

УДК 621.787:669.295

ВПЛИВ ВИХІДНОЇ СТРУКТУРИ ВИСОКОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ НА ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ТА ШОРСТКІСТЬ ПІСЛЯ ОБКОЧУВАННЯ

С. М. ЛАВРИСЬ¹, І. М. ПОГРЕЛЮК¹, С. Є. ШЕЙКІН², І. Ю. РОСТОЦЬКИЙ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ

Встановлено кореляційні залежності між параметрами обкочування кулькою із алмазного композиційного термотривкого матеріалу (навантаженням та кількістю проходів) та поверхневими характеристиками (топографією поверхні, мікротвердістю, шорсткістю, глибиною та структурою деформованого поверхневого шару) високоміцного титанового сплаву VT22 (Ti–5Al–5Mo–5V–1,5Cu–Fe) з різною вихідною структурою (одно- β - та двофазною ($\alpha+\beta$)-пластинчастою та глобулярною). Виявлено, що навантаження під час обкочування незалежно від структурного стану сплаву не повинно перевищувати 400 Н через збільшення шорсткості оброблюваної поверхні внаслідок лущення. З його підвищенням від 100 до 400 Н поверхнева мікротвердість сплаву з вихідною двофазною структурою зростає через зменшення розміру зерна α -фази в поверхневому шарі. Сплав з вихідною однофазною β -структурою менш придатний до обкочування. Зі збільшенням кількості проходів, незалежно від вихідного структурного стану сплаву, за слабкої чутливості до зміни поверхневого зміцнення шорсткість обробленої поверхні зменшується.

Ключові слова: титановий сплав, обкочування, твердість, шорсткість, мікроструктура.

Correlation dependences between diamond ball burnishing parameters (load and number of passes) and surface characteristics (surface topography, microhardness, roughness, depth and structure of the deformed surface layer) of high-strength VT22 (Ti–5Al–5Mo–5V–1.5Cu–Fe) titanium alloy were investigated. A high-strength titanium alloy with different initial structures (single-phase β - and two-phase ($\alpha+\beta$)-lamellar and globular structures) was chosen. It is shown that the load during ball burnishing, regardless of the structural state of the alloy, should not exceed 400 N due to a decrease in surface quality caused by the delamination of the subsurface layers. When the ball burnishing load grows from 100 to 400 N, the surface microhardness of the alloy with the initial two-phase structure increases due to the decrease in the grain size of the α -phase in the near-surface layer. On the other hand, the alloy with the initial single β -structure is less suitable for such treatment. When the number of passes increases, regardless of the initial structural state, in case of a weak sensitivity to the surface hardening, the microrelief of the treated titanium alloy surface decreases.

Keywords: titanium alloy, ball burnishing, hardness, roughness, microstructure.

Вступ. На сьогодні одним із перспективних методів фінішного оброблення металевих виробів авіаційного призначення є поверхневе пластичне деформування, зокрема, обкочування. Наприклад, обкочуванням титанових сплавів можна поліпшити характеристики цілісності поверхні (surface integrity), які визначають експлуатаційні властивості, та підвищити продуктивність їх оброблення [1–3]. Основні переваги процесу такі.

Контактна особа: С. М. ЛАВРИСЬ, e-mail: lavrys92@gmail.com

До основних критеріїв, які впливають на експлуатаційні властивості оброблених металевих виробів, відносять шорсткість поверхні, твердість, мікроструктуру та залишкові напруження [1–3]. Встановили [4], що обкочуванням сплаву Ti6Al4V можна поліпшити шорсткість поверхні R_a від 0,45 до 0,12 μm , підвищити поверхневу мікротвердість з 340 до 405 HV та сформувати зміцнений дрібнозернистий поверхневий шар завтовшки 160 μm , а отже, збільшити зносотривкість (зменшити інтенсивність зношування на 52%) та на 64% знизити коефіцієнт тертя сплаву порівняно з необробленим. Обкочування не тільки поліпшує характеристики цілісності поверхні титанових сплавів, а й підвищує їх корозійну тривалість [5], втомну міцність [6, 7] та зносотривкість [8, 9].

Воно проти інших поверхневих деформаційних оброблень (дробиноструменевого, лазерного ударного, вигладжування тощо) економічно ефективніше. Крім цього, не потребує додаткового технологічного оснащення чи устаткування, а пристрій для його реалізації можна легко комплектувати на фрезерувальний верстат. Це дає можливість збільшити як продуктивність, так і ефективність вироблення виробів [10–12].

У багатьох дослідженнях порівняно обкочування з іншими видами оброблень, які використовують у промисловості. Зокрема, встановили [12], що воно забезпечує зміцнений глибший шар, ніж дробиноструменеве оброблення, а отже, підвищує втомну міцність (52 проти 39%). Внаслідок формування такого шару, який володіє підвищеними залишковими напруженнями стиску, обкочування ефективніше поліпшує довговічність сплаву Ti6Al4V порівняно з лазерним ударним поліруванням [13] чи дробиноструменевим обробленням [14].

Більшість учених концентрують увагу на вивченні впливу технологічних параметрів (навантаження, кількості проходів, швидкості, подачі, діаметра кульки тощо) на ефективність поверхневого зміцнення та підвищення експлуатаційних характеристик титанових сплавів. Водночас мало досліджено вплив структурно-фазового стану оброблюваного матеріалу на ефективність обкочування. Найчастіше прив'язуються до хімічного складу і міцності сплаву і виокремлюють таку залежність: що легованіший (β -стабілізаторами) титановий сплав, то він міцніший і менш схильний до деформування, а отже, менш здатний до поверхневого зміцнення під час обкочування [15, 16]. Серед титанових сплавів виділяють групу “перехідних”, які залежно від технології виготовлення, термічного чи деформаційного оброблення мають різний фазовий ($\alpha+\beta$ чи β) стан з неоднаковою морфологією структурних складників. Сюди відносять високоміцний сплав BT22, який часто використовують у вітчизняному авіабудуванні. Він володіє високою питомою міцністю, яка зберігається за підвищених температур, ефективно замінює високоміцну сталь 30ХГСНА (питома міцність сплаву на 10% більша, ніж сталі) у конструкціях шасі літаків [17, 18].

Тому оцінювали вплив обкочування кулькою діаметром 5 mm з алмазного композиційного термотривкого матеріалу (АКТМ) високоміцного сплаву BT22 з різними структурними станами на шорсткість обробленої поверхні та деформаційне зміцнення поверхневого шару.

Методичні аспекти. Досліджували сплав BT22 з трьома типами структур: однофазною, що представлена рівновісними поліедричними β -зернами (рис. 1a) зі середнім розміром 50...180 μm (виробник ПАТ “Корпорація ВСМПО-АВІСМА”); двофазною ($\alpha + \beta$)-пластинчастою з вмістом β -фази, пропорційним вмісту α -фази (~ 45...52% β -фази). Структура сплаву, сформована під час електронно-променового переплавлення, складається з витягнутих дисперсних (~ 5 μm) первинних пластинок α -фази з різною орієнтацією, які розташовані в тілі β -зерен (матриці) (рис. 1b) (виробник ДП “НВЦ “ТИТАН” ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України). Дво-

фазна ($\alpha+\beta$)-глобулярна, що виникає під час термічного оброблення чи гарячого ізостатичного пресування, рівновісна та представлена дрібними сферичними ($\sim 5\text{ }\mu\text{m}$) частинками α -фази на фоні β -матриці (рис. 1с) (виробник Xi'an Zhaotai-zhuang Import & Export Co., Ltd).

Обкочували кулькою діаметром 5 mm за кімнатної температури, використовуючи універсальний токарно-гвинторізальний верстат 1K62 (рис. 2). Змащували індустриальним мастилом I-20A. Для оброблення застосовували тарований пристрій пружної дії (рис. 2). Подача та частота обертання під час обкочування були сталими і становили 0,07 mm/rev та 200 rpm, відповідно. Навантаження P змінювали в діапазоні 100...700 N, а кількість проходів (n) становила 1–11.

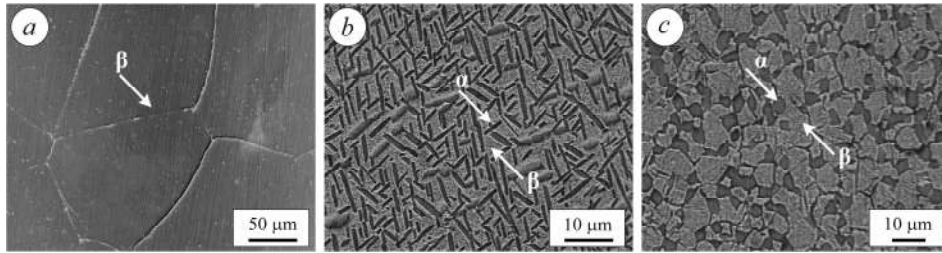


Рис. 1. Мікроструктура сплаву VT22 з однофазною β -поліедричною (а), двофазною ($\alpha+\beta$)-пластинчастою (b) та глобулярною (с) структурами.

Fig. 1. Microstructure of VT22 titanium alloy with single-phase β -polyhedral (a) and two-phase ($\alpha+\beta$)-lamellar (b) and globular (c) structures.

Шорсткість обробленої поверхні вимірювали профілометром 170621 з автоматичним визначенням середнього арифметичного відхилення профілю Ra . Топографію поверхні та мікроструктуру поверхневих шарів сплаву вивчали на сканувальному електронному мікроскопі EVO 40XVP. Поверхневу мікротвердість HV визначали приладом ПМТ-3М за навантаження на індентор Віккерса 0,49 N. За глибину зміцненого шару приймали розмір зони, твердість якої перевищує твердість серцевини на 0,2 GPa.

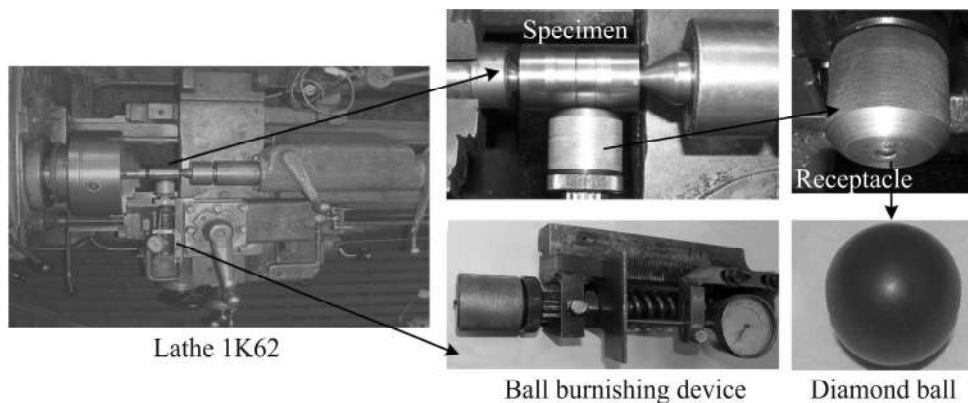


Рис. 2. Експериментальний пристрій для обкочування алмазною кулькою.

Fig. 2. Experimental equipment for diamond ball burnishing.

Результати та їх обговорення. Аналіз топографії обробленої поверхні засвідчив, що зі збільшенням навантаження під час обкочування мікрорельєф, отриманий після точіння зразків, згладжується, характерні сліди від різця практично зникають, шорсткість зменшується (рис. 3). Проте за навантаження вище 400 N, незалежно від вихідної структури сплаву, поверхневий шар починає лу-

щитись (деламініувати). Очевидно, що під час контактної взаємодії оброблюваної поверхні з інструментом за такого навантаження внаслідок вичерпання ресурсу пластичності матеріалу тонкий поверхневий шар відшаровується [8, 16].

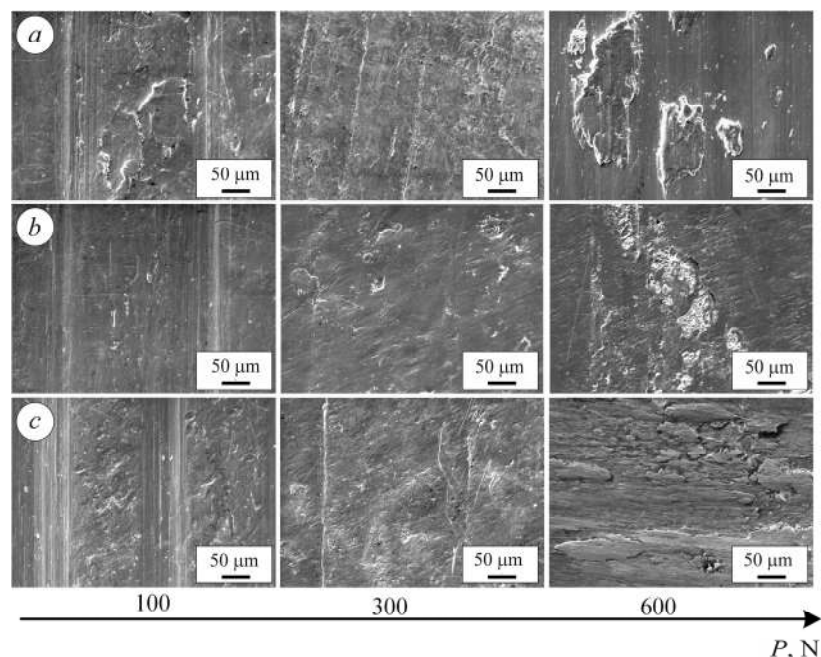


Рис. 3. Топографія поверхні сплаву VT22 з вихідною β - (a), $(\alpha+\beta)$ -пластинчастою (b) та глобулярною (c) структурами після обкочування за навантаження 100; 300 та 600 N.

Fig. 3. Surface topography of the VT22 alloy with the initial β - (a), $(\alpha+\beta)$ -lamellar (b) and globular (c) structures after ball burnishing under the load of 100; 300 and 600 N.

Встановили, що зі збільшенням навантаження під час обкочування від 100 до 300 N поверхнева мікротвердість сплаву зростає. Слід зауважити, що сплав з однофазною β -структурою найменш придатний до такого оброблення, про що свідчить найменший приріст поверхневої мікротвердості порівняно зі сплавами з двофазною структурою (рис. 4a). З подальшим збільшенням навантаження (> 300 N) поверхнева мікротвердість сплаву незалежно від вихідного структурного стану знижується. Це можна пояснити тим, що за вищих навантажень у поверхневому шарі може відбуватися динамічне знеміцнення, як один з етапів пластичної деформації [19]. Під час обкочування у сплав з двофазною $(\alpha+\beta)$ -глобулярною чи пластинчастою структурами формується деформаційно зміцнений шар глибиною 35 та 10 μm , відповідно (рис. 4b). Натомість у сплав з вихідною β -структурою, хоча фіксували незначне підвищення поверхневої мікротвердості, проте деформаційно зміцненого шару не виявили (рис. 4).

Детальніше вплив навантаження під час обкочування на поверхневе зміцнення сплаву вивчали за результатами металографічного аналізу (рис. 5). Згідно з ними, подрібнення зерен у поверхневому шарі після такого оброблення для сплаву з вихідною β -структурою відсутнє, а для двофазного – суттєве: виявили поверхневі шари з дрібними пластинами чи глобулами α -фази, подрібнення яких, очевидно, викликане їх двійникованням у місцях локалізації зсувної деформації. Подрібнені зерна орієнтовані в напрямку пластичної деформації. Зі зменшенням їх розмірів може збільшуватися площа їх меж, що сприятиме гальмуванню та блокуванню дислокацій, тобто реалізуватиметься зерномежовий (полікристалічний)

механізм зміцнення. Отже, під час поверхневого деформування основний ефект зміцнення у двофазному ($\alpha+\beta$)-сплаві викликаний двійникуванням дрібних пластин чи глобул α -фази з ГЦУ граткою. Для подрібнення шляхом фрагментації великих поліедричних зерен β -фази з ОЦК граткою потрібні значно вищі, ніж 700 N, навантаження, однак, погіршуватиме якість обробленої поверхні внаслідок лушення (див. рис. 3).

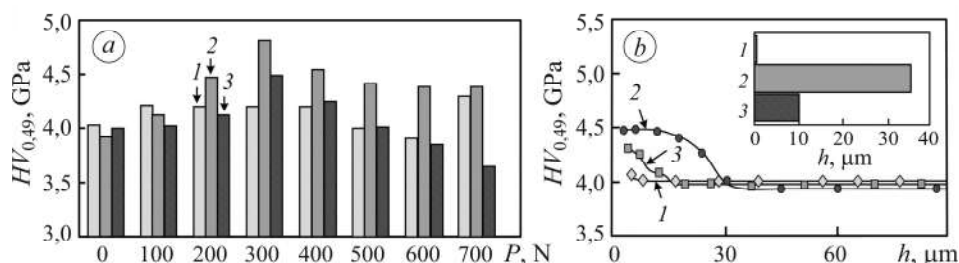


Рис. 4. Поверхнева мікротвердість (а) та глибина зміцненого шару (b) після обкочування сплаву VT22 з вихідною β - (1), ($\alpha+\beta$)-пластинчастою (2) та глобулярною (3) структурами.

Fig. 4. Surface microhardness (a) and thickness of the hardened layer (b) after ball burnishing of the VT22 alloy with the initial β - (1), ($\alpha+\beta$)-lamellar (2) and globular (3) structures.

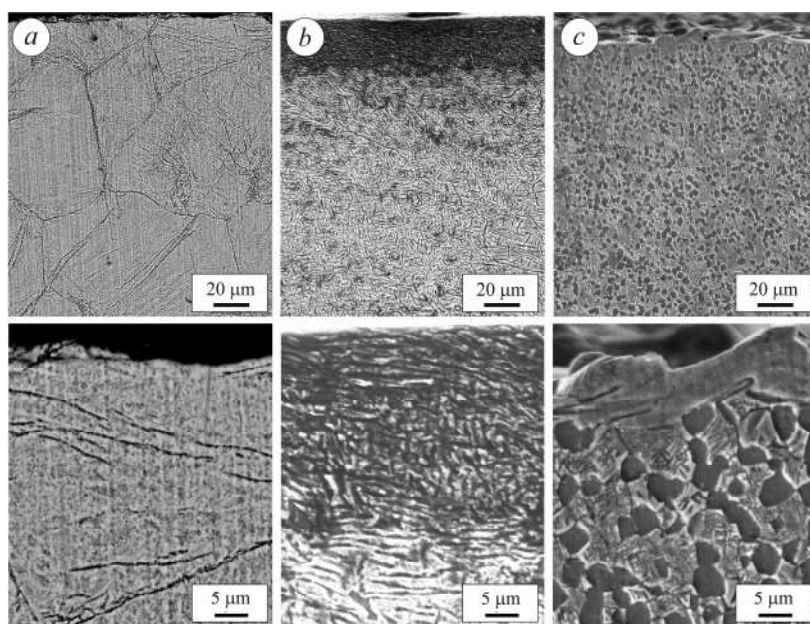


Рис. 5. Мікроструктура поверхневого шару сплаву VT22 з вихідною β - (a), ($\alpha+\beta$)-пластинчастою (b) та глобулярною (c) структурами після обкочування за навантаження 300 N.

Fig. 5. Microstructure of the surface layer of the VT22 alloy with the initial β - (a), ($\alpha+\beta$)-lamellar (b) and globular (c) structures after ball burnishing under a load of 300 N.

Незалежно від вихідного структурного стану сплаву зі збільшенням кількості проходів під час обкочування поліпшується топографія його поверхні. Зокрема, сліди від попереднього механічного оброблення внаслідок поверхневої пластичної деформації за навантаження 300 N поступово розгладжуються та, починаючи зі семи проходів, зникають. Поверхня сплаву стає однорідною без видимих проявів деламінування (лушення) чи налипання (рис. 6), а її шорсткість Ra змен-

шується в декілька разів (рис. 7а). Причому найвідчутніше – під час обкочування сплаву з вихідною β -структурою, а найменше – для сплаву з $(\alpha+\beta)$ -глобулярною структурою. Зі збільшенням кількості проходів поверхневе зміцнення для сплаву з β -структурою змінюється несуттєво. Але для сплаву з двофазною $(\alpha+\beta)$ -структурою позитивний ефект спостерігали лише зі зростанням проходів від одного до трьох, з подальшим їх збільшенням поверхнева мікротвердість не змінювалась (рис. 7б).

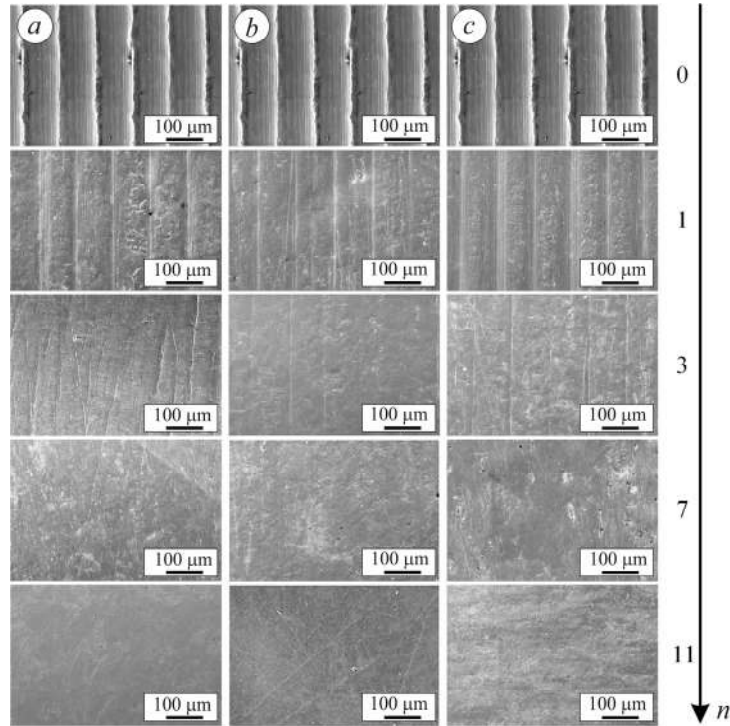


Рис. 6. Вплив кількості проходів (n) під час обкочування за навантаження 300 N на топографію поверхні сплаву VT22 з вихідною β - (a), $(\alpha+\beta)$ -пластинчастою (b) та глобулярною (c) структурами.

Fig. 6. Influence of the number (n) of passes during ball burnishing under a load of 300 N on the surface topography of the VT22 alloy with the initial β - (a), $(\alpha+\beta)$ -lamellar (b) and globular (c) structures.

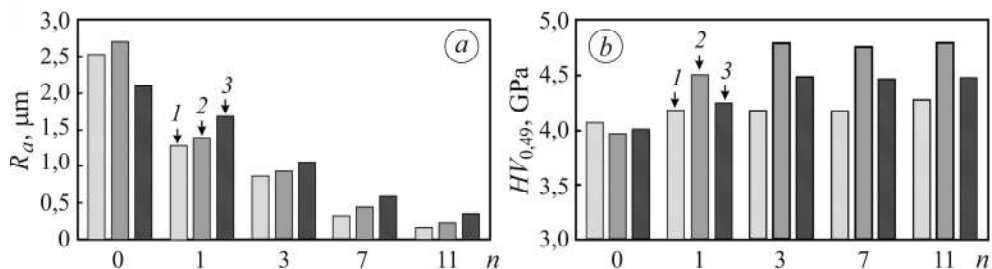


Рис. 7. Вплив кількості проходів (n) під час обкочування за навантаження 300 N на параметр шорсткості R_a (a) та поверхневу мікротвердість (b) сплаву VT22 з вихідною β - (1), $(\alpha+\beta)$ -пластинчастою (2) та глобулярною (3) структурами.

Fig. 7. Influence of the number (n) of passes during ball burnishing under a load of 300 N on the roughness parameter R_a (a) and surface microhardness (b) of the VT22 alloy with the initial β - (1), $(\alpha+\beta)$ -lamellar (2) and globular (3) structures.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що зі збільшенням навантажень під час обкочування до 300 N підвищується поверхнева міцність сплаву VT22, за вищих – якість та міцність обробленої поверхні погіршуються через деламінування з подальшим налипанням відлущеного матеріалу. Сплав з вихідною ($\alpha+\beta$)-пластинчастою і глобулярною структурами зміцнюється на 15% внаслідок подрібнення зерен поверхневого шару, а з вихідною β -структурою – несуттєво (< 5%). Згідно з результатами металографічного аналізу, під час поверхневого деформування зміцнення сплаву з вихідною двофазною структурою пов'язане із двійникуванням дрібних пластин чи глобул α -фази з ГЩУ граткою (3...10 μm). Для подрібнення шляхом фрагментації великих поліедричних зерен β -фази з ОЦК граткою (50...150 μm) необхідні значно вищі навантаження. Виявлено, що незалежно від вихідного структурного стану сплаву VT22 зі збільшенням кількості проходів обкочування зменшується шорсткість оброблюваної поверхні (R_a), проте несуттєво – поверхнєве зміцнення. Найкраще обробляється обкочуванням (низькі значення шорсткості, високий ступінь поверхневого зміцнення та глибина зміцненого шару) двофазний ($\alpha+\beta$)-сплав VT22 за навантаження 300 N у 11 проходів.

1. *Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15–5PH stainless steel* / V. Chomienne, F. Valiorgue, J. Rech, and C. Verdu // CIRP J. Manuf. Sci. Technol. – 2016. – **13**. – P. 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.12.003>
2. *Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti–6Al–4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing* / R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodríguez, Y. Landon, G. Dessein, J. Lluma-Fuentes, and V. Wagner // J. Mater. Process. Technol. – 2019. – **267**. – P. 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>
3. *Jagadeesh G. V. and Gangi Setti S. A review on latest trends in ball and roller burnishing processes for enhancing surface finish* // Adv. Mater. Process. Technol. – 2022. – **8**. – P. 4499–4523. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2077534>
4. *Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti–6Al–4V) by ball burnishing process* / G. D. Revankar, R. Shetty, S. S. Rao, and V. N. Gaitonde // JMR&T. – 2017. – **6**. – P. 13–32. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.007>
5. *Corrosion protection of highly porous titanium by surface engineering* / Kh. Shliakhetka, I. Pohrelyuk, S. Sheykin, S. Lavrys, M. Balog, and K. Kamyshnykova // Surf. Coat. Technol. – 2024. – **482**. – Article number 130663. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130663>
6. *Swirad S. Influence of ball burnishing on lubricated fretting of the titanium alloy Ti6Al4V // Lubricants*. – 2023. – **11**. – Article number 341. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080341>
7. *Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti–6Al–4V alloy by applying ultrasonic impact treatment* / A. I. Dekhtyar, B. N. Mordyuk, D. G. Savvakina, V. I. Bondarchuk, I. V. Moiseeva, and N. I. Khripta // Mater. Sci. Eng. A. – 2015. – **641**. – P. 348–359. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.072>
8. *Pohrelyuk I. M. and Lavrys S. M. Load influence at rolling on structure and wear resistance of a titanium alloy VT22* // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2016. – **38**. – P. 783–793. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/mfint.38.06.0783>
9. *Wear resistance and friction analysis of Ti6Al4V cylindrical ball-burnished specimens with and without vibration assistance* / E. Velázquez-Corral, V. Wagner, R. Jerez-Mesa, K. Delbé, J. Lluma, J. A. Travieso-Rodríguez, and G. Dessein // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2024. – **131**. – P. 551–562. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10919-y>
10. *Zhang T., Bugtai N., and Marinescu I. D. Burnishing of aerospace alloy: A theoretical–experimental approach* // J. Manuf. Syst. – 2015. – **37**. – P. 472–478. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.11.004>
11. *Effect of combined grinding–burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-clad Stellite 21 alloys* / M. Uddin, R. Santifoller, C. Hall, and T. Schlaefer // Adv. Eng. Mater. – 2022. – **25**. – Article number 2201332. <https://doi.org/10.1002/adem.202201332>

12. *Effect of shot-peening and low-plasticity burnishing on the high-cycle fatigue strength of DIN 34CrNiMo6 alloy steel* / A. Avilés, R. Avilés, J. Albizuri, L. Pallarés-Santasmartas, and A. Rodríguez // *Int. J. Fatigue*. – 2019. – **119**. – P. 338–354.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.10.014>
13. *On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550°C* / I. Altenberger, R. K. Nalla, Y. Sano, L. Wagner, and R. O. Ritchie // *Int. J. Fatigue*. – 2012. – **44**. – P. 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008>
14. *Studies on the surface characteristics of Ti60 alloy induced by turning combined with ball burnishing* / K. Han, L. Tan, C. Yao, D. Zhang, and Z. Zhou // *J. Manuf. Process*. – 2022. – **76**. – P. 349–364. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.019>
15. *Influence of mechanical surface treatments on the high cycle fatigue performance of TIMETAL 54M* / K. Zay, E. Maawad, H.-G. Brokmeier, L. Wagner, and Ch. Genzel // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2011. – **528**. – P. 2554–2558. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.064>
16. *Raza A. and Kumar S. A critical review of tool design in burnishing process* // *Tribol. Int.* – 2022. – **174**. – Article number 107717. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107717>
17. *Конструкционные материалы в самолетостроении* / А. Г. Моляр, А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко. – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.
18. *Influence of the structure of VT22 alloy on the surface hardening in the course of deformation-diffusion treatment* / I. M. Pohrelyuk, S. E. Sheikin, S. M. Lavrys, D. A. Serhach, and A. E. Baitser // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 2. – P. 158–164.
<https://doi.org/10.1007/s11003-017-0057-z>
19. *Demchenko L. D. and Sydorenko S. I. The effect of plastic deformation on nitrogen diffusion in α -Fe* // *Defect Diffus. Forum*. – 2011. – **309–310**. – P. 155–160.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.309-310.155>
20. *The effect of water vapor containing hydrogenous atmospheres on the microstructure and tendency to brittle fracture of anode materials of YSZ–NiO(Ni) system* / V. V. Kulyk, B. D. Vasylyv, Z. A. Duriagina, T. M. Kovbasiuk, and I. A. Lemishka // *Archives of Mater. Sci. and Eng.* – 2021. – 108(2). – P. 49–67. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.0254>

Одержано 28.06.2024