДЕРНІЗОВАНА УСТАНОВКА ВУ 700 ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВАКУУМНИХ ПОКРИТТІВ**

*Проведено модернізацію вакуумної установки ВУ 700 для нанесення функціональних покриттів, у тому числі багатошарових та багатокомпонентних, із використанням системи мікроелектродугового розпилення, що включає три лінійні дуготрони та лінійний магнетрон. Установка обладнана системами катодно-іонного бомбардування поверхонь виробів перед нанесенням покриття, а також подачею потенціалу зміщення під час процесу напилення. Чотири катоди установки дозволяють отримувати покриття широкого спектру - від простих одношарових до багатошарових та багатокомпонентних. Показники роботи модернізованої установки досліджено під час формування покриттів із титану та багатокомпонентного жаростійкого сплаву. Для умов використання лінійного дуготрону з титану встановлено діапазон напруг зміщення, щільність іонного струму та показано вплив цієї напруги на імовірність виникнення мікродугових розрядів на поверхні виробу та її ерозію. Запропоновано використання імпульсного ВЧ-блоку зміщення. Для катоду зі сплаву NiCrAlY визначено оптимальне значення струму дуги (90–120 А) та досліджено швидкість сканування катодної плями при використанні встановленого обладнання.*

**Ключові слова:** покриття, модернізована вакуумна установка, мікроелектродугове розпилення, дуготрон, магнетрон, катодно-іонне бомбардування (КІБ).

### **Вступ**

Одним з найбільш поширених і ефективних методів модифікації поверхневого шару різноманітних виробів є нанесення захисних функціональних покриттів із застосуванням фізичних і хімічних методів осадження. За функціональним призначенням такі покриття можуть забезпечувати зниження швидкості хімічної взаємодії матеріалу виробу з навколишнім агресивним середовищем, підвищення механічних властивостей, надання поверхні виробу нових теплофізичних і електрофізичних властивостей та інше. Найбільшого