

PACS: 81.40.Ef

Н.И. Даниленко, А.Г. Моляр, Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ШАРА ИЗ СПЛАВА ВТ1-0 НАКАТЫВАНИЕМ ПЛОСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины
ул. Автозаводская, 2, г. Киев, 04074, Украина

Статья поступила в редакцию 23 мая 2011 года

Исследованы возможности создания мелкодисперсной структуры в поверхностном слое шара из сплава ВТ1-0 накатыванием плоскими поверхностями. Используются методы оптической металлографии, трансмиссионной электронной микроскопии, измерения твердости. Установлено, что накатывание плоскими поверхностями обеспечивает повышение твердости поверхностного слоя глубиной до 50 мкм в ~ 2.5 раза по сравнению с исходной, а слоя, лежащего на глубине 50–2000 мкм, – в ~ 1.7 раза. В тонком поверхностном слое шара из сплава ВТ1-0 образуются ячеистые структуры с размером отдельных ячеек менее 100 нм.

Ключевые слова: упрочнение, наноструктура, микротвердость, накатывание плоскими поверхностями, структурное состояние, металлография

Введение

Выбор объекта изучения обусловлен тем, что в мире и СНГ в настоящее время активно ведутся исследования по созданию эндопротеза тазобедренного сустава человека, отвечающего мировым требованиям биосовместимости, надежности, долговечности и при этом доступного потенциальным потребителям среднего достатка. Важнейшим элементом эндопротеза является пара трения – сферическая головка и ацетабулярная чашка.

Исходя из требований биосовместимости, для изготовления сферической головки эндопротеза из металлов наиболее подходит чистый титан. По этому показателю он превосходит сплавы ВТ6 (зарубежный аналог – сплав Ti–6Al–4V) и комохром (на основе Co–Cr–Mo), широко применяющиеся в практике костной хирургии [1,2]. Кроме того, высокая пластичность чистого титана исключает хрупкое разрушение детали в результате динамических нагрузок либо термической нестабильности, что зарегистрировано при использовании некоторых видов керамики [3].

Однако основными его недостатками являются низкие механические и триботехнические характеристики [2,4 и др.]. Последнее не позволяет ис-

пользовать детали из титана и его сплавов в парах трения. Таким образом, необходимым условием успешного применения чистого титана в качестве материала сферической головки эндопротеза является модификация ее рабочей поверхности, результатом которой должно стать оптимальное сочетание механических и триботехнических характеристик.

Решить данную задачу в принципе можно путем создания в поверхностном слое мелкодисперсных и наноструктур деформационного происхождения и последующей химико-термической обработкой (ХТО), например азотированием.

Известно, что формирование мелкодисперсной и наноструктуры в материале открывает доступ к функциональным характеристикам нового уровня: высокой прочности, твердости, износоустойчивости при достаточно высокой пластичности [3,5].

При этом методы, основанные на применении интенсивной пластической деформации (ИПД), для формирования сверхмелкодисперсных и наноструктур в металлах и сплавах являются достаточно перспективными. Образование таких структур в этом случае является сложным многостадийным процессом, обусловленным поэтапной перестройкой дислокационной структуры [3,6].

В настоящее время для получения субмикроструктурных и наноструктур в объеме используют ряд процессов накопления деформации (кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование, винтовая экструзия и др.) [3,6]. Необходимо, однако, отметить, что большинство исследователей в мире признают, что процессы ИПД, создающие наноструктуру в объеме, пока еще далеки от совершенства и требуют дальнейшего изучения.

При выборе метода повышения функциональных характеристик деталей машин посредством формирования мелкодисперсных и наноструктур следует учитывать, что в большинстве случаев эксплуатации их разрушение начинается с поверхности (изнашивание, усталость, контактное разрушение и др.). Иными словами, служебные свойства поверхностного слоя, который составляет долю процента от всей массы деталей, в значительном числе случаев имеют решающее значение [7].

Вследствие этого, кроме технологий ИПД, направленных на формирование наноструктур в объеме, к настоящему времени активно разрабатываются процессы, позволяющие создавать наноразмерную структуру лишь в поверхностном слое (Surface mechanical attrition, SMA).

Например, в [8] описана технология получения структурных элементов от 10 до 100 nm в приповерхностном слое детали вибрационной обработкой металлическими шарами. При этом зафиксировано увеличение твердости в 2–3 раза.

В [9] показано, что при высокоскоростном трении армко-железа в атмосфере аммиака образуется нанокристаллический слой с зернами 3–5 μm ,

глубиной 200 μm и твердостью 13 GPa при твердости материала основы 4 GPa. Перечисленные примеры свидетельствуют о принципиальной возможности создания нанокристаллических слоев на поверхности деформируемого материала, однако толщина слоя деформационного упрочнения при их использовании весьма невелика, поэтому промышленное применение указанных технологий проблематично.

В настоящем исследовании предпринята попытка решения первой части поставленной задачи: модификации рабочей поверхности сферической головки эндопротеза из чистого титана, а именно создания в поверхностном слое мелкодисперсных и наноструктур деформационного происхождения. Даже в том случае, когда условия ХТО могут привести к рекристаллизации и росту зерна, предварительное измельчение структуры поверхностного слоя создает благоприятные условия для диффузии элементов, что в итоге способствует созданию износостойкого антифрикционного поверхностного слоя детали.

В отличие от упомянутых выше методов создания наноструктур в объеме, а также методов SMA, примененная схема накатывания сферических изделий плоскими поверхностями [10] не требует мощного прессового оборудования и сложной технологической оснастки. Обработка может выполняться на универсальном оборудовании с использованием простых приспособлений.

Методика эксперимента

В экспериментах использовали сферическую заготовку $\varnothing 28 \text{ mm}$, которую получали точением из прутка и подвергали отжигу в вакууме. Шероховатость поверхности заготовки после точения составляла Ra 3.2 μm , некруглость – 0.15 mm. Твердость изделия после отжига HB 1.5 GPa.

Накатывание производили на вертикально-сверлильном станке 2A150 в камере $\varnothing 150 \text{ mm}$. Сферическое изделие 1 размещали в цилиндрической камере 2. Далее производили обработку вращающимся инструментом 3 (рис. 1). Сила прижима инструмента составляла 2000 N, скорость его вращения – 350 rev/min, время обработки – 2 min.

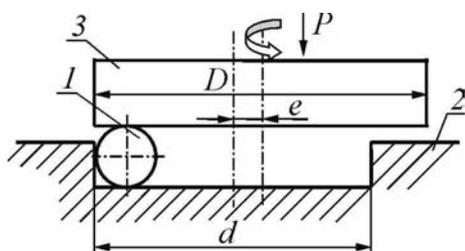


Рис. 1. Схема накатывания сферической заготовки плоскими поверхностями

Для обеспечения производительности и качества обработанной поверхности и поверхностного слоя требуется, чтобы след контакта инструмента с обрабатываемым изделием последовательно охватывал всю его поверхность. Необходимым условием этого является смещение следа пластического контакта на поверхности сферы при каждом обороте изделия относительно предыдущего. Очевидно, что чем больше кривизна тра-

ектории качения по нижней неподвижной плоскости, тем это смещение будет больше. Указанный эффект достигался эксцентриситетом оси вращения инструмента относительно оси камеры $e = 8 \text{ mm}$.

Следует отметить, что при неправильном выборе технологических параметров возможен переход процесса пластического деформирования не к сферической, а к конической устойчивой форме изделия.

Микротвердость деформированного поверхностного слоя заготовки измеряли на приборе ПМТ-3 и «Микрон-гамма» [11] при нагрузке 0.49 N. При подготовке металлографических шлифов в качестве травителя использовали смесь кислот (1 mg HF, 4 mg HNO₃, 96 mg H₂O).

Исследование тонкой структуры металла в исходном состоянии и после деформации в приповерхностном слое проводили методом трансмиссионной электронной микроскопии на микроскопе JEM-2100F. Фольги были получены электрохимической полировкой трехмиллиметровых дисков. Для получения тонких фольг из деформированного слоя проводили одностороннюю электрополировку со стороны недеформированной зоны.

Для индентификации структурного состояния поверхностного слоя детали после накатывания использовали методику, разработанную в Институте проблем материаловедения НАН Украины [12], основанную на индентировании исследуемого материала на приборе «Микрон-гамма». Прибор позволяет определять ряд характеристик исследуемого материала, среди которых твердость и модуль Юнга. По соотношению значения микротвердости, полученного при использовании индентора Берковича и вычисленного по Мейеру, и эффективного модуля упругости H/E^* возможно классифицировать материалы по их структурному состоянию. Эффективный модуль упругости индентируемого материала E^* связан с модулем упругости E соотношением $1/E^* = (1 - \nu^2)/E + (1 - \nu_0^2)/E_0$ (ν_0, ν – коэффициент Пуассона соответственно материала индентора и индентируемого материала) и учитывает упругое взаимодействие испытываемого материала с индентором.

Экспериментально установлено, что для крупнокристаллических материалов $H/E^* \leq 0.04$ (преимущественно металлы и их сплавы), для мелкокристаллических и наноматериалов $H/E^* \approx 0.05\text{--}0.09$ (материалы, подвергнутые высоким степеням деформации, многофазные, керамика, покрытия, пленки), для материалов в аморфном и аморфно-кристаллическом состоянии $H/E^* \leq 0.1$.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведено распределение микротвердости в поверхностном слое накатанного шара, измеренное на приборах «Микрон-гамма» и ПМТ-3. Микротвердость измеряли на ПМТ-3, а также вычисляли по Мейеру. Видно, что значения твердости, полученные двумя методами, отличаются ~ на 20%.

Рис. 2 демонстрирует, что зона деформационного упрочнения в накатанном шаре распространяется на глубину более 2 mm. При этом в слое 1000–2000 μm микротвердость практически не меняется и составляет ~ 2.6 GPa (рис. 2,а).

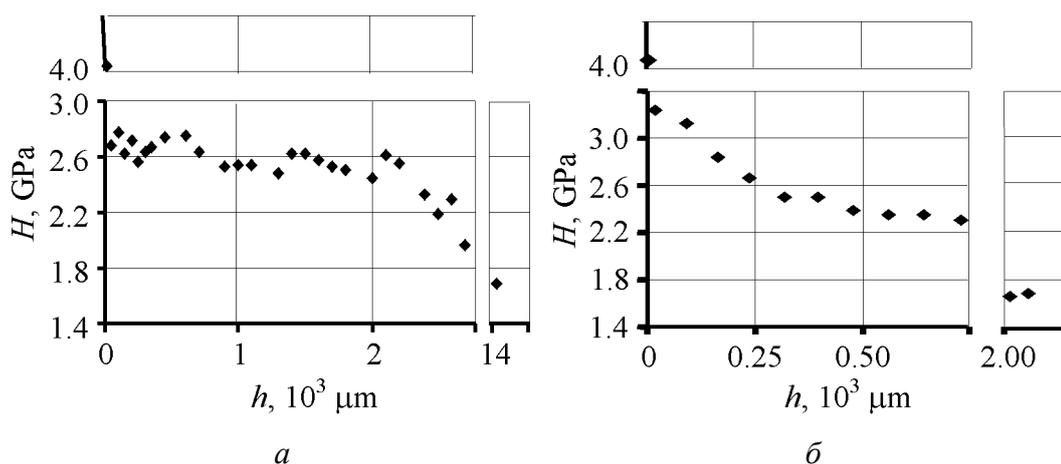


Рис. 2. Распределение микротвердости в поверхностном слое шара после накатывания, полученное измерением на приборе «Микрон-гамма» с использованием пирамиды Берковича (а) и на приборе ПМТ-3 с использованием четырехгранной пирамиды (б)

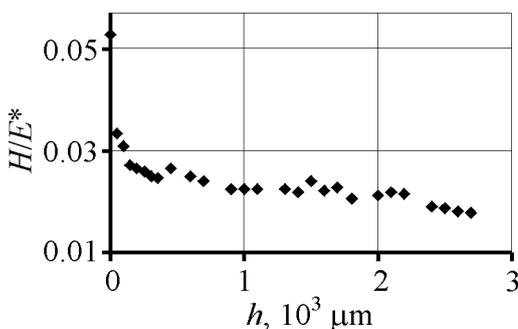


Рис. 3. Изменение соотношения H/E^* по глубине слоя деформационного упрочнения накатанного шара

Максимальная микротвердость локализована в тонком (менее $50 \mu\text{m}$) поверхностном слое. Исходя из значений соотношения H/E^* (рис. 3), структурное состояние материала в слое, расположенном на глубине более $50 \mu\text{m}$, можно классифицировать как крупнокристаллическое, а в тонком (менее $50 \mu\text{m}$) поверхностном слое – как мелкокристаллическое.

Металлографические исследования свидетельствуют о значительной степени деформации в поверхностном слое шара до 2 mm .

На рис. 4 представлены микрофотографии, характеризующие структуру деформированного слоя и сердцевины изделия после обработки накатыванием. Сердцевина детали (материал в исходном состоянии) характеризуется наличием зерен размером $500\text{--}1000 \mu\text{m}$ с крупными пластинчатыми выделениями α -фазы (рис. 4,а). В пределах отдельных субзерен на глубине около 2 mm видны линии скольжения в разных направлениях, что свидетельствует о том, что пластическая деформация достигает этой глубины. На расстоянии от поверхности $\sim 2 \text{ mm}$ находится переходная зона, в которой произошла фрагментация исходных α -пластин, заметно направление деформации. По мере приближения к поверхности наблюдаются измельчение зерен и изменение морфологии, выделенная α -фаза приобретает глобулярную форму (рис. 4,б). При этом глобулы выстраиваются в направлении бывших пластин, т.е. проявляется текстура деформации.

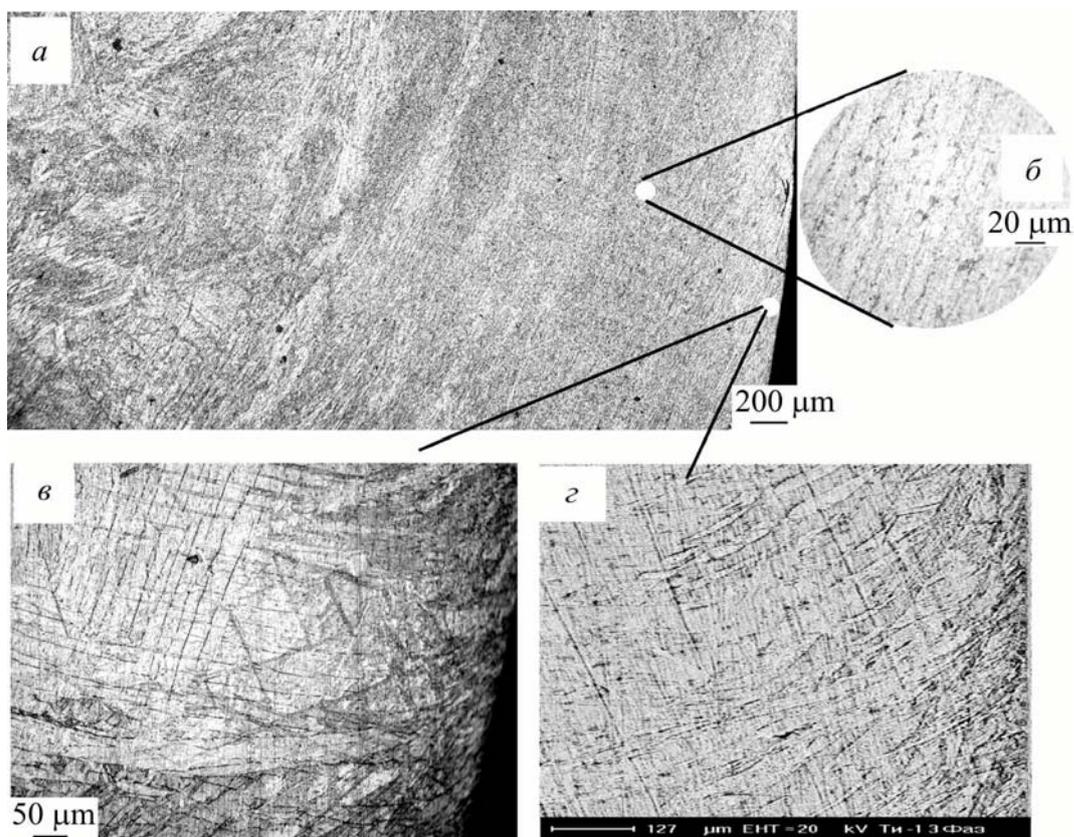


Рис. 4. Структура поверхностного слоя сферической заготовки после накатывания плоскими поверхностями: *a* – металлография участка, непосредственно прилегающего к поверхности; микрофотографии: *б* – того же участка, полученная на электронном сканирующем микроскопе CamScan; *в* – поверхностного слоя глубиной ~ 2.5 mm; *г* – участка поверхностного слоя на расстоянии ~ 700 μm от поверхности

У поверхности материал характеризуется мелкозернистой глобулярной α -структурой с заметной текстурой деформации (рис. 4, б, в). Микрофотография, полученная на электронно-сканирующем микроскопе CamScan (рис. 4, г), также свидетельствует о наличии текстуры у поверхности изделия.

Подтверждением высокой степени деформации металла в поверхностном слое может служить его микроструктура после рекристаллизационного отжига (рис. 5). После нагрева в β -области в поверхностном слое образца сформировалась мелкозернистая равноосная структура с зернами размером 15–20 μm, величина которых растет по мере удаления от поверхности. При этом зерна в недеформированной сердцевине достигают 500–100 μm.



Рис. 5. Микроструктура деформированного поверхностного слоя шара после рекристаллизационного отжига

О высокой степени деформации металла в поверхностном слое свидетельствуют также структурные исследования, проведенные на трансмиссионном

электронном микроскопе. На рис. 6,*а* представлена структура ВТ1-0 в исходном недеформированном состоянии, на рис. 6,*б* – ячеистая структура, сформировавшаяся в приповерхностном слое после деформирования. Размер отдельных ячеек составляет менее 100 нм. Прямое разрешение внутренней области ячейки показано на рис. 7. После фурье-обработки четко видны деформационные двойники, свидетельствующие о наличии высоких напряжений в деформируемом металле.

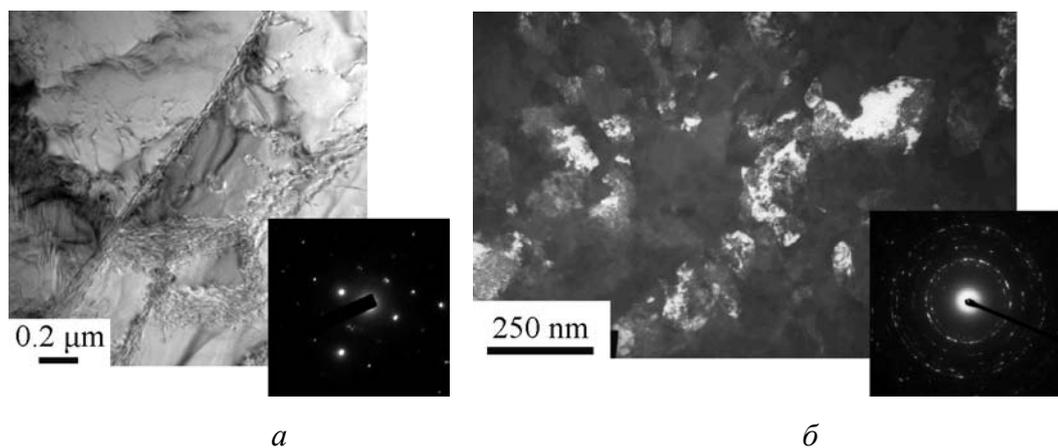


Рис. 6. Структура сплава ВТ1-0 в исходном состоянии (*а*) и сформировавшаяся ячеистая структура в поверхностном слое после деформирования (*б*)

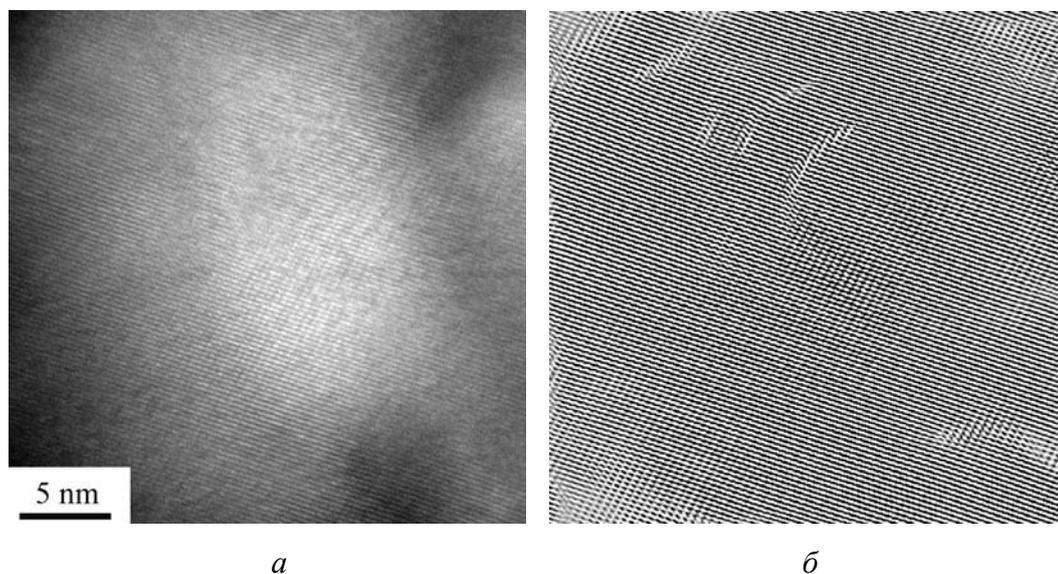


Рис. 7. Деформационные двойники в деформированном титановом сплаве: *а* – HRTEM-изображение; *б* – фурье-обработка изображения

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют об интенсивной пластической деформации в поверхностном слое толщиной ~ 2 мм, приводящей к образованию текстуры, динамической рекристаллизации и формированию наноразмерных ячеек в процессе накатывания.

Выводы

1. Технология накатывания шаров плоскими поверхностями обеспечивает интенсивное пластическое деформирование поверхностного слоя изделия.

2. При накатывании плоскими поверхностями шара из сплава ВТ1-0 можно получить слой деформационного упрочнения 2 мкм и более. При этом микротвердость поверхностного слоя глубиной до 50 мкм увеличивается в ~ 2.5 раза по сравнению с исходной, а слоя, лежащего на глубине 50–2000 мкм, – в ~ 1.7 раза.

3. Применение данной технологии позволяет получить в тонком поверхностном слое изделия из сплава ВТ1-0 ячеистые структуры с размером отдельных ячеек менее 100 нм.

1. *А.И. Иголкин*, Титан (научно-технический журнал) № 1, 86 (1993).
2. *А.В. Белый, В.А. Кукареко, А.Г. Кононов, В.И. Копылов, Ю.П. Шаркеев*, Трение и износ **29**, 571 (2008).
3. *Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков*, Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций, ТЕАН, Донецк (2003).
4. *Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн*, Титановые сплавы в машиностроении, Машиностроение, Ленинград (1977).
5. *В.В. Скороход, І.В. Уварова, А.В. Рагуля*, Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах, Академперіодика, Київ (2001).
6. *Р.З. Валиев*, Российские нанотехнологии **1**, № 1-2, 208 (2006).
7. *Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев*, Поверхностное упрочнение металлов, Наукова думка, Киев (1995).
8. *К. Lu, J. Lu*, Mater. Sci. Eng. **A375–377**, 38 (2004).
9. *A.V. Belocky, A.I. Yurcova*, Technology and product organization № 2, 40 (1988).
10. Пат. на корисну модель 47228, МПК (2009) В 2 4В 39/00, Спосіб обробки сферичних виробів поверхневим пластичним деформуванням, С.Є. Шейкін, Ю.А. Цеханов, U 07091, Заяв. 25.01.10, Бюл. № 2.
11. *E. Aznakavev*, Proc. of the International Conference «Small Talk», San Diego, California, USA, TP.001, 8 (2003).
12. *С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Э.П. Печковский*, Новая методология обработки и анализа результатов автоматического индентирования материалов, Логос, Киев (2009).

М.І. Даниленко, О.Г. Моляр, Ю.А. Цеханов, С.Є. Шейкін

ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ КУЛІ ІЗ СПЛАВУ ВТ1-0 НАКОЧУВАННЯМ ПЛОСКИМИ ПОВЕРХНЯМИ

Досліджено можливості створення дрібнодисперсної структури в приповерхневому шарі кулі із сплаву ВТ1-0 накочуванням плоскими поверхнями. Використано методи оптичної металографії, трансмісійної електронної мікроскопії, виміру твердості. Встановлено, що накочування плоскими поверхнями забезпечує підвищення твер-

дості поверхневого шару глибиною до 50 μm в ~ 2.5 рази в порівнянні з недеформованим матеріалом, а шару, що лежить на глибині 50–2000 μm , – в ~ 1.7 рази. У тонкому поверхневому шарі кулі із сплаву BT1-0 формуються коміркові структури з розміром окремих комірок менше 100 nm.

Ключові слова: зміцнення, наноструктура, мікротвердість, накочування плоскими поверхнями, структурний стан, металографія

M.I. Danylenko, O.G. Molyar, Yu.A. Tsekhanov, S.Ye. Sheykin

SURFACE STRENGTHENING OF THE BT1-0 ALLOY SPHERE BY PLANE SURFACE ROLLING

The possibilities of creation of fine-dispersed structure in a surface layer of the BT1-0 alloy sphere by plane surface rolling were researched. Methods of optical metallography, transmission electron microscopy, hardness measurement were used. It is found, that plane surface rolling provides raising of surface layer hardness at depth up to 50 μm in ~ 2.5 times in comparison with the initial value, and a layer placed on depth 50–2000 μm demonstrated increase in ~ 1.7 times. Cell structures with a size of separate cells less than 100 nm are formed in a thin surface layer of the BT1-0 alloy sphere.

Keywords: strengthening, nanostructure, microhardness, rolling by plane surfaces, structure state, metallography

Fig. 1. The scheme of rolling of a spherical blank by plane surfaces

Fig. 2. Microhardness distribution in surface layer of the sphere after rolling measured by «Micron-Gamma» device with use of Berkovich pyramid (*a*) and by PMT-3 device with use of tetrahedral pyramid (*b*)

Fig. 3. Change of the H/E^* ratio with the deformation hardening layer depth of the rolled sphere

Fig. 4. The surface layer structure of the spherical blank after rolling by plane surfaces: *a* – metallography of area directly adjusted to a surface; microphotographs: *b* – the same area scanned by electronic scanning microscope CamScan; *c* – the surface layer at the depth ~ 2.5 mm; *d* – the surface layer at the distance ~ 700 μm from the surface

Fig. 5. The microstructure of the deformed surface layer of the sphere after recrystallization annealing

Fig. 6. The structure of BT1-0 alloy in the initial state (*a*) and the formed cellular structure of the surface layer after deformation (*b*)

Fig. 7. Deformation twins in the deformed titan alloy: *a* – the HREM image; *b* – Fourier-processed image