

На правах рукописи



КАРИХ Дмитрий Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СФЕРИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ
ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА
НАКАТЫВАНИЕМ ПЛОСКИМИ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки
давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Цеханов Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», директор инновационного
бизнес-инкубатора
Хван Александр Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»
доцент кафедры «Технологии обработки
давлением»
Кривошеин Виталий Александрович

Ведущая организация: Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля" (г. Воронеж)

Защита состоится «25» марта 2016 г. в 12.00 на заседании объединенного диссертационного совета при ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет», ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» Д 999.039.03 по адресу: г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет»: <http://gu-unpk.ru/defence>.

Автореферат разослан «5» февраля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Василенко
Юрий Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день повышенный интерес представляют отделочные операции поверхностного пластического деформирования, позволяющие получать необходимые свойства в ответственных местах будущей детали, не внося изменения в структуру и свойства оставшейся части заготовки. Такой подход предоставляет дополнительные возможности по созданию оптимальных, с точки зрения качества и долговечности, изделий.

При создании эндопротеза тазобедренного сустава, определяющим его работоспособность, является пара трения – «сферическая головка / ацетабулярная чашка». С учетом того, что рабочей средой протеза является тело человека, то к работе этого узла предъявляются повышенные требования, такие как биосовместимость и износостойкость.

Технически чистый титан марки ВТ1-0 является очень перспективным материалом для производства деталей медицинского назначения. Однако основными недостатками этого материала являются низкие механические и триботехнические характеристики. Поэтому его применение для изготовления сферической головки шарнира эндопротеза требует модификации свойств рабочей поверхности.

Для титановых сплавов медицинского назначения широко применяются методы создания интенсивных пластических деформаций для получения мелкодисперсной структуры, приводящие к повышению эксплуатационных характеристик материала.

Разработка технологии получения субмикроструктурной структуры методом поверхностного пластического деформирования сферической заготовки позволит применять ВТ1-0 для изготовления головок шарнирного сочленения, что приведет к созданию эндопротеза тазобедренного сустава человека, отвечающего современным требованиям и доступного потенциальным потребителям.

Объект исследования: поверхностный слой заготовки сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Предмет исследования: деформированное состояние поверхностного слоя заготовки сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека при его формировании накатыванием плоскими инструментальными поверхностями.

Целью работы является повышение стойкости сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека путем разработки технологии ее поверхностного пластического деформирования накатыванием плоскими инструментальными поверхностями с созданием

субмикроструктурной структуры поверхностного слоя для активизации последующего процесса азотирования.

В процессе выполнения работы поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать методику конечно-элементного моделирования процесса обработки на базе программного комплекса DEFORM-3D обеспечивающую определение деформированного состояния поверхностного слоя заготовки в зоне ее контакта с плоскими инструментальными поверхностями при накатывании.

2. Определить влияние технологических параметров обработки на деформированное состояние поверхностного слоя заготовки и разработать методику расчета накопленных деформаций при заданных технологических параметрах накатывания.

3. Создать лабораторную установку для опытного накатывания заготовок сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека плоскими инструментальными поверхностями и исследовать структурное состояние поверхностного слоя материала сферической заготовки после накатывания.

4. Внедрить операцию накатывания плоскими инструментальными поверхностями в технологический процесс изготовления сферической головки шарнира эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Автор защищает методику конечно-элементного моделирования процесса накатывания сферических заготовок плоским инструментом на базе программного комплекса DEFORM-3D; результаты теоретических исследований механики деформирования поверхностного слоя заготовки; полученные зависимости между деформированным состоянием, твердостью, глубиной упрочненного слоя, структурой материала и технологическими параметрами процесса накатывания.

Научная новизна.

1. Разработана методика моделирования технологического процесса деформирования поверхностного слоя сферической заготовки при накатывании плоскими инструментальными поверхностями с применением метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D, позволяющая рассчитывать деформации при одноцикловой и многоцикловой обработке с учетом стохастичности процесса.

2. Установлены закономерности влияния технологических параметров обработки на деформированное состояние поверхностного слоя при накатывании плоскими инструментальными поверхностями, позволяющие рассчитывать суммарные накопленные пластические

деформации, обеспечивающие требуемую микроструктуру поверхности заготовки.

3. Выявлено влияние геометрических и кинематических параметров накатывания плоскими инструментальными поверхностями на необходимое количество циклов обработки материальной точки поверхности сферической заготовки, что обеспечивает равномерную по поверхности величину требуемых накопленных пластических деформаций.

Практическая значимость результатов работы состоит в:

1. Разработке технологии поверхностного пластического деформирования плоскими инструментальными поверхностями деталей сферической формы, позволяющем получать субмикроструктурную структуру в поверхностном слое детали с размером зерна $10 \div 50$ мкм.

2. Разработанной методике определения технологических параметров процесса накатывания деталей сферической формы плоскими инструментальными поверхностями, обеспечивающей требуемое качество обработки по глубине, степени упрочнения и размеру зерна структуры поверхностного слоя заготовки.

3. Применении разработанной операции накатывания в опытном технологическом процессе изготовления сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека из биосовместимого технически чистого титана марки BT1-0, принятом к внедрению в Воронежском акционерном самолетостроительном обществе (ВАСО, г. Воронеж).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Работа соответствует формуле специальности 05.02.09, так как в ней формулируются закономерности пластического деформирования технически чистого титана марки BT1-0 с целью создания технологии изготовления изделия - эндопротеза тазобедренного сустава человека, повышенной стойкости. Исследования, представленные в работе, находятся в области исследований (п. 1, п. 2) специальности 05.02.09, в соответствии с ее паспортом.

Методы исследований. Теоретические исследования выполнены на основе теории упрочняющегося пластического тела. Моделирование обработки производилось методом конечных элементов на базе программного комплекса DEFORM-3D. При выполнении работы использовались современные поверенные измерительные средства, оригинальные установки. Опытные данные обрабатывались методами статистического анализа.

Достоверность результатов исследований обеспечена обоснованным использованием теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью постановки задач, применением известных

математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов расчетов с экспериментальными данными.

Реализация работы. Работа принята к внедрению в ОАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (ВАСО, г. Воронеж).

Апробация работы.

Результаты исследований доложены на шестой конференции молодых ученых и специалистов «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» (г. Киев, 2012), на II Республиканской научно-технической конференции молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (г. Гомель, 2012), на XII Всеукраинской молодежной научно-технической конференции «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (г. Киев, 2012), на IV Международной научно-технической конференции «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (г. Киев, 2013), на международной научно-технической конференции «Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» (г. Ростов-на-Дону, 2013), на VII конференции молодых ученых и специалистов «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» (г. Киев, 2013), на XVI Международной конференции «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения» (п. Морское, АР Крым, 2013), на Международной научно-технической конференции «Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» (п. Дивноморское, Россия, 2013), а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава кафедры строительной механики ВГАСУ (г. Воронеж, 2012-2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них - 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов по научной специальности 05.02.09.

Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках договора о международном научно-техническом сотрудничестве между Воронежским государственным архитектурно-строительным университетом и Институтом сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников литературы из 74 наименований, 2-х приложений, изложена на 165 страницах, содержит 91 рисунок и одну таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены цель и задачи исследований, приведены методы исследований, выделены научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе дан сравнительный анализ известных технологий поверхностной пластической обработки деталей сферической формы. Приведенные примеры подчеркивают интерес к проблеме увеличения износостойкости пар трения, основанных на сферическом шарнирном соединении.

С учетом специфики изделия и использующихся для его изготовления материалов изучались уже существующие технологические схемы процессов получения субмикроструктурных структур в образцах из титана и его сплавов.

На основании малой изученности процесса дается обоснование необходимости исследования технологической операции накатывания плоскими инструментальными поверхностями сферических заготовок из технически чистого титана марки ВТ1-0. Применение этого материала позволит изготавливать биосовместимый, износостойкий и дешевый отечественный аналог уже существующих эндопротезов тазобедренного сустава человека. В связи с этим в диссертационной работе поставлена актуальная научно-техническая задача.

Во второй главе предложен способ модификации поверхностного слоя сферической заготовки путем накатывания ее плоскими инструментальными поверхностями и приведены методики его исследования.

Решить проблему использования технически чистого титана в парах трения предлагается применением технологии накатывания сферических заготовок плоскими инструментальными поверхностями. Принципиальная схема накатывания (рис. 1) заключается в размещении предварительно отточенной сферической заготовки 1 в цилиндрической камере 2. Сверху подводится плоский диск инструмента 3, закрепленный в шпинделе вертикально-сверлильного станка с эксцентриситетом E между его осью вращения и центром камеры.

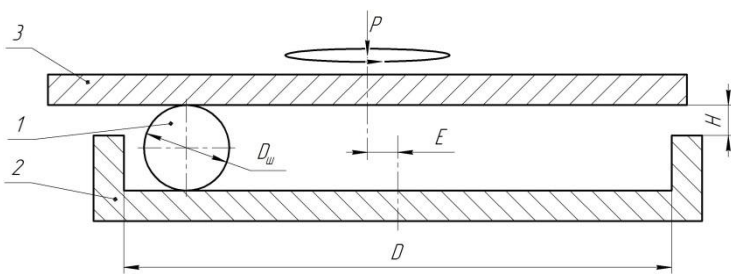


Рис. 1. Схема обработки полной сферы накатыванием.

Вращение верхнего инструмента с выбранной скоростью обеспечивает перемещение заготовки в камере, а деформирование поверхности сферы обеспечивается за счет создания вертикальной подачи станка технологического усилия P . Равномерность обработки поверхности достигается за счет постоянного смещения следа деформационного упрочнения на протяжении всего процесса накатывания.

Столкнувшись с малой степенью изученности процесса накатывания сферических тел плоскими инструментальными поверхностями анализ деформированного состояния заготовки производился методом конечных элементов на базе программного комплекса DEFORM-3D. Для обеспечения сходимости решения и точности получаемых данных были сформулированы основные этапы подготовки моделирования. Для повышения точности расчетов кривые течения сплавов уточнялись экспериментально.

Экспериментальные исследования процесса накатывания производились на созданной лабораторной установке. В ходе исследований изучались изменения структуры и микротвердости в поверхностном слое заготовки, а также кинематические параметры ее перемещения в камере.

В результате триботехнических испытаний азотированных образцов из ВТ1-0 в паре с хируленом (сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)) в сравнении с широко применяемой в настоящее время в эндопротезировании тазобедренного сустава парой трения «CoCrMo/СВМПЭ» отмечено снижение коэффициента трения на 25%, а износа – на 60%. После испытаний образцы из азотированного ВТ1-0 не имели признаков износа.

В третьей главе описывается исследование процесса деформирования поверхностного слоя при накатывании методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D.

Реализация исходной схемы обработки при пробных расчетах выявила высокие требования к количеству машинного времени. Это привело к разработке упрощенной схемы деформирования для изучения

влияния усилия прижима на деформированное состояние поверхности заготовки.

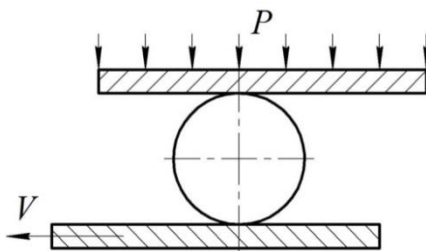


Рис. 2. Схема накатывания по прямолинейной траектории.

Накатывание по прямолинейной траектории (рис. 2) заключается в создании технологического усилия верхним инструментом и предания выбранной скорости качения нижним. Данная схема позволила использовать окна плотности при разбиении тела заготовки на конечные элементы, что позволило более детально изучить напряженно-деформированное состояние заготовки в зоне контакта с инструментом.

Для исследования закономерностей упрочнения материалов по предложенной схеме был проведен ряд расчетов с варьированием технологического усилия для различных материалов. Материал заготовки – идеально пластичный; скорость перемещения инструмента – 2,5 м/с; коэффициент трения – 0,5; диаметр заготовки – 28 мм.

Результаты расчетов показали, что вблизи поверхности максимальные значения накопленных деформации при различных усилиях практически пропорциональны соответствующему усилию прижима P . Принятый коэффициент пропорциональности β для ВТ1-0 равен 0,053 кН-1, для ВТ1-2 – 0,069 кН-1, а для ВТ6 – 0,047 кН-1.

На основании этой закономерности предполагается технологическая инженерная формула для расчета максимальной накопленной деформации на поверхности заготовки при N циклах деформирования:

$$\sum e_i = \sum_{j=1}^M \beta N_j P_j, \quad (1)$$

где N_j - число циклов деформирования с силой прижима P_j .

Процесс перемещения заготовки является наиболее важным с точки зрения равномерности обработки ее поверхности. Для более детального изучения кинематических параметров обработки был смоделирован стохастический процесс накатывания сферы из ВТ1-0 по исходной модели с усилием прижима равным 3 кН и скорость вращения инструмента 351 об/мин. Материал заготовки – идеально пластичный; диаметр заготовки –

28 мм; внутренний диаметр камеры – 180 мм; эксцентриситет – 8 мм; коэффициент трения – 0,5; коэффициент теплопередачи – 18,8 Вт/(м·К).

Данные, полученные в ходе моделирования, свидетельствуют о ступенчатом характере накопления деформаций в отдельно взятой точке поверхности (рис. 3). Установлены основные кинематические особенности процесса накатывания.

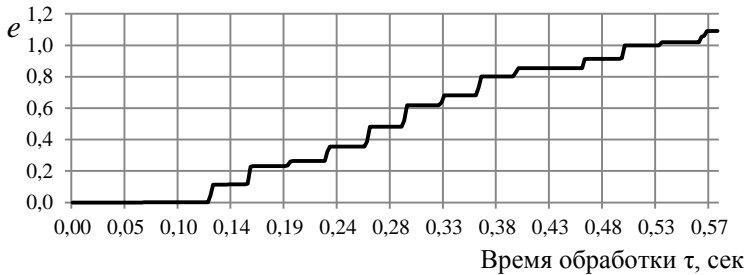


Рис. 3. График приращения накопленных деформаций точкой поверхности.

В четвертой главе, на основе данных моделирования стохастического процесса, была предложена методика расчета накопленных деформаций поверхностью заготовки. Она основывается на предположении, что с каждым новым взаимодействием с инструментом значение накопленной деформации участка поверхности увеличивается каждый раз на равную величину Δe_{icp} . Количество таких взаимодействий m позволяет получить значение суммарных накопленных деформаций:

$$\sum e_i = m \cdot \Delta e_{icp}, \quad (2)$$

где $\sum e_i$ - величина накопленных деформаций в конце обработки, Δe_{icp} - величина среднестатистической деформации за один цикл обработки, m - количество циклов обработки.

Примем следующие допущения:

- 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.

Предположим, что экспериментально или теоретически получено распределение деформаций $\Delta e_i(x, h)$ в поверхностном слое заготовки. Для наглядности представим ее для каждой фиксированной глубины слоя h в виде графика $\Delta e_i(x)$, рис. 4.

Тогда среднеинтегральная величина пластической деформации для заданной глубины h в диапазоне $-x = \frac{t_{nl}}{2} \leq x \leq +x = \frac{t_{nl}}{2}$:

$$\Delta e_{icp}(h) = \frac{S_{ei}}{t_{nl}}, \quad (3)$$

где S_{ei} – площадь под кривой, t_{nl} – ширина пластической области.

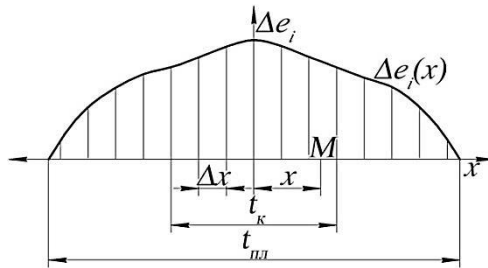


Рис. 4. График изменения приращения накопленной деформации Δe_i для заданной глубины слоя h .

Значение среднеинтегральных деформаций Δe_{icp} для одного цикла обработки сферы были получены с помощью моделирования накатывания по прямолинейной траектории в программном комплексе DEFORM-3D (рис. 5) и обработки данных о деформированном состоянии поверхностного слоя (рис. 6).

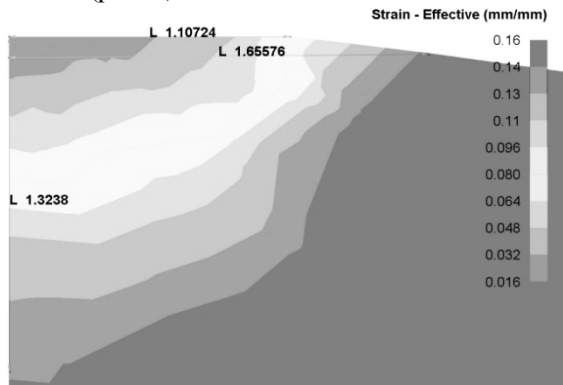


Рис. 5. Распределение деформаций в поверхностном слое, полученное в DEFORM-3D .

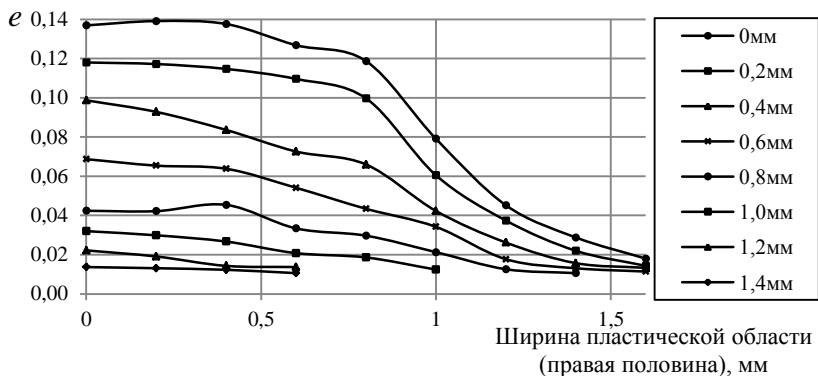


Рис. 6. Распределение накопленных деформаций за один цикл.

Для определения среднеинтегральных деформаций Δe_{icp} для заданной глубины слоя достаточно знать численное значение площади. Для данного примера они приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значение площади S_{ei} и среднеинтегральных деформаций Δe_{icp} .

$h, \text{ мм}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
S_{ei}	0,3011	0,2509	0,1821	0,1327	0,0866	0,0498	0,0233	0,0171
Δe_{icp}	0,0941	0,0784	0,0569	0,0415	0,0271	0,0156	0,0073	0,0054

Анализ ступенчатого характера накопления деформаций поверхностью заготовки (рис. 3) при моделировании исходной схемы процесса обработки показал линейную зависимость значения накопленной деформации от количества циклов обработки (рис. 7). Значение $\Delta e_{icp}=0,0904$ для стохастического процесса и отличается от ранее полученного значения на 4%. Подобное расхождение свидетельствует о правотности предложенного параметра Δe_{icp} .

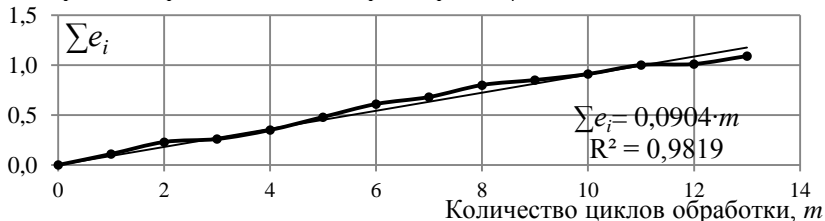


Рис. 7. Приращения деформаций с ростом числа циклов обработки.

Определить параметр m для конкретной точки в ходе эксперимента не представляется возможным из-за стохастического характера процесса ее упрочнения. С другой стороны, если учесть равномерность обработки поверхности, можно предположить, что отношение площади следа от

инструмента на поверхности заготовки к площади ее поверхности и будет требуемым значением. След на заготовке и инструменте по длине одинаков, а сама заготовка большую часть времени в процессе обработки движется по окружности радиуса

$$R_{\text{сл}} = R_{\text{к}} - r_{\text{ш}} - E, \quad (4)$$

где $R_{\text{сл}}$ – радиус траектории перемещения заготовки, $R_{\text{к}}$ – радиус инструментальной камеры, $r_{\text{ш}}$ – радиус заготовки, E – эксцентриситет.

Учитывая скорость вращения инструмента и время обработки, получена формула для определения среднестатистического количества циклов обработки m :

$$m = \frac{n\tau(R_{\text{к}} - r_{\text{ш}} - E)t_{\text{пл}}}{120 \cdot r_{\text{ш}}^2}, \quad (5)$$

где $t_{\text{пл}}$ – ширина пластического следа, мм; n – скорость вращения инструмента, об/мин; τ – время обкатки, сек.

В таком случае, для определения накопленных деформаций поверхностью за весь цикл обработки можно воспользоваться конечной формулой, подставив (3) и (5) в (2),:

$$\sum e_i = \frac{n\tau(R_{\text{к}} - r_{\text{ш}} - E)S_{ei}}{120 \cdot r_{\text{ш}}^2}. \quad (6)$$

Цикличность обработки практически не влияет на глубину упрочненной поверхности. Поэтому для уточнения параметров, влияющих на глубину деформирования, рассмотрим шар из пластичного материала, сдавленный плоскостью инструмента (рис. 8).

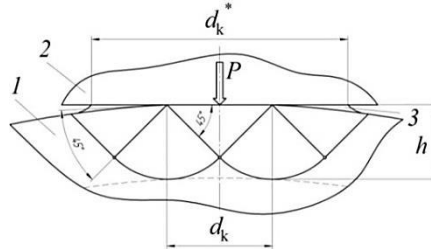


Рис. 8. Схема контакта инструмента и сферической заготовки.

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

$$P = q_{\text{к}} \cdot F_{\text{к}}, \quad (7)$$

где P – технологическое усилие сдавливания, $q_{\text{к}}$ – контактное давление, $F_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4}$ – площадь контакта без учета наплыва,

$d_k = h \cdot \sqrt{2}$ – диаметр пятна контакта без учета наплыва, h – глубина слоя деформационного упрочнения.

Как известно из задачи Прандтля: $q_k \approx 3\sigma_T$, где σ_T - предел текучести материала обрабатываемого изделия, если материал не упрочненный. Но, как показывают эксперименты, в сильно упрочненном поверхностном слое предельное контактное давление может достигать значений $q_k^* \approx 2q_k \approx 6\sigma_T$.

Учитывая все зависимости получим

$$P = 4,71 \cdot \sigma_T d_k^2. \quad (8)$$

Формула (8) связывает технологическое усилие с механическими свойствами материала шара и с диаметром пятна контакта.

В реальности имеет место наплыв (рис. 4), который увеличивает площадь контакта инструмента с обрабатываемым изделием. 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, с учетом наплыва, формула (8) примет окончательный вид:

$$P = 11,4 \cdot \sigma_T h^2 \quad (13)$$

Глубина слоя деформационного упрочнения, полученная при помощи (13) хорошо согласуется с результатами экспериментов и компьютерного моделирования (рис. 9).

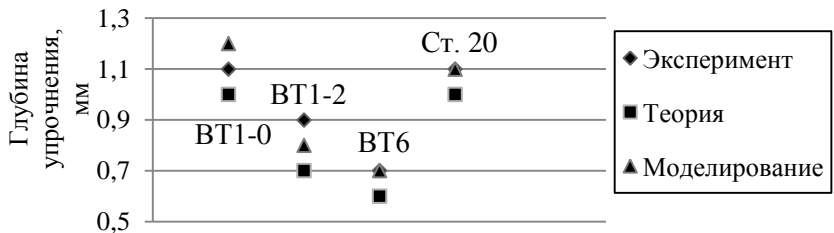


Рис. 9. Глубина упрочненного слоя при усилии прижима 3 кН, полученная для различных материалов.

Приведенные микрофотографии свидетельствуют о высокой степени деформации металла в поверхностном слое после накатывания. Сердцевина детали характеризуется наличием зерен размером 500-100 мкм, а на расстоянии 2 мм от поверхности находится переходная зона, затронутая деформацией. У поверхности же материал характеризуется мелкозернистой структурой (размер зерен 10-50 мкм) с заметной текстурой деформации (рис. 10, а). Подтверждением высокой степени деформации металла в поверхностном слое может также служить его микроструктура, полученная после рекристаллизационного отжига (рис. 10, б).

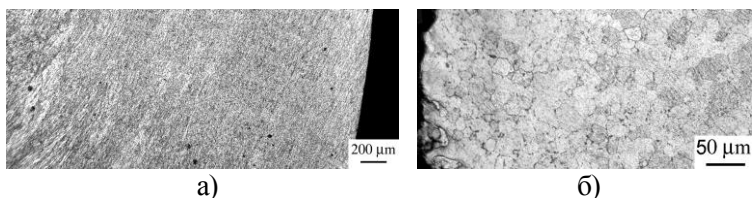


Рис. 10. а) Микроструктура участка, непосредственно прилегающего к поверхности заготовки после накатывания; б) микроструктура деформированного поверхностного слоя заготовки после рекристаллизационного отжига.

На рис. 11 приведено сравнение распределения микротвердости в поверхностном слое, полученное теоретически и экспериментально (усилие на инденторе 0,5 и 2 Н). На самой поверхности значения заметно разнятся. Такой эффект возникает за счет динамических нагрузок при обработке. Циклическое образование наплыва и последующее сдавливание неровностей поверхности, им вызванных, в ходе обработки также увеличивает значение деформаций в самом тонком поверхностном слое. Впоследствии он удаляется финишной операцией полирования. Начиная с глубины 0,2мм, расчетные и экспериментальные данные имеют незначительные различия, что говорит о возможности применения предложенной методики расчета.

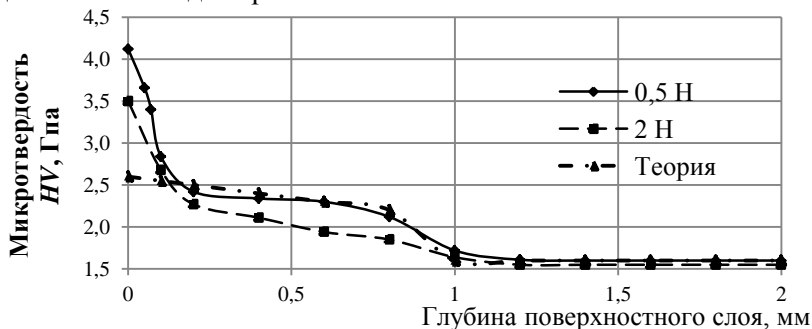


Рис. 11. Распределения твердости в поверхностном слое.

В пятой главе описывается технологический процесс изготовления сферической головки шарнира эндопротеза тазобедренного сустава человека из титанового сплава ВТ1-0.

Заготовка сферической головки получается точением из предварительно отожженного титанового прутка марки ВТ1-0, с полученными значением шероховатости Ra 3,2 мкм и отклонением от сферичности в 0,15 мм.

При последующем накатывании заготовки создается мелкозернистая структура материала с зернами размером 15-20 мкм,

величина которых возрастает по мере удаления от поверхности и в недеформированном слое составляет 100-500 мкм. После накатывания были получены значение шероховатости Ra 0,6 – 0,8 мкм, а отклонение от формы не превышало 0,05 мм.

Дальнейшая обработка заготовки направлена на снижение шероховатости поверхности и повышения геометрической точности конечной детали. Она заключается в поэтапной алмазной обработке со снижением зернистости инструмента по схеме свободной притирки. Значения шероховатости поверхности заготовки после притирки составило Ra 0,25 мкм.

Последующее полирование поверхности позволяет получать шероховатость обработанной поверхности Ra 0,04 мкм, а отклонение формы – 0,01 мм, что соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 7206-2-2005.

После достижения требуемой геометрической точности производилась термохимическая обработка поверхности сферической головки. Для создания износостойкой поверхности применялась технология термодиффузионного азотирования.

Испытания пары трения «азотированный ВТ1-0/хирулен», проведенные на машине торцового трения в плазме крови при условиях и режимах согласно ASTM F732-82, показали, что данная пара по служебным характеристикам (коэффициент трения в паре - 0,075; удельная интенсивность износа - $4,1 \times 10^{-3}$ мм²/км) превосходит широко применяемую в настоящее время пару «CoCrMo/хирулен» (коэффициент трения в паре - 0,1; удельная интенсивность износа - $10,94 \times 10^{-3}$ мм²/км). При испытаниях в паре трения «неазотированный ВТ1-0/хирулен» наблюдалось практически мгновенное схватывание титана с хируленом.

В процессе испытаний даже при прохождении пути трения 120 км никакого износа образца из азотированного титанового сплава ВТ1-0 выявлено не было.

Разработанная технология изготовления головок шарнирного сочленения из ВТ1-0 позволяет получить отечественный аналог эндопротеза тазобедренного сустава человека, доступного потенциальным потребителям и отвечающего современным требованиям биосовместимости и износостойкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработана технология кратного повышения стойкости поверхностного слоя сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека из технического титана ВТ1-0 на основе накатывания ее

плоскими инструментальными поверхностями с созданием субмикроструктурной структуры с размером зерна $10\div 50$ мкм с последующим азотированием.

Основные выводы

1. Разработана методика конечно-элементного моделирования процесса накатывания в программном комплексе DEFORM-3D по исходной и упрощенной схемам, позволившая определить деформированное состояние поверхностного слоя заготовки в зоне контакта с инструментом и установить взаимосвязь геометрических и кинематических параметров обработки.

2. Установлена взаимосвязь геометрических (R_k , $r_{ш}$, E) и кинематических (n , τ) параметров процесса накатывания плоскими инструментальными поверхностями, позволяющая обеспечивать равномерное распределение накопленных деформаций по поверхности заготовки.

3. Разработана методика расчета накопленных материальной точкой поверхности заготовки деформаций, учитывающая заданные технологические параметры процесса накатывания. Методика подтверждена экспериментально и при помощи компьютерного моделирования. Сходимость полученных результатов составляет до 5%.

4. В результате опытного применения операции накатывания плоскими инструментальными поверхностями на созданной лабораторной установке получена мелкозернистая глобулярная структура поверхностного слоя заготовки с заметной текстурой деформации, характеризующаяся зернами размером $10\div 50$ мкм, приводящая к интенсификации последующего процесса азотирования поверхности.

5. На базе Воронежского акционерного самолетостроительного общества (ВАСО) разработана опытная технология изготовления сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека из азотированного титана ВТ1-0, износостойкость которой в паре трения с хируленом в 2,5 раза превышает широко применяемую в настоящее время пару трения «СоСгМо/хирулен».

Себестоимость эндопротеза тазобедренного сустава, изготовленного в производственных условиях ВАСО, при годовой программе в 10 тысяч штук составит 35 тысяч рублей в ценах 2015 года.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Цеханов, Ю.А. Упрочнение накатыванием шаровой опоры из чистого титана эндопротеза тазобедренного сустава человека [Текст] / Ю.А. Цеханов,

С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №4(100). – С. 21-23. (0,4/0,1 п.л.)

2. Цеханов Ю.А. Моделирование деформационного упрочнения при накатывании сферической заготовки методом конечных элементов [Текст] / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, – №3. – С.11-14. (0,5/0,4 п.л.)

Статьи и материалы конференций

3. Цеханов, Ю.А. Поверхностное пластическое деформирование сферической заготовки шаровой опоры при упрочняющем накатывании / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура.–2012. –№ 2. С. 55–61. (0,8/0,4 п.л.)

4. Цеханов, Ю.А. Повышение долговечности эндопротезов тазобедренного сустава человека применением биологически инертных материалов с модифицированным слоем / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. –2011. – №1. –С. 28–29.(0,2/0,1 п.л.)

5. Карих, Д.В. Обработка сферической заготовки из чистого титана поверхностным пластическим деформированием / Д.В. Карих // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Межвузовый сборник научных трудов. ВГУ, Воронеж. –2012. –№9. –С. 61–64. (0,2/0,2 п.л.)

6. Сергач, Д.А. Закономерности упрочнения поверхностного слоя сферических изделий из титана холодным поверхностным пластическим деформированием (ХППД) / Д.А. Сергач, Д.В. Карих // 36. Тез до шостої конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» – Київ, 29-31 травня 2012. –С. 27–28.(0,2/0,1 п.л.)

7. Карих Д.В. О состоянии поверхностного слоя сферических изделий из титана после обработки холодным поверхностным пластическим деформированием (ХППД) // Д.В. Карих, Д.А. Сергач // Сб. Тез. II Республ. науч.-техн. конф. молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» – г. Гомель, Белоруссия, 2-4 октября 2012. –С. 113–115.(0,3/0,1п.л.)

8. Сергач, Д.А. Формирование слоя деформационного упрочнения при накатывании сферических заготовок плоскими поверхностями / Д.А. Сергач, Д.В. Карих // 36. Тез XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» присвяченої пам'яті П.Р. Родіна – м. Київ, 22-25 жовтня 2012. –С. 99–100.(0,2/0,1 п.л.)

9. Цеханов, Ю.О. Накочування сферичних виробів з титанових сплавів плоскими поверхнями // Ю.О. Цеханов, С.Є Шейкін, Д.В. Каріх, Д.А. Сергач // 36.

Тез IV Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» – м. Київ, 14-17 травня 2013.

10. Цеханов, Ю.А. Закономерности распределения микротвердости в поверхностном слое полносферических деталей после накатывания / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач // Сб. научных трудов международной научно-технической конференции «Научоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» – г. Ростов-на-Дону, 9 – 12 октября 2013 г., –С. 107–112.(0,6/0,2 п.л.)

11. Сергач, Д.А. Обробка сферичних виробів з титанових сплавів холодним поверхневим пластичним деформуванням / Д.А. Сергач, Д.В. Карих // Зб. Тез до VII конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» – Київ, 27–31 травня 2013. С. 98–100.(0,3/0,1 п.л.)

12. Yuriy A. Tsekhanov, Rules of creating of the double layered structure (bedding) in deformation strengthening layer in the process of titanium alloys spherical products machining // Dmytro A. Sergach, Yuriy A. Tsekhanov, Sergij Y. Sheykin, Dmitriy V. Karih // On-line journal «Nano and Advanced Materials Workshop and Fair», European Materials Research Society Fall meeting – Warsaw, Poland, 16-20 september, 2013. –P. 21.

13. Цеханов, Ю.А. Закономерности распределения микротвердости в поверхностном слое полносферических деталей после накатывания / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач // Международная научно-техническая конференция «Научоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» 1-4 октября 2013 год, п. Дивноморское, Россия.

14. Цеханов, Ю.А. Накатывание сферических изделий из титановых сплавов плоскими поверхностями/ Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4 (37), –С. 137–142.(0,7/0,1 п.л.)

15. Цеханов, Ю.А. Упрочнение поверхностного слоя полносферических деталей при накатывании плоским инструментом / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач // Физика и техника высоких давлений. – 2013. –Т. 23, № 4. –С. 120-127. (0,9/0,3 п.л.)

Объем 1,1 усл. п. л. Формат 60x84 1/16. Тираж 130 экз.

Подписано в печать 01.02.2016. Заказ №374/35

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ПГУ 302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29.