

УДК 621.774.01.8

## МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ КУЛЬ З ТИТАНУ ВТ1-0 КОМБІНУВАННЯМ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ І ТЕРМОДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ АЗОТОМ

Ю. О. ЦЕХАНОВ<sup>1</sup>, С. Є. ШЕЙКІН<sup>2</sup>, І. М. ПОГРЕЛЮК<sup>3</sup>,  
Д. В. КАПІХ<sup>1</sup>, Д. А. СЕРГАЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Воронежський державний архітектурно-будівельний університет;

<sup>2</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ;

<sup>3</sup> Фізико-механічний інститут ім. В. Г. Карпенка НАН України, Львів

Подано результати моделювання методом скінченних елементів у програмному комплексі Deform-3D холодного поверхневого пластичного деформування за накопчування інструментальними площинами сферичних заготовок з чистого титану. Виконано експериментальну та комп'ютерну оцінки напружено-деформованого стану заготовки. Виявлено залежності ступеня зміцнення її поверхні від кількості циклів обробки і зусилля притиску. Оцінено вплив термодифузійного насичення азотом на поверхневе зміцнення деформованих заготовок.

**Ключові слова:** моделювання, сферична заготовка, титан, зміцнення поверхні, накопчування, термодифузійне насичення, азотування.

Сьогодні активно працюють над створенням ендопротеза кульшового суглоба людини, що має відповідати світовим вимогам біосумісності, надійності, довговічності і бути доступним потенційним споживачам. Найважливішим його елементом є пара тертя сферична головка–ацетабулярна чашка.

Згідно з вимогами біосумісності, для виготовлення сферичної головки ендопротеза найпридатніший чистий титан, зокрема ВТ1-0. За цим показником він перевершує сплави ВТ6 (зарубіжний аналог – сплав Ti6Al4V) і комохром (на основі CoCrMo), які часто застосовують у кістковій хірургії [1].

Однак титану та його сплавам властиві низькі триботехнічні характеристики, тому в парах тертя деталі з них не слід використовувати без додаткового поверхневого зміцнення, а технічно чистий титан ВТ1-0 має до того ж погані механічні властивості [2]. Таким чином, щоб успішно застосувати чистий титан для сферичної головки ендопротеза, необхідно модифікувати її робочу поверхню, досягаючи оптимального поєднання механічних і триботехнічних характеристик.

Тут перспективне термодифузійне насичення поверхневого шару титану елементами втілення, зокрема азотом (ТДА) [3, 4], яке забезпечує необхідне поєднання властивостей робочої поверхні виробу. Але, враховуючи надзвичайну надійність таких деталей, актуально підвищити ефективність цієї технології. Відомо, що попереднє подрібнення структури титану сприяє зростанню глибини дифузійного шару і його твердості [5]. Зі збільшенням площі міжзеренних меж інтенсифікуються дифузійні процеси за подальшого насичення елементами втілення, а також підвищується зносотривкість поверхні.

Ефективним для подрібнення структури поверхневого шару деталей є холодне поверхневе пластичне деформування (ХППД) [6–9]. Поєднання його з термодифузійним насиченням елементами втілення [10] відкриває великі можливості

для керування властивостями функціональних поверхневих шарів, оскільки обидва методи уможливають варіювання технологічними режимами.

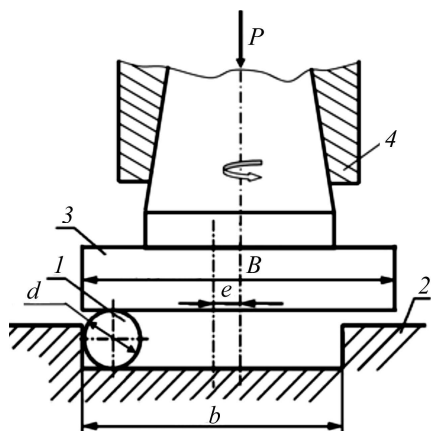


Рис. 1. Схема накочування сферичної заготовки плоскими поверхнями:  
 $B$  – діаметр інструмента;  $b$  – діаметр камери;  $e$  – ексцентриситет;  
 $d$  – діаметр оброблюваної кулі;  
 $P$  – зусилля притиску.

Fig. 1. The scheme of the spherical workpiece rolling by plane surfaces:  
 $B$  – tool diameter;  $b$  – chamber diameter;  
 $e$  – eccentricity;  $d$  – ball diameter;  
 $P$  – clamping force.

Нижче методом скінченних елементів (МСЕ) змодельовано деформаційно-дифузійне зміцнення поверхні сферичних заготовок із технічно чистого титану ВТ1-0.

**Методика.** Для подрібнення структури сферичних деталей ХППД розроблено метод накочування плоскими поверхнями [11]. Під час його реалізації заздалегідь обточену сферичну заготовку 1 (рис. 1) розміщували у циліндричній камері 2. Оброблювали зі зусиллям притиску  $P$  плоским обертовим інструментом 3, закріпленим у шпинделі свердлувального верстата 4, зі швидкістю обертання  $\omega$  за усередненої лінійної швидкості переміщення заготовки в камері  $v$ . Для рівномірного розподілу деформаційного зміцнення по поверхні заготовки безперервно зміщували по ній слід пластичної деформації, використовуючи ексцентриситет  $e$  між осями інструменту і камери.

Накочували сферу  $\varnothing 28$  mm з титану ВТ1-0. Обробляли на вертикально-свердлувальному верстаті 2А150 плоским обертовим інструментом зі швидкістю обертання 750 rpm. При цьому усередне-

на лінійна швидкість переміщення заготовки в штампі  $\sim 3$  m/s. Зусилля притиску 2000 N.

Термодифузійне насичення здійснювали в азоті атмосферного тиску за температури  $650^\circ\text{C}$  упродовж 5 h. Швидкість нагріву  $0,040^\circ\text{C/s}$ . Після ізотермічної витримки зразки охолоджували в азоті з піччю (середня швидкість охолодження  $0,028^\circ\text{C/s}$ ). Після охолодження до  $500^\circ\text{C}$  систему вакуумували. Використовували газоподібний азот технічної чистоти (ГОСТ 9293-74), який перед подачею в реакційний простір печі висушували та вивільняли від кисню, пропускаючи крізь капсулу з силікагелем і нагріту на  $\sim 50^\circ\text{C}$  вище температури насичення титанову стружку.

Для вивчення закономірностей впливу технологічних чинників на властивості деформаційно-дифузійно зміцненого поверхневого шару необхідні численні експерименти, що пов'язано з виготовленням шліфів та дюрOMETричними випробами. Уникнути цього можна, моделюючи зміцнення МСЕ за допомогою програмного комплексу Deform-3D і використовуючи експериментально встановлені фізичні властивості оброблюваного матеріалу, зокрема титану ВТ1-0.

**Результати та їх обговорення.** Для аналізу деформованого стану поверхневого шару сферичної заготовки моделювали однократне накочування частини поверхні сфери без зміщення сліду пластичних деформацій з різними зусиллями притиску інструменту. Зусилля притиску  $P$  варіювали від 0,4 до 5 kN (рис. 2).

Виявили, що характер розподілу деформації на глибині менше 0,8 mm для накочування зі зусиллям менше 0,1 і більше 0,1 kN дещо відрізняється. На глибині поверхневого шару більше 1,8 mm деформації майже відсутні. Поблизу по-

верхні заготовки накопичена деформація  $e_i$  практично пропорційна відповідним зусиллям притиску  $P$ :  $e_i = \beta P$ ,  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності,  $\beta = 0,053 \text{ kN}^{-1}$ . За  $N$  циклів деформування її можна розрахувати за формулою

$$\Sigma e_i = \sum_{j=1}^M \beta N_j P_j,$$

де  $N_j$  – кількість циклів деформування з силою притиску  $P_j$ .

Однією з особливостей обробки сферичних виробів цим методом є формування напливу матеріалу на передній і бічних контактних поверхнях заготовки. Це зумовлено як локальним характером здавлювання сферичної поверхні, що викликає в поєднанні з дією сил тертя перерозподіл матеріалу, так і динамічними ефектами за високої швидкості руху заготовки. Розподіл (рис. 3) накопичених деформацій  $e_i$  по ширині правої половини пластичної ділянки сліду контакту на різних глибинах поверхневого шару за навантаження 3 kN свідчить про накопичення деформації і за межами зони контакту з інструментом – у місцях утворення напливу.

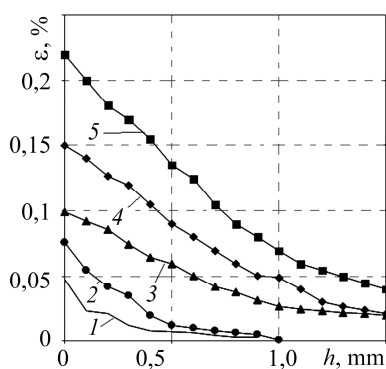


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Розподіл деформацій по перетину поверхневого шару титану ВТ1-0 за різних зусиль притиску: 1 – 0,5 kN; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4 kN.

Fig. 2. Strain distribution over the cross-section of the BT1-0 titanium surface layer at different compression forces: 1 – 0.5 kN; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4 kN.

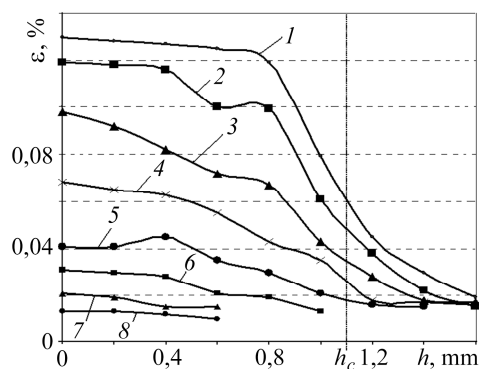


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Пошаровий розподіл накопичених деформацій за один цикл за навантаження 3 kN: 1 – 0 mm; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8; 6 – 1,0; 7 – 1,2; 8 – 1,4 mm.

Fig. 3. The layerwise distribution of accumulated deformations for one cycle at a load of 3 kN: 1 – 0 mm; 2 – 0.2; 3 – 0.4; 4 – 0.6; 5 – 0.8; 6 – 1.0; 7 – 1.2; 8 – 1.4 mm.

Слід зауважити, що накопичування супроводжується нагріванням заготовки. Оскільки титан має низьку теплопровідність, то можна допустити виникнення високих температур у локальних об'ємах. За сильного нагрівання матеріалу в контактній зоні може початися рекристалізація, яка послаблюватиме досягнутий позитивний ефект деформаційного зміцнення і подрібнення зерен.

Щоб оцінити цей аспект деформаційного поверхневого зміцнення, МСЕ досліджували нагрівання заготовки під час накопичування. Побудували графік (рис. 4) розподілу температури по ширині контакту заготовки з інструментом. Найвищу температуру зафіксували в центрі сліду контакту, яка з наближенням до країв знижується.

Встановили (рис. 5), що температура в момент взаємодії точки поверхні заготовки з інструментом підвищується стрибкоподібно. Спочатку на піках зростає, потім стабілізується і не перевищує 90°C. Таким чином, під час обробки

деталей за такою технологією можна обійтися без охолоджувальних середовищ, щоб запобігти зворотним процесам укрупнення структури.

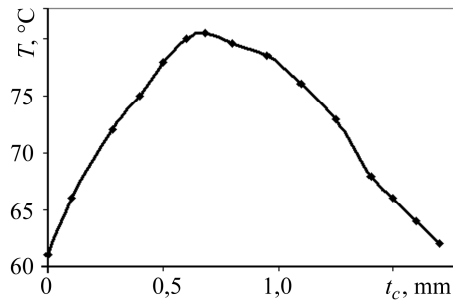


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Розподіл температури по ширині контакту заготовки з інструментом  $t_c$ .

Fig. 4. Temperature distribution across the contact width of a workpiece with tool  $t_c$ .

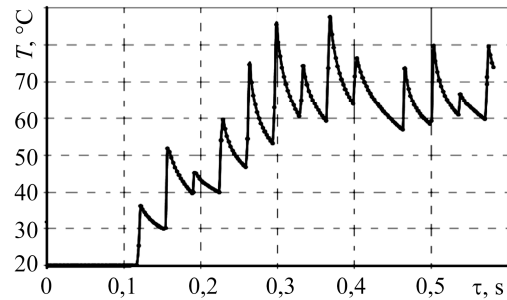


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Нагрів поверхні заготовки під час накочування.

Fig. 5. Heating of the workpiece surface under rolling.

За наявності ексцентриситету траєкторія сліду взаємодії інструменту з оброблюваною заготовкою має стохастичний характер. Тому кількість циклів деформування точки поверхні заготовки можна визначити як співвідношення  $m = lt/F_b$ , де  $m$  – кількість циклів деформування;  $l$ ,  $t$  – відповідно довжина і ширина сліду за період обробки;  $F_b$  – площа поверхні кулі. У цьому випадку формула для визначення середньостатистичної кількості циклів деформування кожної матеріальної точки на поверхні заготовки має вигляд

$$m = 0,0083Dn\tau/d^2,$$

де  $n$  – частота обертання інструменту (rpm);  $D$  – діаметр кругової траєкторії кочення кулі в камері;  $d$  – діаметр накочувальної сфери;  $\tau$  – тривалість обкочування, s.

Методика оцінювання накопичених деформацій з урахуванням середньостатистичних закономірностей за весь цикл обробки ґрунтується на припущенні, що з кожним циклом точка поверхні зміцнюється на однакову величину. Крім цього, передбачається, що її обробляють однакову кількість разів. Звідси впливає залежність

$$\sum e_i = m \cdot \Delta e_{icp},$$

де  $\sum e_i$  – накопичені деформації наприкінці обробки;  $\Delta e_{icp}$  – середньостатистична деформація за один цикл обробки;  $m$  – кількість циклів обробки.

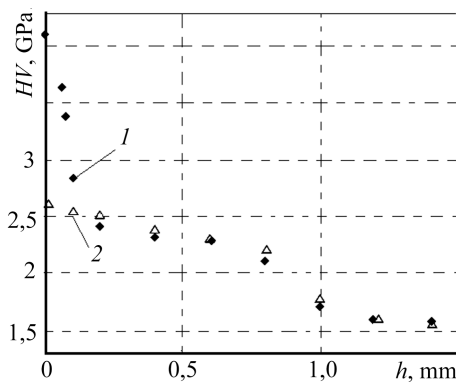


Рис. 6. Розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару після накочування за навантаження 3 kN: 1 – експеримент; 2 – моделювання.

Fig. 6. Microhardness profile distribution over the surface layer depth after rolling at a load of 3 kN: 1 – experiment; 2 – modelling.

За цією методикою розраховували деформаційне зміцнення поверхневого шару кулі після накочування впродовж 30 s зі силою 1,5 kN (рис. 6). Розрахунку твердість отримали перерахунком значень накопиченої деформації через тарувальний графік, який одержали експериментально. Виявили, що на глибині більше 0,2 mm експериментальні і розрахункові дані практично збігаються. Різницю в значеннях твердості на глибині менше 0,2 mm можна пояснити тертям кулі об стінки камери і суттєвою деформацією мікронерівностей в локальних об'ємах.

Щоб оцінити вплив накочування на інтенсивність дифузійних процесів, деформаційно зміцнені кулі азотували за атмосферного тиску азоту при 650°C, 5 h. Обробляли три зразки, які накочували за зусилля 1,5 kN упродовж 30; 60 і 90 s. Для порівняння азотували зразок без накочування (рис. 7). Виявили, що після комбінованого оброблення (накочування і подальшого азотування) поверхнева мікротвердість слабочутлива до тривалості попереднього ХППД. При цьому поверхнева мікротвердість накоченої поверхні після азотування збільшується на 3,9...4,0 GPa, встановлюючись на рівні 6,6...6,8 GPa, а зразка, азотованого без попереднього ХППД – на 2,9...3,1 GPa нижча.

Рис. 7. Поверхнева мікротвердість кулі з титану BT1-0 після ТДА з попереднім ХППД за навантаження 1,5 kN: 1 – ТДА без ХППД; 2 – ХППД упродовж 30 s; 3 – ХППД 2 + ТДА; 4 – ХППД упродовж 60 s; 5 – ХППД 4 + ТДА; 6 – ХППД упродовж 90 s; 7 – ХППД 6 + ТДА.

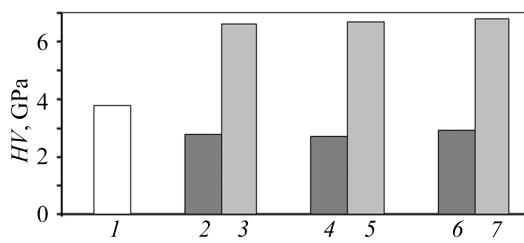


Fig. 7. Surface microhardness of the sphere from BT1-0 titanium after thermo-diffusion nitriding (TDN) with previous cold surface plastic deformation (CSPD) at a load of 1.5 kN: 1 – TDN without CSPD; 2 – CSPD for 30 s; 3 – CSPD 2 + TDN; 4 – CSPD for 60 s; 5 – CSPD 4 + TDN; 6 – CSPD for 90 s; 7 – CSPD 6 + TDN.

Розподіл мікротвердості по перетину поверхневих шарів сферичної заготовки з титану BT1-0 після комбінованої обробки (ХППД і подальше азотування), коли накочували упродовж 90 s, ілюструє рис. 8. Як бачимо, глибина зміцненого азотованого шару в обох випадках приблизно однакова і становить ~50 μm. При цьому попереднє ХППД посилює поверхнєве зміцнення, що проявляється у зміні кривих розподілу мікротвердості по перетину поверхневих шарів у зону вищих значень твердості. Поверхнева (на глибині ~5 μm) мікротвердість азотованого шару зразків з накочуванням суттєво (до 30%) вища, ніж необроблених ХППД. Тобто накочування перед азотуванням суттєво підвищує поверхнєве зміцнення.

Рис. 8. Розподіл мікротвердості по перетину поверхневих шарів сферичної заготовки з титану BT1-0 після термодифузійного насичення азотом: 1 – без ХППД; 2 – ХППД за навантаження 1,5 kN упродовж 90 s.

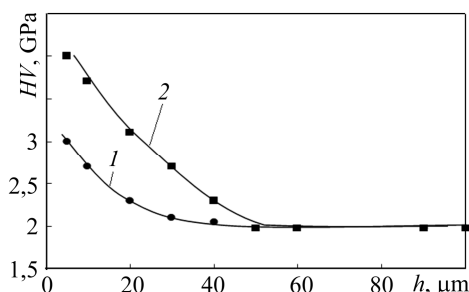


Fig. 8. Microhardness distribution across the subsurface layers crossing of a spherical workpiece from BT1-0 titanium after thermodiffusion saturation by nitrogen: 1 – without CSPD; 2 – CSPD at the load of 1.5 kN for 90 s.

## ВИСНОВКИ

Розроблена методика дає можливість з достатньою для інженерної практики точністю розраховувати параметри деформаційного зміцнення поверхневого шару сферичних виробів під час їх накочування плоскими поверхнями. Попереднє ХППД підвищує поверхневу твердість титану VT1-0 за подальшого термодифузійного насичення азотом на ~30% (порівняно з обробкою без ХППД).

*РЕЗЮМЕ.* Приведены результаты моделирования методом конечных элементов в программном комплексе Deform-3D холодного поверхностного пластического деформирования при накатывании инструментальными плоскостями сферических заготовок из чистого титана. Проведены экспериментальная и компьютерная оценки напряженно-деформированного состояния заготовки. Выявлены зависимости степени упрочнения поверхности заготовки от количества циклов обработки и усилия прижатия. Оценено влияние термодиффузионного насыщения азотом на поверхностное упрочнение деформированных заготовок.

*SUMMARY.* The results of simulations of the cold surface plastic deformation under rolling by instrumental planes of the spherical workpieces of pure titanium using the finite element software package Deform-3D are presented. The problems of experimental and computer analysis of the stress-strain state of the workpiece are analyzed. The dependences of the degree of hardening of the workpiece on the number of cycles and compression force are revealed. The influence of thermodiffusion saturation by nitrogen on the level of surface strengthening of the deformed workpieces is evaluated.

1. *Надеев А. А., Иванников С. В.* Эндопротезы тазобедренного сустава в России (философия построения, обзор имплантов, рациональный выбор). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 178 с.
2. *Структура* и триботехнические свойства субмикроструктурного титана, модифицированного ионами азота / А. В. Белый, В. А. Кукаренко, А. Г. Кононов, В. И. Копылов, Ю. П. Шаркеев // Трение и износ. – 2008. – **29**, № 6. – С. 571–577.
3. *Pohreljuk I. and Fedirko V.* Chemico-thermal treatment of titanium alloys – Nitriding / Ed.: Akm Nurul Amin // Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications. – Rijeka: InTech, 2012. – Chapter 7. – P. 141–174.
4. *Федірко В. М., Погрелюк І. М.* Інженерія поверхні титанових сплавів в контрольованих газових середовищах // Физ.-техн. проблемы совр. материаловедения. – К.: Академперіодика, 2013. – С. 576–598.
5. *Низкотемпературное* ионное азотирование имплантов из титанового сплава VT20 в различных структурных состояниях / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, Е. А. Лукина, В. Н. Карпов, О. А. Поляков // Металлы. – 2005. – № 2. – С. 38–42.
6. *Формирование* нанокристаллической структуры при интенсивном осесимметричном пластическом деформировании / О. А. Розенберг, Н. В. Новиков, С. А. Фирстов, С. Е. Шейкин, Ю. Н. Подрезов, Н. Н. Даниленко // Тр. ИПМ НАН Украины “Электронная микроскопия и прочность материалов: Физическое материаловедение, структура и свойства материалов”. – К., 2003. – С. 25–30.
7. *Shi M., Takayama Y., and Umetsu T.* Microstructure refinement and texture evolution of titanium by friction roll surface processing // Mater. Trans. – 2009. – **50**, № 1. – P. 210–214.
8. *Валиев Р. З.* Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. – 2006. – **1**, № 1–2. – С. 208–216.
9. *Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е.* Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании. – Воронеж: ВГТА, 2001. – 200с.
10. *До питання* використання титану у вузлах тертя штучних суглобів / С. Є. Шейкін, І. М. Погрелюк, Д. В. Єфросінін, І. Ю. Ростоцький, Д. А. Сергач // Наука та інновації. – 2015. – **11**, № 3. – С. 5–12.
11. *Патент* України на винахід №92693 МПК(2009) B24B 39/00. Спосіб обробки сферичних виробів поверхневим пластичним деформуванням / С. Є. Шейкін, Ю. А. Цеханов. – Опубл. 25.11.2010; Бюл. № 22.

Одержано 05.08.2016