

УДК 621.774.01.8

Цеханов Ю. А.
Шейкин С. Е.
Сергач Д. А.
Карих Д. В.

НАКАТЫВАНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПЛОСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

В настоящее время в странах СНГ абсолютное большинство операций эндопротезирования выполняется с применением импортных эндопротезов, цена которых делает недоступной такую операцию для пациентов с небольшими доходами и препятствует их возвращению к активной жизни.

Основным компонентом эндопротеза, который в значительной мере определяет его долговечность, является шарнирное сочленение (пара трения), представляющее собой сферическую головку и ацетабулярную чашку. К настоящему времени наибольшее распространение для изготовления деталей шарнирного сочленения получило сочетание материалов «металл/хирулен» (~ 85 % общего объема используемых в медицинской практике эндопротезов). Такая пара может сохранять работоспособность в течение 20 и больше лет [1]. При этом для изготовления головки как правило применяют сплав на основе CoCrMo, компоненты которого не являются абсолютно безвредными для человеческого организма. Из металлов с точки зрения биоинертности наиболее подходят для изготовления деталей эндопротезов чистый титан и титановый сплав ВТ 6 (Ti-6Al-4V). Предпочтительнее применение чистого титана [2].

Однако их применению препятствуют низкие механические характеристики и повышенная склонность к схватыванию с большинством конструкционных и инструментальных материалов.

На фоне этих обстоятельств использование титана и его сплавов для изготовления головок эндопротезов представляется возможным при условии модификации рабочей поверхности изделия, следствием которой должно быть оптимальное сочетание механических и триботехнических характеристик. Достичь указанного эффекта возможно применив азотирование в качестве метода её модификации [3, 4].

Известно, что свойства азотированного слоя в значительной мере определяются структурой поверхностного слоя титанового изделия. Измельчение структуры и упрочнение поверхностного слоя изделия холодным поверхностным пластическим деформированием перед азотированием приводит к повышению плотности дислокаций и увеличению площади межзеренных границ, что способствует увеличению глубины диффузного слоя и повышению его твердости [5, 6].

На сегодняшний день известны несколько способов обработки сферических поверхностей ХППД [7, 8]. Однако, как правило, они предназначены для обработки неполных сфер и имеют ограниченные технологические возможности в плане создания слоя деформационного упрочнения значительной глубины.

Целью данной статьи является экспериментальное исследование глубины слоя деформационного упрочнения сферических изделий из ВТ1-0 и ВТ6 с использованием схемы накатывания плоскими поверхностями.

Для создания значительных деформаций, и, следовательно, существенного измельчения структуры в поверхностном слое сферического изделия целесообразно использовать технологическую схему накатывания полной сферы плоскими поверхностями [9] (рис. 1). Сферическое изделие (1) размещают в цилиндрической камере (2) и производят обработку вращающимся инструментом (3).

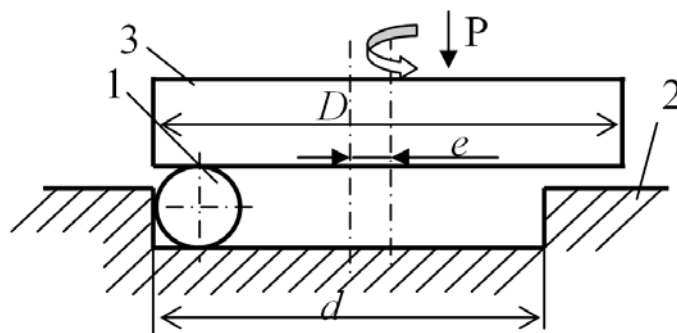


Рис. 1. Схема накатывания сферической заготовки плоскими поверхностями

Данная схема накатывания сферических изделий плоскими поверхностями не требует мощного прессового оборудования и сложной технологической оснастки. Обработка может выполняться на универсальном оборудовании. Кроме того, достоинством данной схемы является возможность приложения значительных нагрузок к заготовке (при достаточно жесткой оснастке) и, следовательно, создания слоя деформационного упрочнения значительной толщины.

При этом для обеспечения производительности и качества обработанной поверхности и поверхностного слоя необходимо, чтобы след контакта инструмента с обрабатываемым изделием последовательно охватывал всю его поверхность. Необходимым условием этого является смещение следа при каждом обороте изделия относительно предыдущего. Указанный эффект достигается смещением оси вращения инструмента относительно оси камеры на некоторый эксцентриситет e (рис. 1).

Однако данная технология является малоизученной и, при этом, имеет ряд технологических параметров, влияющих как на качество и точность получаемой заготовки. Их неудачная комбинация может вызывать появление браковочных признаков, например, формирование конической формы заготовки, перенаклёп и шелушение обработанной поверхности и др. Т. о., учитывая, что сферическая головка эндопротеза является чрезвычайно ответственной деталью, в значительной мере определяющей долговечность изделия в целом, изучение технологических возможностей данного метода является целесообразным.

Как показали экспериментальные исследования, при наличии эксцентриситета e траектория следа взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой имеет стохастический характер. Исходя из этого, количество циклов деформирования поверхности заготовки может быть определено как соотношение $m = l \times t / F_{\text{сф}}$, где m – число циклов деформирования; l , t – соответственно длина и ширина следа за период обработки; $F_{\text{сф}}$ – площадь поверхности заготовки. В этом случае формула для определения среднестатистического числа циклов деформирования каждой материальной точки на поверхности заготовки имеет вид:

$$m = 0,0083 \frac{D}{d^2} t n \tau, \quad (1)$$

где n – скорость вращения инструмента (об/мин);

τ – время обкатки (с);

D – диаметр круговой траектории качения шара в камере;

d – диаметр накатываемой сферы.

Рассмотрим шар из пластичного материала, сдавленный плоскостью инструмента (рис. 2). В силу малости искривления области контакта для определения усилия прижима инструмента обеспечивающего получение слоя деформационного упрочнения заданной глубины, можно использовать схему вдавливания жесткого штампа в пластическое полупространство. Тогда:

$$P = q_k \cdot F_k; \quad (2)$$

$$F_k = \pi \frac{d_k^2}{4}; \quad (3)$$

$$h = \frac{d_k}{\sqrt{2}}, \quad (4)$$

где P – технологическое усилие сдвливания;
 q_k – контактное давление;
 d_k – диаметр пятна контакта без учета напльва;
 h – глубина слоя деформационного упрочнения;
 F_k – площадь пятна контакта без учета напльва.

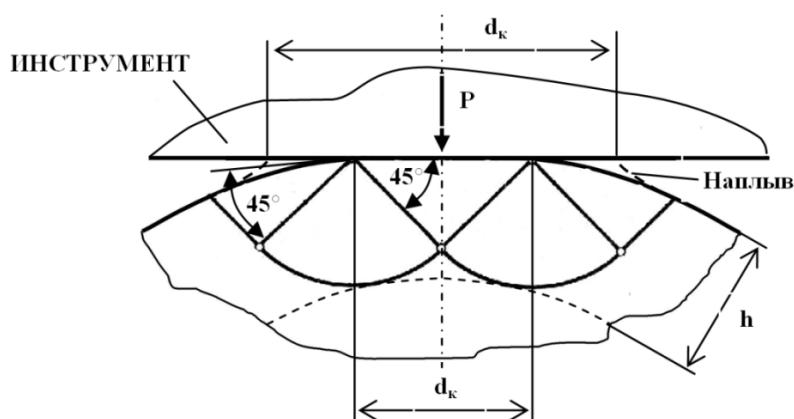


Рис. 2. Схема контакта инструмента со сферическим изделием

Как известно из задачи Прандтля: $q_k \approx 3\sigma_m$, где σ_m – предел текучести материала обрабатываемого изделия, если материал не упрочненный. Но, как показывают эксперименты, в сильно упрочненном поверхностном слое предельное контактное давление может достигать значений:

$$q_k^* \approx 2q_k \approx 6\sigma_T. \quad (5)$$

Подставляя (3, 5) в (2), получаем:

$$P \approx 4,71 \cdot \sigma_T \cdot d_k^2. \quad (6)$$

Формула (6) связывает технологическое усилие с механическими свойствами материала шара и с диаметром пятна контакта.

В реальности имеет место напльв (рис. 1), который увеличивает площадь контакта инструмента с обрабатываемым изделием.

$$d_k^* = k \cdot d_k. \quad (7)$$

Экспериментально установлено, что в диапазоне размеров обрабатываемых изделий из титана $\varnothing 25-50$ мм d_k^* больше d_k в 1,05–1,15 раза. Примем $k = 1,1$.

Тогда, подставляя (7) и (4) в (6) получим:

$$P = 11,4 \cdot \sigma_T \cdot h^2. \quad (8)$$

Или:

$$h = \sqrt{\frac{P}{11,4 \cdot \sigma_T}}. \quad (9)$$

Зависимости глубины слоя деформационного упрочнения от технологического усилия при накатывании сплавов ВТ1-0 и ВТ6, рассчитанные по (9), приведены на рис. 3.

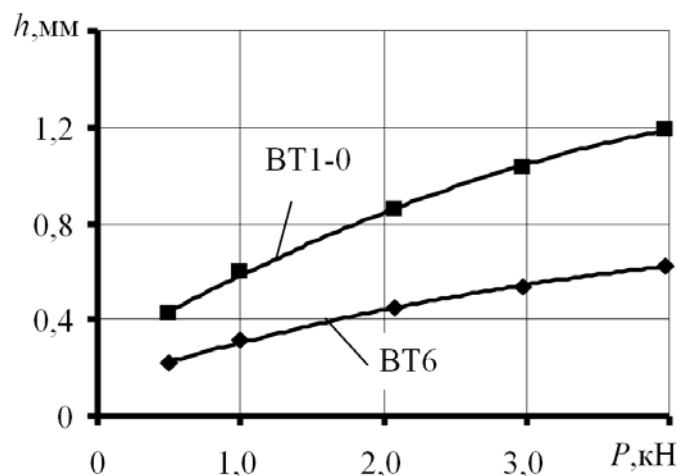


Рис. 3. Зависимость глубины слоя деформационного упрочнения от технологического усилия при накатывании шаров из ВТ1-0 и ВТ6, рассчитанная по (9)

Для проверки данных зависимостей накатывали сферические заготовки $\varnothing 28$ мм из ВТ6 и ВТ1-0, которые получали точением из прутка и подвергали отжигу в вакууме. Шероховатость поверхности заготовки после точения составляла $Ra\ 3,2$, отклонение от сферичности – 0,15 мм. Твердость изделия после отжига составляла ВТ6 – $HV\ 2,9$ ГПа, $\sigma_m = 245$ МПа, ВТ 1-0 – 1,5 ГПа, $\sigma_m = 900$ МПа.

Накатывание производили на вертикально-сверлильном станке 2А150 в камере $\varnothing 100$ мм. Скорость вращения инструмента составляла 350 об/мин.

На рис. 4 приведено распределение микротвердости в поверхностном слое заготовок из ВТ6, обработанных при технологическом усилии $P = 2,08, 2,97$ и $3,87$ кН при времени обработки 120, 60 и 34 с, что соответствует 0,56; 0,28 и 0,16 числам деформирования.

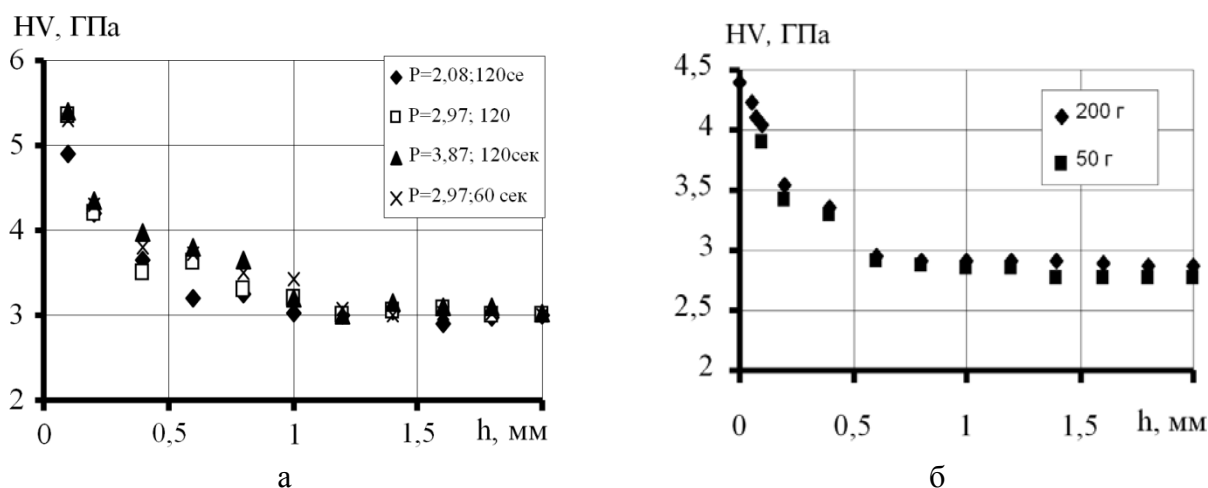


Рис. 4. Распределение микротвердости в поверхностном слое шара из ВТ6 после накатывания:

а – усилиями 2,08, 2,97, 3,87 кН 120 и 60 с; б – после накатывания усилием 2,08 кН 32 с

Видно, что глубина слоя деформационного упрочнения имеет наименьшую глубину при наименьшей из примененных нагрузок – 2,08 кН. При этом, значения твердости, полученные при накатывании в течение 120 с и 60 с и её распределение по глубине поверхностного слоя, практически не отличаются. Отличия наблюдаются при накатывании 32 с.

Объясняется это, по-видимому, тем, что накопленная деформация при накатывании по данной схеме определяется суммированием деформаций на каждом цикле обработки. А, как видно из тарировочного графика (рис. 5), после достижения накопленной деформации значений 0,15 твердость материала изменяется незначительно. По всей вероятности, при накатывании 32 с накопленная деформация в поверхностном слое не превышает 0,15, при накатывании более 60 с – более 0,15.

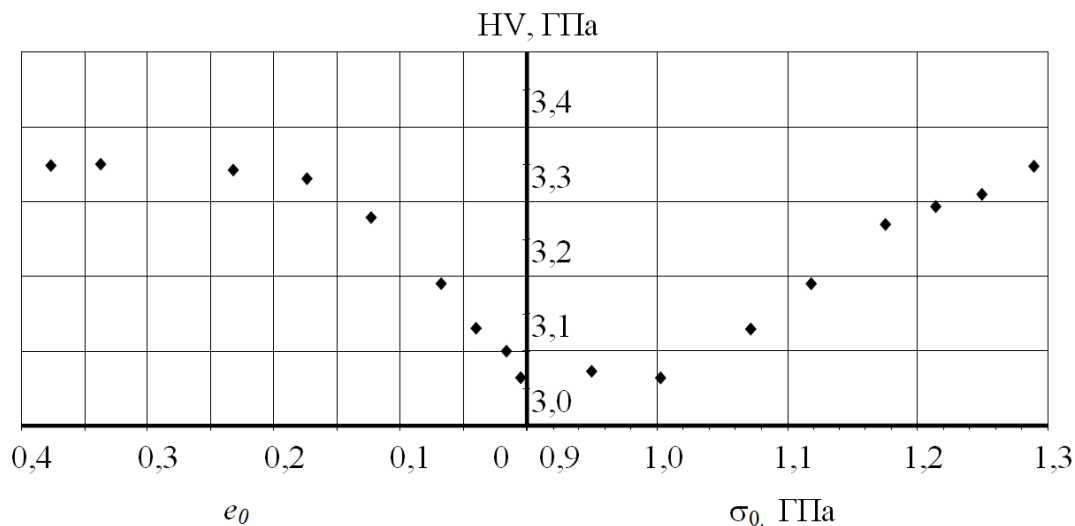


Рис. 5. Тарировочный график для сплава ВТ6

На рис. 6, а приведена структура поверхностного слоя шара из ВТ 1-0 после накатывания, на рис. 6, б – распределение микротвердости в поверхностном слое.

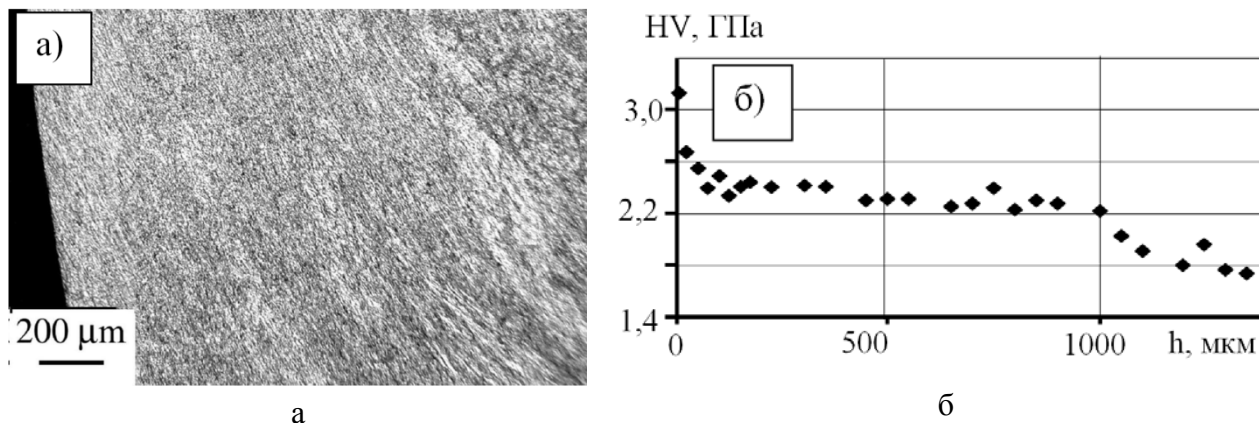


Рис. 6. Структура поверхностного слоя сферической заготовки из ВТ1-0 после накатывания плоскими поверхностями (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое шара после накатывания (б)

Характер структуры свидетельствуют о значительной степени деформации в поверхностном слое шара.

Сердцевина детали (материал в исходном состоянии) характеризуется наличием зерен размером 500–1000 мкм с крупными пластинчатыми выделениями α -фазы (рис. 6, а). В слое глубиной около 1мм пределах отдельных субзерен на видны линии скольжения в разных направлениях, что говорит о пластической деформации. На расстоянии от поверхности ~ 1 мм находится переходная зона, в которой произошла фрагментация исходных α -пластин, заметно направление деформации. По мере приближения к поверхности наблюдаются измельчение зерен и изменение морфологии, проявляется текстура деформации. Максимальная микротвердость локализована в тонком (менее 50 мкм) поверхностном слое.

Видно, что значения твердости, полученные двумя методами, отличаются незначительно.

Распределение микротвердости подтверждает, что зона деформационного упрочнения в накатанном шаре распространяется на глубину около 1 мм. При этом в слое 300–1000 μm микротвердость практически не меняется и составляет $\sim 2,3$ ГПа (рис. 6, б).

Т. о., необходимо отметить, что на практике глубина слоя деформационного упрочнения незначительно превышает значения, получаемые расчетом по (9). Необходимо учитывать, что погрешность формы заготовки приводит к динамическим нагрузкам, следствием чего является увеличение толщины упрочненного слоя. Однако зависимость (9) позволяет с вполне достаточной для практики точностью рассчитывать толщину упрочненного слоя.

ВЫВОДЫ

Технологическая схема накатывания сферических заготовок из ВТ1-0 и ВТ6 плоскими поверхностями обеспечивает упрочнение поверхностного слоя в 2 и более раз при толщине поверхностного слоя 1 мм и более.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tribology and Biophysics of Artificial Joints* / Pinchuk L. C., Nikolaev V. I., Tsvetkova E. A., Goldade V. A. – London : Elsevier, 2006.
2. Иголкин А. И. Титан в медицине / А. И. Иголкин // Титан. – 1993. – № 1. – С. 86–90.
3. Структура и триботехнические свойства субмикрористаллического титана, модифицированного ионами азота / А. В. Бельий, В. А. Кукареко, А. Г. Кононов, В. И. Копылов, Ю. П. Шаркеев // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 6. – С. 571–577.
4. Федірко В. М. Азотування титану та його сплавів / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк. – К. : Наук. думка, 1995. – 220 с.
5. Низкотемпературное ионное азотирование имплантов из титанового сплава ВТ20 в различных структурных состояниях / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, Е. А. Лукина, В. Н. Карпов, О. А. Поляков // Металлы. – 2005. – № 2. – С. 38–44.
6. Влияние фазового состава и структуры на взаимодействие титановых сплавов с азотом при низкотемпературном ионном азотировании / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, Л. М. Петров, Е. А. Лукина, А. А. Чернышова // Металлы. – 2006. – № 2. – С. 40–46.
7. Машиностроительное пр-во. Сер. Прогрессивные технол. процессы в машиностроении: Обзорн. информ. // ВНИИТЭМР. – М., 1991. – Вып. 5. – С. 31–33.
8. Пат. РФ № 2324583, МПК 6 В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования сферы / Степанов Ю. С., Киричек А. В., Афанасьев Б. И., Фомин Д. С., Самойлов Н. Н., Катунин А. В., Катунин А. А., Селеменов К. Ф. – № 2006128547/02 ; заявл. 04.08.2006 ; опубл. 20.05.2008.
9. Патент України № 92693 МПК(2009) В24В 39/00. Спосіб обробки сферичних виробів поверхневим пластичним деформуванням / Цеханов Ю. А., Шейкін С. Є. – № а200907090 ; заявл. 07.07.2009 ; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 2.

Цеханов Ю. А. – д-р техн. наук, проф. ВАСУ;

Шейкин С. Е. – д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник ИСМ;

Сергач Д. А. – аспирант ИСМ;

Карих Д. В. – аспирант ИСМ.

ВАСУ – Воронежский архитектурно-строительный университет, г. Воронеж, Россия.

ИСМ – Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев.

E-mail: sergach_89@mail.ru