

PACS: 91.55.Mb

Ю.А. Цеханов¹, С.Е. Шейкин², Д.В. Карих¹, Д.А. Сергач²

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛНОСФЕРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАКАТЫВАНИИ ПЛОСКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

¹Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Россия

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

Статья поступила в редакцию 25 июня 2013 года

Исследована зависимость глубины упрочненного слоя сферической заготовки от технологического усилия при накатывании плоскими поверхностями. Путем измерения микротвердости и компьютерного моделирования методом конечных элементов в программном комплексе DeForm-3D установлено, что накатывание плоскими поверхностями обеспечивает повышение твердости поверхностного слоя глубиной до 50 мкм в 2.5 раза. Получено распределение деформаций в контактной пластической области заготовки, а также предложена методика их расчета.

Ключевые слова: чистый титан, эндопротез, накатывание, глубина деформирования, повышение твердости поверхностного слоя

Досліджено залежність глибини зміцненого шару сферичної заготовки від технологічного зусилля при накочуванні плоскими поверхнями. Шляхом вимірювання микротвердості і комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів у програмному комплексі DeForm-3D встановлено, що накочування плоскими поверхнями забезпечує підвищення твердості поверхневого шару глибиною до 50 мкм в 2.5 рази. Отримано розподіл деформацій у контактній пластичній області заготовки, а також запропоновано методику їхнього розрахунку.

Ключові слова: чистий титан, эндопротез, накочування, глибина деформування, підвищення твердості поверхневого шару

К настоящему времени в шарнирном сочленении эндопротеза тазобедренного сустава сферическую головку, как правило, изготавливают из металла, а ацетабулярную чашку – из хирулена (~ 85% общего объема используемых в медицинской практике эндопротезов). Такое сочленение может сохранять работоспособность в течение 20 и более лет [1]. При этом для изготовления головки обычно применяется сплав на основе CoCrMo, компоненты которого не являются абсолютно безвредными для человеческого организма. С точки зрения биоинертности для изготовления деталей эндопротезов наиболее подходит чистый титан.

Несколько уступает ему по этому показателю титановый сплав ВТ6 [2]. Однако применению в парах трения титановых сплавов препятствуют их низкие механические характеристики и повышенная склонность к схватыванию [3]. Вследствие этого их использование для изготовления головок эндопротезов представляется возможным лишь при условии модификации рабочей поверхности изделия, результатом которой должно стать оптимальное сочетание механических характеристик и адгезионной инертности. Достичь указанного эффекта можно, применив азотирование в качестве метода модификации [4,5 и др.].

Известно, что свойства азотированного поверхностного слоя в значительной мере зависят от его структуры и фазового состава. Измельчение структуры поверхностного слоя изделия холодным поверхностным пластическим деформированием перед азотированием приводит к повышению плотности дислокаций и росту площади межзеренных границ, что способствует увеличению глубины диффузного слоя и повышению его твердости [6,7].

Для создания значительных деформаций и, следовательно, существенного измельчения структуры в слое деформационного упрочнения разработана технологическая схема накатывания полной сферы плоскими поверхностями (рис. 1) [8,9]. Сферическое изделие 1 размещают в цилиндрической камере 2 и производят обработку вращающимся инструментом 3.

Данная технология не требует мощного прессового оборудования и сложной технологической оснастки. Обработка может выполняться на универсальном оборудовании. Кроме того, достоинством такого метода является возможность приложения к заготовке существенных нагрузок и, следовательно, создания слоя деформационного упрочнения значительной толщины, а высокая жесткость инструмента и оснастки обеспечивает высокую точность обработки.

Для обеспечения производительности и качества обработанной поверхности и поверхностного слоя необходимо, чтобы след контакта инструмента с обрабатываемым изделием последовательно охватывал всю его поверхность, что достигается смещением оси вращения инструмента относительно оси камеры на некоторый эксцентриситет. Предложенная технологическая схема проверена экспериментально при накатывании заготовки из ВТ1-0 при следующих режимах [9]: время обработки – 120 s, сила прижима инструмента – 2000 N, скорость вращения – 351 rev/min, диаметр траектории движения заготовки – 45 mm, эксцентриситет инструмента относительно камеры – 10 mm. На рис. 2,а представлена микрофотография, характеризующая структуру деформированного слоя и сердцевины изделия после обработки накатыванием.

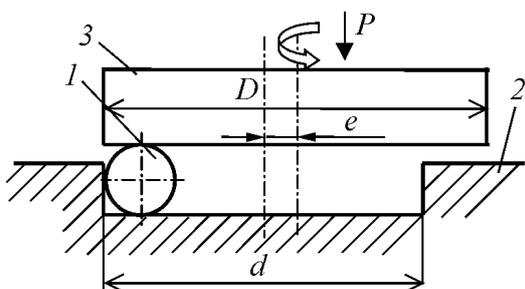


Рис. 1. Схема накатывания сферической заготовки плоскими поверхностями

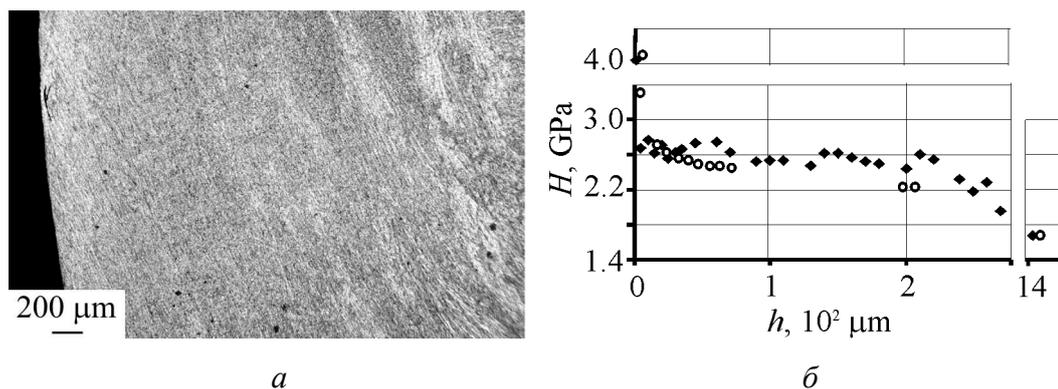


Рис. 2. Структура поверхностного слоя сферической заготовки из VT1-0 после накатывания плоскими поверхностями (а) и распределение микротвердости в этом слое, полученное на приборах ПМТ-3 с использованием четырехгранной пирамиды (○) и «Микрон-гамма» с использованием пирамиды Берковича (◆)

Распределение микротвердости в поверхностном слое накатанного шара, измеренное на приборах «Микрон-гамма» [10] и ПМТ-3 показано на рис. 2,б. Видно, что зона деформационного упрочнения в накатанном шаре распространяется на глубину более 2 mm. При этом на поверхности значение микротвердости достигает более 4 GPa, а в слое 1000–2000 μm – практически не меняется и составляет ~ 2.5–2.6 GPa.

Расчеты и эксперименты показывают, что в процессе обработки происходит нагрев обрабатываемой поверхности до 150–200°C, что в сочетании с объемным сжатием в контактной зоне обеспечивает высокую пластичность и бездефектность обрабатываемого материала. Большие пластические деформации в этих условиях приводят к созданию в поверхностном слое мелкодисперсной и наноструктуры [9], благоприятной для его последующего диффузионного насыщения азотом. При этом рекристаллизация и укрупнение измельченных зерен не происходят.

Необходимо отметить, что примененные методы исследования состояния поверхностного слоя весьма трудоемки, поэтому для его прогнозирования целесообразно иметь математическую модель, описывающую закономерности механизма упрочнения поверхностного слоя.

Для построения такой модели использовали метод конечных элементов. При этом приняты следующие положения:

- процесс формирования пластического следа на сферической поверхности является стохастическим с равновероятностными условиями деформирования любой материальной точки заготовки;
- локальная область смятия поверхности заготовки за счет стохастического многократного деформирования смежных областей и с учетом несжимаемости материала восстанавливает свою сферическую форму;
- следовательно, накопленную при многократном деформировании в данной материальной точке заготовки пластическую деформацию можно определить, используя принцип суперпозиции.

Такой подход нашел экспериментальное подтверждение для многих процессов холодного поверхностного пластического деформирования (ХППД) [11,12].

Эксперименты и расчеты с помощью метода конечных элементов показывают, что ширина пластического следа t_{pl} на поверхности больше ширины области непосредственного контакта t_c .

Рассмотрим статистические закономерности деформирования поверхностного слоя. Примем, что величина радиального сжатия заготовки Δ (рис. 3) в процессе накатывания остается постоянной.

Приращение накопленной пластической деформации в материальной точке M с координатами x и h составляет $\Delta e_i = \Delta e_i(x, h)$. Предположим, что экспериментально или теоретически такая зависимость установлена. Для наглядности представим ее для каждой фиксированной глубины h в виде графика $\Delta e_i(x)$ (рис. 4).

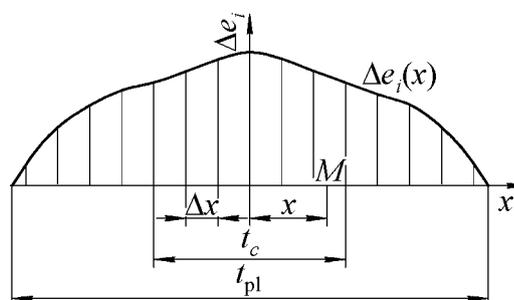
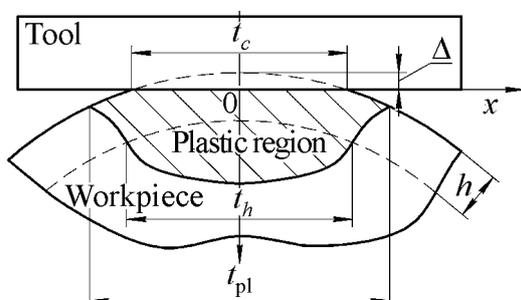


Рис. 3. Схема пластической области

Рис. 4. График изменения приращения накопленной деформации Δe_i для заданной глубины слоя h

По отношению к точке M пластическая область стохастически, но равновероятно смещается в направлении оси x за каждый цикл деформирования. Для удобства рассмотрим обратное движение – точка M равновероятно меняет свою координату x . Пусть за время обработки она получает m циклов деформирования. С учетом вышесказанного она последовательно получит каждое из m приращений Δe_i в интервале $-t_{pl}/2 \leq x \leq +t_{pl}/2$ с шагом $\Delta x = t_{pl}/m$. Для удобства анализа для каждой глубины h примем одну и ту же область существования $\Delta e_i(x)$ шириной t_{pl} .

Накопленная деформация $\sum e_i = \sum_1^m \Delta e_i(x)$ с учетом $m = \frac{t_{pl}}{\Delta x}$ составит

$$\sum e_i = m \sum_1^m \frac{\Delta e_i(x)}{m} = m \sum_1^m \frac{\Delta e_i(x) \Delta x}{t_{pl}}. \quad (1)$$

Очевидно, что при большом m величина $\sum_1^m \Delta e_i(x) \Delta x$ есть площадь S под кривой (рис. 4), а величина

$$\Delta e_{icc} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta e_i(x) \Delta x}{t_{pl}} = \frac{S}{t_{pl}} \quad (2)$$

есть среднеинтегральная деформация на заданной глубине h на ширине t_{pl} . Тогда

$$\sum e_i = m \Delta e_{icp} . \quad (3)$$

Проанализируем зависимость числа циклов деформирования m от технологических параметров. На поверхности заготовки остается пластический след площадью $A_{pl} = lt_{pl}$, где l – длина этого следа, которая, очевидно, равна длине следа, оставляемого шаром, например, на нижней неподвижной плоскости инструмента (рис. 4): $l = V_b \tau$ (где V_b – скорость движения центра шара, τ – время обработки).

Эксперименты показывают, что через несколько секунд после начала обкатывания независимо от величины эксцентриситета e и начального положения шара на нижней неподвижной плоскости он касается боковой цилиндрической поверхности инструмента и в дальнейшем движется относительно него по окружности диаметром $D - d_b$ (см. рис. 1). Касание шара о боковую поверхность и эксцентриситет e вызывают ее дополнительное вращательное движение вокруг оси $i-i$, но не влияют на длину следа контакта. Это вызывает постоянное смещение пластического следа на самой сферической заготовке, что благоприятно сказывается на ее равномерном поверхностном деформационном упрочнении и на формировании высокой геометрической точности получаемой сферической поверхности.

Если верхняя инструментальная плоскость вращается с угловой скоростью $\omega = \frac{n2\pi}{60}$ (s^{-1}) (где n – число оборотов в минуту), то

$$V_b = \frac{n2\pi}{60} \frac{D - d_b}{2} = \frac{\pi(D - d_b)n}{60} . \quad (4)$$

С учетом вышеприведенных зависимостей

$$A_{pl} = \frac{\pi(D - d_b)n\tau t_{pl}}{120} . \quad (5)$$

Пусть эта общая площадь поверхностного пластического следа в m раз больше площади поверхности заготовки $S_b = \pi d_b^2$. Вполне естественно величину $m = A_{pl}/S_b$ принять за параметр, определяющий среднестатистическое число циклов деформирования поверхности. Тогда получаем

$$m = \frac{(D - d_b)t_{pl}n\tau}{120d_b^2} = 0.0083 \frac{(D - d_b)t_{pl}n\tau}{d_b^2} . \quad (6)$$

Из (2), (3) и (6) находим

$$\sum e_i = \frac{(D - d_b) \pi \tau S}{120 d_b^2} = 0.0083 \frac{(D - d_b) \pi \tau S}{d_b^2}. \quad (7)$$

Как видно, в итоге величина накопленной за всю обкатку деформации непосредственно от ширины пластического следа t_{pl} не зависит, но она пропорциональна площади под кривой $\Delta e_i(x)$ на интервале t_{pl} . Формула (7) позволяет как рассчитывать степень деформационного упрочнения слоя заготовки на любой глубине, так и управлять закономерностями этого упрочнения за счет правильного выбора технологических параметров.

Величины, входящие в формулу (7), имеют размерности: $D, d_b - \text{mm}$; $\omega - \text{s}^{-1}$; $\tau - \text{s}$; $S - \text{mm}^{-1}$. Для указанных выше режимов обработки ($D = 180 \text{ mm}$, $d_b = 28 \text{ mm}$, $\omega = 5.85 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 120 \text{ s}$, $S = 0.242 \text{ mm}^{-1}$) получаем: $m = 216$, $\Sigma e_i = 16.3$. В таблице приведены значения S в зависимости от h .

Таблица

Значения S в зависимости от h

h, mm	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
S, mm^{-1}	0.242199	0.165939	0.110093	0.088968	0.064859	0.041708

Процесс накатывания сферы из ВТ1-0 при технологическом усилии 3 кН был смоделирован методом конечных элементов. На рис. 5 показана деформация в конце пластической области.

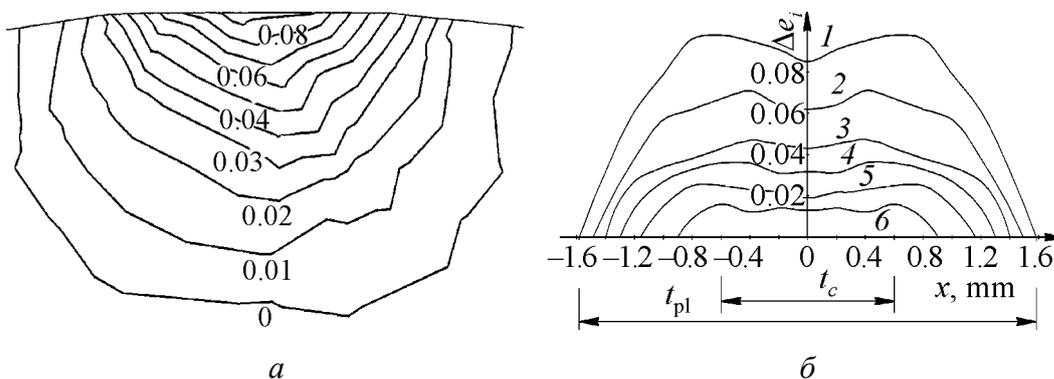


Рис. 5. Деформация Δe_i в конце пластической области: a – изолинии, b – изменение по ширине на разных глубинах h, mm : 1 – 0, 2 – 0.2, 3 – 0.4, 4 – 0.6, 5 – 0.8, 6 – 1.0

На рис. 6 приведено распределение твердости по глубине поверхностного слоя шара, полученное измерением на приборе ПМТ-3 и расчетом по разработанной методике. Видно, что на глубине более 0.2 mm теоретические и экспериментальные значения твердости практически совпадают. На меньшей глубине фактические значения твердости превышают расчетные.

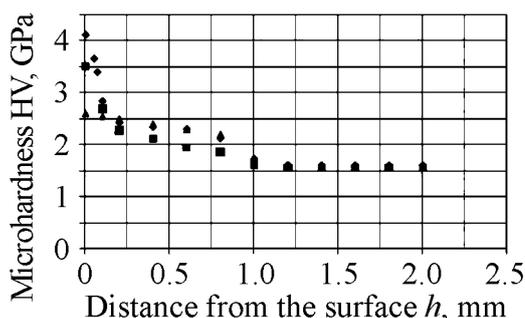


Рис. 6. Распределение твердости в поверхностном слое шара из ВТ1-0 после накатывания: ● – 50 г, ■ – 200 г, ▲ – теоретические значения

Различия в расчетных и фактических значениях микротвердости в поверхностном слое толщиной до 0.2 mm объясняются, по-видимому, тем, что в наших экспериментах накатывали шары, полученные токарной обработкой на универсальном токарном станке. При этом отклонение от сферичности заготовки составляло 0.2–0.25 mm. После накатывания величина отклонения составляла ~ 0.03 mm. Таким образом, деформация в поверхностном слое толщиной ~ 0.2 mm существенно превышает деформацию лежащего ниже слоя.

Выводы

1. Разработанная методика расчета напряженно-деформированного состояния позволяет с удовлетворительной точностью прогнозировать параметры деформационного упрочнения при накатывании сферических заготовок плоскими поверхностями на глубине, превышающей отклонение от сферичности исходной заготовки.

2. Технология накатывания сферических заготовок плоскими поверхностями является перспективной для получения мелкодисперсной и нанокристаллической структуры в поверхностном слое.

1. *L.C. Pinchuk, V.I. Nikolaev, E.A. Tsvetkova, and V.A. Goldade, Tribology and Biophysics of Artificial Joints, Elsevier, London (2006).*
2. *А.И. Игolkин, Титан № 1, 86 (1993).*
3. *И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин, Титановые сплавы в машиностроении, Машиностроение, Москва (1990).*
4. *А.В. Белый, В.А. Кукарко, А.Г. Кононов, В.И. Копылов, Ю.П. Шаркеев, Трение и износ 29, 577 (2008).*
5. *В.М. Федірко, І.М. Погрелюк, Азотування титану та його сплавів, Наукова думка, Київ (1995).*
6. *А.А. Ильин, С.В. Скворцова, Е.А. Лукина, В.Н. Карпов, О.А. Поляков, Металлы № 2, 38 (2005).*
7. *А.А. Ильин, С.В. Скворцова, Л.М. Петров, Е.А. Лукина, А.А. Чернышева, Металлы № 2, 40 (2006).*
8. *Патент України на винахід № 92693 МПК(2009) В24В 39/00, Спосіб обробки сферичних виробів поверхневим пластичним деформуванням, Ю.А. Цеханов, С.Є. Шейкін, Бюл. № 22, 25.11.2010.*
9. *Н.И. Даниленко, А.Г. Моляр, Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, ФТВД 21, № 4, 130 (2011).*

10. E. Aznakavev, Proc. of the International Conference «Small Talk», San Diego, California, USA, TP.001, 8 (2003).
11. В.М. Смелянский, Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Москва (1986).
12. Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании, ВГТА, Воронеж (2001).

Yu.A. Tsekhanov, S.E. Sheikin, D.V. Karih, D.A. Sergach

HARDENING OF THE SURFACE LAYER OF SPHERICAL WORKPIECES AT THE ROLL FORMING BY A FLAT TOOL

The paper is aimed at forecasting of hardening of the surface layer of spherical parts using the scheme of rolling by flat surfaces, on the basis of experimental studies of strain hardening layer depth.

Spherical billet of pure titanium VT1-0 was tested. To create significant strain and significant refinement of the structure in the layer of hardening, rolling of a sphere by flat tools was applied. Microhardness was measured by PMT-3 device.

The depth distribution of hardness of the surface layer of the ball was measured by PMT-3 and calculated by the method developed by us. The hardness values obtained experimentally agreed satisfactory at the depth of 0.2 mm. At lower depth, actual hardness values exceed the estimated ones.

The differences in the calculated and measured values of the microhardness of the surface layer up to 0.2 mm thick are explained, apparently, by the fact that in our experiments, the balls to be rolled were processed by conventional lathe turning. Thus the deviation from the spherical form was 0.2–0.25 mm. The deviation from the spherical form of a workpiece after rolling was ~ 0.03 mm. The deformation of the surface layer ~ 0.2 mm thick substantially exceeded the deformation of the underlying layer.

The developed method for calculating the stress-strain state can predict with reasonable accuracy the parameters of strain hardening in spherical blanks after rolling by flat surfaces at the depth exceeding the deviation from sphericity of the original piece.

The technology of the rolling of spherical workpieces by flat surfaces is promising for obtaining fine and nanocrystal structure in the surface layer.

Keywords: pure titanium, endo-articular hip, rolling, depth of deformation, increase of surface layer hardness

Fig. 1. The scheme of rolling of a spherical workpiece by flat surfaces

Fig. 2. The structure of the surface layer of the spherical workpiece of VT1-0 after the rolling by flat surfaces (*a*) and micro-hardness distribution in the superficial layer of the sphere: \circ – obtained by PMT-3 with four-sided pyramid; \blacklozenge – obtained by «Micron-gamma» device using Berkovich pyramid

Fig. 3. The scheme of the plastic region

Fig. 4. Accumulated deformation increment Δe_i at the fixed depth of the layer *h*

Fig. 5. Deformation Δe_i at the end of plastic region: *a* – isolines, δ – width change at varied depth *h*, mm: 1 – 0, 2 – 0.2, 3 – 0.4, 4 – 0.6, 5 – 0.8, 6 – 1.0

Fig. 6. Distribution of hardness in the surface layer of a ball of VT1-0 after rolling: \bullet – 50 g, \blacksquare – 200 g, \blacktriangle – theoretical values