

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
профессор Цеханов Ю.А.

Воронеж 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	2
Введение.....	4
Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследования	11
1.1. Поверхностное пластическое деформирование – как способ упрочняющей отделочной обработки поверхности	11
1.2. Методы измельчения микроструктуры титана и титановых сплавов	19
1.4. Выводы и задачи исследования	27
Глава 2. Методики исследования	29
2.1. Метод обработки сферических заготовок плоскими инструментальными поверхностями.....	29
2.2. Методика теоретического исследования накатывания методом конечных элементов	32
2.3. Методика испытаний на сжатие	38
2.4. Методика металлографических исследований	42
2.5. Методика определения траектории качения сферы в инструменте	45
2.6. Методика исследования контактного трения.....	49
2.7. Выводы.....	53
Глава 3. Компьютерное моделирование процесса обработки средствами метода конечных элементов.....	54
3.1. Основные этапы создания конечно-элементной модели в DEFORM-3D.....	57
3.2. Пробные расчеты.....	66
3.3. Моделирование накатывания сферы по прямолинейной траектории	69
3.4. Моделирование исходной схемы накатывания сферической заготовки..	78
3.5. Выводы	89

Глава 4. Закономерности накопления деформаций поверхностным слоем при накатывании.....	90
4.1. Определение значений накопленных деформаций материальной точкой поверхности заготовки.	91
4.2. Влияние конструкции технологической оснастки и кинематических параметров обработки на количество циклов деформирования материальной точки.	101
4.3 Влияние усилия прижима заготовки на глубину поверхности, затронутой деформированием.	105
4.4. Результаты экспериментального накатывания	108
4.5. Выводы	116
Глава 5. Результаты практического внедрения.....	117
5.1. Технологические рекомендации для операции накатывания.....	117
5.2. Технология изготовления головки эндопротеза тазобедренного сустава человека.....	119
Основные результаты и выводы	126
Список использованных источников	128
Приложения	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. На сегодняшний день повышенный интерес представляют способы обработки заготовок, 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 и ацетабулярная чашка. С учетом того, что сферический шарнир используется в теле человека, то к работе этого узла предъявляются повышенные требования, такие как биосовместимость [1] (материал шарнира не должен негативно взаимодействовать с тканями организма или отторгаться ими), износостойкость (имплантированный протез не должен загрязнять ткани вокруг шарнира продуктами износа сопряженных частей, поверхность сферы не должна растрескиваться) [2], долговечность (шарнирное сопряжение должно выдерживать большое число циклов работы до момента его замены). Отдельную проблему представляет высокая стоимость самого имплантата и операции по его протезированию, а также продолжительность процесса реабилитации после оперативного вмешательства.

В настоящее время в медицине применяют протезы тазобедренного сустава, в которых сферическая головка выполнена из металла, либо керамики [3]. Применение керамики решает многие проблемы с износостойкостью, однако механические свойства материала не исключают хрупкого разрушения поверхности сферы в результате динамических нагрузок либо термической нестабильности, что было зарегистрировано при применении некоторых видов керамики. Кроме того, протез с керамическими частями дороже в сравнении с цельнометаллическими, поэтому широкое применение в этой области получили сплавы на основе титана. Так, одними

из самых распространённых являются сплав ВТ6 (зарубежный аналог - сплав Ti-6Al-4V) и комохром (на основе Co-Cr-Mo) [4], [5].

С учетом требований биосовместимости, более подходящим является чистый титан [6], [7]. Его высокая пластичность исключает его хрупкое разрушение и растрескивание поверхности, что исключает попадание продуктов износа за пределы пары трения и снижает вероятность повторной операции [8]. Как показала практика эндопротезирования, титановый имплантат по своим эксплуатационным свойствам сходен с костной тканью человека, снижая тем самым дискомфорт от его последующего использования. Однако основными недостатками этого материала являются низкие механические и триботехнические характеристики. 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 свойств [9].

Добиться от материала более высоких показателей прочности, твердости, износостойчивости или достаточно высокой пластичности можно, сформировав мелкодисперсную структуру в рабочей области детали или во всем ее объеме [10]. Методы, позволяющие создавать мелкодисперсные, а довольно часто и наноструктуры, в металлах и сплавах основаны на применении интенсивной пластической деформации (ИПД). Образование таких структур в этом случае является сложным многостадийным процессом, обусловленным поэтапной перестройкой дислокационной структуры.

Реализация технологии накатывания сферических заготовок из технически чистого титана марки ВТ1-0 плоскими инструментальными поверхностями требует разработки модели пластического деформирования в зоне контакта инструмента с заготовкой и изучения влияния технологических параметров обработки на качество поверхностного слоя.

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 ВТ1-0, 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 ВТ1-0 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 совместно с отделом №20 «Перспективных ресурсосберегающих технологий механической обработки» института сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины по Договору о международном научно-техническом сотрудничестве между Воронежским государственным архитектурно-строительным университетом и институтом сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины. В исследованиях принимал участие младший научный сотрудник Сергач Д.А.

Автор выражает благодарность заведующему отделом №20 «Перспективных ресурсосберегающих технологий механической обработки» института сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины Шейкину С.Е. за оказанную помощь в проведении исследований.

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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Поверхностное пластическое деформирование – как способ упрочняющей отделочной обработки поверхности

Добиться от материала более высоких показателей прочности, твердости, износоустойчивости или достаточно высокой пластичности можно, сформировав мелкодисперсную структуру в рабочей области детали или во всем ее объеме. Методы, позволяющие создавать мелкодисперсные, а довольно часто и наноструктуры, в металлах и сплавах основаны на применении интенсивной пластической деформации (ИПД). Образование таких структур в этом случае является сложным многостадийным процессом, обусловленным поэтапной перестройкой дислокационной структуры [11].

К тому же, с учетом того, что в большинстве случаев разрушение деталей начинается с поверхности (изнашивание, усталость, контактное разрушение), целесообразней разрабатывать процессы обработки, затрагивающие только поверхностный слой, который составляет доли процента от всей массы детали. 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, такие как Surface mechanical attrition (SMA), Surface mechanical attrition treatment (SMAT), Friction roll surface processing (FRSP) [12].

Например, в [13] описана технология получения структурных элементов от 10 до 100 нм в приповерхностном слое детали вибрационной обработкой металлическими шарами. При этом зафиксировано увеличение твердости в 2-3 раза.

В [14] показано, что при высокоскоростном трении армко-железа в атмосфере аммиака образуется нанокристаллический слой с зернами 3-5

мкм, глубиной 200 мкм и твердостью 13 Гпа при твердости материала основы 4 Гпа.

Приведенные методы обработки позволяют добиваться повышения твердости поверхности поверхностного слоя в 2-3 раза и измельчения структуры материала, однако немало важным фактором является правильная геометрия сферы. Большие отклонения от сферичности в сопряжении сферическая головка – ацетабулярная чашка создадут повышенное контактное трение, чреватое срезанием микронеровностей и ранним выходом из строя протеза. С учетом этого обстоятельства, оптимальным было бы применение такого метода обработки, в котором сочетались бы поверхностное упрочнение и формирование сферической поверхности высокой точности [15].

Аналогом головки протеза, соединенной с его ножкой, можно считать шаровый палец, применение которого широко распространено в автомобильной и в смежных отраслях промышленности. Для упрочнения и отделки поверхностного слоя предложена технология обкатывания неполной сферы беспараторным инструментом [16]. Схема самого процесса обкатывания приведена на рис. 1.1. Вначале обрабатываемой заготовке придается вращение вокруг собственной оси. Затем подводится обкатник, имеющий сжимающее усилие по направлению центру сферической части обрабатываемой заготовки и вращающийся относительно собственной оси с большей скоростью, чем обрабатываемая заготовки. В ходе обработки обкатник расположен на поворотном столе так, что вертикальная ось поворота проходит через центр обрабатываемой неполной сферы. В таком случае возвратно-вращательное движение позволяет обрабатывать всю требуемую поверхность.

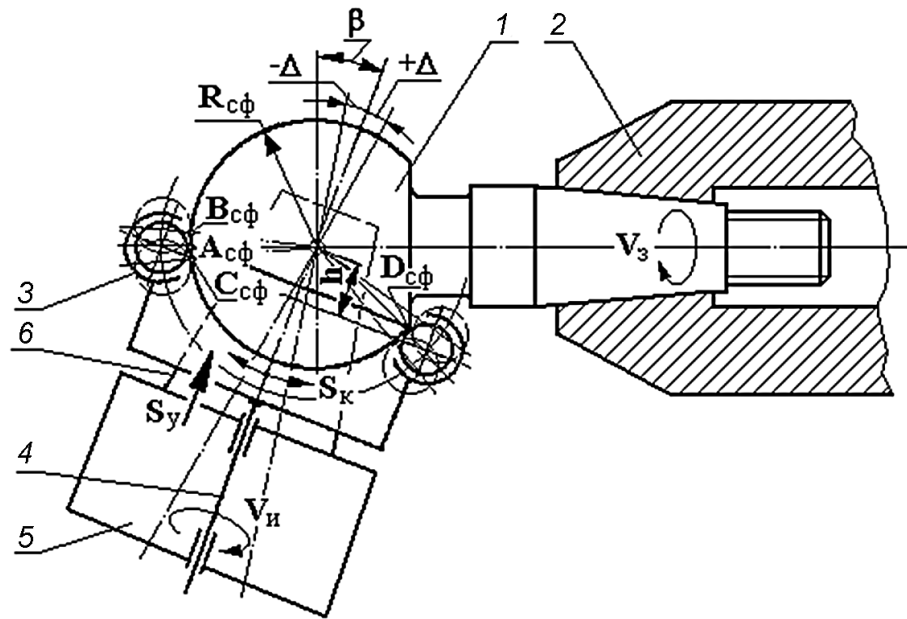


Рис. 1.1. Схема обкатки бессепараторным инструментом.

Данная технология позволяет добиться повышения качества обработки поверхности, в сравнении с методами, применяющими инструменты сепараторного типа. В экспериментах со сталью 40X зафиксировано увеличение твердости поверхностного слоя в 1,3-1,5 раза, а отклонение от сферичности составило всего 5 мкм, что позволяет говорить о высоком качестве получаемого изделия.

Однако одним из недостатков методов отделки сферической поверхности деформирующими телами в виде шариков является невысокая производительность процесса. Кроме того, применение этого метода для различных размеров обрабатываемой заготовки требует создания технологической оснастки (пример которой приведен на рис. 1.2.) под каждый требуемый диаметр сферы.

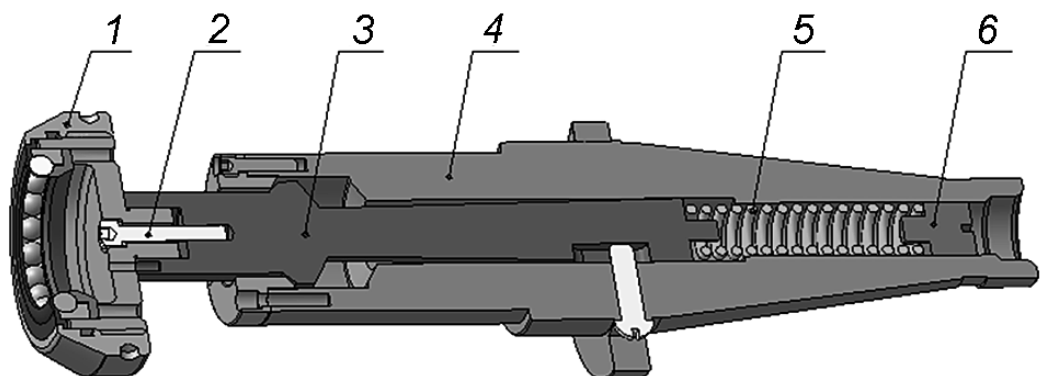


Рис.1.2. Инструмент, для обкатывания (1- обкатник, 2- винт, 3 – шток, 4 – корпус, 5- пружина, 6 – регулировочный винт).

Более производительный способ обработки деталей сферической формы описан в [17]. Он основывается на создании в радиальном направлении сжимающих напряжений, а в перпендикулярном – растягивающих. Такая обработка позволяет создавать перемещающееся поле разнонаправленных напряжений во всем объеме шарика.

На рис. 1.3 приведена схема обработки заготовок:

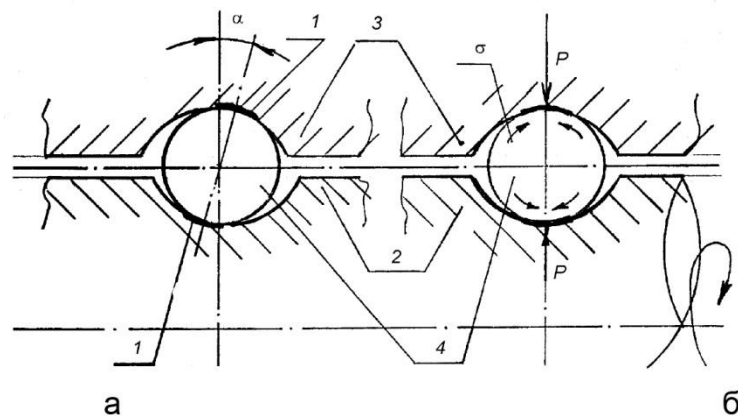


Рис. 1.3. Схема обкатки шариков: а – изменение гравюры обкатного инструмента; б – схема обкатки шарика: 1 – площадка контакта шарика и инструмента, 2 – вращающаяся часть инструмента, 3 – неподвижная часть инструмента, 4 – шарик.

В инструменте выполнена винтовая канавка с несколько большим радиусом, чем сам шарик. При сближении частей инструмента высота образованной канавками полости становится меньше размера обрабатываемой заготовки, что приводит к ее сжатию по одной оси и растяжению, по перпендикулярной ей оси в плоскости приложения усилия. Кроме того, шарик имеет вращение, двигаясь по полости канавки. Оно попеременно изменяет площадку контакта заготовки и инструмента, позволяя добиваться равномерности обработки.

Рассматриваемая схема позволяет изменять степень сжатия обрабатываемого изделия. В данном случае подбор оптимальной величины

расстояния между частями инструмента является главным технологическим параметром процесса обкатки.

Результатом такой обработки являются шарики с более равномерной и однородной микроструктурой, прочность которых в среднем в 1,27 раза выше в сравнении с не обработанными образцами. На рис. 1.4. приведены начальная микроструктура обрабатываемой заготовки и микроструктура, ставшая результатом обкатывания заготовки.

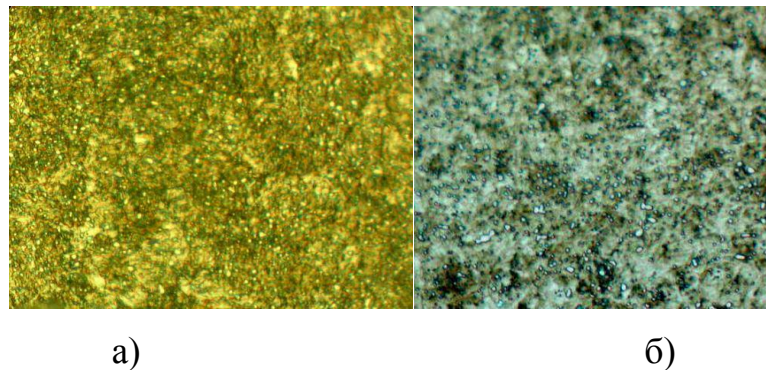


Рис. 1.4. Структура шарика диаметром 3/8 дюйма, увеличенная в 1500 раз:

а) - исходного, б) - обработанного

Приведенная технология уменьшает разброс значений твердости материала шарика. Это особенно важно с точки зрения требований износостойкости, предъявляемых к шарикоподшипникам.

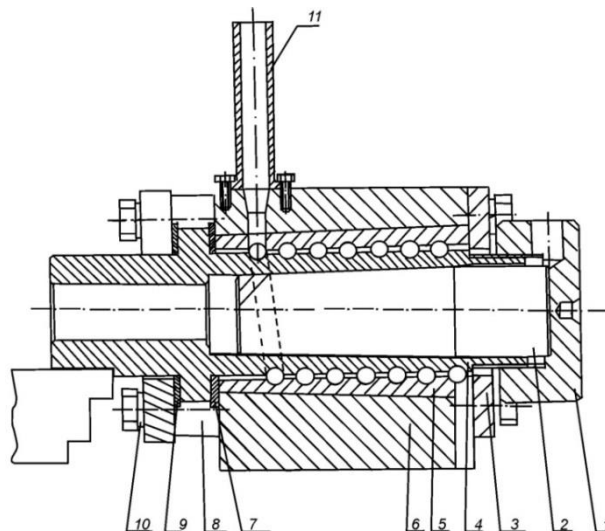


Рис. 1.5. Инструмент для обкатки сферических заготовок (1- гайка прижимная, 2 – оправка, 3- крышка, 4 – шнек, 5 – вставка, 6 – корпус, 7 – шайба, 8 – втулка, 9 – шайба, 10 – крышка, 11 – накопитель шариков).

К недостаткам подобного способа обработки (рис. 1.5.) можно отнести необходимость создания оснастки под определенный размер изделия. Основной упор авторы идеи делают на измельчение и выравнивание структуры стали во всем объеме заготовки, поэтому применение предложенной схемы для шариков подшипников больших размеров дополнительно к оснастке требует наличия оборудования, способного создавать большое усилие сжатия.

Особого внимания требует рассмотрение метода вибрационной обработки более известное как Surface mechanical attrition treatment (SMAT). Он основывается на ударном деформировании плоского образца сферической дробью, хаотично перемещающейся в инструментальной камере под действием сильной вибрации. Из-за высокой частоты вибрации происходит соударение шариков между собой и поверхностями инструментов, что подвергает обрабатываемый образец высокому числу ударов за короткий промежуток времени (рис. 1.6.). Это приводит к упрочнению его поверхности и изменению микроструктуры в сторону равномерного ее измельчения, позволяя достигать дробления зерен до размеров в 50 нм.

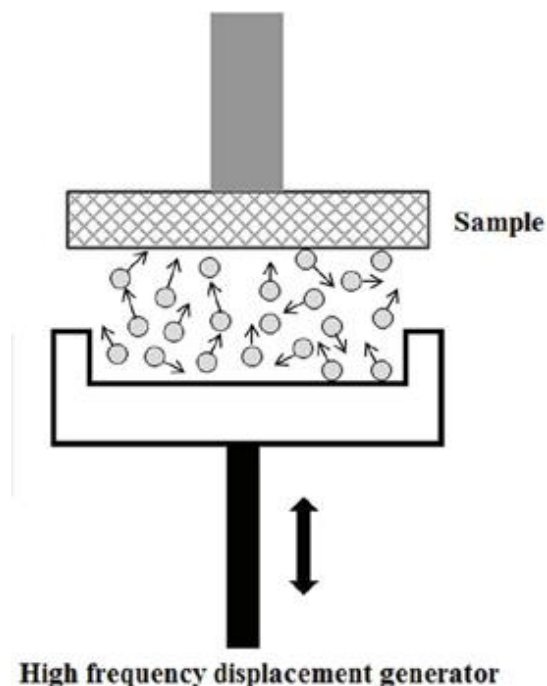


Рис. 1.6. Схема вибрационной обработки методом SMAT

В статье [18] приведены результаты обработки технически чистого титана методом SMAT. Обработка производилась на открытом воздухе при различных технологических режимах. В ходе описанных в работе [18] экспериментов были опробованы различные режимы обработки, наглядно продемонстрировавшие различия измельчения зерен, как у поверхности, так и по всей глубине затронутого упрочнением слоя.

Такая технология по своим результатам позволяет модифицировать поверхностный слой обрабатываемой заготовки, позволяя достигнуть требуемых для протеза из титана физических свойств поверхности и микроструктурных изменений (рис 1.7.). Однако, стоит отметить, что вибрационная обработка в данном случае приводила к деформированию поверхности жестко закрепленного образца, а не сферической дроби. Кроме того, длительность обработки, которая позволяла добиваться требуемых результатов составляла от шестнадцати минут до часа.

Возможная модернизация описанной схемы деформирования, направленная на деформацию дроби, причем более крупной, чем в оригинальном исследовании может потребовать более сложного оборудования. К тому же, достижение требуемого упрочнения поверхности может занять большое количество времени.

В таком случае технологический процесс финишной обработки заготовки будет серьезно затянут, что в целом скажется на всей технологической цепочке изготовления протеза.

Приведенные выше методы обработки заготовок позволяют добиваться требуемых параметров упрочнения и создавать определенную структуру материала с необходимой эффективностью процесса [19]. Для каждого метода была создана технологическая оснастка, которая позволила реализовать принципиальные схемы обработки как технологическую операцию.

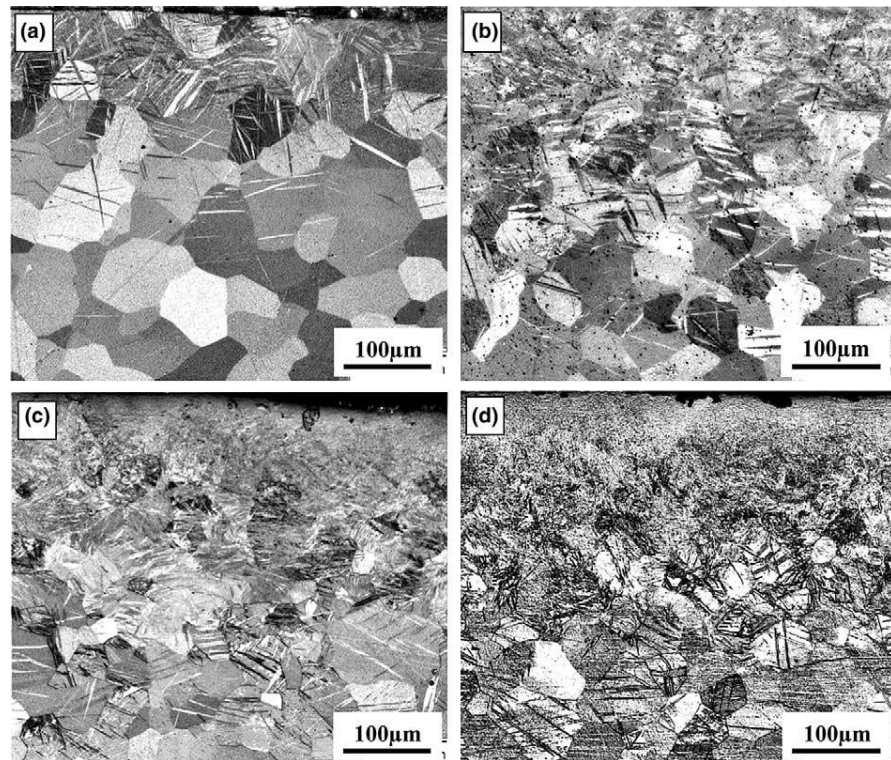


Рис. 1.7. Микроструктура после SMAT

- (1 – амплитуда 50%, время обработки – 10 мин,
 2 – амплитуда 100%, время обработки – 16 мин,
 3 – амплитуда 100%, время обработки – 30 мин,
 4 – амплитуда 100%, время обработки – 60 мин).

Однако ни один из этих методов не позволяет реализовать обработку сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава, объединяющего все требования к самому процессу обработки и его результатам – обработка полной сферы; создание упрочненного слоя с мелкодисперсной микроструктурой, благоприятной для последующего азотирования; применение биосовместимых материалов заготовки, таких как технологически чистый титан; использование универсальной технологической оснастки.

1.2. Методы измельчения микроструктуры титана и титановых сплавов

Описанные выше технологии относятся к методам обработки сферических поверхностей, большинство из которых применяется для обработки сталей. В свою очередь создание узлов, работающих в полости человеческого тела, требует кроме повышенной износостойкости еще и биосовместимости [20].

Применение легирующих элементов в сплавах, использующихся для протезирования, негативно сказывается на совместимости с биологическими тканями, хотя и позволяет получить требуемые технические характеристики прочности и износостойкости. Если приводить примеры из применения имплантатов тазобедренного сустава человека, то основными причинами повторной операции по замене были физический износ пары трения ацетабулярная чашка – сферическая головка сферического шарнира протеза и загрязнение прилегающих к протезу тканей продуктами износа [21]. Причем если в первом случае ухудшается работа протеза, вызывающая дискомфорт, то во втором случае ситуация осложняется отторжением тканей и отравлением их продуктами износа. По статистике каждая пятая операция по протезированию тазобедренного сустава выполняется с целью замены изношенного протеза.

В таком случае применение технически чистого титана было бы полностью оправдано, так как он наиболее совместим с тканями организма из числа применяемых материалов. Однако его механические свойства не позволяют его использовать в протезировании без предварительной упрочняющей обработки [22], [23].

Одним из перспективных методов получения мелкодисперсной структуры обрабатываемого материала является винтовая экструзия (ВЭ). Ее суть заключается в выдавливании через канал матрицы, имеющий в середине участок винтовой формы (рис. 1.8) [24].

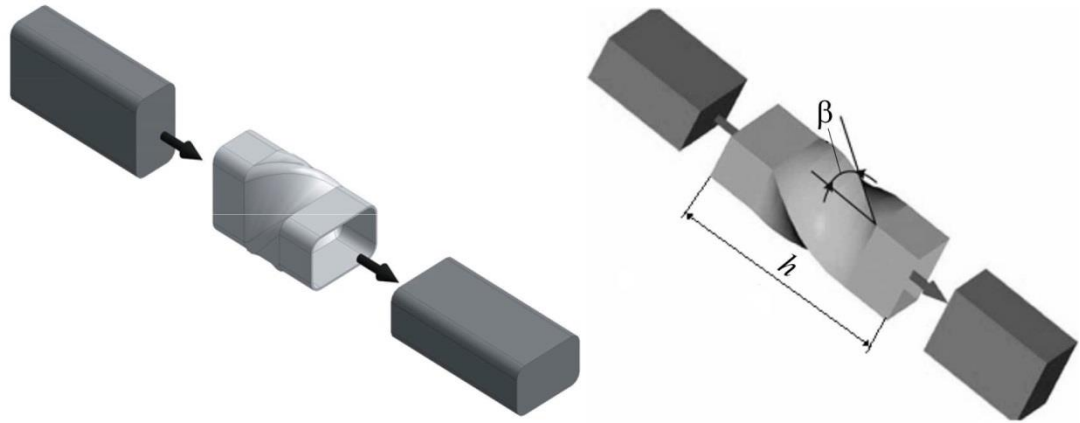


Рис. 1.8. Винтовая экструзия: а) Схема деформирования б) Основные параметры обработки

Результаты экспериментов, опубликованные в [25] позволяют говорить об успешности применения данного метода. Так, исходным материалом заготовки была цилиндрическая заготовка сплава титана ВТ1-0 с гексагональной плотноупакованной решеткой после горячей прокатки. Матрица, применяемая в эксперименте, содержала в себе винтовой участок с параметрами $\beta_{max}=60^\circ$, $h=50$ мм. Причем угол наклона винтовой линии к оси прессования изменяется по высоте матрицы, однако на начальном и конечном участках он одинаков и равен нулю.

Опытно-промышленная оснастка (рис. 1.9.) смонтирована и была использована на прессе с усилием 250 тонн. Обработка приводилась при температуре нагрева контейнера и матрицы до 623 К и давлении винтовой экструзии 220 Мпа. Скорость деформирования образца составляла 3 мм/с, а скорость деформации $0,2-1 \text{ с}^{-1}$.

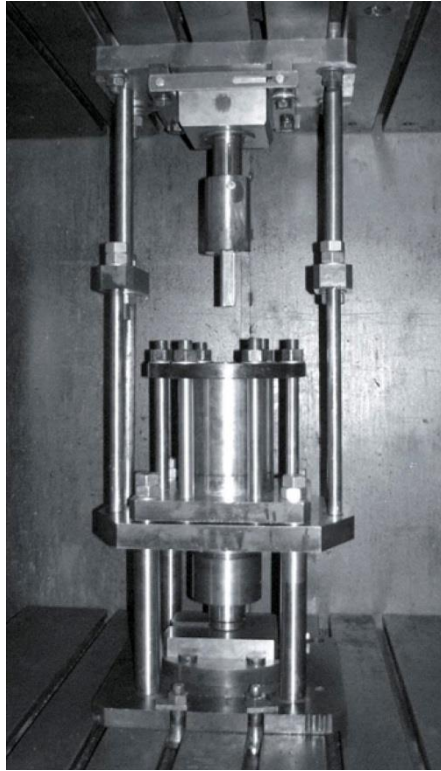


Рис. 1.9. Опытно-промышленная оснастка для винтовой экструзии.

Фотография установки в сборе.

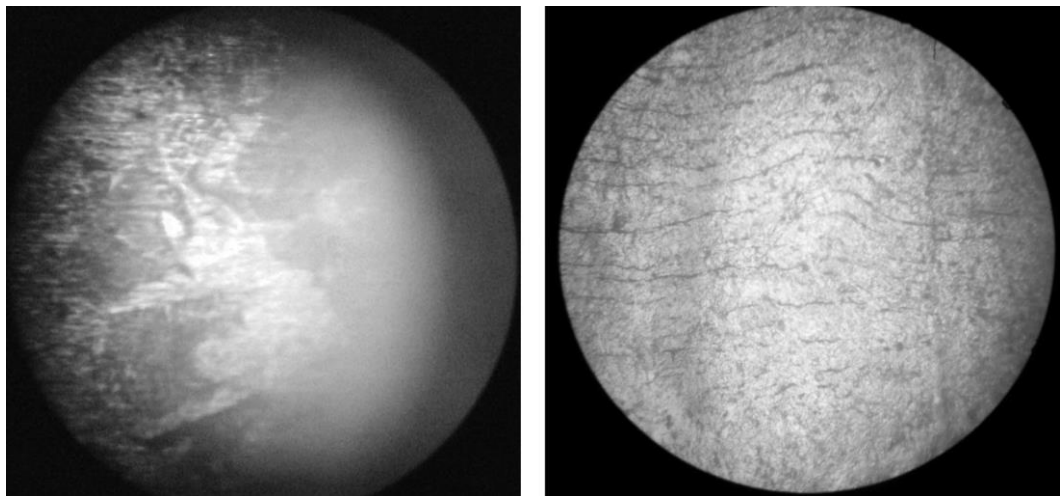


Рис. 1.10. Структура VT1-0 в исходном состоянии (а) и после 4 проходов винтовой экструзии (б).

Результатом эксперимента стала значительно измельченная структура титана [26], которая до обработки характеризовалась зернами размером 1-2 мм. После обработки величина зерна стала близка к 100 нм, видны вихреобразные следы деформации на рис. 1.10. Таким образом, при помощи

ВЭ удастся получать субмикроструктурную структуру с целью повышения прочностных характеристик изначально пластичного материала.

Основным ограничением для применения такой обработки является габаритные размеры заготовки, так как обработка крупных прутков требует высоких давлений выдавливания через винтовую часть матрицы и многократного повторения операции ВЭ с целью достижения требуемых свойств материала.

Другим схожим с ВЭ по результатам методом обработки является равноканальное угловое прессование (РКУП) [27]. Его первоначальный вариант представлен на рисунке 1.11.

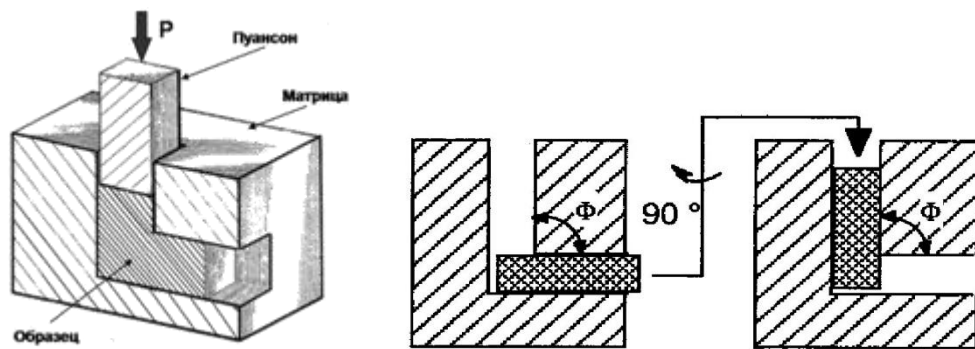


Рис. 1.11. Равноканальное угловое прессование:

а) Принципиальная схема

б) Маршрут деформирования заготовки

Процесс деформирования во многом зависит от исходного состояния материала заготовки, и управляющие параметры процесса выбираются с их учетом. К примеру, для деформирования сплава ВТ1-0 используется схема с углом Φ равным 90° . Интервал температур подбирается в диапазоне $250\text{--}450^\circ\text{C}$, а заготовка перед деформацией подвергается отжигу. Результатом такой обработки становится измельчение исходной микроструктуры материала до субмикроструктурной [28].

Кроме оригинальной идеи деформирования методом РКУП получили развитие вариации этой идеи – РКУП с противодавлением (рис. 1.12.), позволяющее получать заготовки без образования трещин. Таким образом,

использование противодействия позволяет повысить механические свойства получаемых образцов, однако ограничивает их размеры.

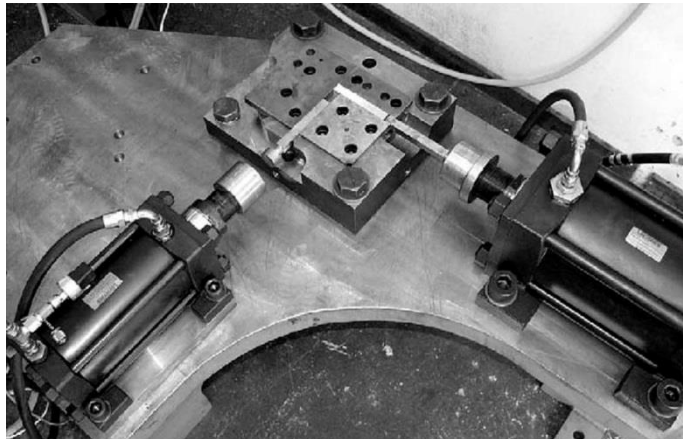


Рис. 1.12. Установка для РКУП с противодействием

Другой вариацией является технология РКУП-Conform [29]. В отличие от предыдущих методов он лишен, пожалуй, главного недостатка – производительности, так как с его применение дает возможность получать прутки обработанного материала длиной до 2 метров. Такой результат достигается за счет модернизации схемы деформирования вводом ротора для подачи материала к зоне основного деформирования, заключенной между ротором, прижимом и упором (рис. 1.13.).

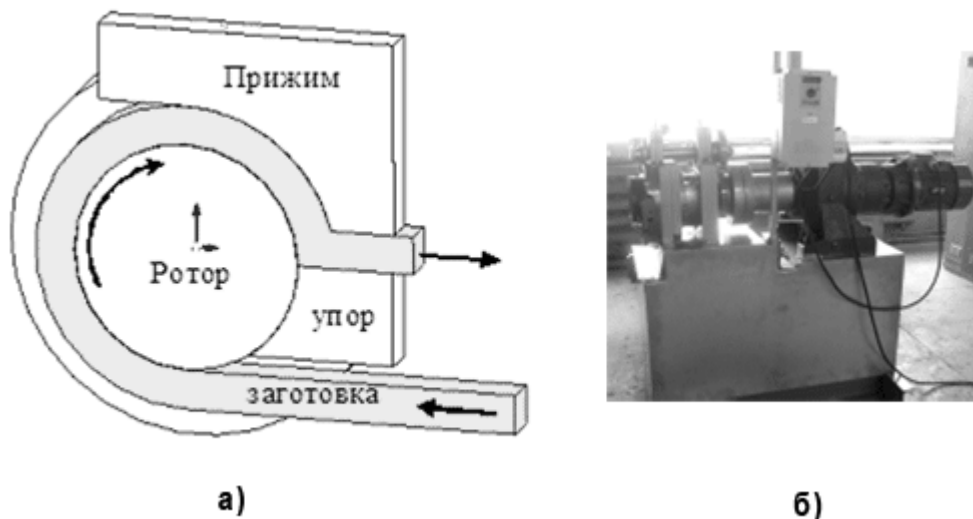


Рис. 1.13. РКУП-Conform :
 а) Схема деформирования
 б) Экспериментальная установка

Как и большинство РКУП методов, достижение заданных структурных изменений в материале происходит не за один проход [30]. На рис. 1.14. показаны результаты, достигаемые в процессе обработки:

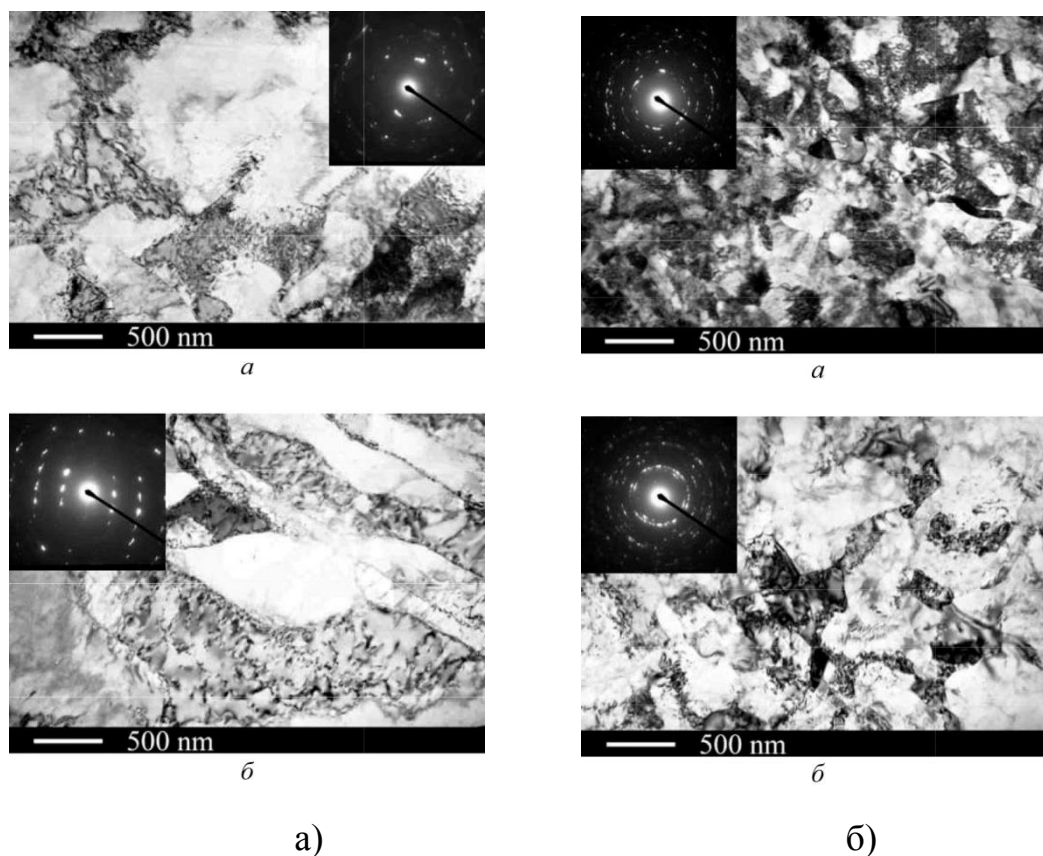


Рис. 1.14. ПЭМ снимки микроструктуры после:

а) одного прохода б) четырех проходов.

Схожих результатов позволяет добиться метод криопротатки [31] и метод многократного одноосного прессования (abc-прессование) в сочетании с многоходовой прокаткой [32]. Получение мелкозернистой структуры происходит в два этапа. Начальный этап заключался в прессовании заготовки на гидравлическом прессе со скоростью 10^{-3} - 10^{-1} с⁻¹. Одной из особенностей процесса является ступенчатое уменьшение температуры заготовки в ходе обработки в интервале от 500 до 400 °С. Каждая смена температурного режима соответствовала трехкратному прессованию со сменой оси деформирования, причем при каждой заданной температуре образец осаживался на 40-50 %. Вторым этапом обработки производилась прокатка в ручьевых или гладких валках при комнатной температуре, позволяющая

поднимать степень деформации исходного образца до 75% и позволяет получить прутки обработанного материала размерами 6х6х500 мм. Готовые заготовки после деформирования подвергаются отжигу в атмосфере аргона при температуре от 300 до 350 °С для снятия внутренних напряжений и увеличения пластичности.

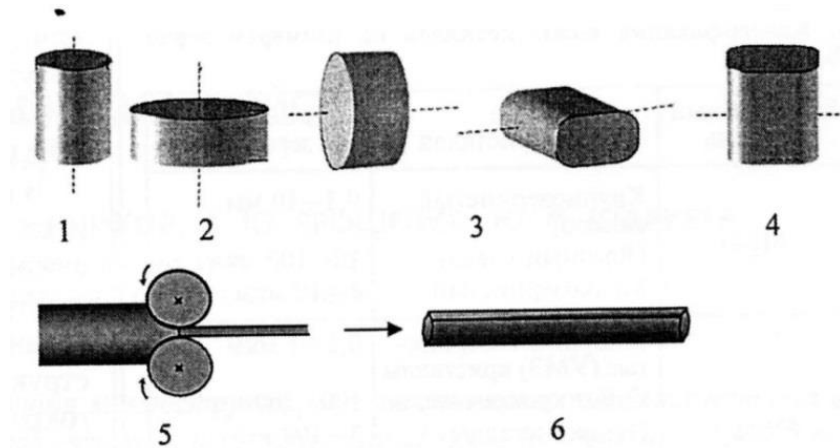


Рис. 1.15. Этапы деформирования VT1-0 методом abc-прессования с последующей прокаткой

Как видно на рисунке 1.15, измельчение микроструктуры достигается за счет многократной смены оси деформирования заготовки. На рис. 1.16 в одном случае представлена микроструктура крупнозернистого титана VT1-0 перед прессованием, в другом – полученную после abc-прессования с использованием пресс-формы сильно раздробленную структуру с зернами размером менее 0,1 мкм. На последнем снимке приведено изображение микроструктуры титана в ультра мелкозернистом состоянии, сформированного при применении свободного abc-прессования без пресс-формы с последующей прокаткой. Средний размер зерен составил 0,2 мкм [33].

Однако кроме метода получения мелкозернистой структуры, исследована ее термическая стабильность, а так же зависимость механических свойств титана в субмикроструктурном состоянии от температуры отжига [34]. В ходе исследования было обнаружено, что после отжига при температуре 350 °С наблюдаются признаки процесса

рекристаллизации. Дальнейшее увеличение температуры отжига до 400 °С приводит к исчезновению областей скопления зерен, размером менее 0,1 мкм. Повышение температуры отжига свыше 400 °С приводит к процессу собирательной рекристаллизации и снижению механических характеристик образцов.

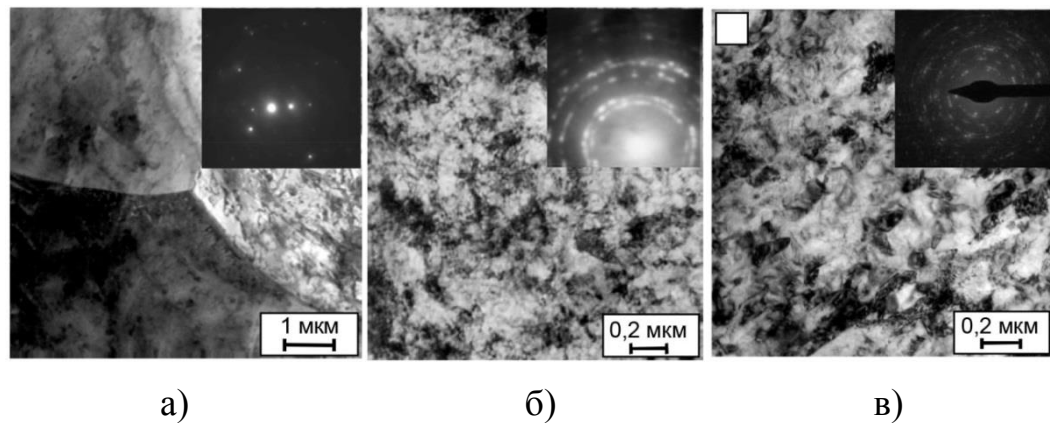


Рис. 1.16. Светлопольные электронно-микроскопические изображения:
а) исходной структуры VT1-0; б) наноструктурированного титана; в)
ультра мелкозернистого титана

Описанные способы упрочняющей обработки сферических поверхностей и технологии создания субмикроструктур [35] в образцах из технического чистого металла позволяют добиваться требуемых для протеза параметров износостойкости и точности геометрии шарнира, а так же биосовместимости [36]. Однако эти методы обработки и технологии получения СМК структур решают лишь отдельные проблемы создания протеза. Таким образом, проблема изготовления сферической головки из технического чистого титана, пригодной для длительного использования в полости тела продолжает быть актуальной. Решением поставленной задачи может быть метод упрочняющего накатывания инструментальными поверхностями сферических заготовок из технического чистого титана марки VT1-0.

1.4. Выводы и задачи исследования

Модификация сферической поверхности методами поверхностного пластического деформирования для каждой конкретной технологической задачи часто не позволяет создать один универсальный метод обработки. В каждом случае приходится оптимально подбирать как кинематическую схему, так и технологические параметры процесса обработки, наиболее точно подходящие для применения к требуемому материалу заготовки.

В большинстве случаев для обработки сферической поверхности не применяются инструменты, поверхность соприкосновения которой с поверхностью заготовки является плоской. Этот момент кардинально отличает приведенные сходные технологические процессы с предложенным в патенте [37] методом накатывания плоскими инструментальными поверхностями к дальнейшему исследованию. Факт этого отличия не позволяет в полной мере применить созданную ранее теоретическую и экспериментальную базу. Однако результаты пробных экспериментов говорят о перспективности применения предложенного метода обработки, в ходе которых было выявлено увеличение твердости поверхности в два раза по сравнению с необработанной заготовкой.

Исходя из всего вышеперечисленного, процесс накатывания плоскими инструментальными поверхностями имеет большой практический интерес для повышения износостойкости сферической головки шаровой опоры протеза тазобедренного сустава человека. Однако для его успешного применения требуется создания теоретических основ процесса накопления пластических деформаций, изучения влияния применяемой кинематической схемы и технологических параметров на качество поверхностного слоя.

С учетом изложенного, в диссертационной работе поставлены для решения следующие актуальные 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.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Метод обработки сферических заготовок плоскими инструментальными поверхностями

Износостойкость большинства сопрягаемых деталей в узлах механизмов в основном зависит от свойств поверхностного слоя материала детали. В большинстве случаев достаточно повысить механические свойства сопрягаемых поверхностей трущихся деталей для обеспечения продолжительной работы узла. Исходя из таких соображений, в настоящее время активно развиваются методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностного слоя заготовок.

Одним из, хорошо зарекомендовавших себя, направлений является поверхностное пластическое деформирование. Подробное описание наиболее интересных технологических схем и методов обработки сферических поверхностей приводилось в предыдущей части этой главы. Основной особенностью описанных выше идей реализации ППД является достаточно сложная технологическая оснастка. Большинство схем не подразумевают использования универсального инструмента для обработки заготовок различного размера.

Протезирование тазобедренного сустава является очень дорогостоящим. Если учитывать только технические стороны создания эндопротеза, то достижение приемлемой износостойкости осуществляется за счет применения керамических головок протеза или изготовленных из высокопрочных титановых сплавов. Однако истирание поверхности сферической головки шарнира никак не зависит от прочностных свойств внутренней части головки, т.е. применение высокопрочных и дорогостоящих материалов оптимально только на поверхности. Другой стороной вопроса следует отметить среду работы самого шарнира – полость тела человека. В этом случае, кроме износостойкости протеза возникает вопрос биосовместимости материалов, из которых изготовлен протез. Известны

случаи отторжения (найти подтверждение) протезов. Кроме того, выходящий из строя шарнир загрязняет ткани тела продуктами износа, которые кроме проблем с передвижением могут вызывать аллергические реакции и даже отравления [21].

Таким образом, основным направлением для создания экономически выгодного и доступного протеза тазобедренного сустава следует рассматривать известный и хорошо зарекомендовавший себя в протезировании материал – технически чистый титан. Однако его механические свойства в исходном состоянии не удовлетворяют требованиям износостойкости. Предложенный Цехановым Ю.А. и Шейкиным С.Е. метод обработки сферических заготовок поверхностным пластическим деформированием [37] может быть применен для устранения этого недостатка.

Заготовка (1) размещается в инструментальной камере (2) на удалении от ее боковой стенки (рис. 2.1). Внутренний диаметр камеры D составляет 180 мм. Сверху подводится прижим (3) в виде плоского диска, закрепленного в шпинделе вертикально-сверлильного станка. Ось вращения прижима и ось цилиндрической стенки камеры имеют эксцентриситет E равный 8 мм. Диаметр прижима должен обеспечивать постоянный контакт с заготовкой в зависимости от выбранного эксцентриситета и диаметра камеры. Зазор между камерой и прижимом H составляет одну треть от диаметра заготовки $D_{ш}$.

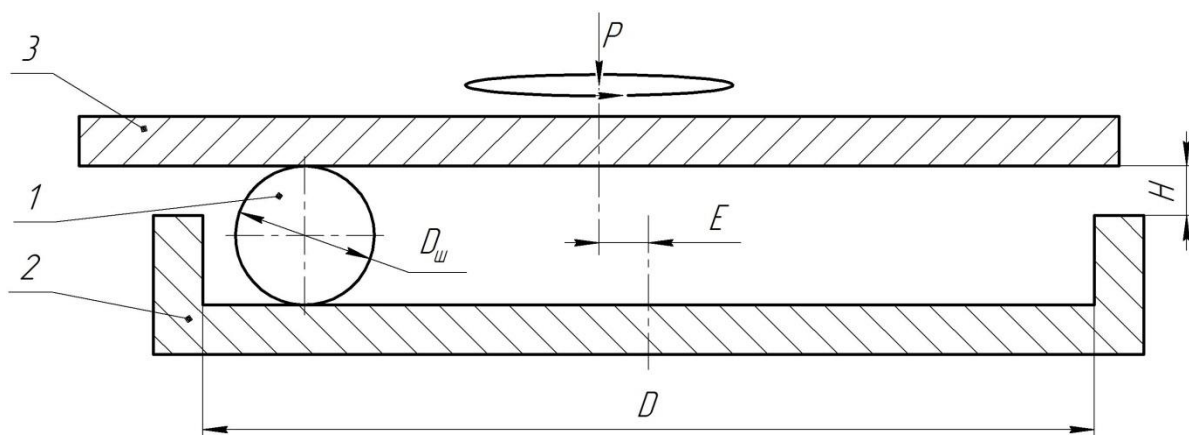


Рис. 2.1. Схема процесса накатывания

Вращение прижима со скоростью 351 об/мин обеспечивает перемещение заготовки в камере, а деформирование поверхности сферы обеспечивается за счет создания вертикальной подачи станка усилия P . Равномерность обработки поверхности достигается за счет постоянного смещения следа деформационного упрочнения на протяжении всего процесса накатывания.

В результате обработки заготовки должен создаваться требуемый по глубине слой деформационного упрочнения с необходимыми параметрами твердости у его поверхности. Пластическая деформация поверхностного слоя приводит к измельчению структурных элементов обрабатываемого материала до субмикроструктурного состояния. Подобная модификация структуры поверхностного слоя благоприятно влияет на дальнейшее азотирование поверхности заготовки.

2.2. Методика теоретического исследования накатывания методом конечных элементов

Инженерный анализ процессов методом конечных элементов в настоящее время получает широкое развитие. Применение результатов компьютерного моделирования позволяет сократить затраты на проведение натуральных экспериментов. С каждым годом разработчики программного обеспечения, реализующего моделирование методом конечных элементов, повышают качество своих продуктов и расширяют их возможности. Это приводит к тому, что качество исследований, дополненных компьютерным моделированием, только растет.

Столкнувшись с малой степенью изученности процесса накатывания сферической заготовки плоскими поверхностями, анализ деформированного состояния заготовки производился методом конечных элементов на базе программного комплекса DEFORM-3D. Этот комплекс специально разработан для анализа процессов обработки материалов давлением.

Подготовка данных для моделирования производилась в несколько этапов.

Первоначально требуется получить геометрию объектов исследования. В большинстве операций ОМД основные сложности с геометрией возникают на закруглениях штампа и течения металла по этим участкам. Однако штампа в привычном понимании при накатывании нет. Однако сама заготовка имеет сферическую форму, а камера, в которой происходит обработка – цилиндрическую боковую стенку. Таким образом, хоть и геометрия объектов исследования довольно примитивна, большое внимание стоит уделить качеству получаемой геометрии. Под качеством геометрии в данном случае требуется понимать ее полигональное строение. Низкое количество полигонов в объектах не позволит создать приемлемую конечно-элементную сетку, а как следствие – не будет обеспечен должным образом контакт инструментов (рис. 2.2).

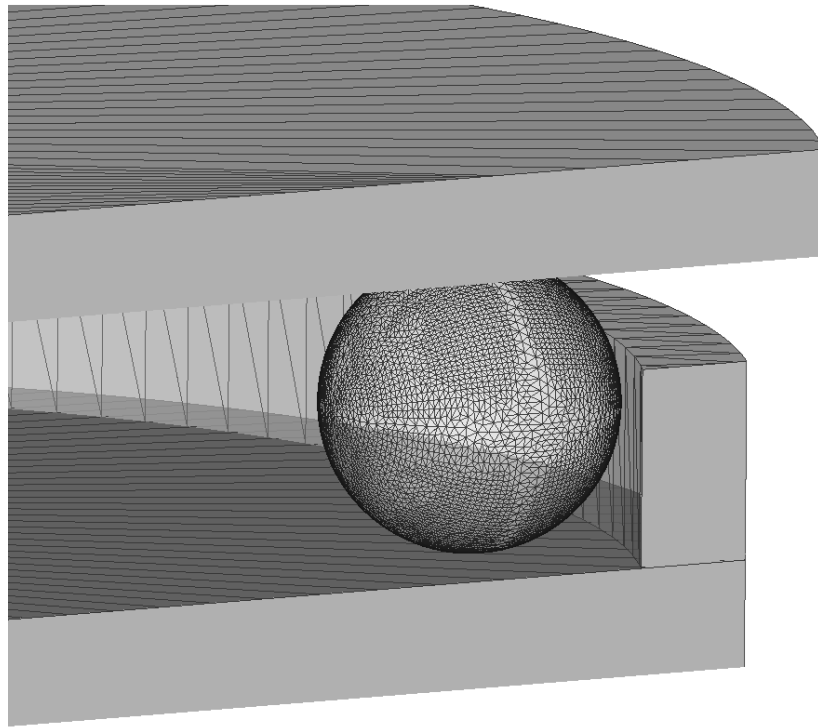


Рис. 2.2. Геометрия инструментов и заготовка с конечно-элементной сеткой

Дальнейшим этапом будет создание конечно-элементной сетки объектов исследования. От качества геометрии, как говорилось ранее, будет зависеть и качество ее разбиения. В случае с процессом, где деформирование заключается в циклической обработке поверхности разбиение должно обеспечивать как требуемый уровень точности получаемых данных, так и обеспечивать уверенный контакт заготовки с инструментом. Операций ОМД в сравнении с отделочно—упрочняющими операциями имеют большую площадь контакта “заготовка - инструмент”. И применяя программное обеспечения, предназначенное для моделирования операций ОМД, требуется это учитывать.

Контакт объектов между собой выведен в отдельный пункт по многим причинам. Для накатывания сферы это один из наиболее важных пунктов. При создании контакта выбирается главный объект в паре и зависимый. В нашем случае сфера всегда будет зависимым объектом. Назначается тип трения в контакте и значение коэффициента. В ходе экспериментов, поверхность боковой кромки дополняли фторопластом для изменения

коэффициента трения между заготовкой и стенкой камеры. Для возможности изменения в модели этого параметра для боковой стенки геометрия инструмента была разделена на нижнюю плиту и цилиндрическую часть. Соответственно условия контакта для каждой пары объектов задавались отдельно. При создании контакта между объектами возможна реализация теплообмена между ними с возможностью задать все необходимые характеристики процесса теплопередачи.

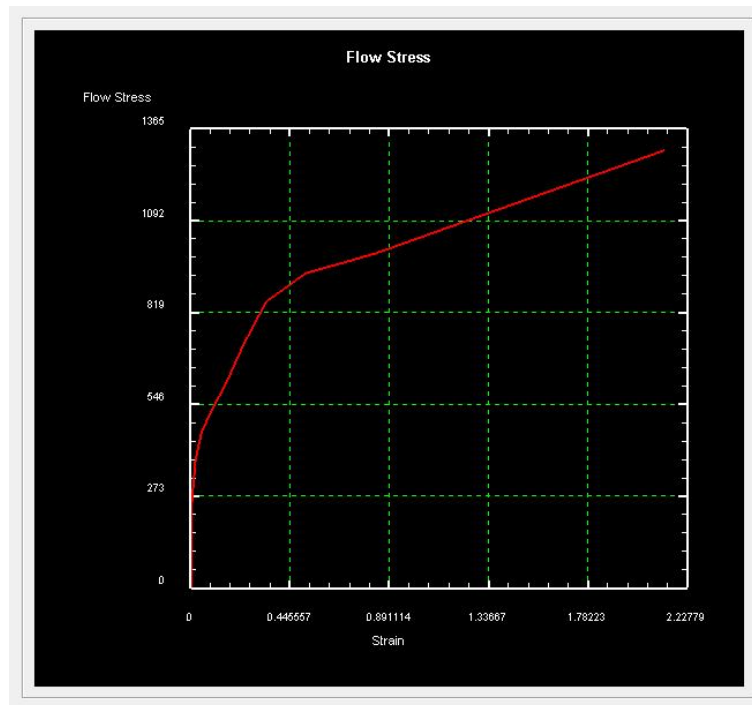


Рис. 2.3. Экспериментально полученная кривая течения для VT1-0 в программе DEFORM-3D

Описанные ранее этапы подготовки касаются геометрии объектов и их взаимодействия. Более значимый этап - определение свойств материалов. Deform-3D имеет свою библиотеку с файлами свойств металлов и сплавов. Однако для повышения точности расчетных данных для материала сферической заготовки использовались экспериментально полученные кривые течения (рис. 2.3). Редактор свойств материалов в Deform-3D позволяет ввести огромное количество данных, начиная с взаимозависимостей деформаций, напряжений и скорости деформирования и заканчивая закономерностями фазовых превращений зерен материалов.

При моделировании процесса накатывания использовались то же усилие и скорость вращения инструмента, что и в экспериментах. При моделировании схемы накатывания по прямой усилие оставалось тем же. Скорость перемещения инструмента соответствовала поступательной скорости центра сферы при движении вдоль цилиндрической кромки камеры в ходе экспериментального накатывания.

Последним этапом подготовки идет настройка решателя. Во-первых, ему требуется задать метод разбиения процесса на отдельные итерации. Можно реализовать схему разбиением процесса связанного с перемещением инструмента или разбиения по времени. Оптимальным считается итерация, в ходе которой перемещение инструмента соответствует величине ребра конечного элемента в зоне контакта. Для накатывания не имеет разницы этот пункт в виду особенности операции – единственный подвижный инструмент имеет только осевое вращение. Поэтому величина перемещения инструмента в единицу времени постоянна. Однако заготовка под действием инструмента может менять свою поступательную скорость в зависимости от удаления от центра его вращения. Таким образом, все же благоприятнее дробить обработку на равные временные шаги, с учетом максимально возможной скорости перемещения заготовки в процессе обработки.

Далее предлагается выбор метода расчета. В DEFORM-3D можно выбрать два метода и три решателя для каждого метода, а так же отдельно выбрать решатель для расчета теплообмена [38], [39]. Все расчеты производились решателем Sparse с использованием метода Direct iteration.

После успешного завершения подготовки остается только сгенерировать базу данных, с которой во время расчетов будет работать решатель программы. В случае неполноты введенных данных база не будет сгенерирована и будут указаны возникшие проблемы. В любом случае, все ограничения при создании файла расчета связаны с недостатком данных. Для решения большинства проблем достаточно отключить ненужные для определенного вида обработки моменты моделирования, такие как

моделирование изменения микроструктуры, диффузии или индукционного нагрева.

Сам решатель в DEFORM-3D позволяет работать с многопроцессорными вычислительными системами и позволяет распределять вычислительные функции всем ядрам процессора. Для этого необходимо в настройках DEFORM-3D во вкладке мультипроцессор указать количество ядер, которые требуются для проведения расчетов. При старте расчета во вкладке Simulator используя опцию “Run (options)” можно задать варианты с полным или частичным распараллеливанием расчетов и количеством памяти, выделяемой для расчетов.

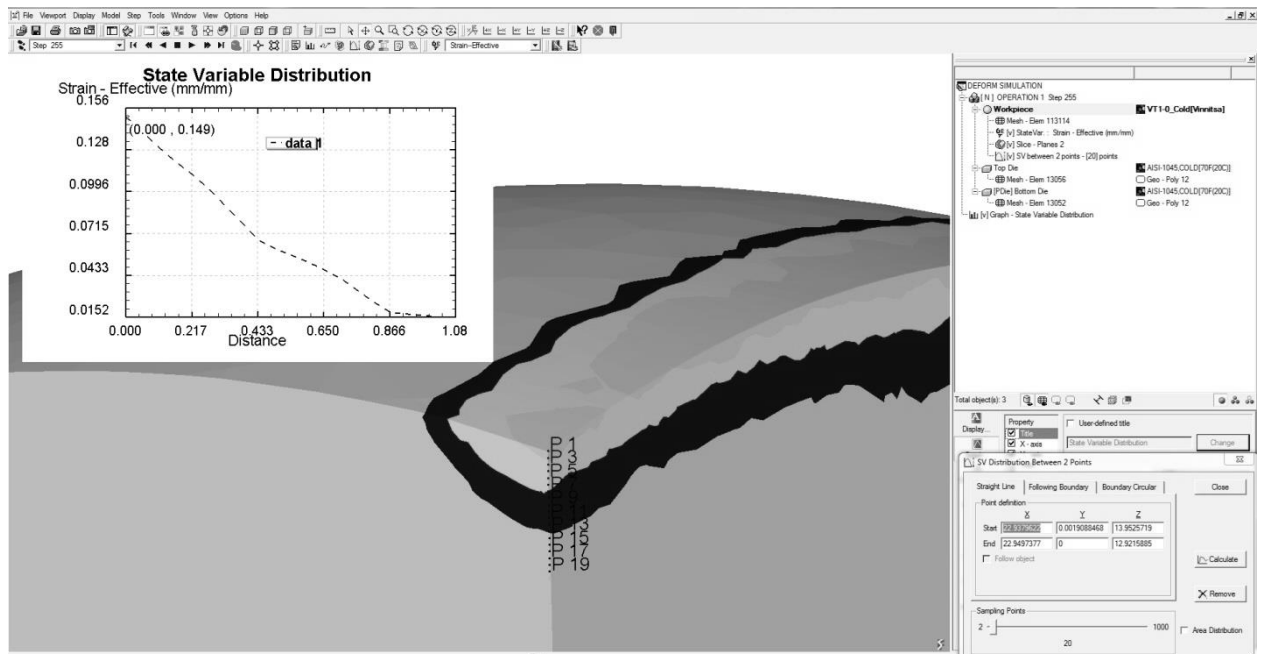


Рис. 2.4. Пример получения распределения деформаций в поверхностном слое

После успешного окончания расчетов постпроцессор программы позволяет получить требуемые данные о напряженно-деформированном состоянии заготовки, перемещении каждого из объектов. Данные могут быть получены в эпюр распределения требуемой величины на поверхности или разрезах объектов. Более важным является возможность получить распределение этой величины между двумя точками, которые затем могут быть представлены как в виде графика (рис. 2.4), так и в табличном виде.

Постпроцессор позволяет отслеживать перемещение определенной точки и получать значения изменения изучаемой величины во времени. Для процессовковки и штамповки есть полезные возможности определения перемещения инструмента, затраченной на это энергии и площади пятна контакта с заготовкой.

2.3. Методика испытаний на сжатие

Определенное недоверие к результатам компьютерного моделирования процессов обработки материалов давлением сводится к различию полученных данных и результатом экспериментов. Одной из причин расхождения теории с практикой является применение данных из технических справочников. Механические свойства одной и той же марки сплава могут различаться в зависимости от полученной плавки на заводе изготовителе и, хотя они колеблются в оговоренных пределах, могут внести неточности при расчетах.

Для обеспечения согласованности экспериментов и моделирования было принято решение проведения испытаний на сжатие для контрольных образцов из каждой партии обрабатываемого сплава.

Таким образом, с целью повышения качества получаемых данных, производились эксперименты на испытательной машине для получения диаграмм сжатия образцов из требуемого материала. Исходя из соображений биосовместимости, для моделирования были отобраны титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ1-2 ГОСТ 19807-91. Кроме того из использующихся в настоящее время сплавов для изготовления сферических головок протезов был выбран титановый сплав ВТ-6 ГОСТ 19807-91.

Для испытаний на сжатие использовалась испытательная машина Р-20 (рис. 2.5) и цифровые системы обработки данных. Жесткость самой машины в зависимости от усилия сжатия (рис. 2.6):



Рис. 2.5. Испытательная машина P20

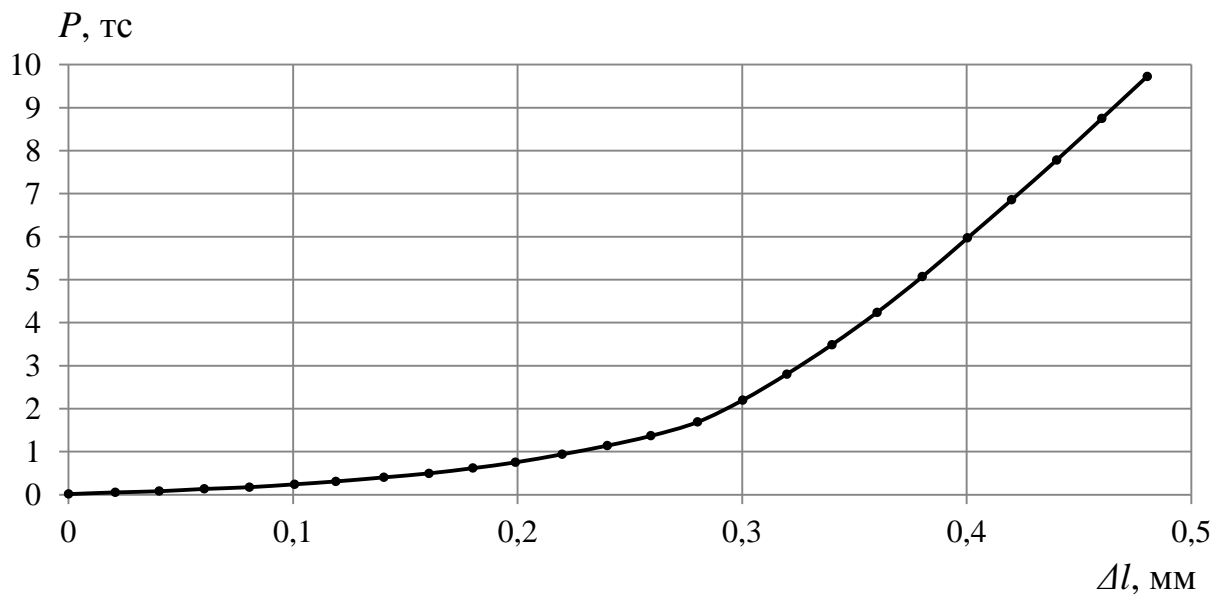


Рис. 2.6. Жесткость экспериментальной установки.



Рис. 2.7. Образцы из ВТ1-2 после испытаний

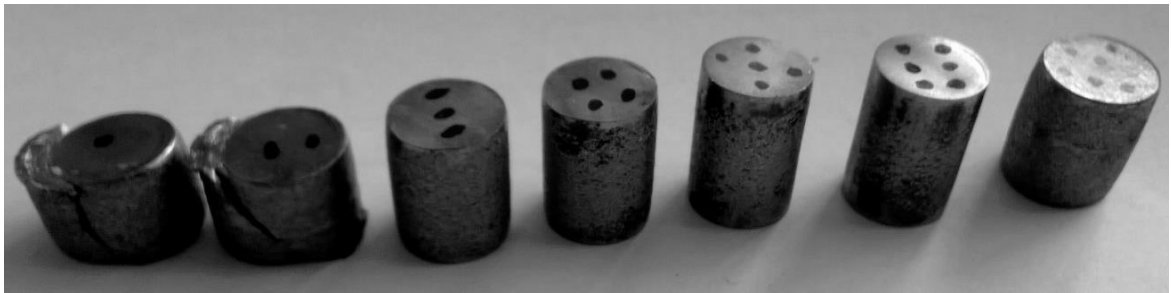


Рис. 2.8. Образцы из ВТ1-0 после испытаний

После обработки экспериментальных данных, с учетом жесткости испытательной машины, были получены кривые течения (рис. 2.9 - 2.11) выбранных образцов (рис. 2.7, 2.8):

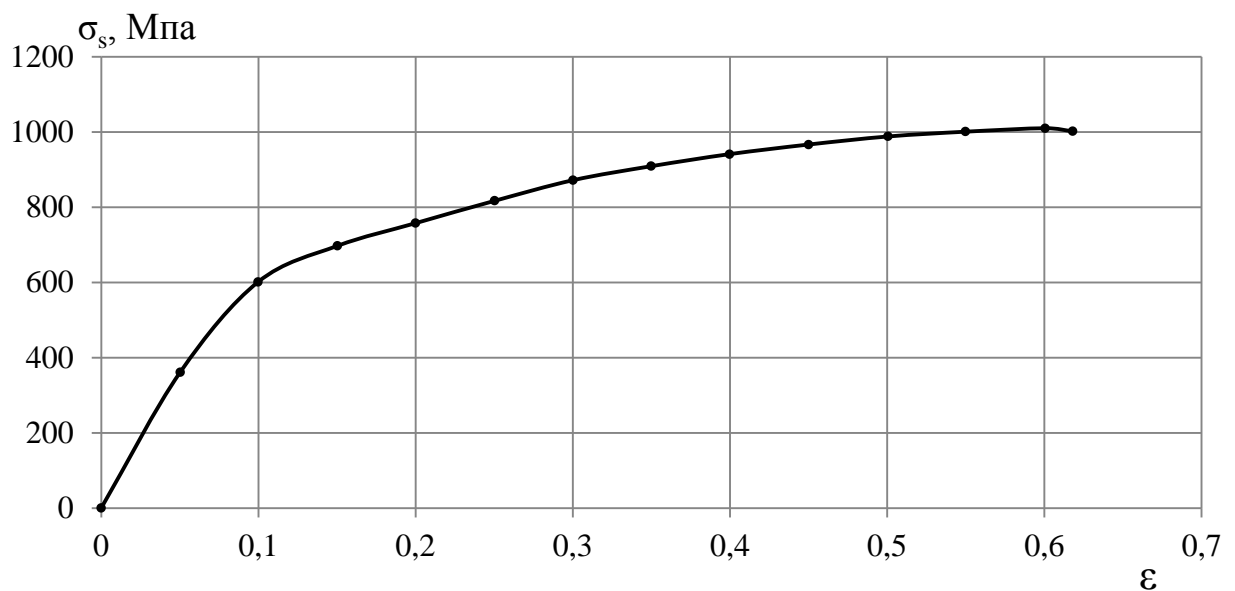


Рис. 2.9. Кривая течения образца из сплава ВТ1-2

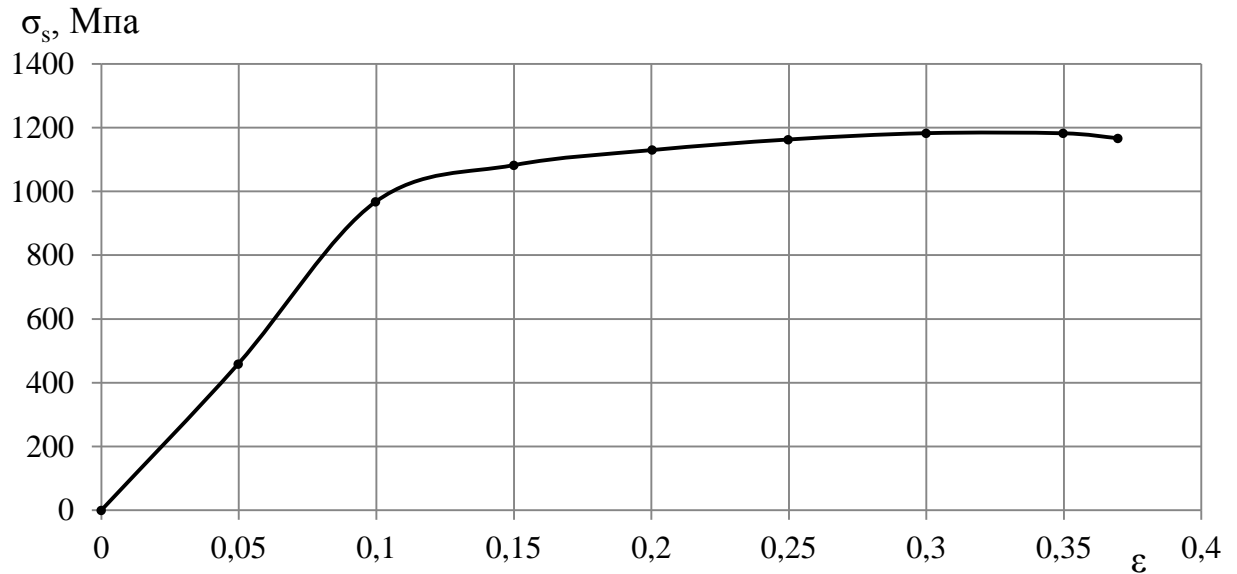


Рис. 2.10. Кривая течения образца из сплава ВТ6

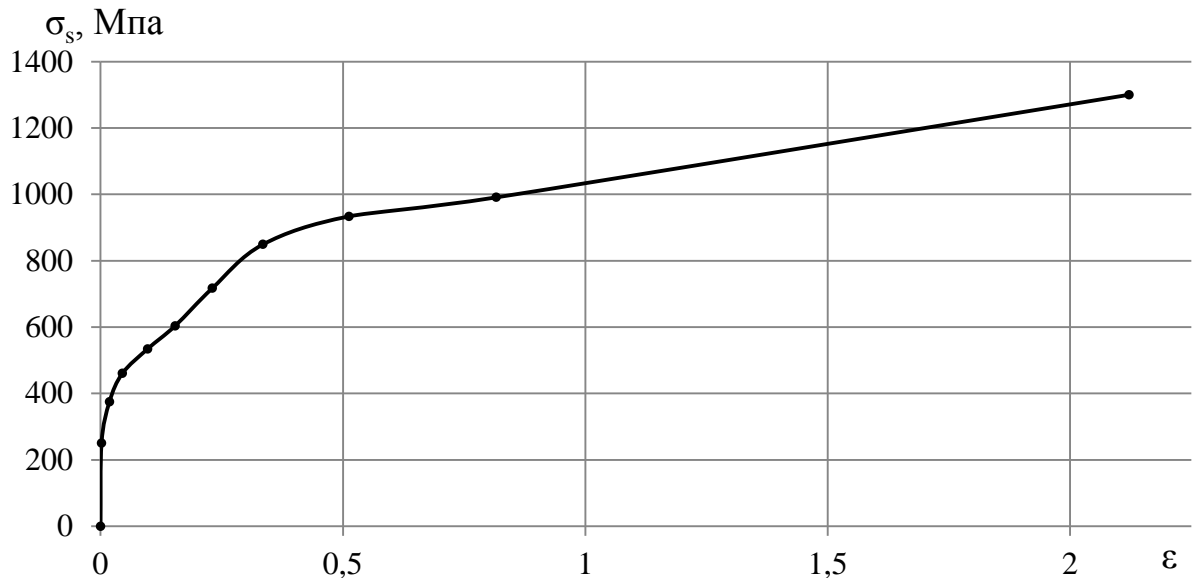


Рис. 2.11. Кривая течения образца из сплава ВТ1-0

Все испытания проводились в соответствии с ГОСТ 25.503-97 «Методы испытаний на сжатие». Полученные зависимости в дальнейшем использовались для уточнения механических свойств образцов при подготовке данных для конечно-элементного моделирования процесса накатывания.

2.4. Методика металлографических исследований

Интенсивные пластические деформации при накатывании создают в поверхностном слое обработанной заготовки мелкозернистую структуру материала. Причем глубина, на которой происходит дробление, не превышает пары миллиметров. Наиболее сильные деформации происходят на самой поверхности сферы постепенно затухая при распространении вглубь.

Микротвердость определялась на металлографических шлифах. Они изготавливались способом горячей запрессовки или холодной заливкой.

При горячей запрессовке объект исследования запрессовывался в полимерный материал с помощью металлографического пресса МТН STANDART 30 (рис. 2.12). В дальнейшем образец шлифовался абразивным кругом с охлаждением и выхаживанием на плоскошлифовальном станке. После образец полировался на фетре алмазной пастой и очищался на бархатной поверхности.



Рис. 2.12. Металлографический пресс МТН STANDART 30

Холодная заливка начиналась с заливки эпоксидной смолы и отвердителя в стальную оправку. Как и при горячей запрессовке, в дальнейшем образец шлифовался абразивным кругом с охлаждением и выхаживанием на плоскошлифовальном станке. В последствии шлиф

доводился на алмазных эластичных кругах на автоматической полировальной машине и полировался на фетре алмазной пастой. Для этого этапа применялась автоматическая полировальная машина LECO SPECTRUM SYSTEM 1000 (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Доводочно-полировальная машина LECO SPECTRUM SYSTEM 1000

После очистки на бархатной поверхности осуществлялось травление поверхности образца. В качестве травителя для титановых сплавов использовали травитель Кролла: 2 мг HF, 6 мг азотной кислоты HNO_3 , 92 мг дистиллированной воды H_2O . В качестве травителя для образцов из стали и чугуна использовали травитель Nital: 100 мг этанола, 10 мг азотной кислоты HNO_3 .



Рис. 2.14. Образцы изготовленные горячим прессованием и холодной заливкой

Для оценки неоднородности процесса деформирования заготовки производились измерения микротвердости поверхностного слоя обработанных экспериментально образцов. Исследования шлифов (рис. 2.14) производились на микротвердомере ПМТ-3 (рис. 2.15). Нагружение на инденторе составляло 0,5 и 2 Н.



Рис. 2.15. Общий вид микротвердомера ПМТ-3

Металлография полученных образцов проводилась на микроскопе OLIMPUS IX 70 оснащенном цифровым фотоаппаратом (рис. 2.16.).



Рис. 2.16. Микроскоп OLIMPUS IX 70

2.5. Методика определения траектории качения сферы в инструменте

Равномерность деформирования всей поверхности обрабатываемого изделия является одним из важных условий успешной обработки накатыванием. Для этого крайне необходимо обеспечить смещение следа пластического контакта на поверхности сферы относительно предыдущего.

Конструкция установки для накатывания подразумевает эксцентриситет между осью вращения верхнего инструмента, закрепленного в шпинделе сверлильного станка, и осью цилиндрической камеры, в которой размещалась заготовка. Изменение величины эксцентриситета позволяет изменять кривизну траектории качения сферы в камере и величину соприкосновения с боковой кромкой камеры.

Стоит отметить влияние касания заготовкой боковой кромки камеры. В результате соприкосновения заготовки и инструмента появляется еще одно пятно контакта заготовки и инструмента, которое вызывает возникновение незначительных деформаций в поверхностном слое. Основное влияние этого контакта заключается в изменении распространения следа деформационного упрочнения.

Исследование перемещения заготовки в камере было осуществлено на лабораторной установке для экспериментального накатывания. Отличительными чертами были сокращенная длительность обработки и окрашивание поверхности прижима (рис. 2.17). Как видно на фотографии, заготовка, располагаясь на удалении от кромки камеры, перемещается от центра к периферии по спиралевидной траектории.

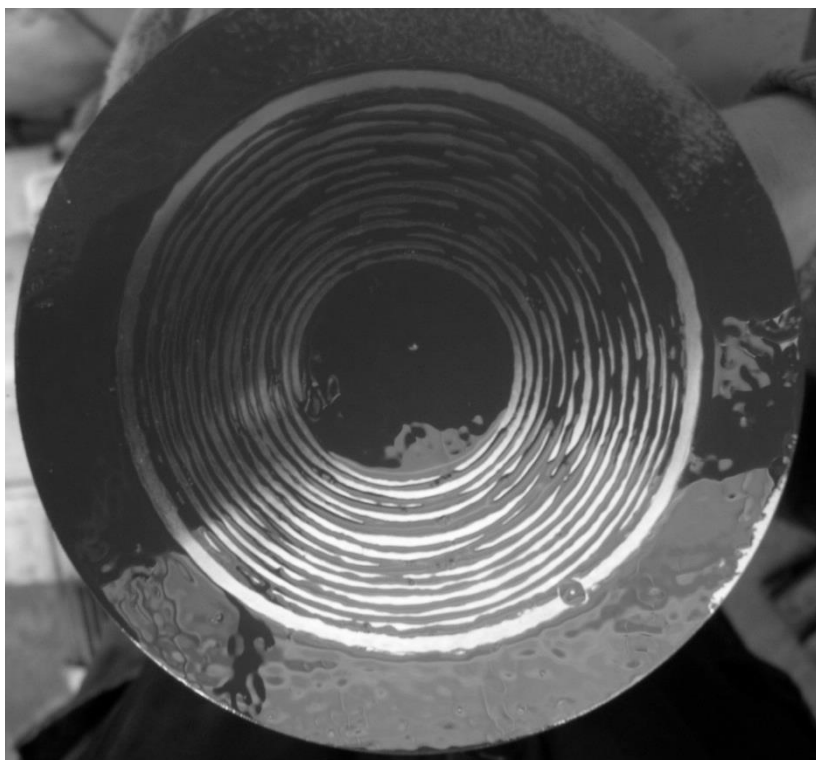


Рис. 2.17. Окрашенная поверхность прижима со следом контакта с заготовкой

В центре фотографии отчетливо видно место первоначального расположения заготовки относительно инструмента. Оно расположено в левой части круглого пятна краски в центре. От этой точки по спирали под действием окрашенного инструмента сфера начинает перемещаться по спирали к боковой кромке камеры. Стоит отметить равномерность удаления следа контакта от центра инструмента.

Широкий след, расположенный у края инструмента, образовался при движении заготовки вдоль кромки камеры. В данном случае, больше интересна картина распределения краски с инструмента на поверхности самой заготовки и гранях камеры. Она приведена на рис. 2.18. Рассмотрим сначала отпечаток на плоской поверхности инструментальной камеры. Так как для его получения сфера должна первоначально быть испачкана краской с верхнего инструмента. Полученный след отличается от предыдущего большим удалением первого отпечатка от центра камеры, вызванного как эксцентриситетом инструментов, так и требуемым перемещением

окрашенного участка сферы к плоскости камеры. Однако в остальном он идентичен с ранее представленным отпечатком. Это позволяет говорить о равномерности смещения следа, как по поверхности инструментов, так и по поверхности сферы на этапе перемещения заготовки к кромке камеры.



Рис. 2.18. След на поверхности камеры и заготовки

На фотографии поверхности заготовки видны следы краски одинакового характера, расположенные со смещением друг от друга. Они представляют собой ровные линии одинаковой толщины, окольцовывающие поверхность сферы. Подобный отпечаток характерен для распределения следа деформационного упрочнения по поверхности шара с момента начала обработки до момента касания заготовкой боковой кромки камеры.

Участок траектории перемещения сферы по спирали занимает незначительный временной промежуток в ходе обработки. Больше распространение имеет участок траектории, при котором сфера перемещается вдоль цилиндрической кромки камеры. На этом участке появляется дополнительный контакт заготовки с инструментом, который меняет характер смещения следа. Перемещение заготовки внутри камеры на этом этапе происходит по ее внутренней цилиндрической грани, оставляя след на ее кромке.

На той же фотографии есть участок, состоящий как бы из двух полос на боковой кромке. В то же самое время, с другой стороны камеры наблюдается одна горизонтальная полоса, местами прерывающаяся. Так как контакт сферы с вогнутой цилиндрической гранью является точкой, наличие двух полос в месте одной может показаться странным. Объяснить подобное можно тем, что участок с двумя полосами – место наиболее сильного вращения сферы относительно своего центра. В этом месте накапливается большее, по сравнению, с другими участками, количество краски. В ходе обработки на этом участке накапливается такое количество краски, что в дальнейшем взаимодействуя с камерой, сфера разделяет один большой след на два меньших.

В таком случае, можно отметить, что взаимодействие сферы с боковой кромкой камеры распространяется не на всю длину окружности, а локализовано на отдельных участках. Кроме того, стоит отметить наличие участков стенки, избежавших контакта с заготовкой.

На самой заготовке кроме уже описанных отпечатков имеются непрерывные следы краски с сильным изменением кривизны. Их возникновение связано с появлением дополнительного момента вращения заготовки, связанного с контактом с боковой стенкой камеры.

Отпечатки краски, оставленные на поверхности заготовки, указывают на стадийность процесса накопления деформаций при обработке накатыванием. Очень долгое перемещение заготовки к боковой кромке камеры может привести к потере сферической формы и переходу к конической. Однако при возникновении дополнительного контакта инструмента и заготовки происходит сильное изменение кривизны траектории взаимодействия инструмента и заготовки, благоприятно сказывающееся на восстановлении сферической формы. Кроме сохранения первоначальной формы, дополнительный контакт благоприятно воздействует на равномерность распределения деформирования поверхности.

2.6. Методика исследования контактного трения

Важнейшим элементом любого эндопротеза сустава является шарнирное сочленение, деталями которого являются выпуклая сферическая головка и вогнутая ацетабулярная чашка. Для оценки возможности использования чистого титана в паре с хируленом (сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)) в условиях близких к работе имплантированного шарнирного сочленения требовалось получить триботехнические характеристики их совместной работы.

Исследования износостойкости пары трения азотированный ВТ1-0/хирулен выполнялись на машине торцевого трения по схеме кольцо-плоскость (рис 2.19). Титановый образец в виде кольца прижимался к неподвижному плоскому контртелу из хирулена, шероховатость рабочей поверхности которого составляла R_a 3 мкм. Рабочая поверхность титановых образцов доводилась на доводочно-полировальной машине до зеркального блеска. Скорость относительного перемещения деталей составляла 0,057 м/с согласно ASTM F732-82, предусматривающего проведение аналогичных испытаний при возвратно-поступательном движении по схеме pin-on-flat, контактное давление (q) изменяли в пределах 3,54 – 8,2 МПа. Значение нижнего предела диапазона значений контактного давления взято из ASTM F732-82. В процессе исследований тензометрическими динамометрами измерялись осевая нагрузка и момент трения.

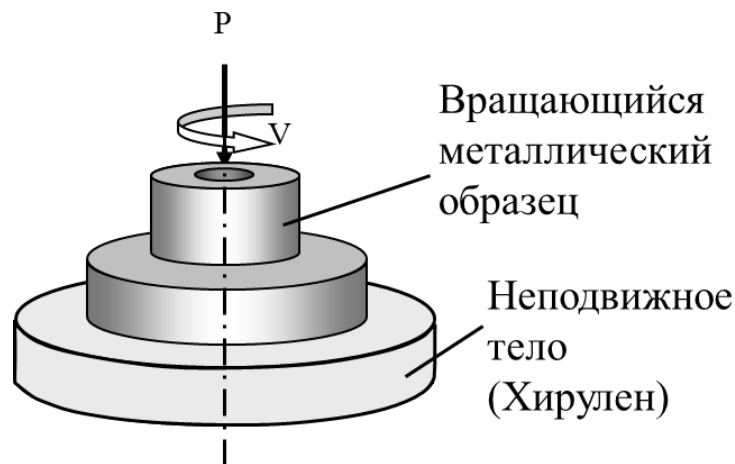


Рис. 2.19. Схема испытаний на машине торцевого трения

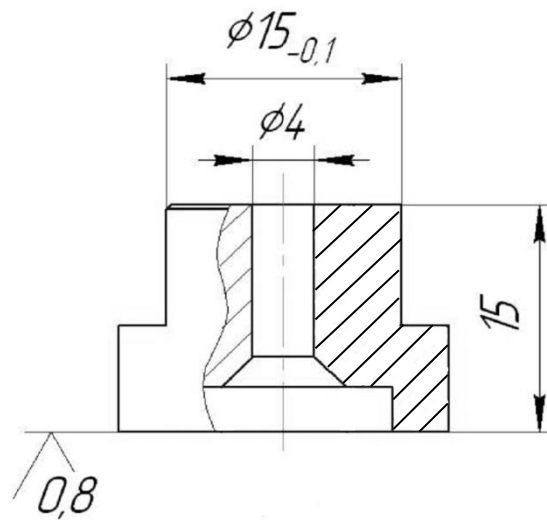


Рис. 2.20. Конструкция металлического образца

Износ металлических образцов (рис. 2.20.) контролировался электронным микрометром *IP-54*, форма и глубина канавки износа (рис. 2.21) на поверхности контртела СВМПЭ фиксировалась профилографированием на приборе ВЭИ Калибр мод. 201. Износ деталей пары трения оценивался через каждые 4 километра пути при суммарном пути трения - 60 км. При этом характеристики снимались после окончания периода приработки (~ 400 м).

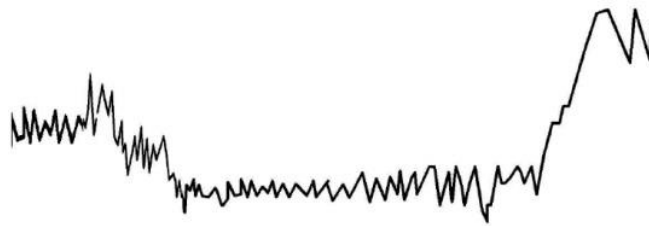


Рис. 2.21. Профиллограмма канавки износа хирулена.

Для исследования контактных давлений производилось моделирование описанного выше эксперимента методом конечных элементов в программном комплексе *DEFORM-3D*. Для определения нормальных контактных напряжений (q) использовали расчетную схему, представленную на рис. 2.22. Между двумя плитами размещали объект исследования. Верхний инструмент оставался неподвижен, когда нижний инструмент вращался, обеспечивая одновременно с этим усилие прижима.

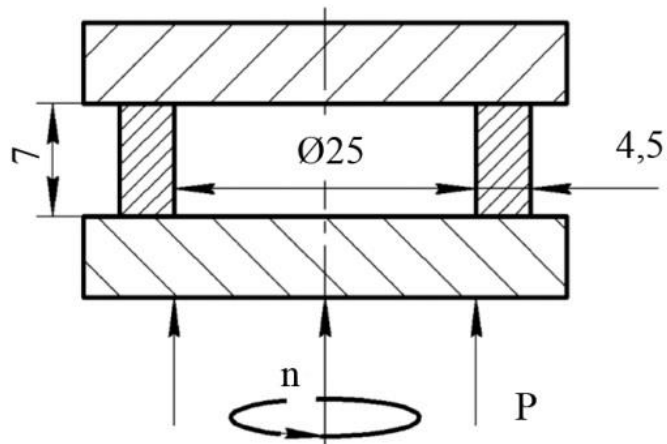


Рис. 2.22. Расчетная схема для определения контактных давлений для
схемы плоскость-кольцо

Конечно-элементная сетка кольца состояла из 90000 элементов (рис. 2.23). Повышенное внимание уделялось поверхности трения, поэтому было принято решение сгустить сетку по торцам кольца. Таким образом, удалось создать разбиение, в котором на поверхности размер конечного элемента в 10 раз был меньше принятого для остального объема исследуемого тела.

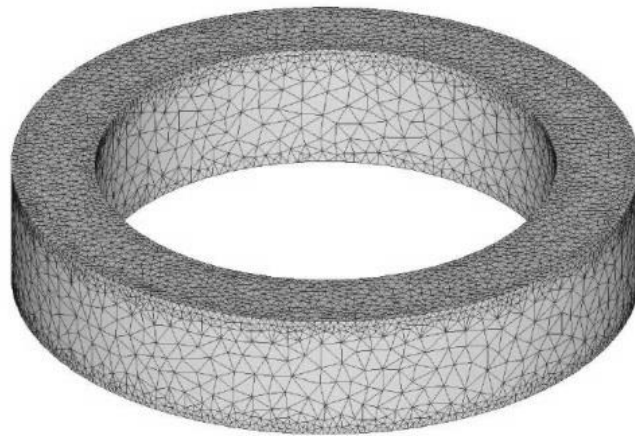


Рис. 2.23. Конечно-элементная модель кольца

Кольцо сжималось с усилием 2 кН, а инструмента вращался со скоростью 351 об/мин. Коэффициент трения поверхностей принимался равным 0,12. Расчеты проводились без учета возможного теплообмена.

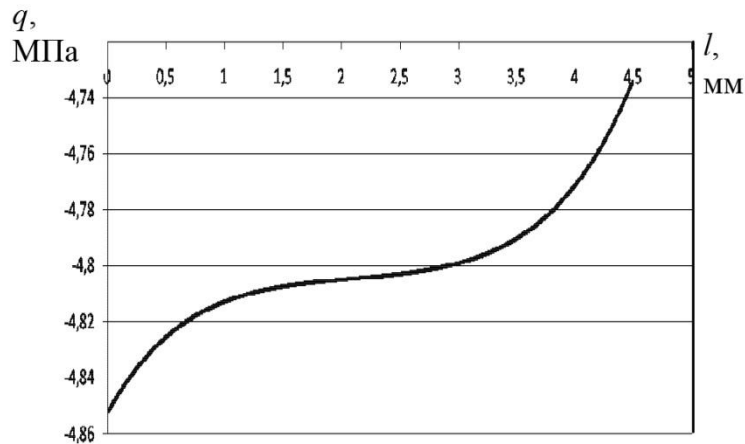


Рис. 2.24. Распределение контактного давления (q) по ширине контакта трущейся поверхности (от оси к периферии)

В результате была получена эпюра распределения контактного давления q по ширине контакта (рис. 2.24). Из нее видно, что неравномерность распределения контактного давления не превышает 3%. Таким образом, определение нормальных напряжений на контактной поверхности делением нагрузки на площадь контактной поверхности вполне правомерно.

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 «СоCrMo/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.

При испытаниях с не азотированным ВТ1-0 происходило практически мгновенное намазывание титана на поверхность хирулена [40]. В ходе испытаний износа поверхности образца из азотированного титанового сплава ВТ1-0 не наблюдалось.

2.7. Выводы

1. В результате опытного применения операции накатывания на созданной лабораторной установке выявлено положительное влияние обработки на последующие операции технологического процесса изготовления сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека.

2. Разработана методика подготовки данных и проведения моделирования накатывания методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D, позволяющая обеспечивать сходимость решения в пределах 5% при оптимальных затратах машинного времени.

3. Разработана технология получения металлографических шлифов, которые применялись для исследования микроструктуры поверхностного слоя заготовки, затронутого интенсивными пластическими деформациями. Получены распределения твердости по глубине поверхностного слоя, свидетельствующие о повышении значений твердости в 2,5 раза по сравнению с необработанными образцами.

4. Разработана методика изучения перемещения заготовки в инструментальной камере при накатывании и выявлены основные закономерности движения заготовки по поверхности камеры. Установлена взаимосвязь резкого изменения распространения следа контакта заготовки с инструментами, вызванная появлением дополнительного контакта с боковой цилиндрической стенкой неподвижного инструмента.

5. Разработанная методика исследования контактного трения пары сферическая головка из азотированного ВТ1-0 и вертлужной чашки из хирулена позволила установить, что по сопротивлению истиранию, антифрикционным свойствам пара трения «азотированный ВТ1-0/хирулен» существенно превосходит традиционную для практики эндопротезирования пару «СоСгМо/хирулен». Трение в паре «азотированный ВТ1-0/хирулен» ниже на 25%, износ – в 2,6 раза.

ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СРЕДСТВАМИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основой предложенного процесса накатывания является создание равномерно распределенных деформаций в поверхностном слое заготовки, что обеспечивается последовательным сжатием каждой точки поверхности сферы с высокой скоростью перемещения следа пластической деформации от одной точки к другой. В таком случае, важным становится возможность исследовать влияние технологических параметров на протяжении всего хода обработки. Однако большинство экспериментов могут дать лишь конечные данные о том или ином параметре обработки, что приводит либо к увеличению количества экспериментов, либо к снижению качества получаемых данных. Исследование принципиально нового метода обработки поверхности, объединяющего высокоскоростное перемещение заготовки относительно инструмента и сложную траекторию деформирования поверхности, может быть облегчено использованием вычислительных комплексов на основе метода конечных элементов.

Применение компьютерного моделирования для исследования механики деформационного упрочнения сферической заготовки накатыванием обусловлено несколькими обстоятельствами:

- сложность траектории соприкосновения заготовки и инструмента. Деформационный след, оставляемый на поверхности заготовки, имеет сложную траекторию. Причем на его траекторию оказывают влияние практически все технологические параметры процесса: скорость вращения шпинделя сверлильного станка, величина эксцентриситета между шпинделем и инструментальной камерой, применение прокладок для увеличения/уменьшения силы трения на внутренней цилиндрической кромке камеры, технологическое усилие прижима, использование теплоотводящей среды в камере (к примеру – воды, жидкого азота), геометрического отклонения от сферичности заготовки полученной точением. Таким образом,

точно рассчитать, а в большинстве случаев и просто прогнозировать траекторию контакта инструмента и заготовки просто невозможно;

- невозможность экспериментально проследить все этапы накопления деформаций отдельно взятой точки поверхности. Этот пункт является продолжением предыдущего, т.к. в конечном счете, сводится к количественному анализу взаимодействия между выбранной точкой на поверхности и инструментами. Отдельным моментом является ситуация, когда исследуемая точка расположена так, что не контактирует с инструментом, но расположена в области, затронутой пластическим деформированием;

- экономическими соображениями. Математическое моделирование достигло высокой точности получаемых данных, однако при анализе малоизученных процессов обработки полагаться только на симуляции этого процесса не является правильным решением. С другой стороны экспериментальную составляющую можно сократить до уровня подтверждения или опровержения результатов моделирования, анализа конечных результатов исследуемой технологической обработки.

Исходя из вышеописанных преимуществ было принято решение о разработке методики исследования процесса накатывания полносферических заготовок плоскими инструментальными поверхностями упрочняющим накатыванием при помощи метода конечных элементов, широко применяемого для анализа операций ОМД [41].

Программные комплексы, реализующие вычисления методом конечных элементов получили в наше широкое распространение. Среди них наиболее популярным, а также широко применяемым на крупных предприятиях, является комплекс DEFORM-3D. Он специально разработан для моделирования операций ОМД [42], [43] и находит свое применение как на производстве [44], так и в научной деятельности [45].

Описанные в первой главе методы получения субмикроструктурной структуры у титана и титановых сплавов так же

были исследованы с применением DEFORM-3D. К ним относятся такие методы, как исследование непрерывного прессования методом КОНФОРМ [46], процесса равноканального углового прессования [47], моделирование процесса винтовой экструзии [48] и моделирование структурообразования в титановом сплаве ВТ6 при изотермической ковке [49]. Успешный опыт использования моделирования операций ОМД в DEFORM-3D для изучения методов измельчения структуры позволяет остановить свой выбор на нем, как основном инструменте теоретического исследования методом конечных элементов.

3.1. Основные этапы создания конечно-элементной модели в DEFORM-3D.

Возможности метода конечных элементов, предоставленные средствами вычислительной техники, расширили количество инструментов в рабочем арсенале инженеров и ученых. Однако необходимо учитывать различия между конечно-элементной моделью и самим объектом исследования, а так же учитывать особенности алгоритмов решения задач, реализованных в применяемом программном комплексе. Таким образом, главными задачами исследователя становятся подготовка корректных и актуальных данных об исследуемом объекте и, по возможности, создание упрощенных или оптимизированных моделей процесса обработки.

Моделирование изменения деформированного состояния поверхностного слоя заготовки в процессе накатывания является очень ресурсоемким процессом, в котором большое влияние на конечный результат оказывает правильно подготовленная конечно-элементная модель обработки. При накатывании деформирование происходит в малом объеме тела заготовки и затрагивает в процессе обработки только ее поверхностный слой. Кроме того, заготовка быстро перемещается в штампе. Эти обстоятельства требуют определенного подхода, для успешного моделирования процесса. На основе известной литературы по программному комплексу DEFORM-3D [38], [50] были сформулированы основные этапы подготовки данных и настройки пре-процессора DEFORM-3D.

Подготовка модели заготовки и инструмента. Анализируемая принципиальная схема процесса обработки не подразумевает трудностей для проектирования оснастки. Как заготовка, так и пакет инструментов состоят из простых геометрических форм и все взаимодействие между ними на начальном уровне можно описать как касание шаром плоскости и касание шаром вогнутой цилиндрической грани. Соответственно, площади соприкосновения заготовки и инструмента значительно меньше площади

поверхности обрабатываемой сферы, что накладывает дополнительные условия на объекты модели для вычислительного комплекса.

К примеру, хоть и визуально, при построении шара поверхность выглядит сферической, однако в действительности она состоит из полигонов (зависит от CAD - приложения), на которые раздроблена поверхность сферы (рис. 3.1). Таким образом, основываясь на качестве этого разбиения, препроцессор DEFORM-3D будет создавать конечно-элементную сетку заготовки (рис. 3.2), формируя из вершин полигонов узлы сетки МКЭ. Кроме того, грубое разбиение сказывается на объеме получаемой фигуры, искусственно уменьшая его в большинстве случаев, что является еще одной предпосылкой для снижения точности расчетов.

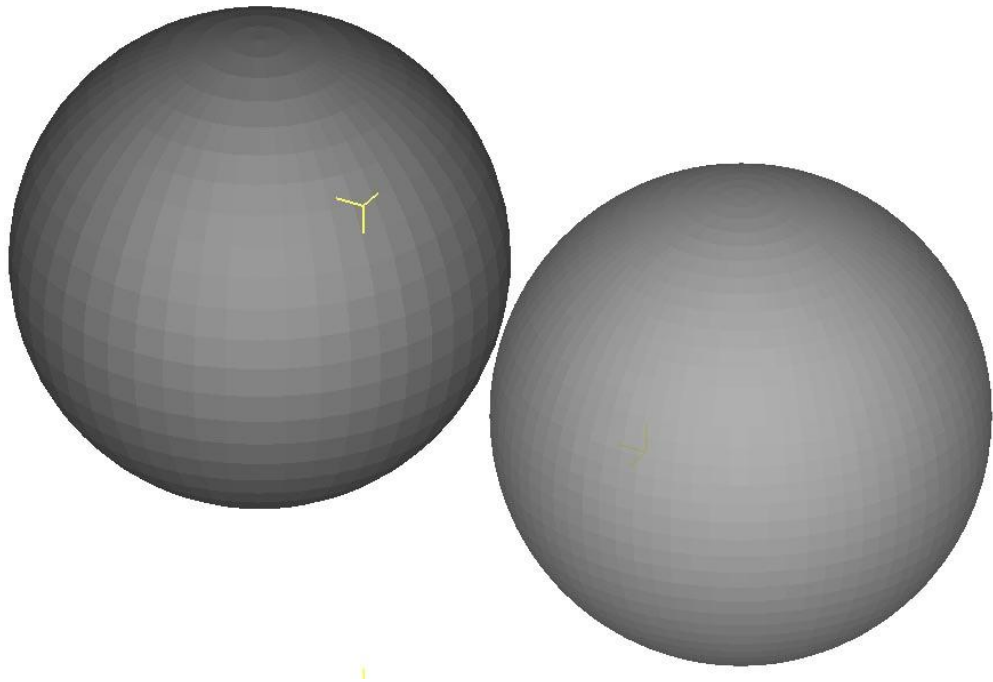


Рис. 3.1. Поверхность сферы, полученная из .stl файла одной и той же модели, в DEFORM-3D: слева – геометрия обычной точности; справа - повышенной

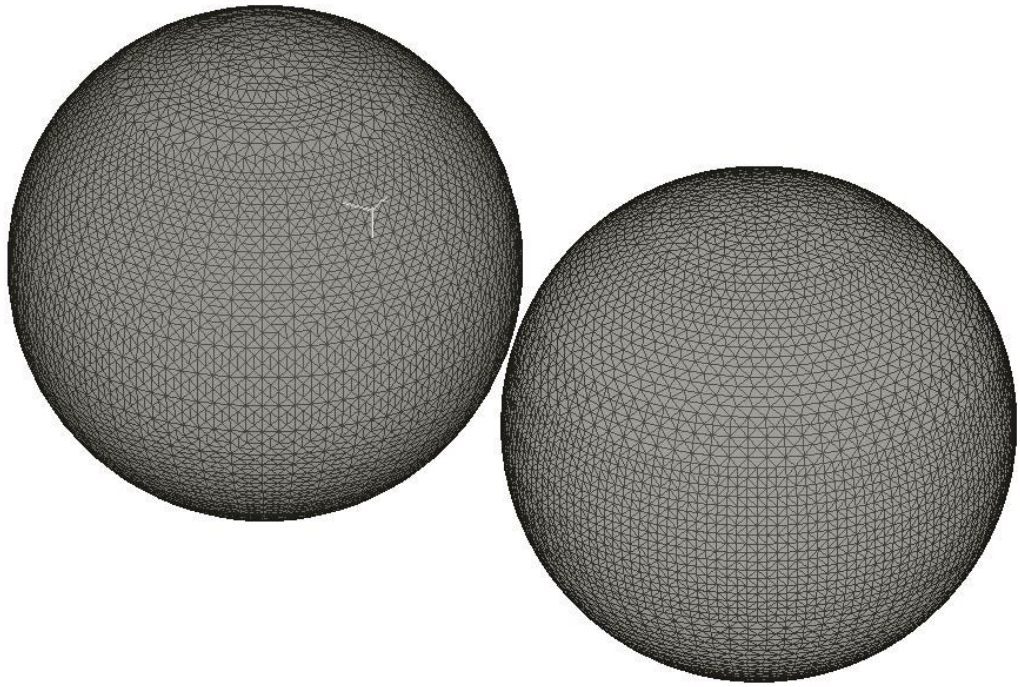


Рис. 3.2. Разбиение поверхности моделей на конечные элементы при одинаковых настройках препроцессора DEFORM-3D из рисунка выше

В руководстве пользователя DEFORM -3D не говорится, какой должна быть величина грани многоугольника для окружности или величина угла между двумя соседними гранями. Однако во всех рекомендациях к проектированию указана общая идея – для достижения удовлетворительных результатов сходимости решения поставленной задачи пятно контакта должно составлять как минимум из трех узлов конечно-элементной решетки, а при наличии радиусов закруглений в инструменте – по длине этого радиуса должны одновременно размещаться не менее трех узлов решетки. Таким образом, все усилия при проектировании должны быть сведены к обеспечению этих условий.

В случае с моделированием в программном комплексе DEFORM -3D стоит уточнить само понятие “контакт заготовки и инструмента”, т.к. препроцессор и решатель в данном случае имеют несколько иное понятие контакта. Узлы решетки, лежащие на инструменте, в любом случае являются точками контакта, однако препроцессор подготавливает сетку таким образом, что допускает добавление точек контакта удаленных от поверхности инструмента, на величину, меньшую определенного значения. Такой подход

позволяет искусственно увеличить пятно контакта, обеспечив тем самым лучшую сходимость результатов расчета. Так же этот метод позволяет сократить время решения, позволяя добиваться достоверных результатов с использованием менее густой сетки.

Вышеперечисленные ограничения касаются создания правильной геометрии инструментов и заготовки, а также их разбиения на элементы в препроцессоре DEFORM-3D, но не распространяются на их взаимодействие между собой.

Для большинства процессов обработки металлов давлением время взаимодействия заготовки и инструмента ограничено скоростью перемещения пуансона прессы. С другой стороны процессы прокатки профилей сопоставимы по скорости перемещения заготовки и инструмента, однако различий в НДС получаемого профиля не будет при изменении времени деформирования – измениться лишь длина получаемого профиля. Заготовка же при накатывании перемещается в инструментальной камере с высокой скоростью, а процесс получения деформационного упрочнения поверхности несет накопительный характер.

В таком случае, оптимальным является ситуация, когда при моделировании за одну итерацию пятно контакта инструмента и заготовки переместилось по направлению своего движения на расстояние, равное длине ребра конечного элемента.

Моделирование, запущенное без соблюдения последней рекомендации, может потратить гораздо больше машинного времени, чем того могло потребоваться. Решатель DEFORM-3D, столкнувшись с проблемой сходимости, может совершать следующие действия:

- Разбиение расчетного шага на подшаги, таким образом, самостоятельно выводя число итераций к более оптимальному количеству;
- Повторная генерация сетки конечных элементов. Причем, в зависимости от настроек симуляции, перестроение сетки может производиться в той области, где возникли проблемы, либо, что часто стоит

“по умолчанию”, во всем объеме заготовки. С учетом того, что кроме генерации новой сетки, задействуется механизм переноса уже рассчитанных деформаций из узлов старой сетки конечных элементов в новую. Такой процесс требует определенного времени, а с учетом того, что решатель DEFORM-3D в процессе моделирования самостоятельно с первого раза может и не справиться с созданием оптимального разбиения объекта, это время многократно увеличивается.

В конечном счете, при невозможности достичь рекомендуемых значений сходимости решения задачи, решатель может остановить моделирование и время, затраченное на расчеты, будет потрачено впустую.

Большое влияние на работу решателя оказывает правильная настройка взаимодействия объектов при моделировании. Самым простой ситуацией будет являться выбор главного инструмента. В исследуемом процессе трудностей с этим не возникает, т.к. верхний инструмент, закрепленный в шпинделе сверлильного станка, сжимает заготовку с требуемым усилием прижима и придает ей движение. Инструментальная же камера жестко зафиксирована. Однако при моделировании перемещения верхнего инструмента возникают определенные сложности:

- DEFORM-3D позволяет задавать перемещение инструмента с определенной скоростью. Это может быть либо постоянная угловая или поступательная скорость перемещения, либо их комбинация. Также можно создавать перемещение, которое зависит от разных факторов – от угла поворота кривошипного вала для прессов, от потери энергии при деформировании для молотов или произвольной зависимости скорости от времени. Однако для одного объекта рекомендуется использовать только один тип перемещения. Таким образом, сдавливание по вертикальной оси и вращательное движение относительно нее же должно быть разделено между двумя инструментами – верхний инструмент сохраняет вращение, а инструментальная камера становится подвижной и создает усилие по направлению к верхнему инструменту. Такой подход является оптимальным.

- В исследуемом процессе накатывания перемещения одного из инструментов относительно другого по оси подачи станка не могут быть точно определены. Определяется сила прижима заготовки инструментом. В таком случае, при задании для инструмента усилия и его направления, решатель каждую итерацию рассчитывает величину перемещения инструмента, которое будет соответствовать заданному усилию. В данном случае, при моделировании накатывания, нет возможности уйти от задания усилия прижима к заданию перемещения или скорости движения инструмента.

- Из невозможности отказаться от оперирования усилием прижима инструмента добавляется рекомендация по его использованию. При назначении величины сжатия оптимальным считается ситуация, когда усилие на заготовку возрастает со временем и через небольшое количество шагов выходит на заданный уровень. Таким образом, можно избежать возникновения областей с искаженным НДС из-за резкого начала взаимодействия заготовки и инструмента.

Таким образом, грамотно созданная 3D-модель заготовки и пакета инструментов, правильное задание их взаимодействия между собой и знание определенных рекомендаций работы с выбранным для моделирования программным комплексом могут значительно сократить машинное время без потери качества получаемых на выходе данных. Но ключевым фактором, позволяющим сравнивать реальную обработку с ее виртуальной моделью, является данные о механических свойствах материалов.

Сбор сведений об обрабатываемом материале. Обеспечение точности получаемых моделей тел заготовки и инструмента для расчетов с помощью МКЭ всегда можно улучшить. Механические же свойства исследуемых материалов могут отличаться в разных плавках, но укладываться в допуски ГОСТ на этот материал. Таким образом, основная задача повышения точности получаемых данных применительно к материалам сводится к уточнению физических и механических свойств перед

проведением экспериментов и использование уточненных данных в моделировании.

В DEFORM-3D имеется возможность математически описывать свойства материалов [39], а также есть собственная база данных о широко применяемых в промышленности металлах, сплавах и композитах. Однако использование в моделировании справочных кривых течения материала заготовки могут сильно сказаться при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных.

С целью повышения качества получаемых данных, производились эксперименты на испытательной машине для получения диаграмм сжатия образцов из требуемого материала. Исходя из соображений биосовместимости, для моделирования были отобраны титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ1-2 ГОСТ 19807-91. Кроме того из использующихся в настоящее время сплавов для изготовления сферических головок протезов был выбран титановый сплав ВТ-6 ГОСТ 19807-91, как наиболее распространенный в этой отрасли. Для оценки технологических возможностей процесса накатывания в машиностроении были проведены дополнительные испытания с такими материалами, как сталь 20 ГОСТ 1050-88.

Большинство схем деформирования, применяемых при моделировании, не приводили к заметному разогреву поверхности заготовки, либо моделировались схемы обработки с отводом тепла от поверхности в водной среде. В таком случае, дополнение ранее выявленных в экспериментах механических свойств материалов справочными данными [51] о температурных особенностях исследуемых сплавов [52] не повлечет за собой повышение погрешности в расчетах.

Принципиальные схемы моделирования. Множество операций, связанных с обработкой металлов давлением, может быть упрощено для последующего анализа средствами метода конечных элементов. К примеру, процесс штамповки тел вращения не обязательно моделировать в полном объеме, а можно ограничиться лишь сектором этого тела, ограничив

перемещения материала по его краям, либо заменить решением плоской задачи с учетом однородности свойств материала заготовки. Обрабатываемые детали, имеющие в ходе обработки тот или иной вид симметрии, как получаемой заготовки, так и использующегося для этого инструмента, значительно облегчают процесс моделирования технологической операции обработки. Однако, часто бывает так, что процесс не вызывает трудностей в производстве, но создание его рабочей модели требует большего внимания. В отдельных случаях, к затрудняющим факторам можно отнести сложную форму получаемого изделия или сложность, описываемой траектории инструмента относительно заготовки.

Накатывание шара, описываемое в патенте [37] – операция высокоскоростная, что уже накладывает дополнительное ограничение на качество разбиения объема заготовки на конечные элементы. Для обеспечения наилучшей сходимости шаг перемещения инструмента относительно заготовки должен быть равен длине ребра элемента, а в отдельных случаях в три раза меньше его. Таким образом, при скорости вращения шпинделя сверлильного станка в 351 об/мин, линейная скорость сферы достигает 1,5 м/с. Обращая внимание на то, что непосредственный контакт должен быть у 3 узлов конечно-элементной решетки, а ее диаметр – 28мм, то для обеспечения этих условий требуется 134 тысячи 700 элементов. Особенности решателя DEFORM-3D, в свою очередь, позволяют использовать элементы с различной длиной грани в получаемой конечно-элементной сетке. Такой подход позволяет сгущать сетку в местах интенсивного формообразования или обозначенных пользователем участках (рис. 3.3). В данном случае длины ребер имеют диапазон длин от 0,2 мм до 0,8 мм, а участки сгущения сетки всегда будут находиться в зоне контакта с инструментом. Таким образом, временной шаг одной итерации, с обеспечением всех условий, будет составлять $0,2 \text{ мм} / 1500 \text{ мм/с} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

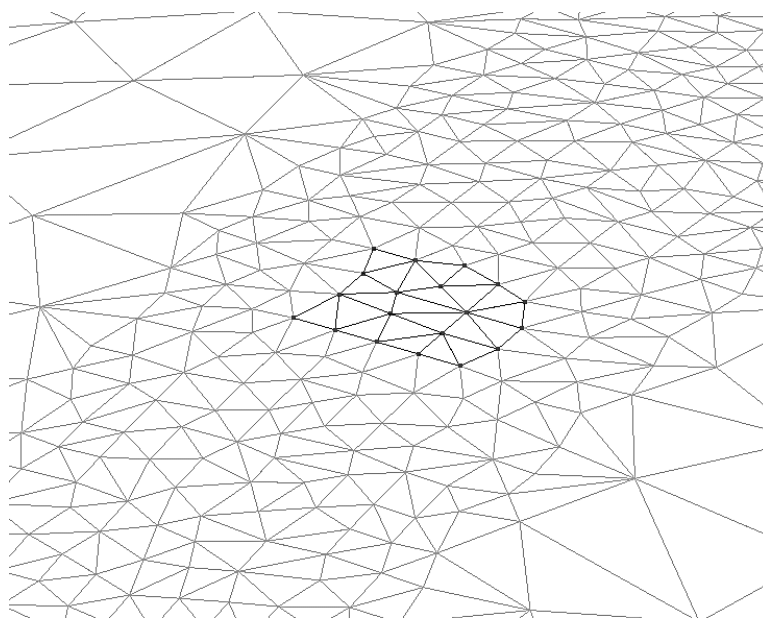


Рис. 3.3. Пятно контакта инструмента и заготовки в области сгущения сетки

В таком случае, при моделировании этапа накатывания от начала обработки до касания сферой боковой поверхности и, к примеру, по времени продлится 1 секунду, то процесс моделирования растянется на 7500 шагов. С учетом высокой плотности разбиения, процесс может катастрофически сильно растянуться, затратив несоразмерное с поставленными задачами машинное время.

Дополнительные проблемы создает траектория перемещения самой заготовки в инструментальной камере. Она поддается прогнозированию и состоит из участков движения по спирали, качения вдоль кромки камеры и при отрыве от кромки – качения по спирали большего начального радиуса. Но точному расчету может поддаваться только случай качения без деформирования самой сферы.

Выявленные особенности составления модели обработки, сложность описываемой заготовкой траектории движения в инструментальной камере и ряд требований решателя DEFORM-3D ограничивают возможности проведения расчетов по предложенной в патенте схеме обработки [53]. Дальнейшие усилия требуется приложить к видоизменению или серьезному упрощению первоначальной схемы обработки.

3.2. Пробные расчеты

Не смотря на то, что ранее уже были обговорены некоторые моменты, касательно первоначальной схемы деформирования сферы, стоит отдельно упомянуть этап, связанный с пробными расчетами. Проектирование принципиальной схемы обработки на основе реально существующего инструмента с последующим моделированием процесса с грубыми допущениями позволило получить начальное представление о поведении как реальной заготовки в инструментальной камере, так и выявить проблемные места взаимодействия конечно-элементных моделей между собой. Особое внимание при таком подходе уделялось величине разбиения объектов на конечные элементы для обеспечения необходимой производительности расчетов и исключения потери контакта заготовки с прижимающим инструментом (что наблюдалось в ходе нескольких расчетов с грубым разбиением заготовки на конечные элементы).

При переборе технологических режимов обработки, были получены результаты с потерей заготовкой сферической формы и получения овала конической формы. Такие явления были зафиксированы и при первоначальных экспериментах с реальными образцами и были связаны с выбором эксцентриситета между камерой и вращающимся прижимным инструментом.

Упрощенное моделирование дало картину распределения деформаций на поверхности заготовки, которое, при поэтапном воспроизведении, позволяет проследить траекторию контакта инструментальных плоскостей с поверхностью заготовки. След разогрева от трения на поверхностях инструментов указывает на перемещение заготовки в инструментальной камере, отображая траекторию перемещения самой сферы в камере.

Полученные начальные сведения о взаимосвязи равномерности распределения деформаций по поверхности заготовки совместно с назначаемыми технологическими режимами позволяет говорить об успешности выбранных граничных условий.

На данном этапе моделирования была выявлена важная закономерность, касающаяся равномерности распределения накопленных деформаций по поверхности сферической заготовки и ее формоизменения. В процессе обработки сфера соприкасается с боковой гранью инструментальной камеры, получая дополнительное вращение за счет трения. Таким образом, заготовка на первых этапах обработки, до момента касания кромки перемещается в камере по спирали, след деформации смещается на величину δ и заготовка теряет первоначальную форму правильной сферы, становясь более конусообразной. В момент касания, величина δ многократно увеличивается, вращение идет уже по двух осям. За счет этого останавливается конусообразование и сфера восстанавливает первоначальную форму. Таким образом, для повышения точности получаемой формы конечного изделия следует увеличить число контактов заготовки с боковой кромкой, скорректировав для этого технологический процесс обработки.

Большой практический интерес представляет процесс накопления деформаций материальной точкой поверхности заготовки. Из экспериментального накатывания следует, что поверхность после обработки сохраняет сферическую форму. Таким образом, было принято решение попытаться смоделировать процесс накатывания заготовки на небольшой угол, попытаться восстановить геометрию заготовки с сохранением накопленных за предыдущую операцию деформаций и повторить процесс упрочнения.

В программном комплексе DEFORM-3D предусмотрена возможность извлечения напряженно-деформированного состояния заготовки с ее последующей экстраполяцией в другом объекте. Исходя из такой возможности, было предложено накатать сферу по прямолинейной траектории на небольшой угол и получить распределение деформаций во всем объеме заготовки. В дальнейшем, геометрию деформированной модели

планировалось заменить на первоначальную, экстраполировав в нее полученные значения.

Попытки реализовать предложенную схему не увенчались успехом. Основной проблемой во всем процессе был момент с экстраполированием. Пре процессор DEFORM-3D ни разу не смог перенести значения в новую конечно-элементную модель.

Кроме прикладного значения, пробный этап моделирования позволил выявить оптимальную величину разбиения заготовки, подходящих для исключения проскальзывания инструмента и временных ограничений. Выявил начальные значения разогрева поверхности заготовки. Позволил выявить зависимость разбиения геометрии объекта на конечные элементы при различных параметрах полигональной точности.

Дальнейшее изучение процесса накатывания предполагает создания упрощенной схемы накатывания для определения зависимости изменения НДС поверхностного слоя от механических свойств материалов и технологических режимов их обработки.

Вторым направлением исследования является анализ перемещения заготовки в инструментальной камере. Требуется исследовать равномерность распределения деформаций по поверхности заготовки, степень их возрастания при каждом последующем деформировании участка поверхности. Выявить закономерности перемещения заготовки в камере в зависимости от условий обработки и геометрии инструмента.

3.3. Моделирование накатывания сферы по прямолинейной траектории

Предположим, что любая точка в поверхностном слое получает кратную величину деформаций за один цикл взаимодействия с инструментом и величина эта на протяжении всей обработки остается постоянной. Тогда процесс обработки можно заменить моделью накатывания сферы по прямолинейно траектории. Расстояния, равного половине длины окружности заготовки будет вполне достаточно для того, чтобы получить участки с уже деформированным слоем и участки в контактной области.

Одним из основных допущений, принимаемых для данной схемы накатывания, является условие равномерности распределения деформаций исходного процесса, обусловленное статистическими закономерностями обработки.

В таком случае, каждая из половин получившегося следа деформации представляет полный набор данных о деформированном состоянии, как в зоне контакта там и за ним.

Упрощенная схема характеризуется не только прямолинейным движением инструментов относительно друг друга. Для упрощения расчета движения инструментов решателем программного комплекса принято решение придать поступательное движение нижнему инструменту, а верхнему оставить лишь создание усилия прижима (рис. 3.4). Таким образом, исключается возможность возникновения вектора перемещения верхнего инструмента не перпендикулярного к плоскости площадки контакта с заготовкой.

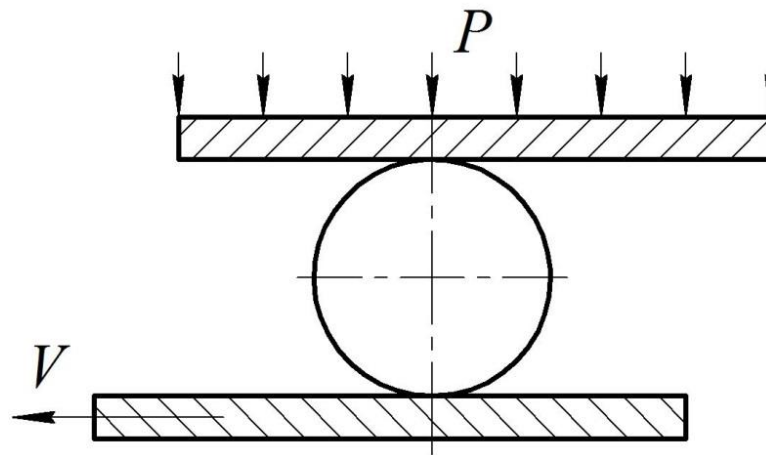


Рис. 3.4. Схема процесса накатывания по прямолинейной траектории

Моделирование накатывания поверхности сферы по прямолинейной траектории с точки зрения анализа механики процесса деформирования заготовки дает представление о первоначальном накоплении деформаций поверхностью сферы. В большинстве случаев, полученные моделированием значения позволяют судить о последующем упрочнении поверхности, т.к. сама технология обработки подразумевает накопительный характер деформирования поверхности.

Стоит отметить, что приведены результаты расчетов без имитации применения охлаждающих сред, таких как вода или жидкий азот. Для всех материалов условно принято охлаждение воздушной средой (т.е. приобретенное заготовкой и инструментом тепло излучается во внешнюю среду). Для удобства сравнения, конечно-элементная модель процесса оставалась одинаковой для всех типов исследуемых материалов.

Характерная особенность реализации подобной схемы моделирования – применение областей уплотнения конечно-элементной сетки заготовки. Так как заготовка движется с высокой скоростью относительно инструмента и кроме того испытывает сжатие по оси, перпендикулярной вектору перемещения, в точках контакта заготовки и инструмента происходит интенсивное пластическое деформирование. С учетом того, что трение титана и стали имеет достаточно высокий коэффициент, то при такой схеме деформирования имеет место возникновение наплыва материала заготовки

на плоскости инструмента, создавая основной фронт деформационного упрочнения. Если учесть, что точность результатов напрямую зависит от величины разбиения тела заготовки на конечные элементы, а размеры пятна контакта инструментов с уже начавшей деформироваться сферой, очень малы, то требуется насытить область их соприкосновения. Кроме того, область насыщения желательно создавать не локальной. В данном случае локальной подразумевается область, которая захватывает только пространство около точек касания сферой инструмента и перемещаются относительно инструмента по направлению вектора перемещения самой сферы и с ее линейной скоростью. В таком случае существует вероятность искажения результатов моделирования, т.к. насыщение конечно-элементной сетки происходит только в этой небольшой области. При выходе уже деформированного участка из области насыщения будет идти заполнение узлов грубой конечно-элементной сетки значениями, полученными в насыщенной конечными элементами области.

Более правильным, было бы создание области насыщения, расположенной в плоскости пересечения оси сжатия и оси линейного перемещения заготовки, а ширину принять равной ширине контакта заготовки и инструмента, достигаемой при подобной обработке. Длина этой области должна быть достаточной для того, чтобы заготовка располагалась в ее пределах на протяжении одного оборота.

Размер конечно-элементной сетки внутри окна плотности (рис. 3.5) удобнее всего назначать исходя из соотношения один к трем. В таком случае, соотношение прироста точности получаемых значений к приросту затраченного на вычисления машинного времени для данной операции будет оптимальным.

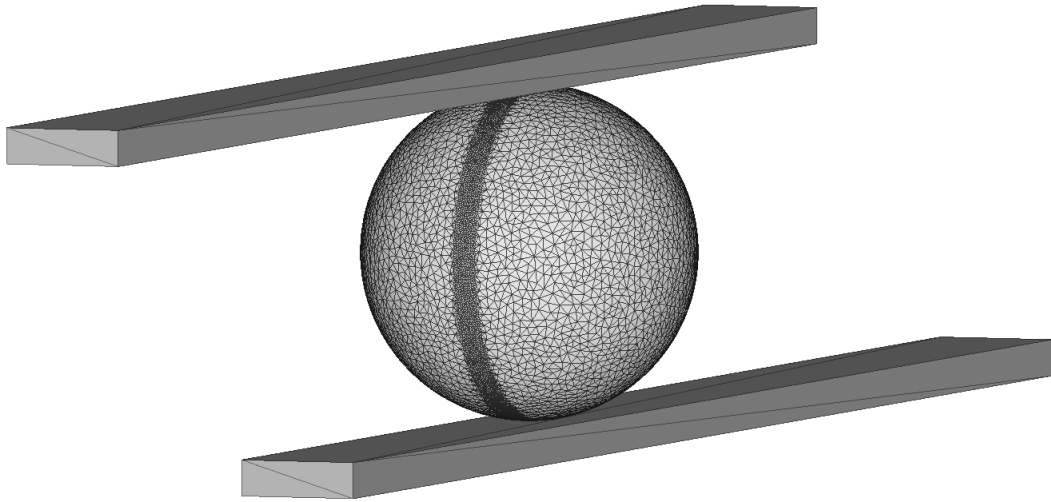


Рис. 3.5. Область повышенной плотности элементов, применяемая при моделировании.

Для исследования закономерностей упрочнения материалов по предложенной схеме был проведен ряд расчетов. Для этого были выбраны несколько материалов. VT1-0 был выбран на основании дальнейшего его применения в производстве эндопротеза тазобедренного сустава человека. Также были выделены титановые сплавы VT1-2 и VT6, а также Сталь 20. Результаты представлены на рисунках 3.8 – 3.11.

При моделировании перемещение заготовки и инструментов соответствовали предложенной экспериментальной схеме (рис. 3.6):

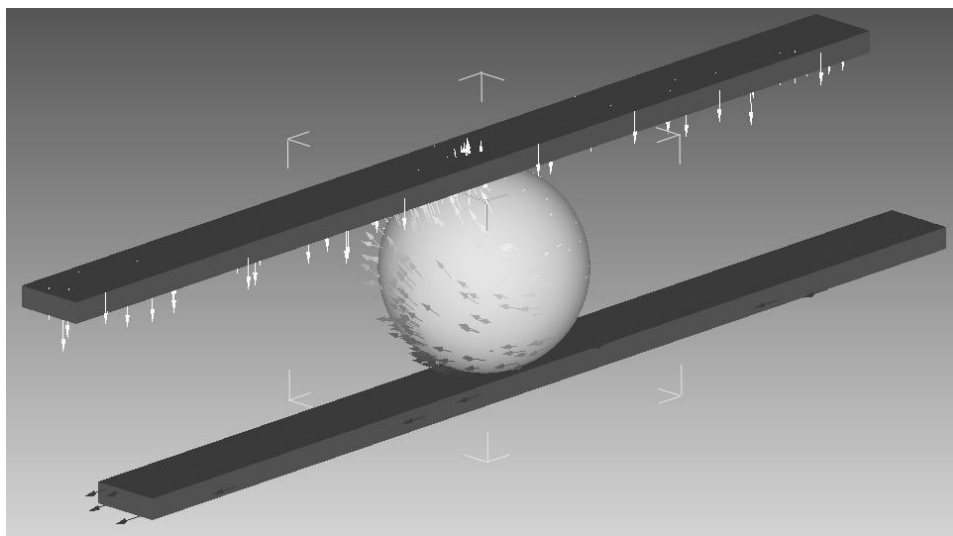


Рис. 3.6. Векторы перемещения объектов при моделировании накатывания по прямолинейной траектории.

Основной задачей моделирования являлось получение распределения деформаций в поверхностном слое при различных усилиях прижима заготовки для выбранных материалов. В ходе всех расчетов модель заготовки совершила четверть оборота (рис. 3.7), что является достаточным, т.к. первичное смятие поверхности и выход на установившийся процесс деформирования располагаются именно на этом участке траектории.

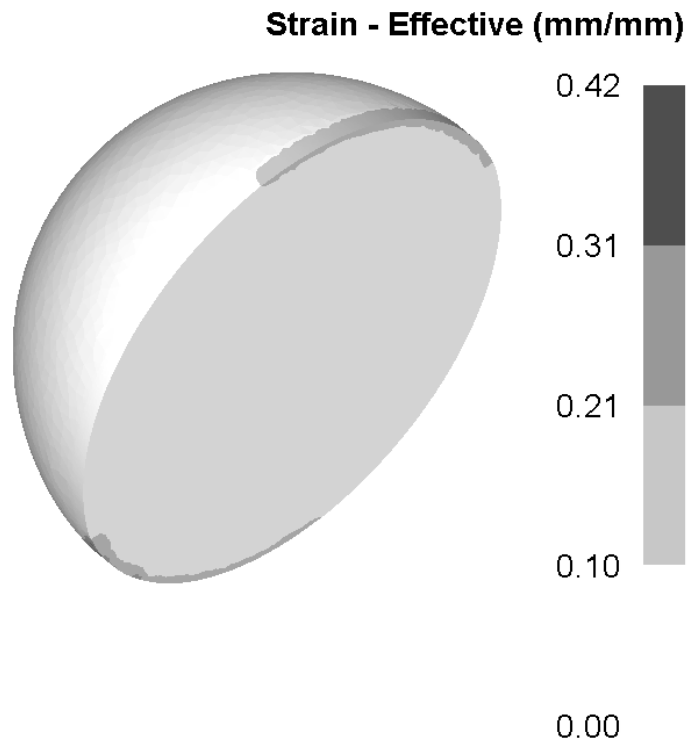


Рис. 3.7. Деформации, накопленные при накатывании по прямолинейно траектории (продольный разрез модели)

Дальнейшие расчеты предоставили бы аналогичные данные, но на последующих участках траектории взаимодействия. Наложение следов деформационного упрочнения от верхнего и нижнего инструмента, возможного при дальнейшем моделировании, привело бы к смене схемы деформирования, т.к. замкнувшийся след деформационного упрочнения имел бы цилиндрическую форму.

Переход от сферической поверхности деформирующегося тела к цилиндрической недопустим, так как из экспериментов известно, что

заготовка при обработке сохраняет свою геометрию за счет многократного деформирования всей поверхности по сложной траектории.

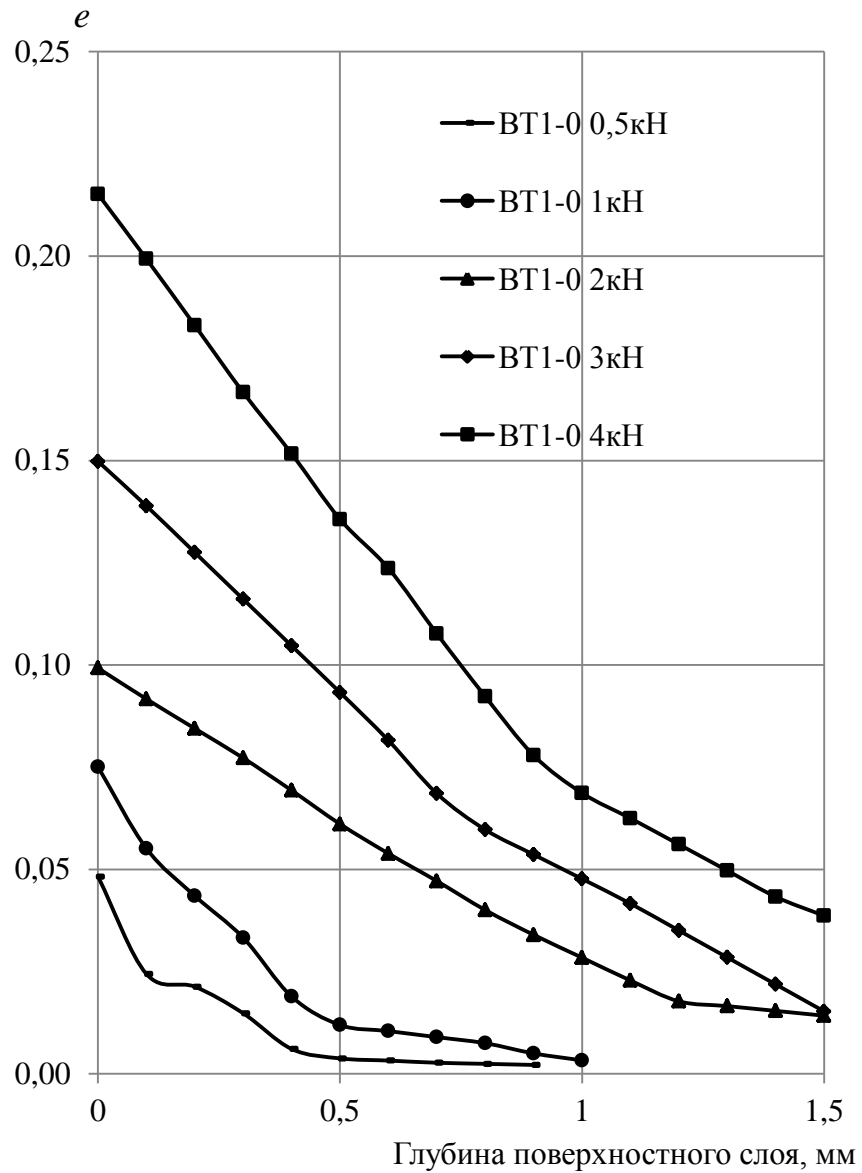


Рис. 3.8. Распределение деформаций по глубине поверхности при различных усилиях прижима для BT1-0

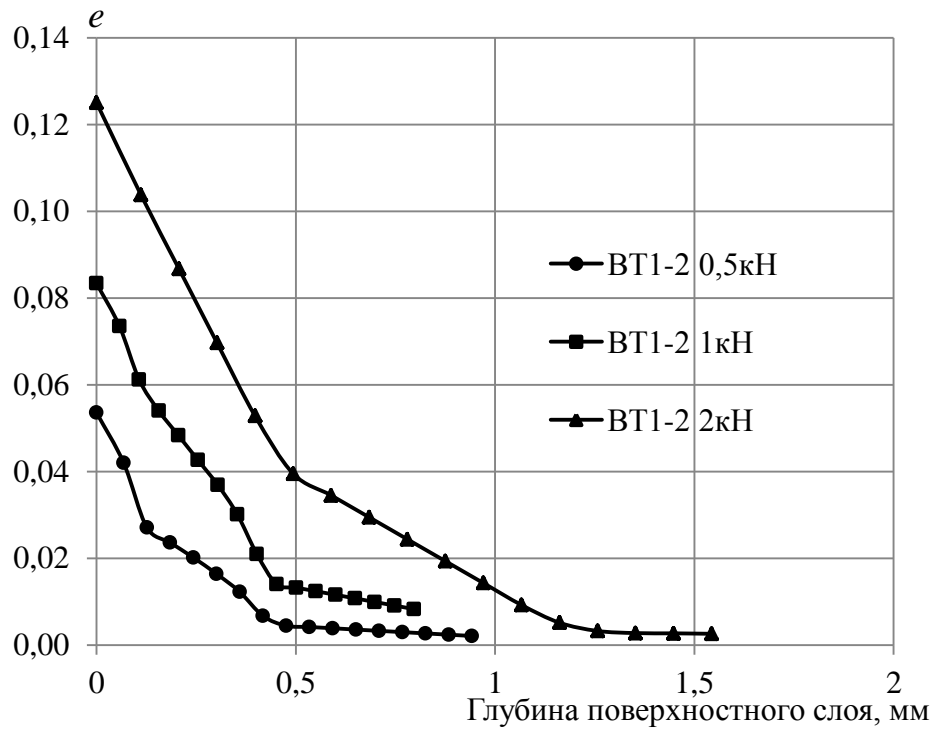


Рис. 3.9. Распределение деформаций по глубине поверхности при различных усилиях прижима для ВТ1-2

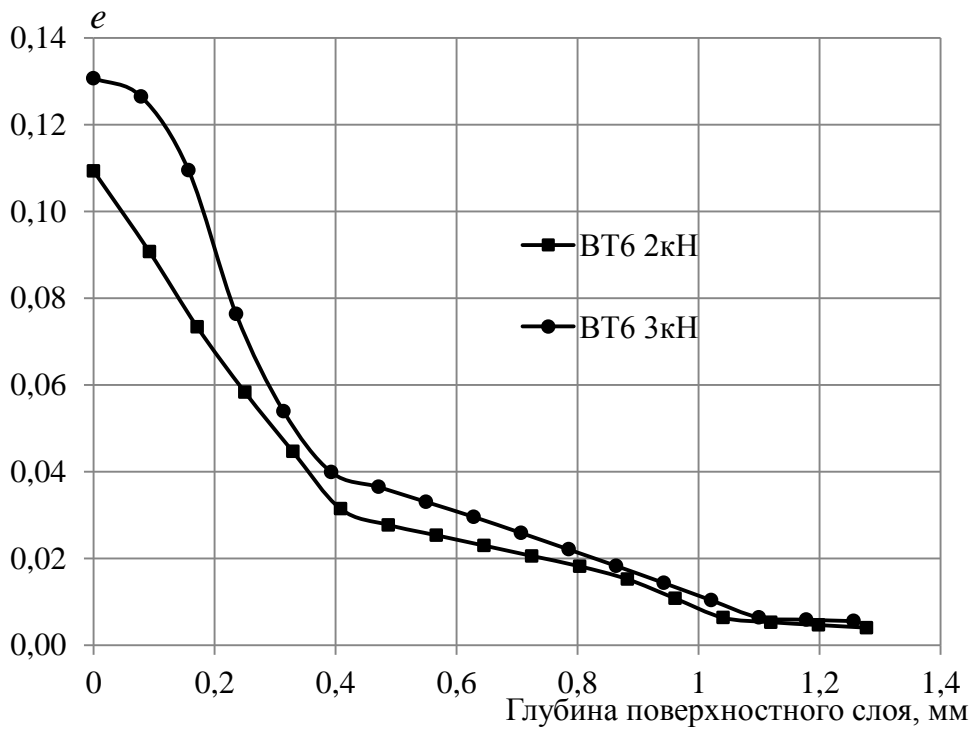


Рис. 3.10. Распределение деформаций по глубине поверхности при различных усилиях прижима для ВТ6

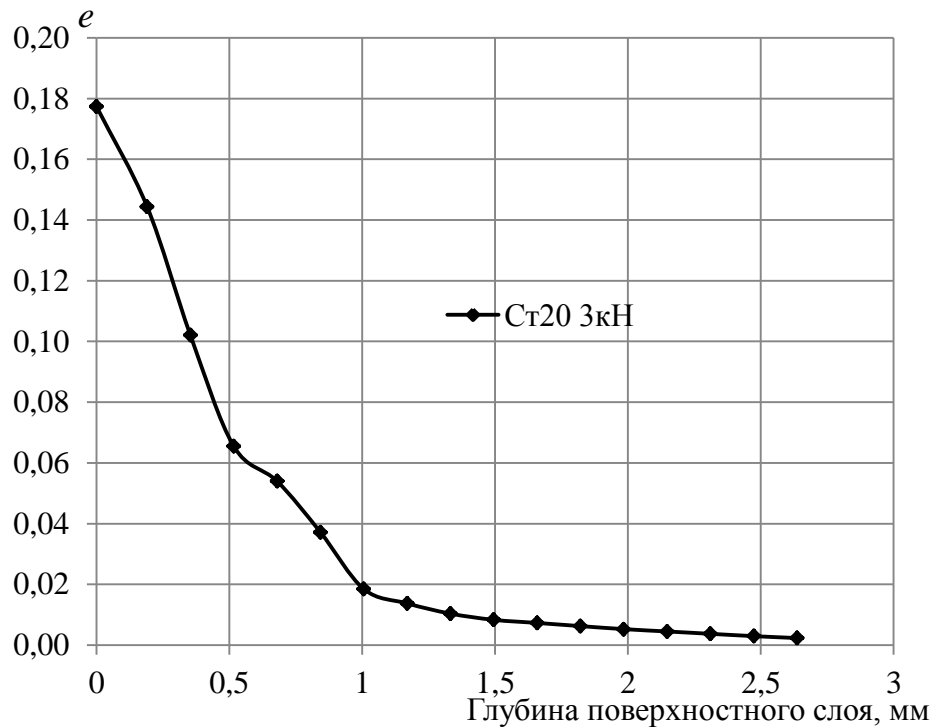


Рис. 3.11. Распределение деформаций по глубине поверхности при различных усилиях прижима для Ст.20

Как видно, вблизи поверхности накопленные деформации при различных усилиях практически пропорциональны соответствующему усилию прижима P (рис. 3.12.). Примем коэффициент пропорциональности β , который для ВТ1-0 будет равен $0,053 \text{ кН}^{-1}$, для ВТ1-2 – $0,069 \text{ кН}^{-1}$, а для ВТ6 – $0,047 \text{ кН}^{-1}$. На основании этого предполагается технологическая инженерная формула для расчета максимальной накопленной деформации на поверхности заготовки при N циклах деформирования [54]:

$$\Sigma e_i = \sum_{j=1}^M \beta N_j P_j, \quad (3.1)$$

где N_j - число циклов деформирования с силой прижима P_j .

Следует отметить, что с увеличением усилия распределение деформаций по глубине становится менее равномерным. На глубине поверхностного слоя более 1,8 мм деформации мало зависят от усилия

прижима, а на глубине до 0,8 мм наблюдаются значительные различия, как в степени деформирования, так и в характере ее распределении.

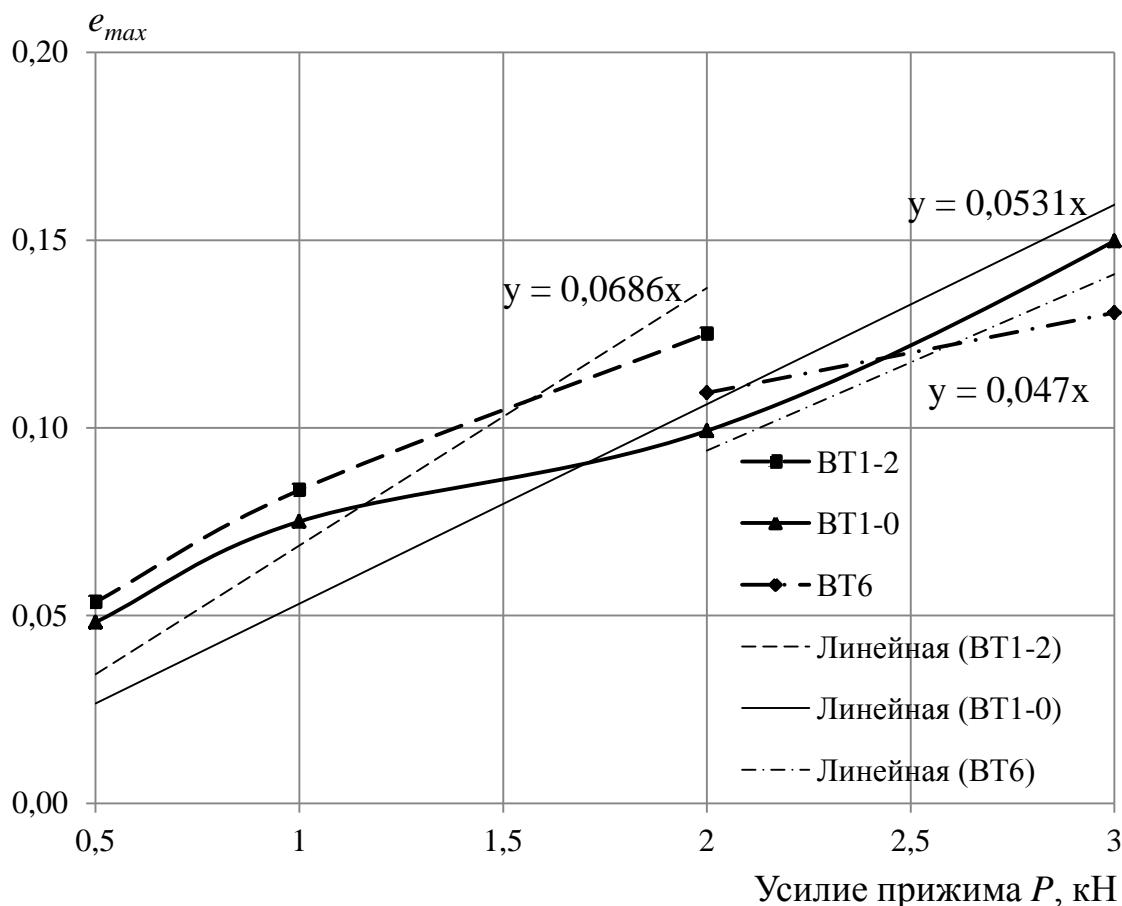


Рис. 3.12. Зависимость максимальных деформаций от усилия прижима

Таким образом, исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что для достижения требуемого уровня упрочнения поверхности не имеет смысла использовать большие усилия. При накатывании большие усилия прижима направлены в основном на увеличение глубины деформирования.

В нашем случае, упрочнение поверхности должно обеспечить повышение твердости в поверхностном слое и произвести модификацию структуры для успешного азотирования. Модификации поверхности в пределах 1 мм достаточно для обеспечения необходимого состояния поверхностного слоя заготовки.

3.4. Моделирование исходной схемы накатывания сферической заготовки

Одним из наиболее интересных с практической точки зрения моментов обработки является касание заготовки боковой кромки камеры инструмента и движение вдоль нее до момента отрыва от этой кромки. Предварительное моделирование показало, что именно этот этап обработки обеспечивает сохранение сферической формы заготовки. Достигается такой эффект появлением дополнительного контакта заготовки с инструментом не находящимся в одной плоскости с двумя основными. Таким образом, заготовка приобретает дополнительный момент вращения, что сильно искажает первоначальную траекторию взаимодействия плоскостей инструментов с поверхностью заготовки. Взаимодействуя подобным образом, сфера, успевшая за время движения по первоначальной траектории приобрести конусообразную форму, за счет резкого изменения направления, в котором распространяется след деформации в сторону вытянувшихся участков, восстанавливает первоначальную форму.

Важнейшим для этого этапа обработки параметром будет являться коэффициент трения между заготовкой и боковой кромкой камеры. Он оказывает сильное влияние на процесс раскручивания заготовки. Для изменения данного параметра допускается использовать вставки из материалов с различными трибологическими свойствами, что позволяет, не меняя основных технологических параметров процесса добиваться оптимального изменения угла, на который последовательно сдвигается траектория качения сферы во время обработки.

Процесс перемещения заготовки является наиболее важным с точки зрения равномерности обработки ее поверхности. Для более детального изучения взаимодействия инструментов с заготовкой был смоделирован процесс накатывания в DEFORM-3D сферы из ВТ1-0 по исходной модели с усилием прижима равным 3 кН и скоростью 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 [55]; коэффициент теплопередачи – 18,8 Вт/(м·К).

Для начала была подготовлена геометрия объектов, согласно оригинальной схеме обработки. Единственным изменением было разделение камеры на два объекта – плоский диск, являющийся дном камеры и цилиндрическое кольцо – являющееся боковой стенкой камеры. Такое разделение обеспечивает по одному контакту между инструментами и заготовкой, позволяя их варьировать в зависимости от применяемых материалов

Заготовка располагалась в инструментальной камере практически вплотную с ее боковой стенкой. Причем в том месте, где расстояние между осью вращения инструмента и гранью цилиндрической стенки камеры минимально. В таком случае, в начале движения заготовка под действием вращающегося верхнего инструмента должна начать катиться, сближаясь с боковой гранью. После появления дополнительного контакта заготовка начинает раскручиваться в сторону боковой грани (рис. 3.13).

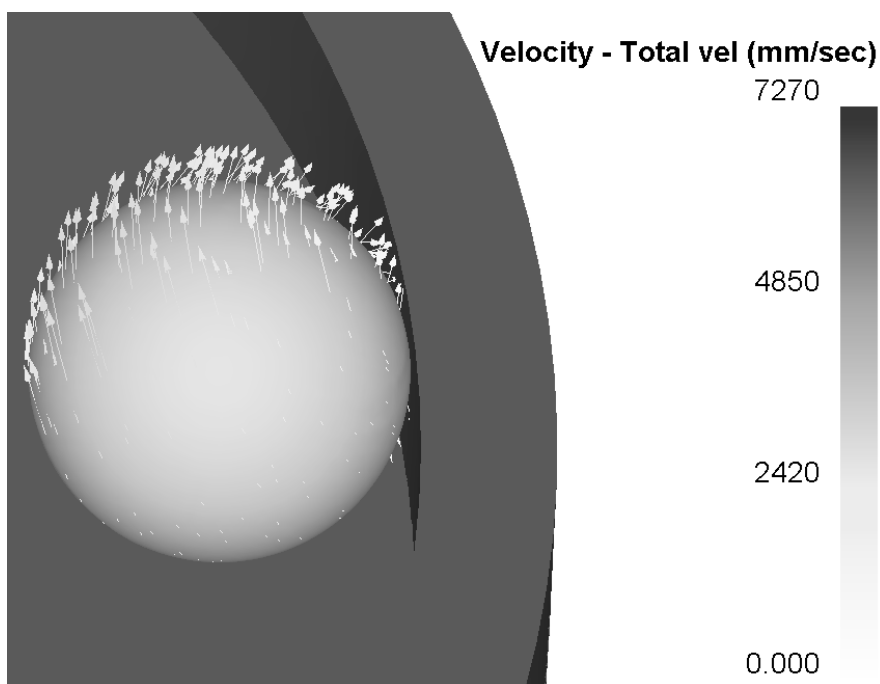


Рис. 3.13. Направление движения узлов модели

Под действием дополнительно закручивающего контакта траектория следа деформационного упрочнения приобретает кольцеобразный вид (рис. 3.14).

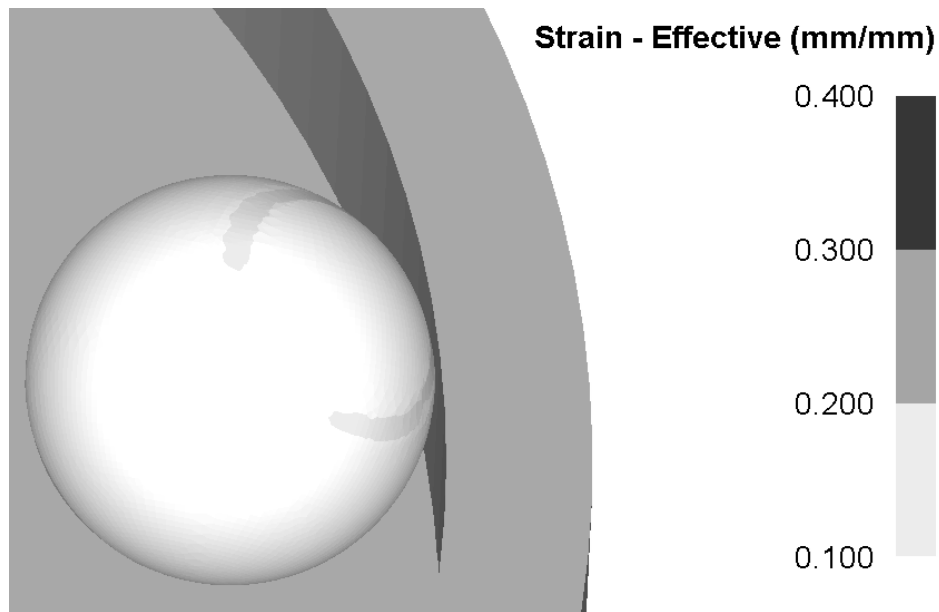


Рис. 3.14. След деформационного упрочнения (заготовка касается боковой стенки камеры)

Движение вдоль кромки является не постоянным, поэтому в определённый момент заготовка теряет контакт с боковой стенкой и характер распространения деформационного следа меняется (рис. 3.15).

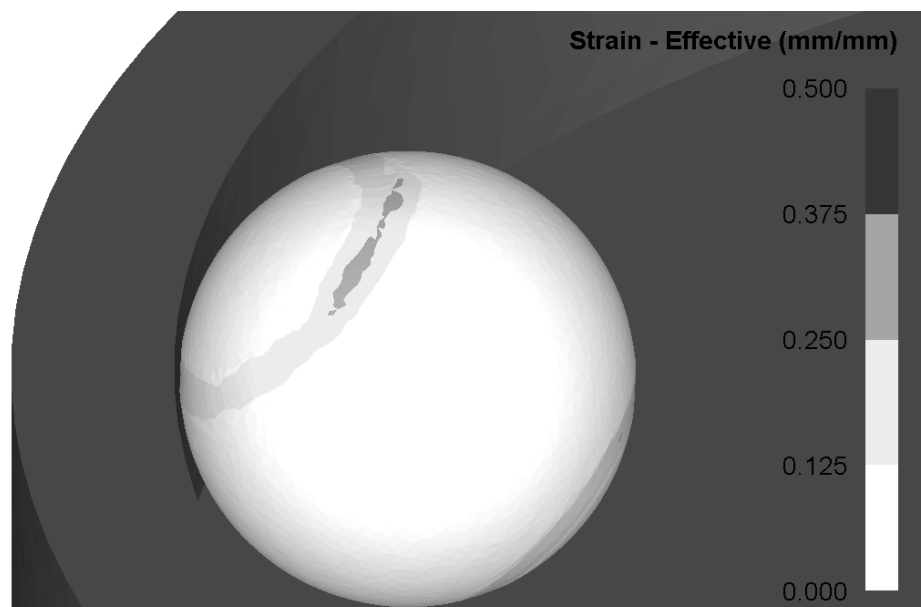


Рис. 3.15. Изменение направления деформационного упрочнения

Дальнейшее движение заготовки в камере без дополнительного контакта происходит по окружности определенного радиуса. Причем след деформационного упрочнения охватывает поверхность заготовки кольцом того же диаметра, что и сама сфера. Распространение следа с каждым оборотом сферы вокруг своей оси немного смещается относительно предыдущего (рис. 3.16).

Из рис. 3.16 видно, что первоначальный кольцеобразный участок траектории малого радиуса перешел в кольцо, охватывающее поверхность сферы по наибольшему радиусу. До момента следующего касания с боковой кромкой траектория следа будет незначительно смещаться относительно предыдущего витка.

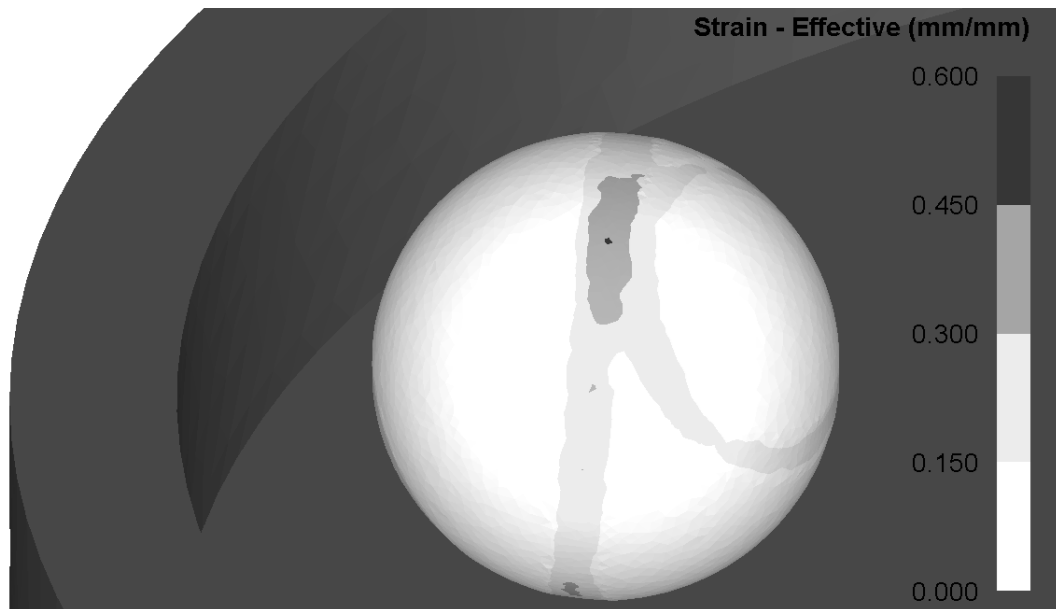


Рис. 3.16. Смена направления распределения деформаций

При возвращении контакта с боковой гранью камеры будет сильное изменение направления и возврат к первоначальной траектории (рис. 3.17).

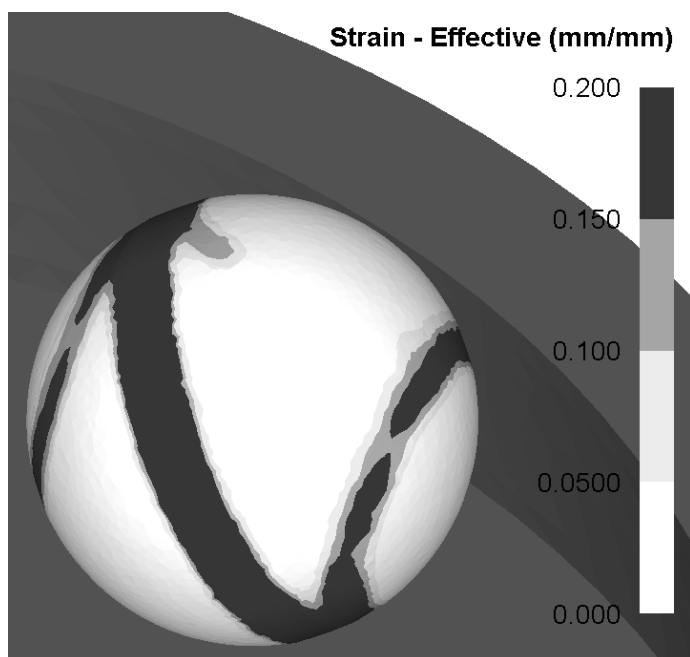


Рис. 3.17. Распространение деформаций при повторном контакте с боковой кромкой (деформации ограничены значением 0,2).

Градация шкалы деформаций в небольшом пределе вызвана большими значениями деформаций на относительно небольших участках, где было многократное деформирование поверхности заготовки. Распределение деформаций в поверхностном слое на том же участке, но с полной шкалой представлено на рис. 3.18.

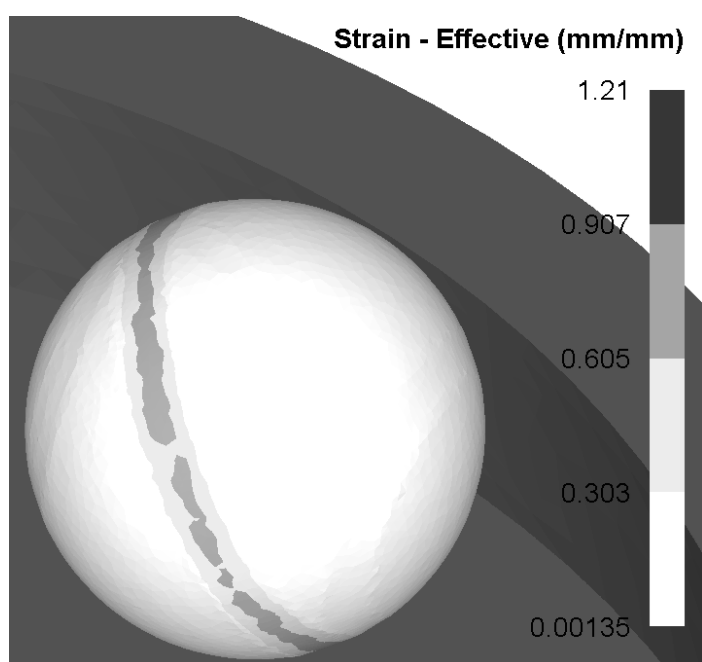


Рис. 3.18. Распространение деформаций при повторном контакте с боковой кромкой.

Таким образом, в процессе деформирования заготовки по схеме накатывания плоскими инструментами были определены два участка с различным характером распространения деформаций по поверхностному слою.

Общий вид деформированной поверхности сферы после 0,6 секунд обработки, смоделированных в DEFORM-3D по исходной схеме представлены ниже (рис. 3.19).

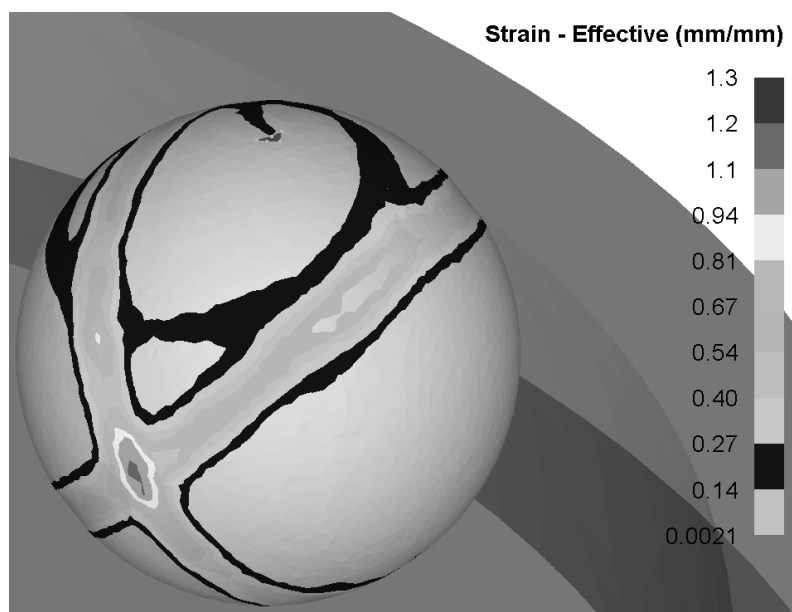


Рис. 3.19. Деформации, накопленные поверхностью заготовки, за 0,6 сек обработки.

Моделирование накатывания производилось с учетом температурных особенностей процесса. Температура всех объектов в начале моделирования составляла 20 °С. На заготовке траекторию взаимодействия с инструментами можно проследить по распределению деформаций по поверхности. Траекторию перемещения заготовки можно получить исходя из нагрева поверхности камеры. К примеру, при движении вдоль цилиндрической кромки камеры был получен нагрев поверхности камеры (рис. 3.20).

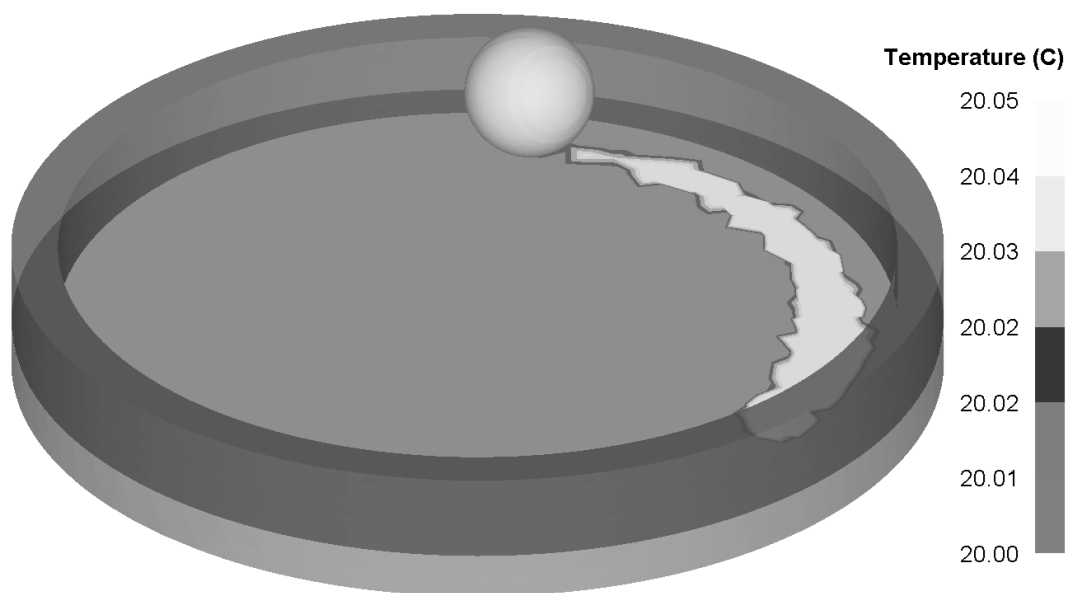


Рис. 3.20. Нагрев поверхности камеры при накатывании

На момент окончания моделирования (0,6 сек реальной обработки) разогретая поверхность камеры приняла форму окружности (рис. 3.21).

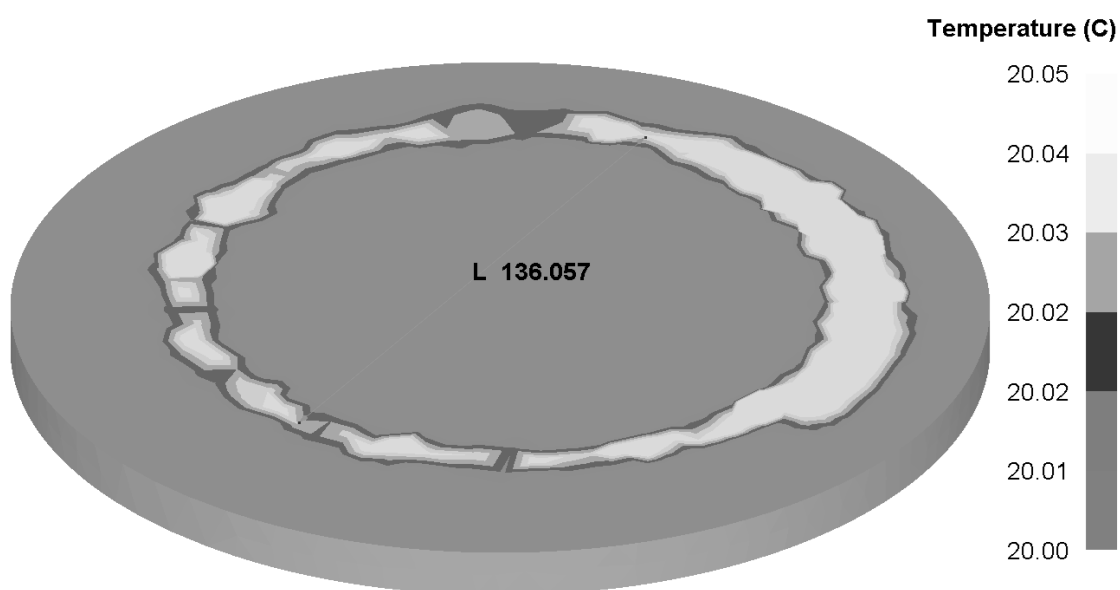


Рис. 3.21. Нагрев поверхности камеры при взаимодействии с заготовкой

Диаметр окружности, по которой перемещается заготовка, составил 136 мм при диаметре внутренней грани стенки камеры в 180 мм и эксцентриситете, равном 8 мм между осью вращения инструмента и центром камеры (рис. 3.22).

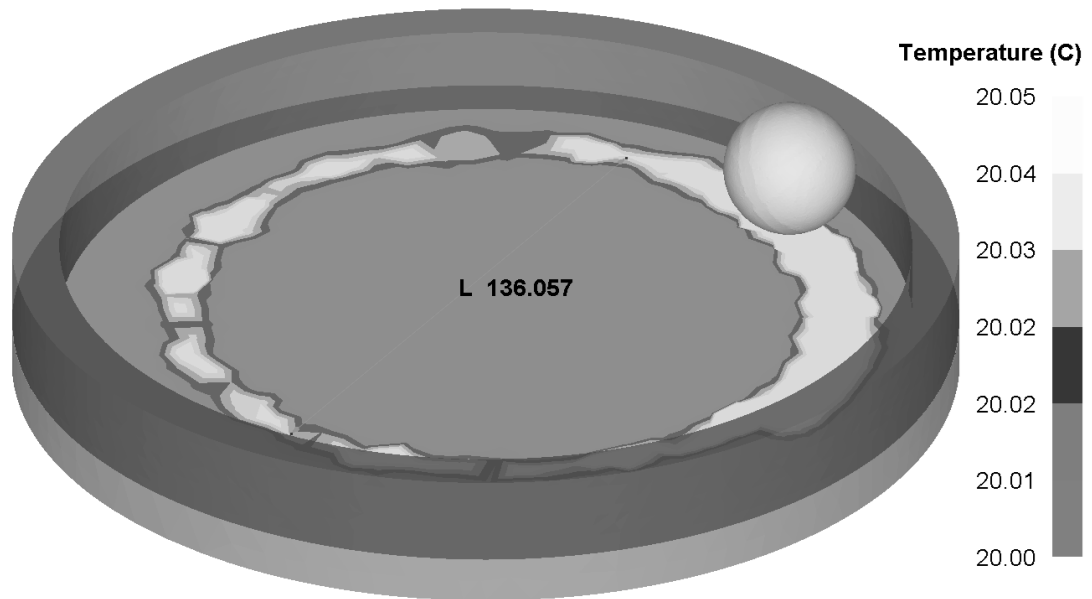


Рис. 3.22. Температурный след взаимодействия заготовки с дном камеры

В свою очередь, поверхность накатываемой заготовки нагрелась в большей степени (рис. 3.23).

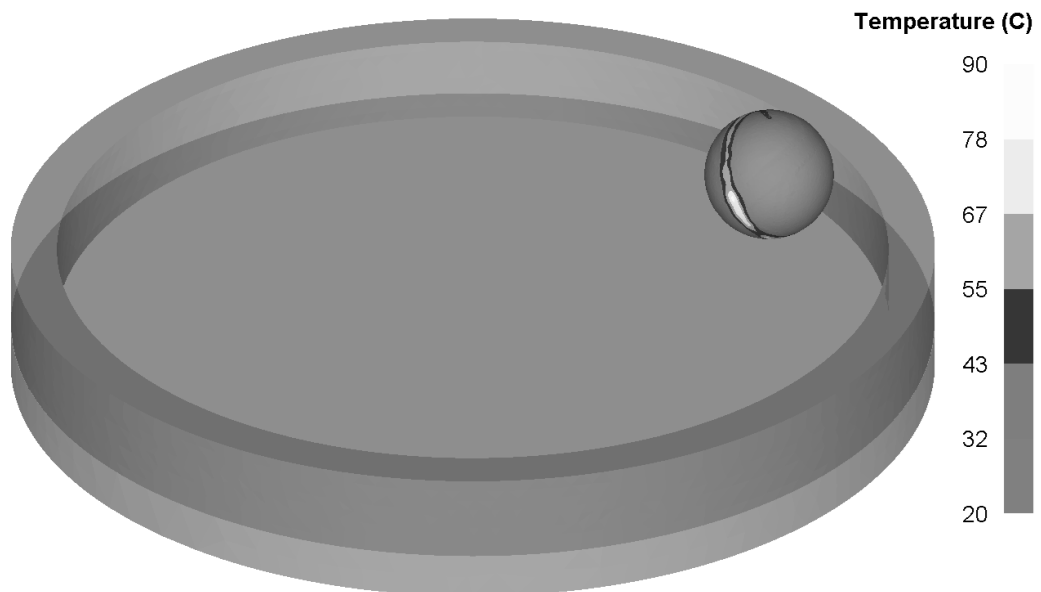


Рис. 3.23. Нагрев поверхности заготовки

Последним этапом анализа данных, полученных после моделирования процесса, стало исследование напряженно-деформированного состояния отдельно выбранной точки поверхности при помощи функции Point Tracking. Так как на начальном этапе исследования закономерностей накатывания

предполагалась кратность обработки материальной точки, то полученные значения деформаций могли бы это подтвердить или опровергнуть.

На рис. 3.24 представлены напряжения, возникающие в выбранной точке поверхности при попадании этой точки в зону пластической деформации, вызванной контактом с инструментом. На рис. 3.25 соответственно представлен график накопления деформаций после каждого взаимодействия. В дополнение приведен график разогрева поверхности заготовки в исследуемой точке (рис. 3.26).

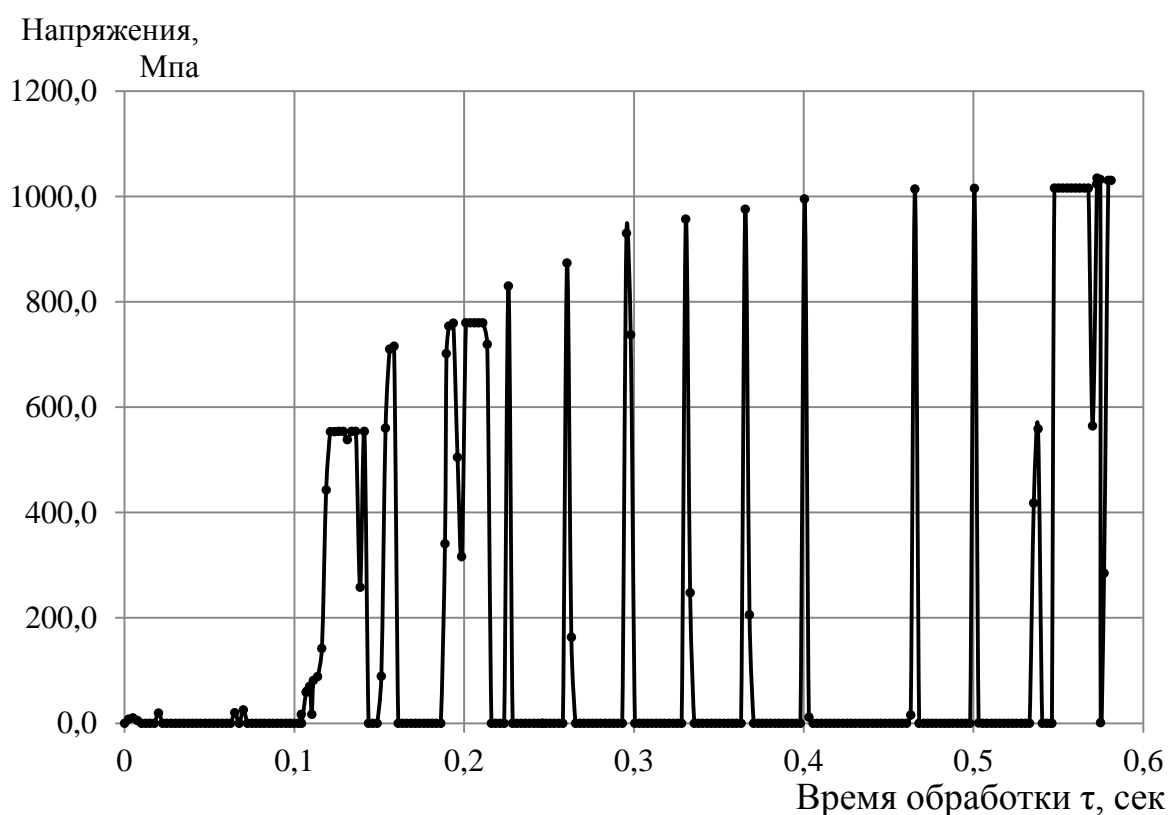


Рис. 3.24. Напряжения при контакте с инструментом

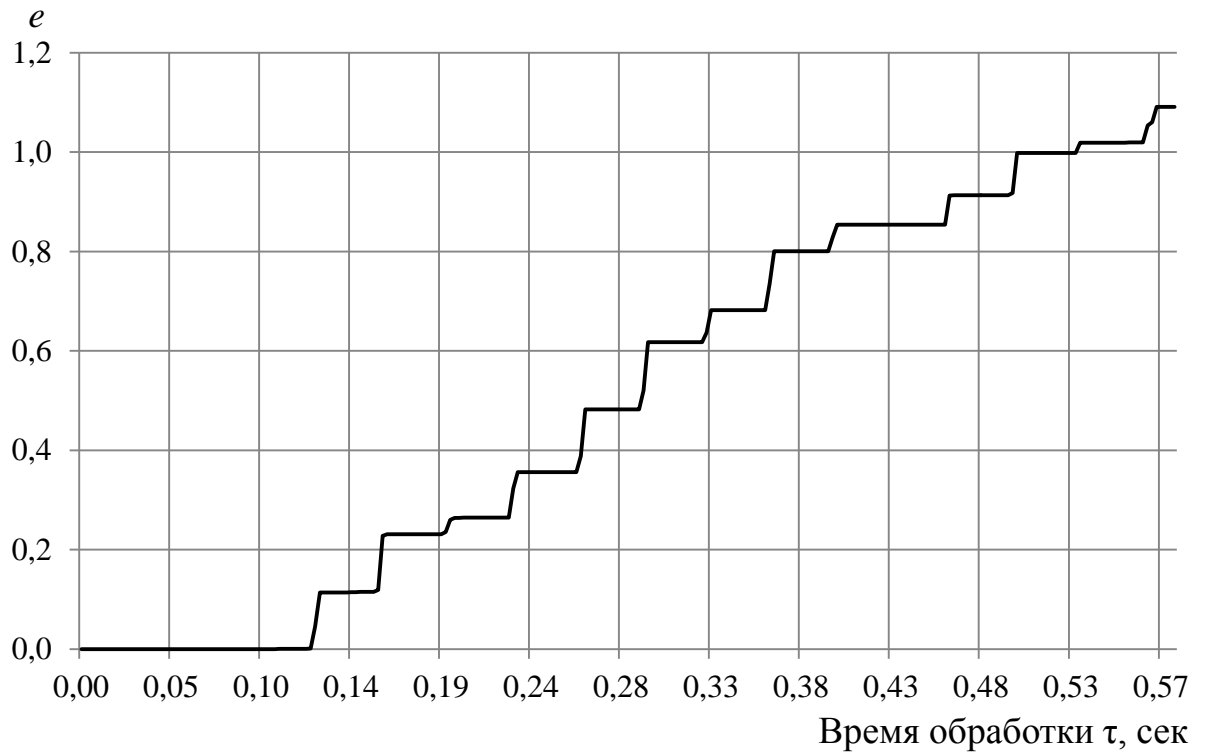


Рис. 3.25. График приращения накопленных деформаций точкой поверхности

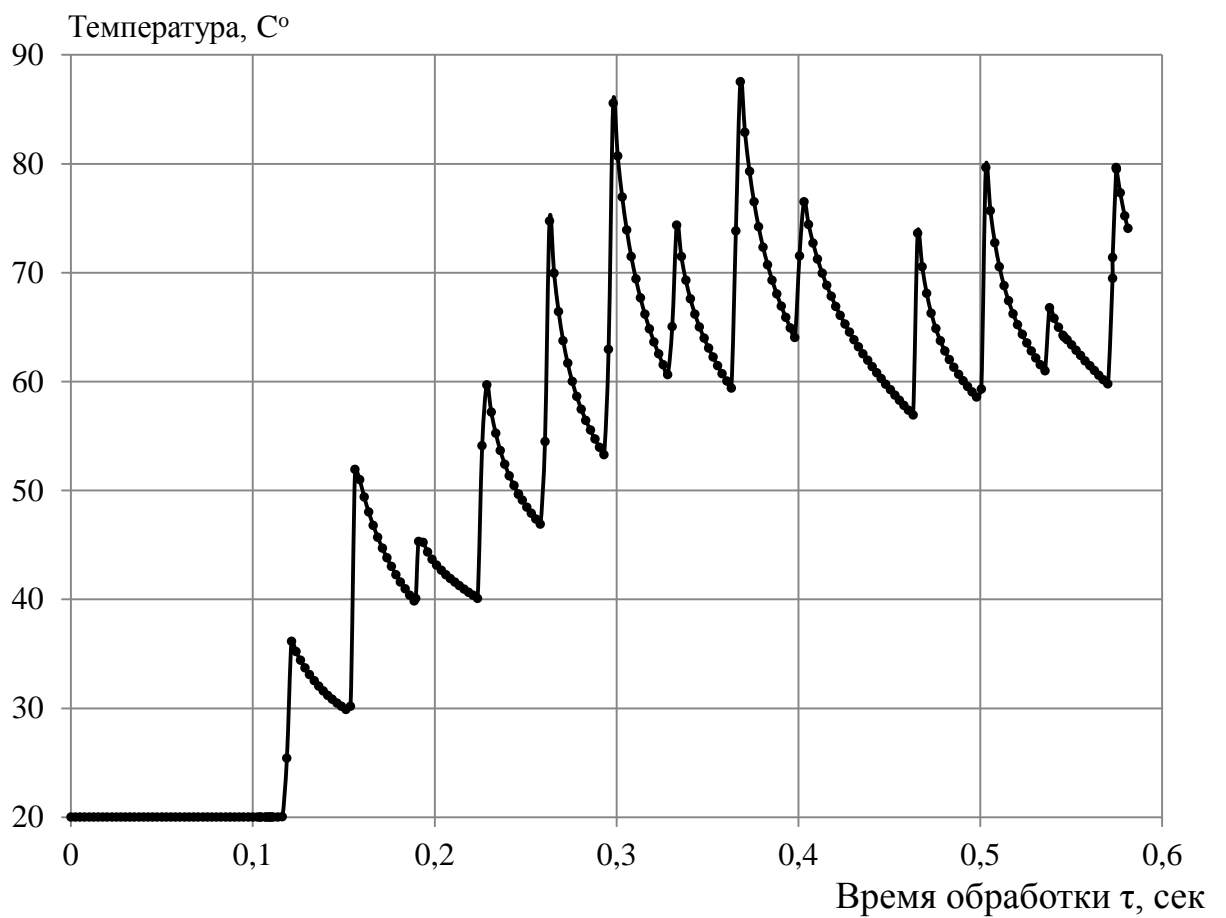


Рис. 3.26. Нагрев поверхности заготовки при накатывании

Полученные данные свидетельствуют о ступенчатом характере накопления деформаций в отдельно взятой точке поверхности. Деформирование этой точки может происходить как непосредственно в пределах пятна контакта заготовки и инструмента, так и за его пределами. Это вызвано разницей между шириной контакта и шириной пластической области. Значения накопленных деформаций при каждом цикле взаимодействия возрастают на некую среднюю величину, что видно из графика рис. 3.25.

По результатам компьютерного моделирования установлено, что заготовка при контакте с инструментом без должного отвода тепла достаточно быстро и сильно нагревается (рис. 3.26). Следует иметь в виду, что при сильном нагреве материала заготовки в контактной зоне может начаться процесс рекристаллизации, который снизит достигнутый положительный эффект деформационного упрочнения и дробления зерен. Поскольку титан обладает низкой теплопроводностью, это явление нужно учитывать для грамотного проведения технологической операции накатывания.

3.5. Выводы

1. Сформулированы основные этапы подготовки данных при моделировании накатывания в программном комплексе DEFORM-3D, обеспечивающие необходимую точность получаемых данных при оптимальных временных затратах.

2. Проведены пробные расчеты, в ходе которых выявлены основные условия обеспечения сходимости решения при моделировании процесса накатывания. Установлены дополнительные требования к конечно-элементной модели, позволяющие избежать проскальзывания инструмента и потери контакта с заготовкой.

3. Реализована методика исследования накопления деформаций поверхностью сферической заготовки, перемещающейся по прямолинейной траектории. Полученные распределения деформаций по глубине слоя позволили установить закономерности изменения максимальных деформаций, накопленных за один цикл обработки поверхностью заготовки, от применяемого технологического усилия прижима для исследуемых материалов.

4. Разработана конечно-элементная модель стохастического процесса накопления деформаций поверхностью сферы, обеспечивающая ее переменный контакт с цилиндрической гранью инструментальной камеры. Анализ полученных с ее помощью результатов выявил ступенчатый характер накопления деформаций материальной точкой поверхности, а также основные закономерности кинематики движения заготовки в инструментальной камере.

ГЛАВА 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ ПРИ НАКАТЫВАНИИ

Для исследования закономерностей механизма ступенчатого упрочнения целесообразно сочетать экспериментальные методы исследования с теоретическим моделированием с помощью метода конечных элементов. Примем 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; отметим, что такой подход нашел экспериментальное подтверждение для многих упрочняющих процессов ППД [56], [57].

4.1. Определение значений накопленных деформаций материальной точкой поверхности заготовки.

Для учета статистических закономерностей процесса пластического деформирования поверхностного слоя рассмотрим следующую расчетную схему.



Рис. 4.1. Схема пластической области

Эксперименты и расчеты с помощью метода конечных элементов показывают, что ширина пластического следа $t_{пл}$ на поверхности больше ширины области непосредственного контакта t_k (рис. 4.1.)

Рассмотрим случай, когда величина радиального смятия заготовки Δ в процессе накатывания остается величиной постоянной. Из принятого выше принципа суперпозиции следует, что форма пластической области и распределение в ней приращения интенсивности накопленных деформаций (за каждый цикл деформирования) остаются неизменными, несмотря на накапливание деформированного упрочнения в материале заготовки.

Тогда приращение накопленной пластической деформации Δe_i в материальной точке M с координатами x и h за один цикл деформирования является функцией этих двух координат (при заданной величине смятия Δ):

$$\Delta e_i = \Delta e_i \cdot (x, h). \quad (4.1)$$

Предположим, что экспериментально или теоретически такая зависимость $\Delta e_i(x, h)$ установлена. Для наглядности представим ее для каждой фиксированной глубины слоя h в виде графика $\Delta e_i \cdot (x)$, рис. 4.2.

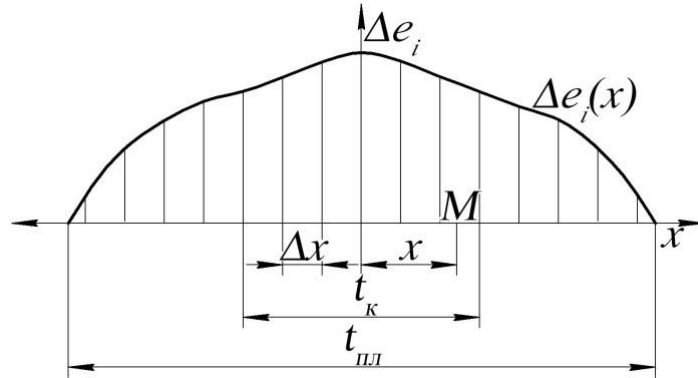


Рис. 4.2. График изменения приращения накопленной деформации Δe_i для заданной глубины слоя h

В действительности по отношению к фиксированной материальной точке M пластическая область стохастически и равномерно смещается в направлении оси x за каждый цикл деформирования. Для удобства рассуждений рассмотрим обратное движение – пластическая область и связанная с ней система координат (x, O, h) неподвижны, а материальная частица M на фиксированной глубине h случайным образом равновероятно меняет свою координату x (рис. 4.2).

Пусть за время обработки она получает m циклов деформирования. В соответствии с принятыми выше допущениями она последовательно получает каждое из приращений деформаций Δe_i в интервале $-\frac{t_{пл}}{2} \leq x \leq +\frac{t_{пл}}{2}$, определяемых на графике рис.4.2 с шагом по оси x , равным

$$\Delta x = \frac{t_{пл}}{m} . \quad (4.2)$$

Здесь для удобства последующего анализа для каждой глубины h принята одна и та же область существования функции $\Delta e_i(x)$ равная $t_{пл}$. Показано, что при этом за пределами ширины пластической зоны $t_{пл}$ значения $\Delta e_i = 0$.

Полная накопленная деформация в т. M

$$\Delta e_{\Sigma} = \sum_1^m \Delta e_i(x). \quad (4.3)$$

Преобразуя выражение (4.3) с учетом (4.2):

$$m = \frac{t_{n\partial}}{\Delta x}. \quad (4.4)$$

Тогда

$$\Delta e_{\Sigma} = \sum_1^m \Delta e_i(x) = \sum_1^m \frac{m}{m} \Delta e_i(x) = m \sum_1^m \frac{\Delta e_i(x)}{m} = \sum_1^m \frac{\Delta e_i(x) \cdot \Delta x}{t_{n\partial}} = \sum_1^m \frac{\Delta e_i(x) \cdot \Delta x}{t_{n\partial}} \quad (4.5)$$

Очевидно, что сумма $\sum_1^m \Delta e_i(x) \cdot \Delta x$ при большом числе циклов m есть площадь под кривой (рис. 4.2):

$$S_{ei} = \int_{-x=\frac{t_{n\partial}}{2}}^{+x=\frac{t_{n\partial}}{2}} \Delta e_i(x) dx, \quad (4.6)$$

а выражение $\frac{S_{ei}}{t_{n\partial}}$ есть среднеинтегральная величина пластической

деформации для заданной глубины h в диапазоне $-x = \frac{t_{n\partial}}{2} \leq x \leq +x = \frac{t_{n\partial}}{2}$:

$$\Delta e_i(h) = \frac{S_{ei}}{t_{n\partial}}. \quad (4.7)$$

Тогда с учетом (6) получаем:

$$\Delta e_{i\Sigma} = m \cdot \Delta e_{icp}(e_i). \quad (4.8)$$

Таким образом, если для данной глубины h имеются графики изменения Δe_i (рис. 4.2), то легко вычислить для каждой h среднеинтегральные деформации $\Delta e_{icp}(e_i)$ [58] (4.7).

Характерное распределение деформаций в поверхностном слое можно получить после моделирования накатывания по прямолинейно траектории. При качении по прямой, деформированный участок сферы всегда остается

позади инструмента. В реальном процессе имеется постоянно изменение направления деформирования, влияющее на значения накопленных деформаций Δe_i .

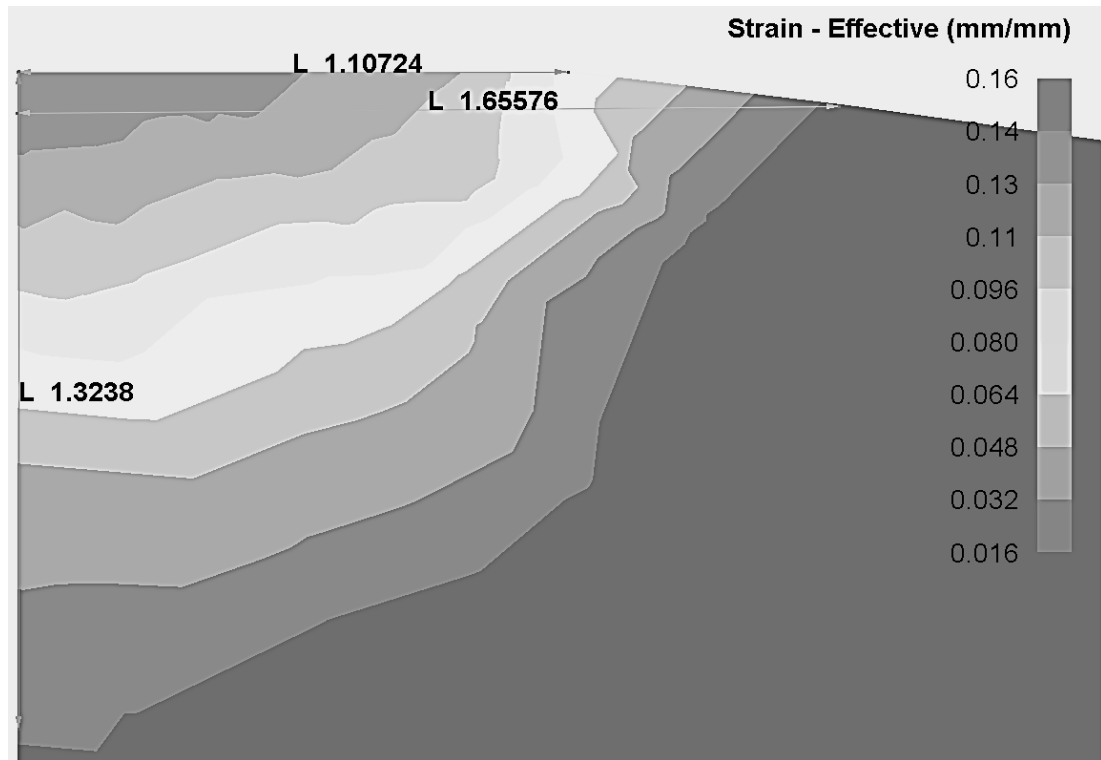


Рис. 4.3. Распределение накопленных деформаций за один цикл

При моделировании усилие прижима составляло 3 кН, а скорость поступательного перемещения нижнего инструмента – 2,5 м/с. Коэффициент трения обеих поверхностей с заготовкой составлял 0,5.

На рис. 4.3 приведена правая половина распределения накопленных деформаций после однократного контакта с инструментом ранее не обработанной поверхности. Как видно участок поверхности шириной 1,1 мм имел непосредственный контакт с инструментом. Таким образом, величина ширины контакта поверхности сферы с поверхностью инструмента при заданных условиях составляла $t_k \approx 2,2$ мм. Из этого же рисунка видно, что пластическая деформация затронула поверхность сферы на ширину 1,65 мм, что дает нам ширину пластической области $t_{пл} \approx 3,3$ мм. А глубина слоя деформационного упрочнения в центральной области составляла $h \approx 1,32$ мм.

Пластическая область, ограниченная по ширине величиной $t_{пл}$ и h по глубине достаточно для получения среднеинтегральных деформаций $\Delta e_{icp}(e_i)$. Полученная область разделялась по ширине $(0; t_{пл})$ и глубине $(0; h)$ с шагом 0,2 мм. Таким образом, в каждой точке полученной сетки определялось значение накопленной деформации. В результате получался график, наглядно показывающий распределение значений деформаций, как по поверхности заготовки, так и по слоям с шагом в 0,2 мм.

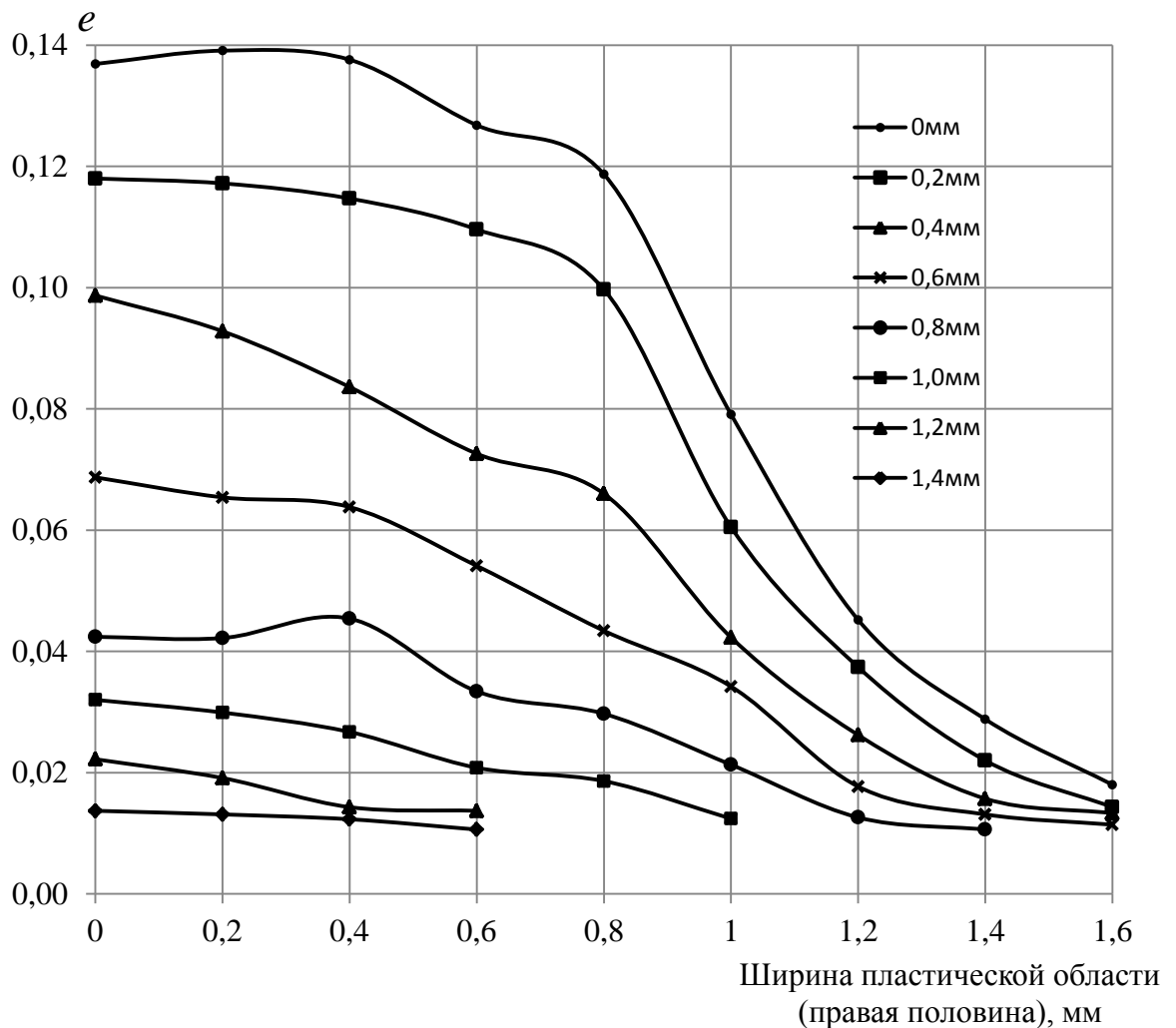


Рис. 4.4. Послойное распределение накопленных деформаций за цикл.

Для каждого глубины поверхностного слоя площадь под кривой будет соответствовать S_{ei} (рис. 4.4). Поэтому для определения среднеинтегральных деформаций Δe_{icp} для заданной глубины слоя достаточно знать численное значение площади. Для данного примера они приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Значение полученных площадей S_{ei} и рассчитанных среднеинтегральных деформаций Δe_{icp} .

h , 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

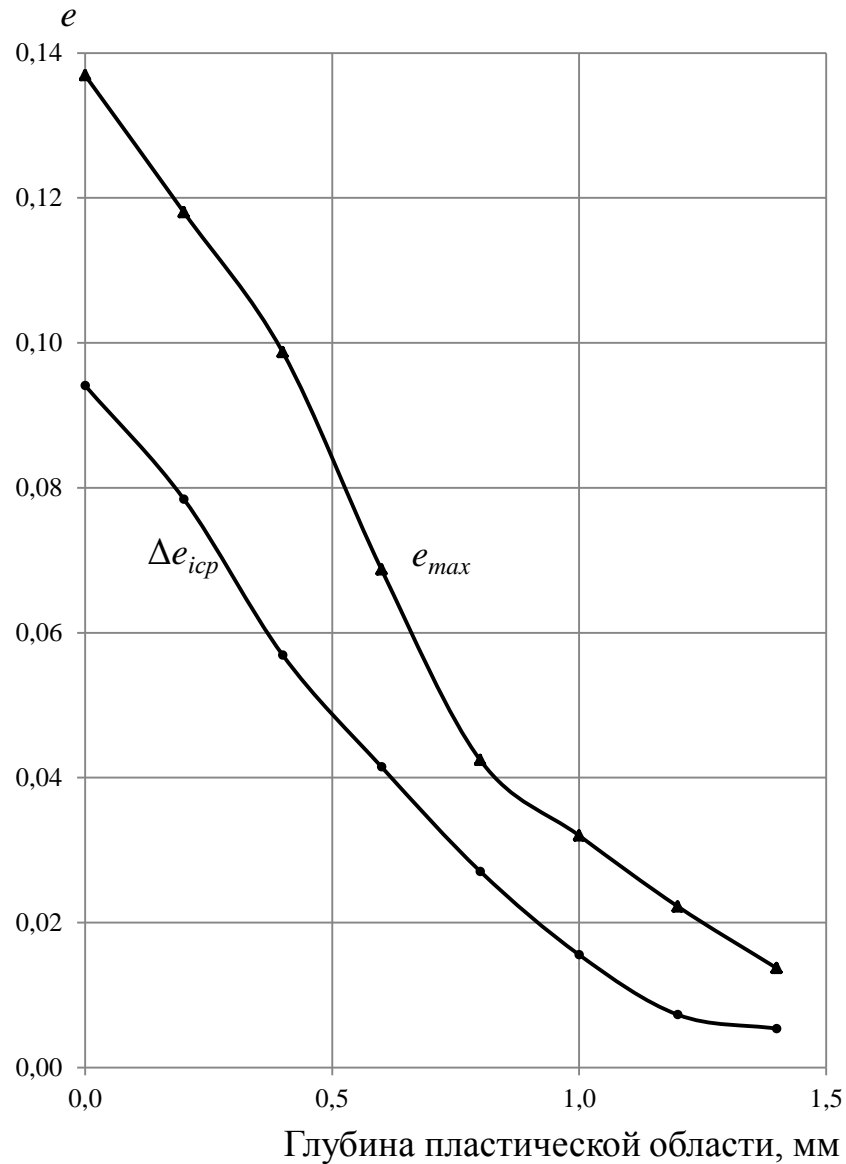


Рис. 4.5. Распределение максимальных деформаций e_{max} и среднеинтегральных деформаций Δe_{icp} в пластической области.

Подставляя в (4.7) полученные значения получим Δe_i для каждой глубины слоя. Характер распределения Δe_{icp} совпадает с распределением

деформаций по центру контакта (являющихся для данной схемы максимальными) e_{max} .

Постпроцессор программного комплекса Deform-3D имеет функцию “Point Tracking”. Благодаря этой функции можно проследить изменение напряженно-деформированного состояния и кинематических характеристик выбранной точки в теле модели или на ее поверхности. Таким образом, для подтверждения теоретической зависимости (4.8) необходимо смоделировать накатывание заготовки по первоначальной схеме, реализовав стохастический характер накопления деформаций поверхностью. В таком случае, выбранная материальная точка будет иметь постоянное смещение внутри диапазона $-x = \frac{t_{nl}}{2} \leq x \leq +x = \frac{t_{nl}}{2}$ при каждом последующем цикле взаимодействия с инструментом. Результатом такого смещения будет варьирование величины накопленных среднеинтегральных деформаций Δe_{icp} за каждый последующий цикл обработки. Подобное изменение значений позволит дать более точную оценку характеру накопления деформаций в точке и подтвердить или опровергнуть предложенную методику расчета.

Для моделирования стохастического процесса деформирования поверхности заготовки применялась исходная схема накатывания, предложенная в [37]. Эксцентриситет между осями инструмента и камеры составлял 8 мм. Сам инструмент вращался со скоростью 351 об/мин, обеспечивая одновременно усилие прижима равное 3 кН. Остальные граничные условия соответствовали моделированию накатывания по прямолинейной траектории.

Моделирование подобного процесса требует большого количества машинного времени. Это связано с большой скоростью перемещения заготовки в инструментальной камере и обеспечению достаточного контакта между объектами для избегания проскальзывания. Достигается последнее путем уменьшения размера элементов при генерировании конечно-элементной сетки. В нашем случае, при моделировании 0,6 секунд обработки

заготовка описала два полных круга в инструментальной камере. За это время след деформирования распространялся с небольшим смещением относительно предыдущего и также имел участки траектории с резким изменением направления дальнейшего распространения. В результате был образован участок повышенного накопления деформаций, хорошо заметный на рис. 4.6.

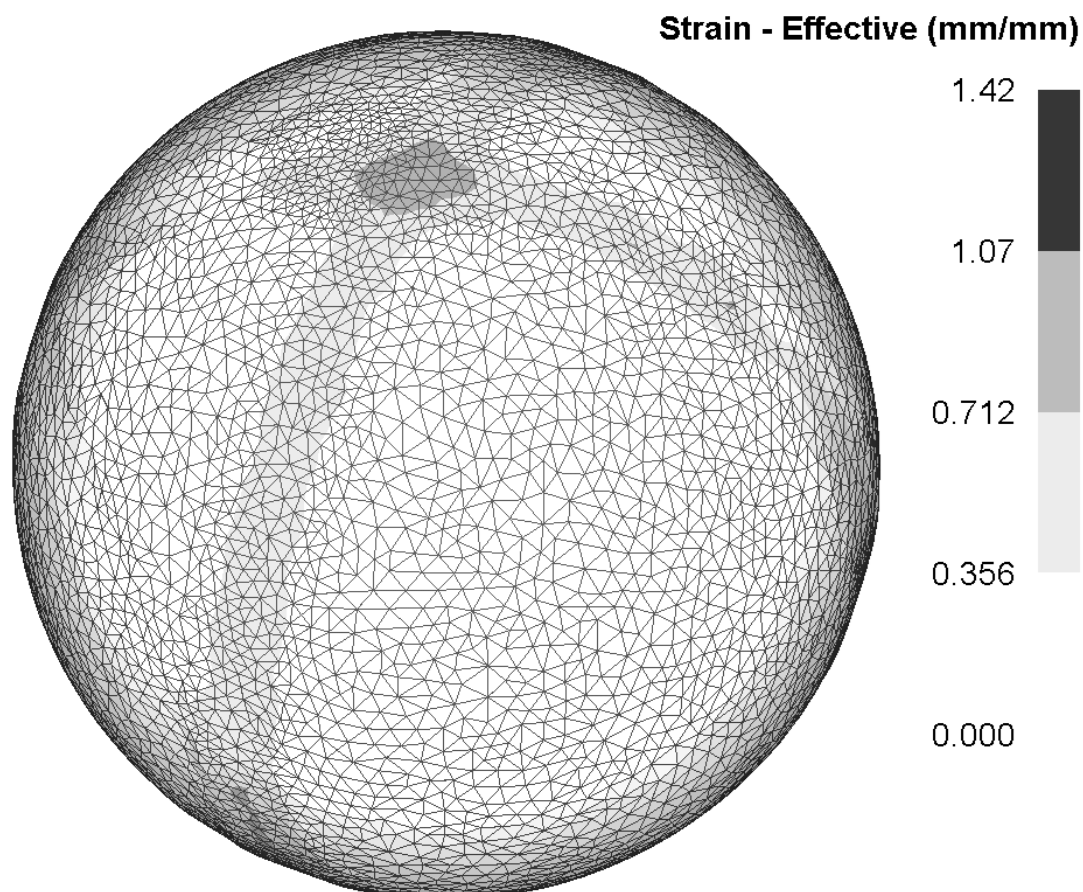


Рис. 4.6. Распространение деформаций по поверхности заготовки

На этом участке была выбрана точка с наибольшим значением накопленных деформаций. С помощью функции “Point Tracking” был получен график приращения деформаций от времени обработки (рис. 4.7). Ступенчатый характер полученного графика говорит о том, что, как и предполагалось ранее, деформации накапливаются порциями.

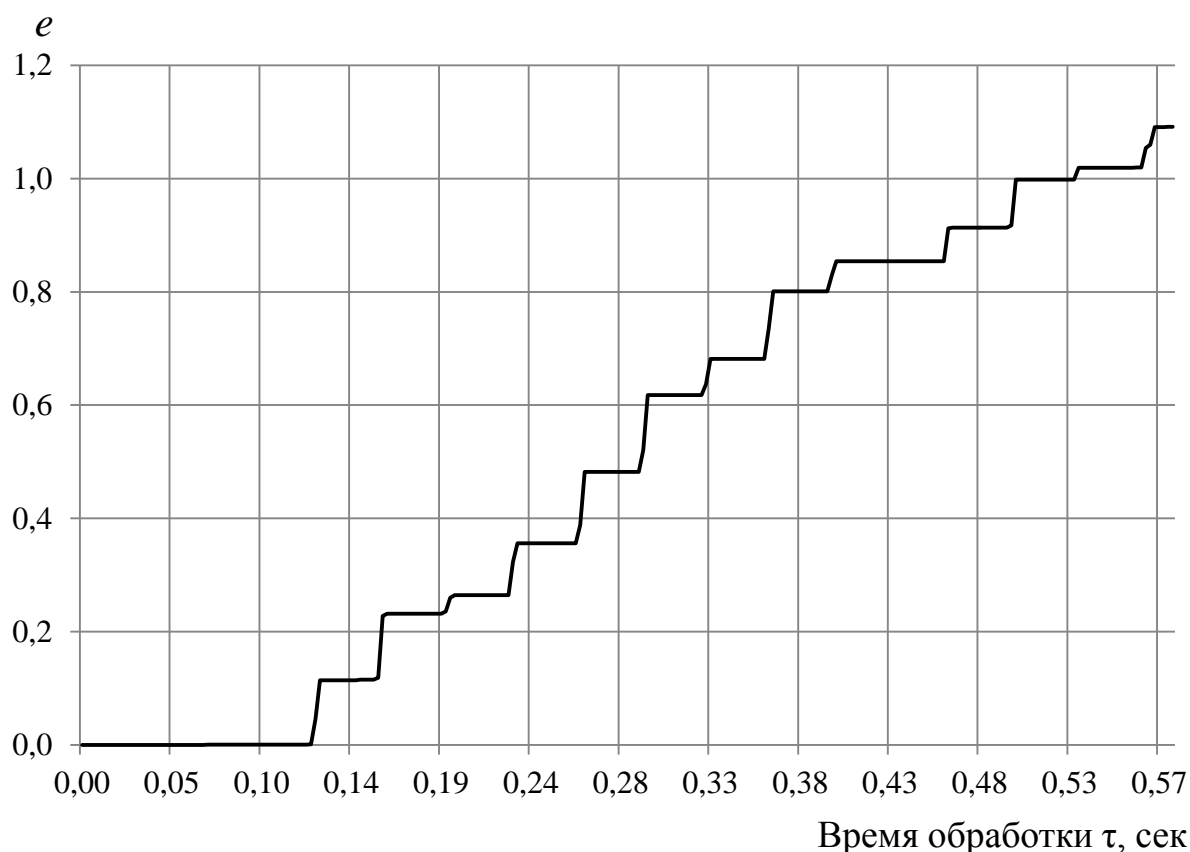


Рис. 4.7. График приращения накопленных деформаций точкой поверхности

Если выделить все ступенчатые приращения значений деформаций материальной точкой, можно построить более наглядный график. Примем количество скачкообразных изменений значений как число циклов обработки m . Тогда на графике каждому значению m будет соответствовать значение накопленных деформаций в этот момент времени $e_{\text{экс}}$. Полученный график представлен на рис. 4.8. Так как он близок к линейному, его можно аппроксимировать как линейную функцию $e_{\text{экс}}(m)$:

$$\sum e_{i_{\text{экс}}} = \Delta e_{i_{\text{экс}}} \cdot m. \quad (4.9)$$

В таком случае, при моделировании стохастического процесса обработки с каждым циклом взаимодействия с инструментом в среднем значение накопленных деформаций увеличивалось на $\Delta e_{i_{\text{экс}}} = 0,0904$. С другой стороны, по предложенной ранее методике расчету значения $\Delta e_{i_{\text{экс}}}$ должно соответствовать значение $\Delta e_{i_{\text{ср}}}$, полученное для поверхности заготовки. В

нашем случае $\Delta e_{i\text{cp}}=0,0941$. Тогда можно получить погрешность в расчетах двумя независимыми методами:

$$\delta = \left(1 - \frac{\Delta e_{i\text{экс}}}{\Delta e_{i\text{cp}}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{0,0904}{0,0941}\right) \cdot 100\% = 3,9\% \quad (10)$$

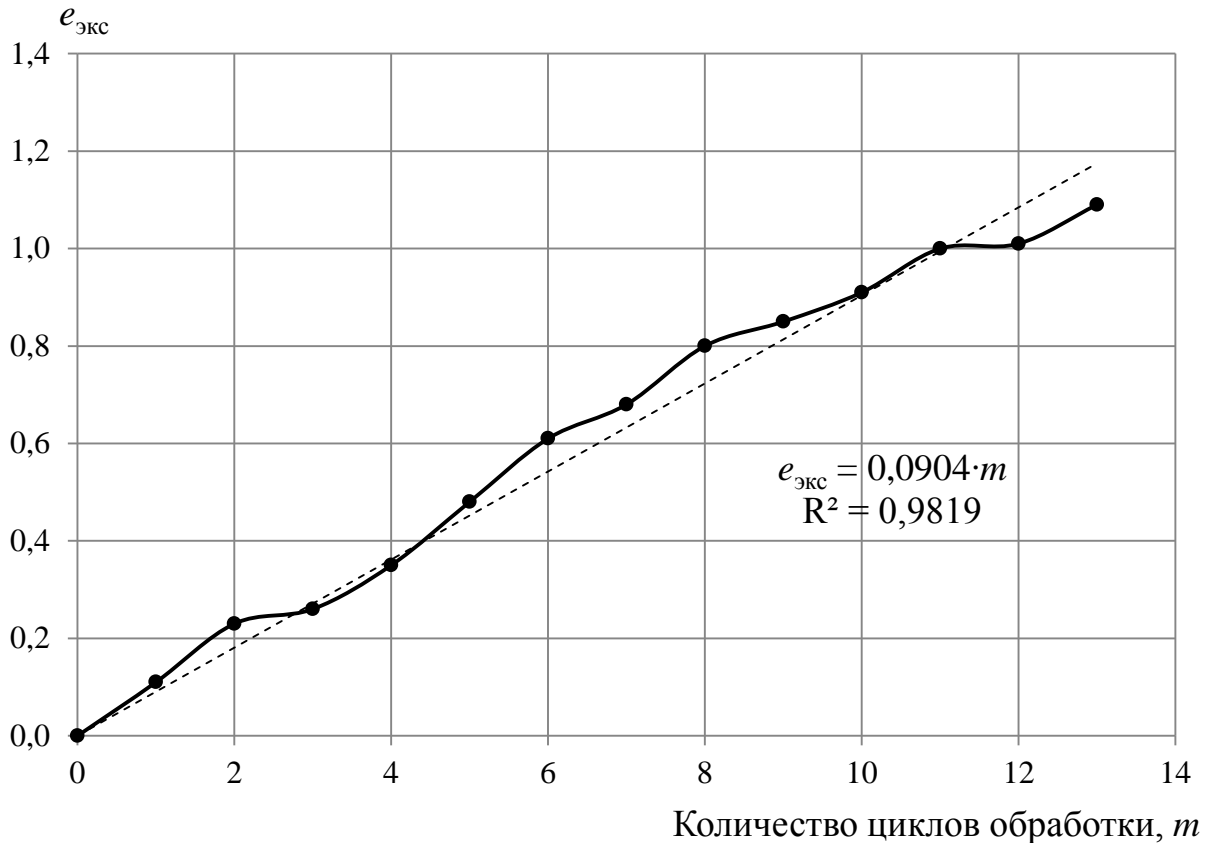


Рис. 4.8. Зависимость приращения деформаций от числа циклов обработки материальной точки при моделировании стохастического процесса накатывания.

Ранее предложенная методика оценки накопленных деформаций полностью подтверждена результатами моделирования стохастического процесса деформирования. Отклонение в 4% является приемлемым для применения данной методики в последующих инженерных расчетах.

4.2. Влияние конструкции технологической оснастки и кинематических параметров обработки на количество циклов деформирования материальной точки.

Накатывание обеспечивает циклическое упрочнение поверхности заготовки. Ранее приводилась методика вычисления величины деформаций, которые накапливались за один цикл обработки материальной точки поверхности. Для получения полной картины упрочнения после окончания накатывания требуется иметь возможность расчета количественной величины контакта заготовки с инструментом.

Проанализируем зависимость числа циклов деформирования m от технологических параметров операции упрочнения. Уже отмечали, что на поверхность заготовки ширина пластического следа $t_{пл}$ больше ширины непосредственного контакта инструмента с заготовкой t_k . Длину этого следа на поверхности сферы определим из очевидного условия, что она равна длине контактного следа, например, на нижней неподвижной контактной плоскости инструмента (рис. 4.9).

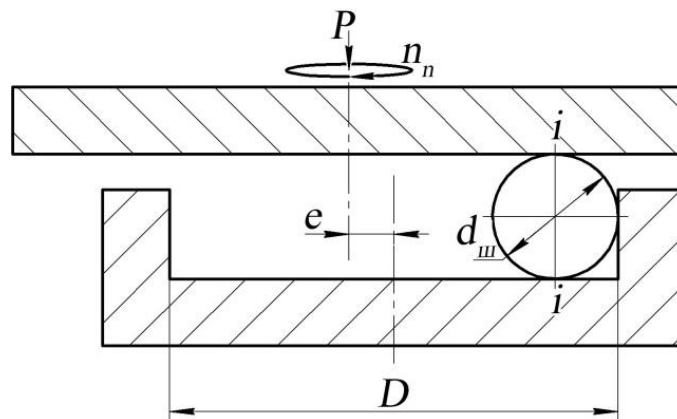


Рис. 4.9. Схема накатывания

Эксперименты показывают, что через несколько секунд после начала обработки, независимо от величины эксцентриситета e и начального положения шара на нижней неподвижной плоскости он касается боковой цилиндрической поверхности инструмента. Причем заготовка на этом участке траектории перемещается по спирали, а след деформационного упрочнения имеет небольшое смещение относительно предыдущего. Чем

больше данный участок, тем сильнее отклонение первоначальной геометрии заготовки от сферической вплоть до приобретения конической формы. Таким образом, целесообразнее исключить данный отрезок траектории из обработки и расположить заготовку в непосредственной близости от боковой кромки камеры.

Касание шара о боковую поверхность вызывает ее дополнительное вращательное движение вокруг оси $i-i$, но не влияет на длину следа контакта. За счет подобного вращения происходит постоянное смещение пластического следа на самой сферической заготовке, его взаимное пересечение под большим углом, что благоприятно сказывается на ее равномерном поверхностном деформированном упрочнении и на формировании высокой геометрической точности получаемой сферической поверхности.

Кроме того, в экспериментах было отмечено, что сфера движется вдоль кромки камеры не постоянно, а на некоторых участках не имеет контакта с боковой гранью неподвижной камеры. Данная особенность подтверждается при моделировании накатывания методом конечных элементов по исходной схеме обработки. Таким образом, характер перемещения заготовки и ее упрочнения будет подобен начальному этапу обработки, где заготовка не имеет контакта с боковой гранью. Стоит отметить, что этот участок траектории практически не влияет на геометрическую форму заготовки.

В результате, траектория движения сферы в камере будет состоять из двух участков, попеременно сменяющих друг друга – перемещения вдоль кромки камеры и перемещения по спирали до следующего контакта с кромкой.

Так как движение заготовке придает верхний инструмент, имеющий эксцентриситет E с осью камеры, то минимально возможное расстояние между центром вращения инструмента и цилиндрической гранью камеры примем как:

$$R = R_k - E. \quad (4.10)$$

Хоть и в действительности траектория движения заготовки состоит из двух участков, но след на нижней камере будет приближен к окружности с радиусом R . Это вызвано малой величиной шага получаемой спирали, при перемещении в камере без контакта с боковой гранью камеры. Таким образом, сведем сложную траекторию движения к движению по окружности. При моделировании процесса накатывания геометрию следа взаимодействия заготовки с дном камеры можно получить, определив разогрев поверхности камеры (рис. 4.10) :

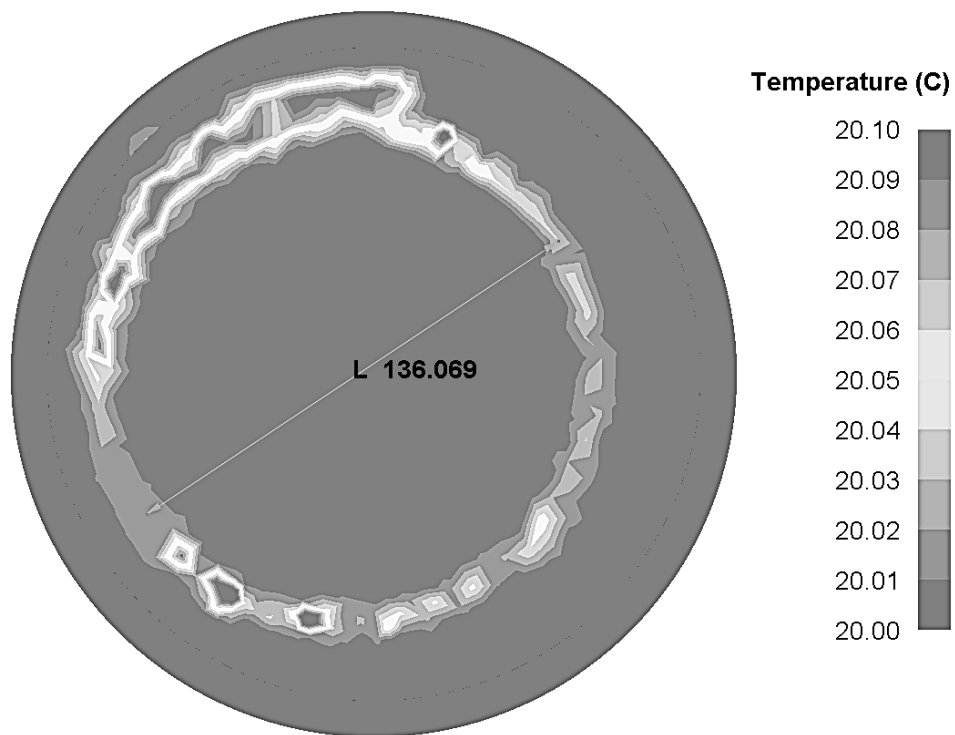


Рис. 4.10. Температурный след, оставляемый заготовкой при движении по дну камеры

В таком случае, след, оставляемый на поверхности камеры будет иметь радиус, меньший чем R на величину радиуса заготовки:

$$R_{\text{сл}} = R_{\text{к}} - r_{\text{ш}} - E \quad (4.11)$$

Если верхняя инструментальная плоскость вращается с угловой скоростью n , то скорость $V_{\text{ш}}$ центра шара (а значит и скорость движения следа контакта по нижней неподвижной поверхности) равна:

$$V_{\text{ш}} = \frac{2\pi R_{\text{сл}} n}{60} = \frac{2\pi n (R_{\text{к}} - r_{\text{ш}} - E)}{60} = \frac{\pi n (R_{\text{к}} - r_{\text{ш}} - E)}{30} \quad (4.12)$$

тогда длина контактного следа в метрах за время τ (сек)

$$l_k = V_{\text{ш}} \cdot \tau = \frac{\pi n \tau (R_k - r_{\text{ш}} - E)}{30} \quad (4.13)$$

Пусть общая площадь поверхностного пластического следа

$$A_k = l_k \cdot t_{\text{пл}} = \frac{\pi n \tau (R_k - r_{\text{ш}} - E)}{30} \cdot t_{\text{пл}} \quad (4.14)$$

в m раз больше, чем поверхность самой заготовки

$$S_{\text{ш}} = 4\pi r_{\text{ш}}^2 \quad (4.14)$$

Вполне естественно величину

$$m = \frac{A_k}{S_{\text{ш}}} \quad (4.15)$$

принять за параметр, определяющий среднестатистическое число циклов деформирования каждой материальной точки на поверхности шара [59]. Тогда с учетом (4.12 – 4.15):

$$m = \frac{\pi n \tau (R_k - r_{\text{ш}} - E) t_{\text{пл}}}{30 \cdot 4 \cdot \pi r_{\text{ш}}^2} = \frac{n \tau (R_k - r_{\text{ш}} - E) t_{\text{пл}}}{120 \cdot r_{\text{ш}}^2} \quad (4.16)$$

Параметр m описывает относительную кратность обработки поверхности сферической заготовки при накатывании. Подобный подход к количественной оценке кратности обработки применялся и в [60]. В данном случае, m определяет взаимосвязь между геометрическими параметрами применяемого штампа, скоростью вращения инструмента и временем обработки.

Подставив (4.16) и (4.7) в (4.9), получим:

$$\sum e_i = \frac{n \tau (R_k - r_{\text{ш}} - E) t_{\text{пл}}}{120 \cdot r_{\text{ш}}^2} \cdot \frac{S_{ei}}{t_{\text{пл}}} = \frac{n \tau (R_k - r_{\text{ш}} - E) S_{ei}}{120 \cdot r_{\text{ш}}^2} \quad (4.17)$$

Как видно, в итоге величина накопленной за всю обкатку деформации непосредственно от ширины пластического следа $t_{\text{пл}}$ не зависит, но она пропорциональна площади под кривой $\Delta e_i(x)$ на интервале $t_{\text{пл}}$.

Формула (4.17) позволяет рассчитывать степень деформационного упрочнения слоя заготовки на любой глубине. Однако основное применение данная формула будет иметь для расчета деформаций на поверхности заготовки.

4.3 Влияние усилия прижима заготовки на глубину поверхности, затронутой деформированием.

Процесс накатывания сферы носит циклический характер. Каждый участок поверхности подвергается многократному воздействию деформирующего инструмента, а накопление деформаций поверхностью имеет накопительный характер. При этом предварительно обточенная заготовка приобретает более точную геометрическую форму сферы и упрочненную, со сниженными значениями шероховатости, поверхность.

Таким образом, исследование процесса деформирования поверхности можно разделить на две части: исследование процесса взаимодействия инструмента с заготовкой в контактной области и статистические закономерности изменения НДС поверхности. В этой главе будет рассмотрена первая часть исследования.

Предложенная схема обработки, если исключить вращение верхнего инструмента, является осаживанием сферы двумя взаимно параллельными плоскими поверхностями. С этой точки зрения осаживание схоже с схемой вдавливания жесткого штампа в пластическое полупространство. Таким образом, задача Пландтля является отправной точкой в исследовании механики упрочнения поверхностного слоя заготовки.

Рассмотрим шар из пластичного материала, сдавленный плоскостью инструмента (рис. 4.11). 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

$$P = q_k F_k \quad (4.18)$$

$$F_k = \pi d_k^2 / 4 \quad (4.19)$$

$$h = d_k / \sqrt{2}, \quad (4.20)$$

где P – технологическое усилие сдавливания, q_k – контактное давление, d_k – диаметр пятна контакта без учета наплыва, h – глубина слоя

деформационного упрочнения, F_k – площадь пятна контакта без учета наплыва.

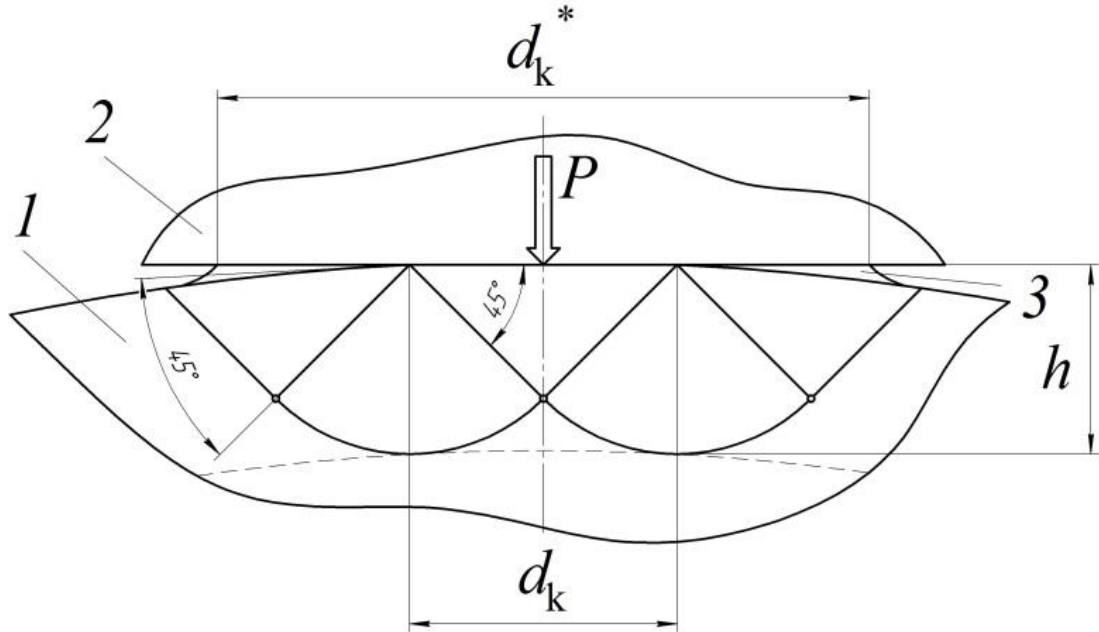


Рис. 4.11. Схема контакта инструмента со сферической поверхностью

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

$$q_k^* \approx 2q_k \approx 6\sigma_T. \quad (4.21)$$

Подставляя (4.19, 4.21) в (4.18), получаем

$$P = 4,71 \sigma_T d_k^2 \quad (4.22)$$

Формула (4.22) связывает технологическое усилие с механическими свойствами материала шара и с диаметром пятна контакта [61].

В реальности имеет место наплыв (рис. 4.11), который увеличивает площадь контакта инструмента с обрабатываемым изделием.

$$d_k^* = k d_k \quad (4.23)$$

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 (4.23) и (4.20) в (4.22) получим

$$P = 11,4 \sigma_t h^2, \quad (4.24)$$

или

$$h = \sqrt{\frac{P}{11,4\sigma_t}}. \quad (4.25)$$

Зависимости глубины слоя деформационного упрочнения от технологического усилия при накатывании сплавов ВТ1-0, ВТ1-2 и ВТ6, а также стали 20 рассчитанные по (4.25), приведены на рис. 4.12 [62].

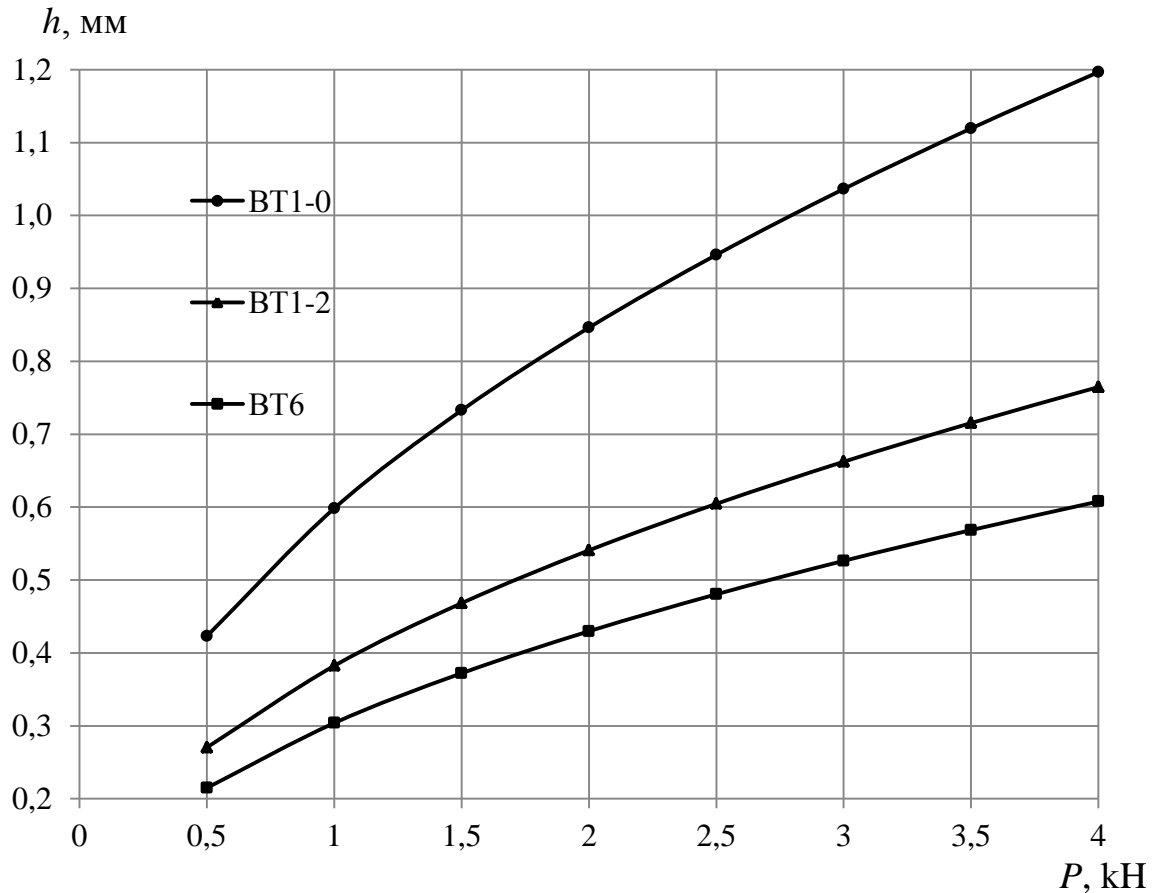


Рис. 4.12. Зависимость глубины слоя деформационного упрочнения от технологического усилия прижима

4.4. Результаты экспериментального накатывания

Для экспериментального подтверждения полученных зависимостей была произведена обработка образцов из титановых сплавов ВТ1-0, ВТ1-2 и ВТ-6, широко применяемых при изготовлении шарнирного сочленения искусственных суставов. Кроме них, в группу материалов, подвергнутых экспериментальному накатыванию, была включена сталь 20, повсеместно применяемая в машиностроении.

Образцы диаметром 28мм были выточены из прутков и подвергались отжигу в вакууме. Шероховатость поверхности заготовки после точения составляла Ra 3,2, отклонение от сферичности – 0,15 мм. Обработка производилась на вертикально-сверлильном станке 2А150 в камере диаметром 180 мм. Скорость вращения инструмента составляла 350 об/мин. Технологическое усилие прижима для всех образцов составляло 3 кН. В каждом случае процесс накатывания длился 120 секунд.

Ниже приведены значения распределения микротвердости для каждого из материалов (рис. 4.13 – 4.16). Из них видно, что независимо от материала образца, максимальная микротвердость сосредоточена в очень тонком поверхностном слое глубиной 50 мкм. Дальнейшее распределение значений микротвердости схоже с распределением накопленных деформаций по глубине поверхностного слоя, полученных при моделировании процесса обработки накатыванием в DEFORM-3D.

Полученные распределения микротвердости имеют ряд значений, не уменьшающихся с увеличением глубины. Это говорит о переходе между зоной интенсивных пластических деформаций, возникающей при накатывании, и зоной, не затронутой деформированием. В таком случае, для каждого образца можно определить глубину упроченного слоя.

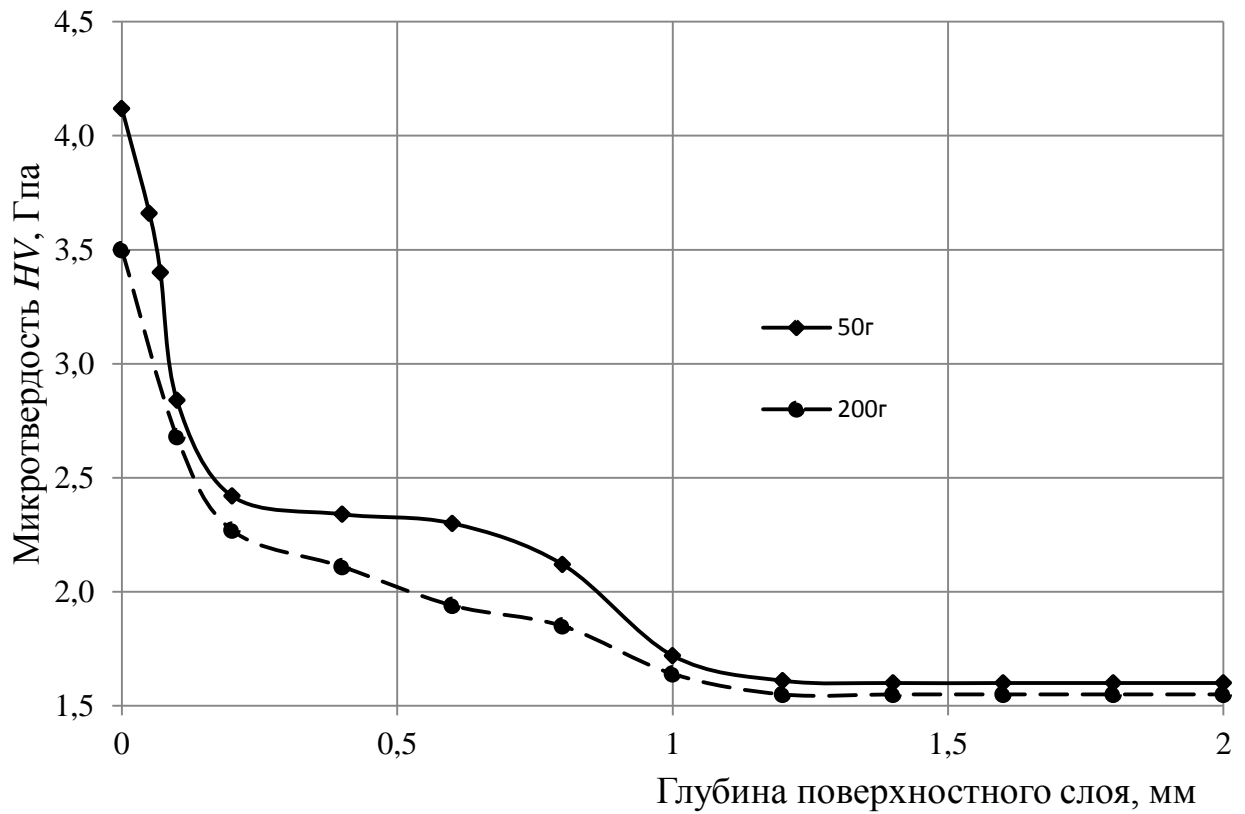


Рис. 4.13. Распределение твердости в поверхностном слое у образца из титанового сплава ВТ1-0 (Усилие прижима – 3 кН; время обработки – 120 с.)

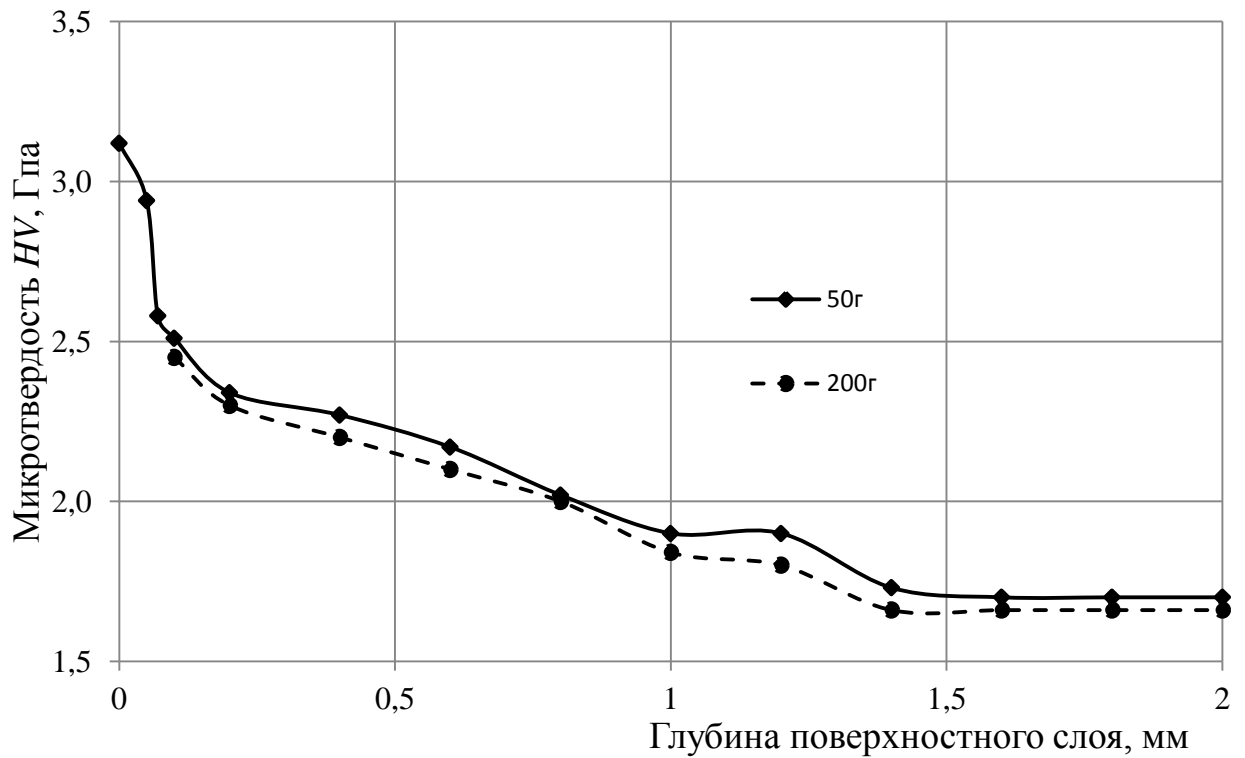


Рис. 4.14. Распределение твердости в поверхностном слое у образца из титанового сплава ВТ1-2 (Усилие прижима – 3 кН; время обработки – 34 с.)

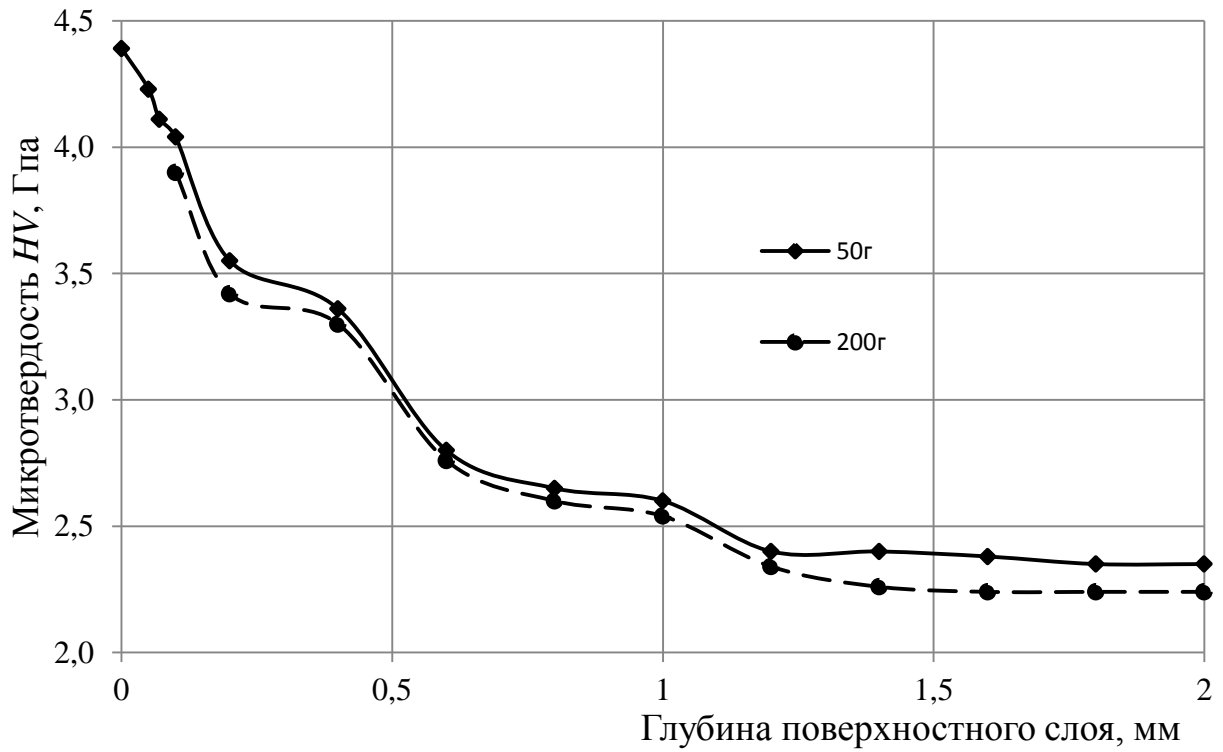


Рис. 4.15. Распределение твердости в поверхностном слое у образца из титанового сплава ВТ6 (Усилие прижима – 3 кН; время обработки – 34 с.)

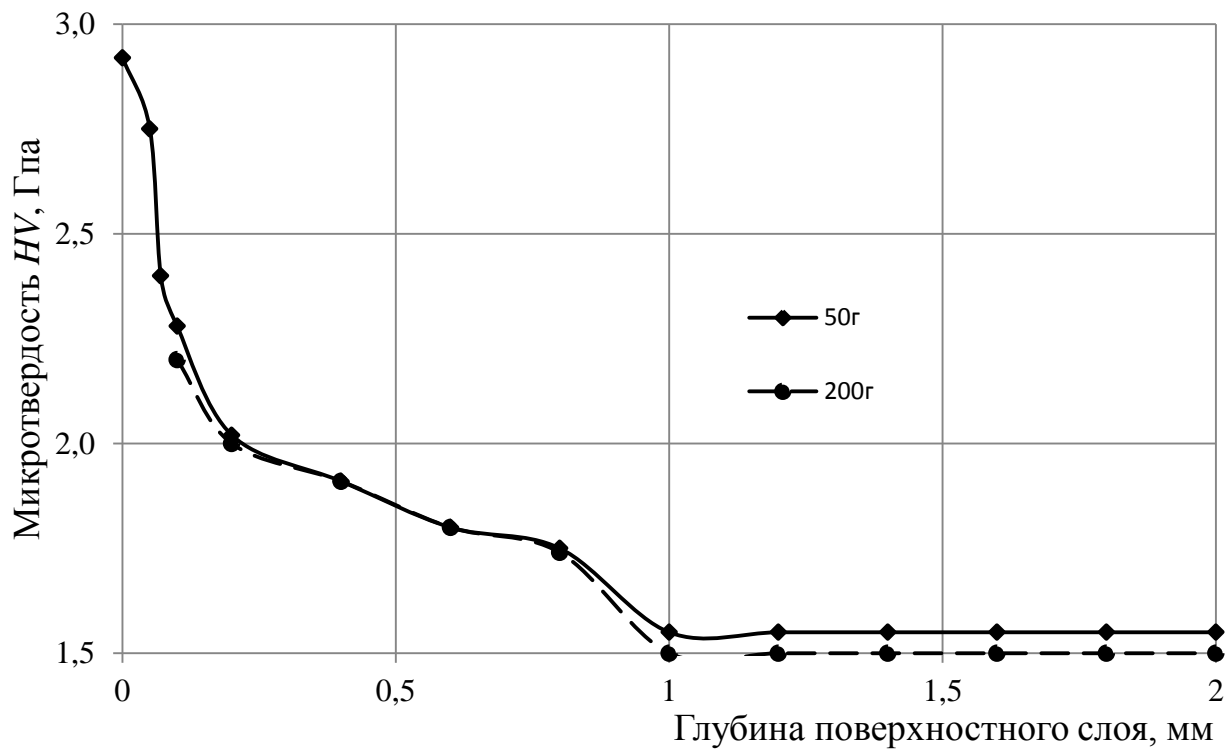


Рис. 4.16. Распределение твердости в поверхностном слое у образца из стали 20 (Усилие прижима – 3 кН; время обработки – 270 с.)

Из экспериментальных данных получено, что при усилии в 3 кН глубина упрочненного слоя для ВТ1-0 составила ~ 1,1 мм, ВТ1-2 ~ 0,9 мм, ВТ6 ~ 0,7 мм, сталь 20 ~ 1,0 мм. Предложенная ранее формула (4.25) для определения глубины упрочненного слоя дала похожие значения: для ВТ1-0 1,0 мм, ВТ1-2 0,7 мм, ВТ6 ~ 0,6 мм, сталь 20 ~ 1,0 мм. Данные, полученные с помощью DEFORM-3D, дают схожие значения : для ВТ1-0 - 1,2 мм, ВТ6 - 0,7 мм, сталь 20 – 1,1 мм.

Глубина слоя деформационного упрочнения, полученная при помощи (4.25) хорошо согласуется с результатами экспериментов и компьютерного моделирования (рис. 4.17).

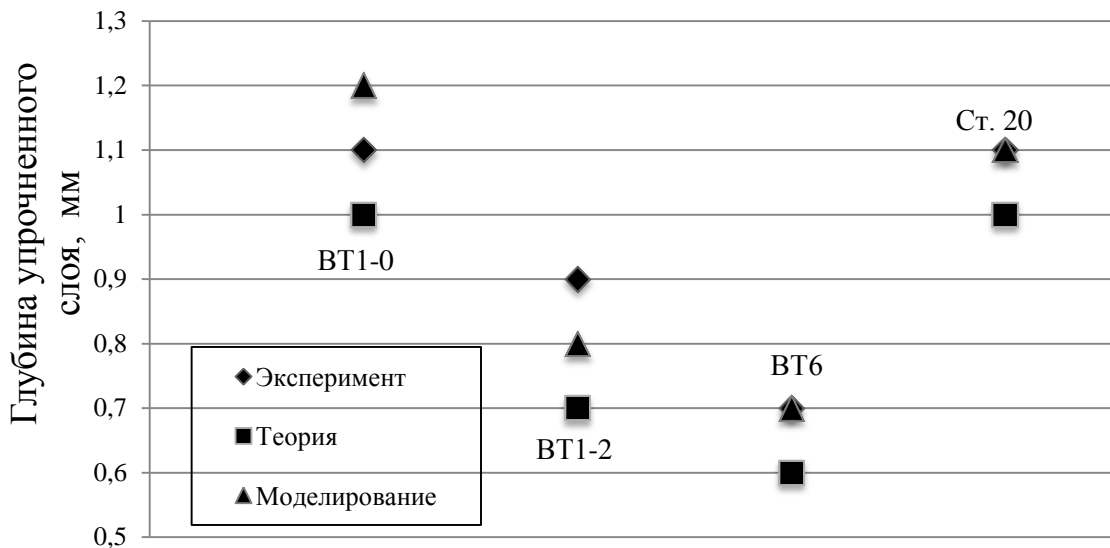


Рис. 4.17. Глубина упрочненного слоя при усилии прижима 3 кН, полученная для различных материалов.

Полученные экспериментальные данные незначительно превышают значения, рассчитанные по предложенной формуле. Объяснить подобные различия можно возникновением дополнительных динамических нагрузок при накатывании, вызванных отклонениями в форме заготовки, что в конечном итоге увеличивает глубину упрочненного слоя.

На рис. 4.18 приведены микрофотографии, характеризующие структуру деформированного слоя и сердцевины изделия после обработки накатыванием [63]. Сердцевина детали (материал в исходном состоянии) характеризуется наличием зерен размером 500-1000 мкм с крупными

пластинчатыми выделениями α -фазы (рис. 4.18, а) [64]. На расстоянии от поверхности ~ 2 мм находится переходная зона, в которой произошла фрагментация исходных α -пластин, заметно направление деформации. По мере приближения к поверхности наблюдается измельчение зерен, изменение морфологии, выделенная α -фаза приобретает глобулярную форму (рис. 4.18, б). При этом глобулы выстраиваются в направлении бывших пластин, т.е. проявляется текстура деформации. В пределах отдельных субзерен на глубине около 2 мм видны линии скольжения в разных направлениях, что свидетельствует о том, что пластическая деформация достигает этой глубины (рис. 4.18, а).

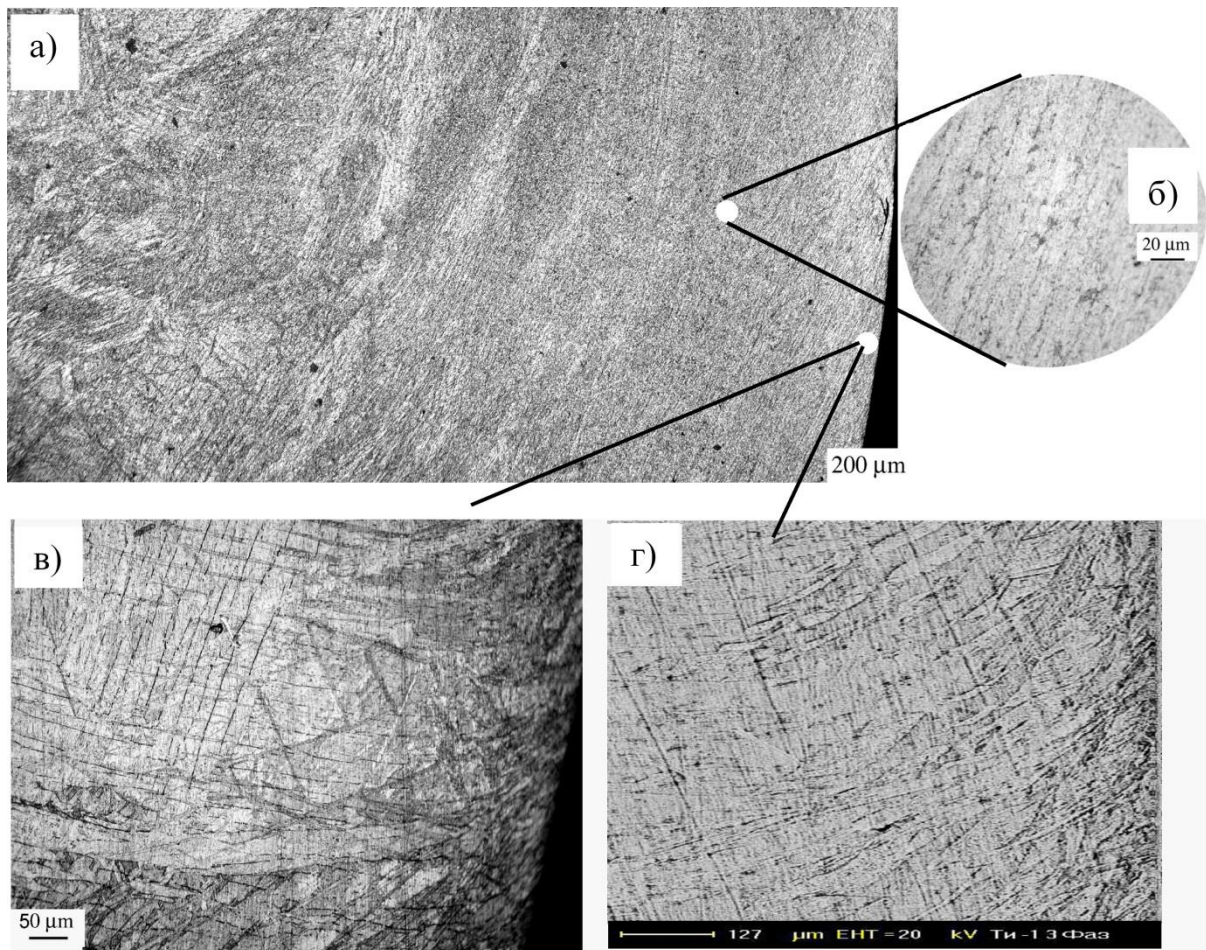


Рис. 4.18. Структура поверхностного слоя сферической заготовки после накатывания плоскими поверхностями:

а) металлография участка, непосредственно прилегающего к поверхности;

б) микрофотография того же участка, полученная на электронном сканирующем микроскопе CamScan;

в) микрофотография поверхностного слоя глубиной $\sim 2,5$ мм;

г) микрофотография участка поверхностного слоя на расстоянии ~ 700 мкм от поверхности

У поверхности материал характеризуется мелкозернистой глобулярной α -структурой с заметной текстурой деформации (рис. 4.18, б, в). Микрофотография, полученная на электронно-сканирующем микроскопе CamScan (рис. 4.18, г) также свидетельствует о наличии текстуры у поверхности изделия.

Подтверждением высокой степени деформации металла в поверхностном слое может также служить его микроструктура, полученная после рекристаллизационного отжига (рис. 4.19). После нагрева в β -область в поверхностном слое образца образовалась мелкозернистая равноосная структура с зернами размером 15–20 мкм, величина которых возрастает по мере удаления от поверхности. При этом зерна в недеформированной сердцевине достигают 500-100 мкм.

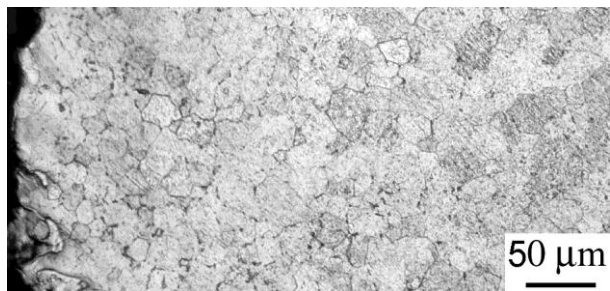


Рис. 4.19. Микроструктура деформированного поверхностного слоя заготовки после рекристаллизационного отжига

Приведенные микрофотографии свидетельствуют о высокой степени деформации металла в поверхностном слое. Теоретический расчет накопленных деформаций поверхностным слоем, произведенный согласно методике из четвертой главы также указывает на высокую степень деформационного упрочнения поверхности.

Как известно, значения твердости взаимосвязаны с напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя заготовки [65]. Пересчитав значения накопленных деформаций по глубине слоя в центральной части контактной области после однократной обработки с учетом количества циклов обработки, получим итоговые значения для выбранных технологических параметров процесса, а затем произведем перерасчет на значения микротвердости согласно тарировочному графику для сплава ВТ1-0, который был получен экспериментально.

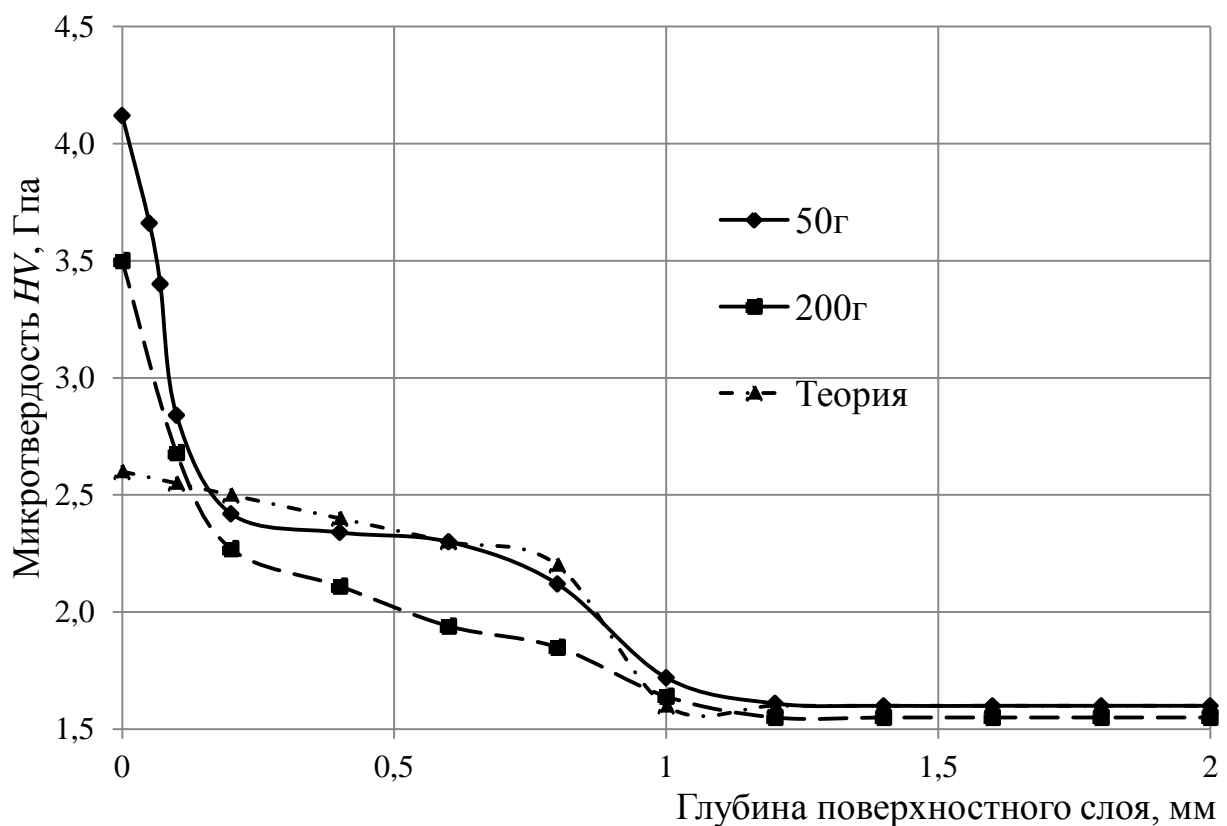


Рис. 4.20. Сравнение распределения твердости в поверхностном слое у образца из титанового сплава ВТ1-0 с теоретическими значениями.

Как видно из рис. 4.20, на самой поверхности значения микротвердости заметно разнятся. Такой эффект возникает за счет динамических нагрузок, появляющихся при искривлении формы сферы сдавливанием и возникновением на ее поверхности наплыва, а так же возможностью проскальзывания заготовки относительно инструмента. Циклическое образование наплыва и последующее сдавливание неровностей поверхности,

им вызванных, в ходе обработки также увеличивает значение деформаций в самом тонком поверхностном слое. Начиная с глубины 0,2 мм, расчетные и экспериментальные данные имеют незначительные различия, что говорит о возможности применения предложенной методики расчета. При этом, нужно иметь в виду, что самый тонкий поверхностный слой удаляется финишной операцией полирования.

4.5. Выводы

1. Разработана методика позволяющая производить расчет накопленных деформаций поверхностным слоем заготовки при заданных технологических параметрах процесса накатывания плоскими инструментальными поверхностями.

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. Получена аналитическая зависимость между глубиной упрочненного слоя сферической заготовки и технологическим усилием прижима, успешно подтвержденная моделированием обработки в программном комплексе DEFORM-3D и экспериментально при оценке микротвердости поверхности после накатывания, позволяющая определять величину требуемого усилия сжатия для обеспечения заданной глубины упрочнения.

4. Микроструктура поверхностного слоя сферической заготовки, полученная после накатывания ее плоскими инструментальными поверхностями, характеризуется зернами размером 10-50 мкм, что благоприятно сказывается для дальнейшего процесса термодиффузионного азотирования, приводящего к образованию износостойкой поверхности.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ВНЕДРЕНИЯ

5.1. Технологические рекомендации для операции накатывания

Изготовление сферической головки шарнира эндопротеза тазобедренного сустава человека – трудоемкий процесс, состоящий из множества операций. Одной из них является операция накатывания сферической заготовки плоскими инструментальными поверхностями.

В настоящее время головку шейки бедра изготавливают как минимум в четырех типоразмерах – 22, 26, 28 и 32 мм. Для обеспечения возможности применения ВТ1-0 подбирать диаметр головки и вертлужной впадины сочленения необходимо таким образом, чтобы контактное давление между трущимися поверхностями не превышало 6,5 Мпа [66].

Успешная реализация операции накатывания плоскими инструментальными поверхностями может быть осуществлена при соблюдении предложенных рекомендаций:

- Исходя из выбранной глубины упрочения слоя (с учетом последующих операций притирки и полирования, убирающих порядка 0,2 мм материала с поверхности заготовки), подобрать минимально необходимое прижима усилие инструмента можно по формуле (4.24):

$$P = 11,4 \cdot \sigma_T \cdot h^2$$

- Определить необходимое число циклов деформирования на основе значения максимальных деформации поверхности исходя из усилия прижима и свойств материала можно из (3.1):

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

- Подобрать оптимальный диаметр камеры и эксцентриситет можно из соотношения (4.11):

$$R_{сл} = R_k - r_{ш} - E$$

▪ Исходя из требуемых параметров упрочнения и приведенных выше зависимостей, можно подобрать время обработки и скорость вращения инструмента из соотношения (4.17):

$$\sum e_i = \frac{n\tau(R_k - r_{ш} - e)S_{ei}}{120 \cdot r_{ш}^2}$$

Кроме того, в исследованиях было выявлено, что на глубину упрочнения влияет только усилие прижима, создаваемое вертикальной подачей станка. Такие параметры как время обработки и скорость вращения инструмента на увеличение глубины практически не влияют. Исходя из этого, для обработки сферической головки не требуется создавать больших усилий прижима, т.к. глубина последующего азотирования больше зависит от степени измельчения структуры.

Для большего измельчения структуры поверхностного слоя целесообразнее использовать малое технологическое усилие прижима в совокупности с большим временем обработки. В таком случае след деформационного упрочнения на поверхности заготовки будет длиннее, а значит обработка поверхности – более равномерной. Упрочнение поверхности же останется на требуемом уровне, несмотря на уменьшение усилия.

Так же в экспериментах с накатыванием заготовок из всех исследуемых материалов был отмечен сильный разогрев поверхности. Следует иметь в виду, что при сильном нагреве материала заготовки в контактной зоне может начаться процесс рекристаллизации, который снизит достигнутый положительный эффект дробления зерен. Поскольку титан обладает низкой теплопроводностью, это явление нужно учитывать для грамотного проведения технологической операции накатывания. Для исключения подобного негативного момента в процессе обработки предлагается использовать охлаждающую среду. Проведенные эксперименты с водой, налитой в инструментальную камеру, доказали возможность применения ее в качестве охладителя.

5.2. Технология изготовления головки эндопротеза тазобедренного сустава человека

Решить проблему износа сферической головки эндопротеза можно повышением твердости поверхностей трения [67] и снижением прочности адгезионных связей путем насыщения азотом ее поверхности. Обеспечить ее долговечность можно применением комплексной обработки, в которой поэтапно будут решаться поставленные задачи.

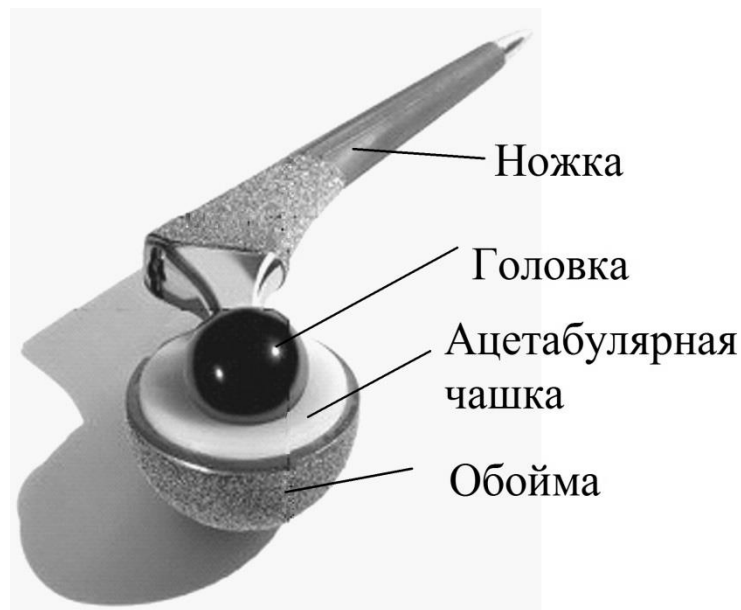


Рис. 5.1. Общий вид эндопротеза тазобедренного сустава с металлической головкой

Сферическая головка является важным компонентом шарнирного сочленения эндопротеза тазобедренного сустава (рис. 5.1), которая в значительной мере определяет его долговечность. Основными требованиями к получаемой головке являются повышенная износостойкость, прочность, триботехнические характеристики и биоинертность. Последнее требование обеспечивается применением сплава ВТ1-0, являющегося технически чистым титаном, в качестве материала сферической головки.

Экспериментально установлено, что получить указанный эффект возможно, применив азотирование в качестве метода модификации [68], [69]. Это делает актуальной комплексную задачу разработки технологии прецизионной механической обработки сферических головок из ВТ1-0, а

также технологии их азотирования. Заготовка для термохимического насыщения должна отвечать определенным требованиям по точности и состоянию поверхностного слоя. Кроме того, для интенсификации процесса насыщения в поверхностном слое заготовки азотом необходимо сформировать мелкодисперсную структуру.

Процесс изготовления начинается с получения точением сферы необходимого диаметра из отожженного титанового прутка марки ВТ1-0 со значением шероховатости поверхности $Ra\ 3,2$ мкм и отклонением от сферичности в $0,15$ мм. Поверхность полученной заготовки требуется в дальнейшем упрочнить.

Операция деформирования должна обеспечивать увеличение поверхностной твердости заготовки и измельчение микроструктуры ее поверхностного слоя. Повышение твердости увеличивает стойкость к истиранию поверхности головки, а мелкозернистая структура позволяет глубже насыщать поверхность азотом, что также благоприятно сказывается на износостойкости. Для реализации интенсивного пластического деформирования поверхности применялась схема накатывания заготовки плоскими инструментами (рис. 5.2).

Заготовка (1) размещается в инструментальной камере (2) на удалении от ее боковой стенки. Сверху подводится прижим (3) в виде плоского диска. Ось вращения прижима и ось цилиндрической стенки камеры имеют эксцентриситет E .

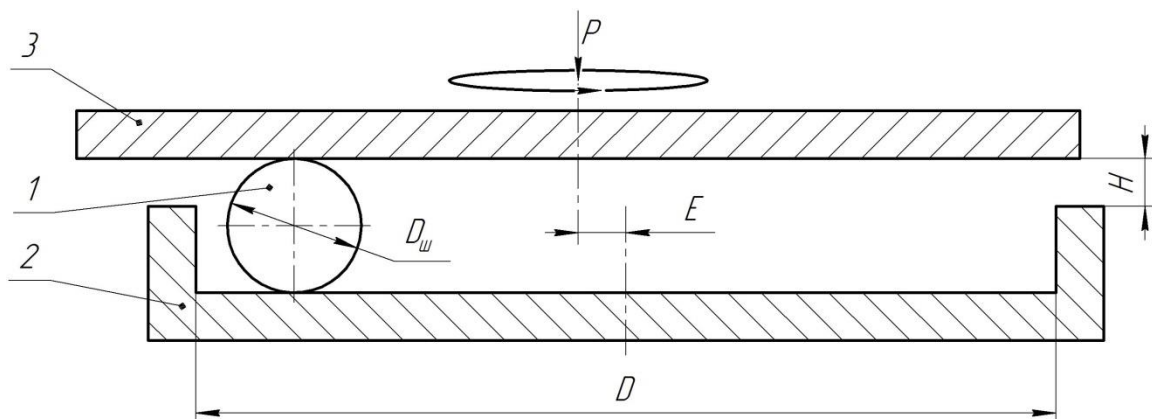


Рис. 5.2. Схема процесса накатывания

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

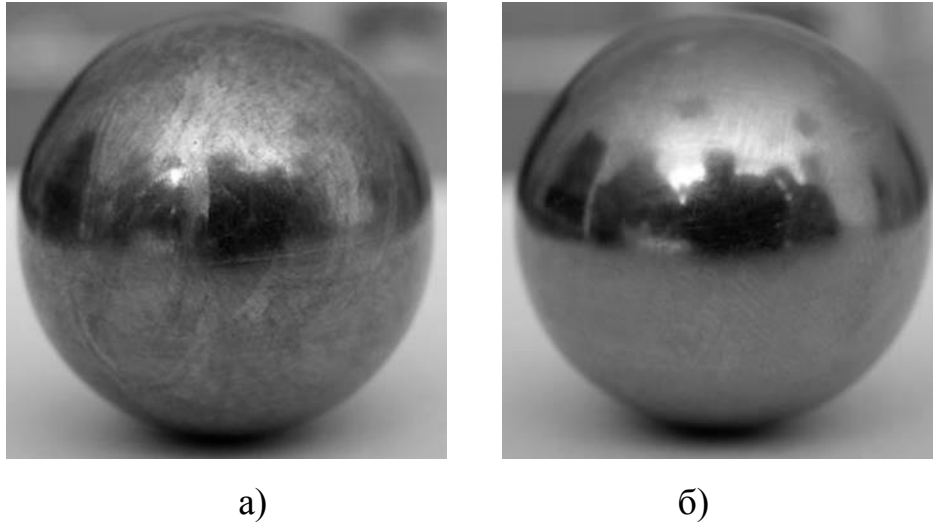


Рис. 5.3. Поверхность заготовки после накатывания:

а) после 5 секунд; б) после 60 секунд

Опытные образцы (рис. 5.3) после обработки имели слой деформационного упрочнения глубиной до 2 мм и более. При этом микротвердость поверхностного слоя глубиной до 50 мкм увеличивается в $\sim 2,5$ раза по сравнению с исходной, слоя, лежащего на глубине 50 – 2000 мкм – в $\sim 1,7$ раза. Результаты экспериментального накатывания позволяют говорить об успешности предложенного метода, как способного обеспечить требуемые качества поверхностного слоя сферической заготовки. После накатывания были получены значения шероховатости R_a 0,6 – 0,8 мкм, а отклонение от формы не превышало 0,05 мм.

Дальнейшая обработка уже упрочненной заготовки направлена на снижение шероховатости поверхности и повышения геометрической точности конечной детали. В ИСМ НАН Украины разработана технология прецизионной алмазно-абразивной обработки сферических заготовок из ВТ1-0, обеспечивающая получение шероховатости обработанной поверхности R_a

0,02 мкм и точности 0,01 мм. Она заключается в поэтапной алмазной обработке со снижением зернистости инструмента по схеме свободной притирки.

Для предварительной (черновой) обработки использовали технологическую схему [70], позволяющую абразивному инструменту в виде чашки с отверстием (рис. 5.4) свободно самоустанавливаться относительно заготовки, совершая сложное относительное перемещение. К детали 1, посаженной на оправку 2 и установленную в патрон токарного станка, прижимают под углом α инструмент 3, установленный в обойме 4, которая опирается на шарнир 5. Данная схема позволяет получить необходимую точность сферического изделия.

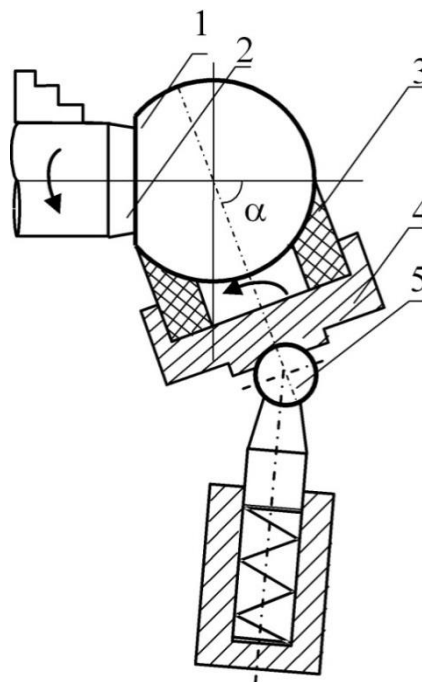


Рис. 5.4. Схема абразивной обработки заготовки свободной притиркой

Использование при абразивной обработке инструмента, содержащего мелкодисперсный алюмосиликатный наполнитель – монтмориллонит и порошки синтетических алмазов позволило избежать схватывания инструмента с поверхностью титана. Последующее полирование поверхности позволяет получать точность и шероховатость обработанной поверхности соответствующей требованиям ГОСТ Р ИСО 7206-2-2005. Заготовки, полученные после полирования, представлены на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Образцы перед азотированием

Сравнение технологических маршрутов с операцией накатывания и без нее привело к выводу, что обрабатываемость деталей, упрочненных холодным поверхностным пластическим деформированием, алмазно-абразивной обработкой по методу свободной притирки выше, чем у не упрочненных. Ниже приведены изображения поверхности сферы, полученные по двум технологическим маршрутам (рис. 5.6).

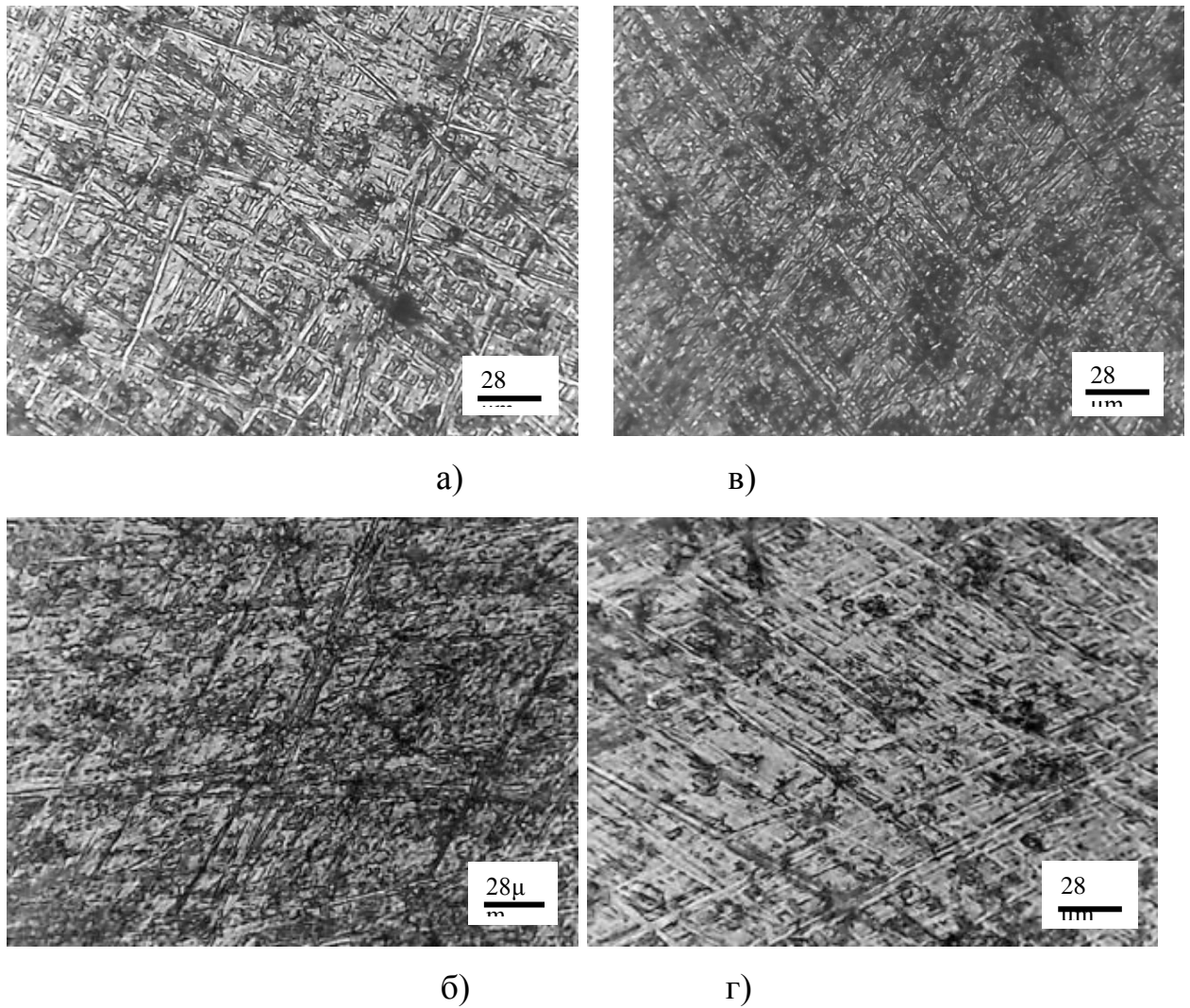


Рис. 5.6. Топография поверхности шара: а, б) после токарной обработки и обработки инструментом с алмазными зернами не выше 100 и 50 мкм соответственно; в, г) после ХППД и обработки инструментом с алмазными зернами не выше 100 и 50 мкм соответственно.

После достижения требуемой геометрической точности производилась термохимическая обработка поверхности полученной детали. Азотирование может быть произведено двумя различными методами – методом ионно-плазменного термоциклического азотирования (ИПТА) [71], [72] и термодиффузионного азотирования (ТДА). Для создания износостойкой поверхности в данном случае применялась технология термодиффузионного азотирования.

Испытания пары трения «азотированный титан/хирулен» [73], проведенные на машине торцового трения в плазме крови при условиях и

режимах согласно ASTM F732-82 (скорость скольжения образца по контртелу - 0,057 м/с, контактное давление – 3,54 МПа), 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), а также пару «неазотированный титан/хирулен». Характерно, что в процессе испытаний даже при прохождении пути трения 120 км никакого износа образца из азотированного титанового сплава выявлено не было [74].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что чистый титан является очень перспективным материалом для производства деталей шарнирного сочленения эндопротезов суставов. Разработанная технология изготовления головок шарнирного сочленения открывает путь к созданию социального эндопротеза тазобедренного сустава человека, доступного потенциальным потребителям и отвечающего современным требованиям.

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 10-50 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 VT1-0, износостойкость которой в паре трения с хируленом в 2,5 раза превышает широко применяемую в настоящее время пару трения «CoCrMo/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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Косяков А.Н. Биосовместимость материалов эндопротеза нового поколения при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава [Текст] / А.Н. Косяков, О.А. Розенберг, В.К. Бондарь и др. // Ортопедия, травматология и протезирование. –2010. –№4(581). –С. 105–115.

2. Назаров Е.А. Применение отечественных имплантатов в эндопротезировании тазобедренного сустава [Текст] / Е.А. Назаров, М.Н. Рябова // Российский медико-биологический вестник им. Академика И.П. Павлова. –2007. –№2. –С. 13–20.

3. Tribology and Biophysics of Artificial Joints [Text] / Pinchuk L.S. Nikolaev, V.I. Tsvetkova, E.A. Goldade, V.A. – London: Elsevier, 2006. – 375 pp.

4. Эндопротезы суставов человека: материалы и технологии: монография [Текст] / Н.В. Новиков О.А. Розенберг, Й. Гавлик и др. –Киев: ИСМ НАН Украины, 2011. – 528 с.

5. Скороглядов А.В. Твердые пары терния в эндопротезировании тазобедренного сустава. За и против [Текст] / А.В. Скороглядов, А.Б.Бут-Гусаим, И.В. Сиротин, В.А. Мкртчян // Российский медицинский журнал. – 2014. –№6. –С.48-53.

6. Розенберг О.А. Перспективы применения технически чистого титана для имплантатов костной хирургии [Текст] / О.А. Розенберг, С.Е. Шейкин, С.В. Сохань // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2010. –№ 2. – С. 50–54.

7. Шаркеев Ю.П. Наноструктурный титан биомедицинского назначения [Текст] / Ю.П. Шаркеев, А.Д. Братчиков, Ю.Р. Колобов и др. // Физическая мезомеханика. –2004. –Т. 7. – № S2. –С. 107—110.

8. Неверов В.А. Ревизионное эндопротезирование тазобедренного сустава [Текст] / В.А. Неверов, С.М. Закари. – СПб.: Образование, 1997. – 112 с.

9. Загородний Н.В. Эндопротезирование тазобедренного сустава тотальным цементным эндопротезом “СФЕН” [Текст] / Н.В. Загородний, А.Л. Плющев, О.А. Клубова и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. –2001. –№ 2. –С. 84-90.

10. Курзина И.А. Эволюция структуры и механических свойств ультрамелкозернистого титана [Текст] / И.А. Курзина, И.А. Божко, М.П. Калашников и др. // Материаловедение. –2010. –№5. –С. 48–55.

11. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации [Текст]/ Р.З. Валиев // Российские нанотехнологии. –2006. – Т.1. –№1-2. –С. 208–216.

12. Shi M. Microstructure Refinement and Texture Evolution of Titanium by Friction Roll Surface Processing [Text], M. Shi, Y. Takayama, T. Umetsu, Materials Transactions. –2009. –Vol. 50. –№1. –pp. 210-214.

13. Lu K. Nanostructure surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment [Text] / K. Lu, J. Lu // Mater. Sci. & Eng. A.– 2003.– Vol. 375–377. –pp. 38–45.

14. Belocky A.V. Strengthening of steel by friction in nitrogen atmosphere. [Text] / AV. Belocky, A.I. Yurcova // Technologi and product organization. – 1988. – №2. – pp. 40–43.

15. 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.

16. Катунин А.А. Моделирование процесса обкатки сферической головки автомобильного шарового пальца [Текст] / А.А. Катунин // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». Орел: ОрелГТУ, 2008.– №3–7(546).– С. 53–56.

17. Алифанов А.В. Упрочнение стальных деталей сферической формы методом обкатки [Текст] / А.В. Алифанов, В.Н. Алехнович, А.А. Лях // Материалы 11-ой Международной практической конференции-выставки "Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня".

18. Zhu K.Y. Nanostructure formation mechanism of α -titanium using SMAT [Text] / K.Y. Zhu, A. Vassel, F. Brisset et al. // Acta Materialia – 2004. – Volume 52. – Issue 14. – pp. 4101–4110.

19. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов [Текст] / М.В. Макушев // Письма о материалах. –2011. –Т. 1. –№1. –С. 36–42.

20. Иголкин А. И. Титан в медицине [Текст] / А.И. Иголкин. // Титан. – 1993. – №1, – С. 86 – 90.

21. Максимов А.Л. Анализ причин асептической нестабильности эндопротеза тазобедренного сустава компании "АЛТИМЕД" [текст] / А.Л. Максимов, Е.Н. Горбач, А.В. Каминский // Современные проблемы науки и образования. –2012. –№ 5. –С. 52.

22. Liu X. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications [Text] / X. Liu, C. Ding, P.K. Chu // Materials Science and Engineering: R: Reports. –2004. –Т. 47. –№ 3-4. –Р. 49-121.

23. Титановые сплавы в машиностроении [Текст] / Б.Б. Чечулин С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн. – Л.: «Машиностроение»,1977. – 248 с.

24. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я.Е. Бейгельзимер В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков. – Донецк: ТЕАН. – 2003. – 87 с.

25. Варюхин В.Н. Опытнo-промышленная установка винтовой экструзии для проведения маркетинговых исследований объемных наноматериалов [Текст] / В.Н. Варюхин, Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков и др. // Металл и литье Украины. – 2010. – №6. – С. 17–22.

26. Усов В.В. Текстура титана после винтовой экструзии [Текст] / В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк, П.А. Брюханов, Я.Е. Бейгельзимер // Физика и техника высоких давлений. – 2011. – Т. 21. – №2. – С. 103–108.

27. Бетехтин В.И. Длительная и статическая прочность микрокристаллического титана VT1-0, полученного при равноканальном угловом пресоовании [Текст] / В.И. Бетехтин, J. Drovak, А.Г. Кадомцев и др. // Письма в “Журнал технической физики”. – 2015. – Т. 41. №. 2. – С. 58–63.

28. Бетехтин В.И. Механические свойства, плотность и дефектная структура субмикрокристаллического титана VT1-0, полученного после интенсивной пластической деформации при винтовой и продольной прокатках [Текст] / В.И. Бетехтин, О.Р. Колобов, М.В. Нарыкова и др. // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – №11. – С. 58–63.

29. Поляков А.В. Механическое поведение титана GRADE 4, полученного комбинацией РКУП-CONFORM и волочения [Текст] / А.В. Поляков, И.П. Семенова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. –769.

30. Поляков А.В. Эволюция микроструктуры титана GRADE 4 с изменением деформации при РКУП-Conform [Текст] / А.В. Поляков, Д.В. Гундеров, Г.И. Рааб, Е.П. Сошникова // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – №1(41). – С. 95–100.

31. Москаленко В.А. Механические свойства и структурные особенности нанокристаллического титана, полученного при криопротатке [Текст] / В.А. Москаленко, В.И. Бетехтин, Б.К. Кардашев и др. // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56. – № 8. – С. 1539–1545.

32. Пат. 2436847 Российская Федерация МПК С21D007/10, С22F001/00, В21J013/02, В82В003/00. Способ деформирования для получения заготовок в

субмикроструктурном и наноструктурированном состоянии и устройство для его осуществления [Текст] / Шаркеев Ю.П. (RU), Глухов И.А. (RU), Ерошенко А.Ю. (RU), Коробицын Г.П. (RU), Толмачев А.И. (RU); заявитель и патентообладатель Учреждение РАН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (ИФПМ СО РАН) (RU). — № 2010123586/02; заявл. 09.06.2010, опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. — 13 с.

33. Шаркеев Ю.П. Микроструктура и механические свойства наноструктурированных и ультрамелкозернистых титана и циркония, сформированных методом интенсивной пластической деформации [Текст] / Ю.П. Шаркеев, А.Ю. Ерошенко, В.И. Данилов, А.И. Толмачев и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2003. — Т. 56. — №10. — С. 47–53.

34. Шаркеев Ю.П. Структура и механические свойства наноструктурного титана после дорекристаллизационных отжигов [Текст] / Ю.П. Шаркеев, А.Ю. Ерошенко, А.Д. Братчиков и др. // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8. — № 5. — С. 91–94.

35. Столяров В.В. Деформационные методы измельчения структуры [Текст] / В.В. Столяров // Вестник научно-технического развития. — 2013. — №4(68). — С. 29–36.

36. Шаркеев Ю.П. Закономерности формирования субмикроструктурных структур в титане, подвергнутом интенсивному пластическому деформированию по различным схемам [Текст] / Ю.П. Шаркеев, В.А. Кукаренко, А.Ю. Ерошенко и др. // Физическая мезомеханика. — 2006. — Т. 9. — №1. — С. 129–132.

37. Пат. 2407622 Российская Федерация МПК6 В24В039/00, Способ обработки сферических изделий поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Шейкин С.Е., Цеханов Ю.А., заявители и патентообладатели Шейкин С.Е. Цеханов Ю.А. . — 2009126405/02 ; заявл. 09.07.2009; опубл. 25.01.2010, Бюл. №2. — 1 с.

38. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие [Текст] / В.С. Паршин А.П. Карамышев, И.И. Некрасов и др., научн. Ред. Ю.Б. Чебулин. –Екатеринбург: УрФУ 2010. – 266 с. .

39. DEFORM-3D Version 10.0 User's manual [electronic resource]. Scientific Forming Technologies Corporation 2009. – 617 p.

40. Шейкин С.Е. Работоспособность сферических титановых головок эндопротезов тазобедренного сустава в паре с хируленом и технологические основы их изготовления [Текст] / С.Е. Шейкин, Ю.А. Цеханов, Д.В. Ефросинин, И.Ю. Росточкий // Вістник СевНТУ. – 2012. –№133. –С. 323–328.

41. Kobayashi Shiro. Metal forming and the finite-element [Text] / Shiro Kobayashi, Soo-Ik Oh, Taylan Altan. New-York: Oxford university press, 1989. – 377 p.

42. Харламов А.А., Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса Deform [Текст] / А.А. Харламов, А.П. Латаев, В.В. Галкин, П.В. Уланов // САПР и графика. – 2005. – №5. – С. 11.

43. Харламов А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением. / А. Харламов, А. Уваров. // САПР и графика. – 2003. – №6. – 5 с.

44. Лопатин Н.В. Моделирование формообразования и эволюции структуры наноструктурного титанового сплава ВТ6 при изотермической формовке с использованием DEFORM 2D [электронный ресурс] / Н.В. Лопатин, Е.А. Кудрявцев, Г.А. Салищев. - режим доступа: http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es13-belgtu.pdf, свободный.

45. Лажнев С. Использование программного комплекса DEFORM 2D/3D в научной работе и учебном процессе [Текст] / С. Лажнев, Е. Панин. // САПР и графика. – 2009. – №5 (151). – С. 92–93.

46. Довженко Н.Н. Моделирование процесса непрерывного прессования методом КОНФОРМ в инженерном программном комплексе DEFORM-3D [электронный ресурс] / Н.Н. Довженко, И.Ю. Губанов, И.В.

Солопко. – режим доступа: http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es11_sibfu.pdf, свободный.

47. Камалетдинов И.Ш. Исследование процесса равноканального углового прессования [электронный ресурс] / И.Ш. Камалетдинов, В.С. Юсупов. – режим доступа: <http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/IMET1.pdf>, свободный.

48. Бейгельзимер Я.Е. Моделирование процесса винтовой экструзии [Текст] / Я.Е. Бейгельзимер, Р.Ю. Кулагин, А.П. Латаев // Обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. – 2011. – №2 (27). – С. 19-23.

49. Лопатин Н.В. Моделирование структурообразования в титановом сплаве ВТ6 при изотермической ковке в программном комплексе Deform // Н.В. Лопатин, С.Н. Горбушин, И.П. Семенова и др. // Обработка металлов давлением. Компьютерные исследования и моделирование. . — 2014. – Т.6. – №6. – С. 975–982.

50. Новокшенов С.Л. Проектирование технологических процессов ОМД. Решение задач методом конечных объемов. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине “САПР технологических процессов ОМД” для студентов специальности очной формы Проектирование технологических процессов ОМД. Решение задач методом конечных объемов [Текст] / Воронеж, ВГТУ; сост. С.Л. Новокшенов, А.Ю. Бойко, Г.Л. Дегтярев. Воронеж: ВГТУ, 2005. – 44 с.

51. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением [Текст] / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. 2-е изд. М., “Металлургия”, 1973. –224с.

52. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник [Текст] / В.А. Кроха. М.: Машиностроение, 1980. – 157с.

53. 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.

54. 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.

55. Коршунов Л.Г. Влияние фрикционной обработки на структуру и износостойкость поверхностного слоя титана ВТ1-0, подвергнутого азотированию / Л.Г. Коршунов, Н.Л. Черненко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 31-48.

56. Смелянский В.М. Механика деформирования поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах пластического поверхностного деформирования. [Текст] Дис. д-ра техн. наук. – М. – 1986.

57. Цеханов Ю.А. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании [Текст]: монография / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин. – Воронеж: ВГТА, 2001. –201 с.

58. 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.

59. 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. ВГТУ, Воронеж. –2012. –№9. –С. 61–64.

60. Михайловский И.А. Повышение результативности производства шаровых шарниров на основе регламентации комплекса требований к

качеству изделий и материалов [Текст]: автореф. Дис. На соиск. Учен. Степ. д. техн. наук / Михайловский Игорь Александрович, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. –Магнитогорск, 2011. – 44 с.

61. 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.

62. 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.

63. Цеханов Ю.А. Поверхностное упрочнение шара из сплава ВТ1-0 накатыванием плоскими поверхностями [Текст] / Ю.А. Цеханов, Н.И. Даниленко, А.Г. Моляр, С.Е. Шейкин // Физика и техника высоких давлений. – 2011. –Т. 21. –№ 4. –С. 130—138.

64. 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.

65. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости [Текст] / Г.Д. Дель. М.: Машиностроение, 1971. – 200с.

66. Грушко А.В. О контактном давлении в шарнирном сочленении эндопротеза тазобедренного сустава [Текст] / А.В. Грушко, С.Е. Шейкин, И.Ю. Ростоций // Трение и износ. – 2012. – Т. 33. – № 2. – С. 160–167.

67. Загородний Н.В. Низкофрикционные эндопротезы в хирургии тазобедренного сустава.[Текст] / Загородний Н.В. Калашников С.А.,

Магомедов Х.М. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицины. – 2002. – №2. – С. 52–56.

68. Белый А.В. Структура и триботехнические свойства субмикрористаллического титана, модифицированного ионами азота [Текст] / А.В. Белый, В.А. Кукаренко, А.Г. Кононов и др. // Трение и износ. –2008.–Т. 29. – №6. –С. 571–577.

69. Федірко В. М. Азотування титану та його сплавів [Текст] / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк. – К.: Наук. думка, 1995. – 220 с.

70. Пат. № 61729 А Україна 7 В 24 В 11/10. Спосіб обробки сферичних поверхонь та пристрій для його реалізації [Текст] М.В. Новіков, О.О. Розенберг, С.В. Сохань. Заявл. 09.04.2003, Опубл.17.11.2003 Промислова власність, Бюл. №11.

71. Ильин А.А. Влияние фазового состава и структуры на взаимодействие титановых сплавов с азотом при низкотемпературном ионном азотировании [Текст] / А.А Ильин, С.В. Скворцова, Л.М. Петров, Е.А. Лукина и др. // Металлы. – 2006.– №2.– С. 40–46.

72. Ильин А.А. Низкотемпературное ионное азотирование имплантов из титанового сплава VT20 в различных структурных состояниях [Текст] / А.А. Ильин, С.В. Скворцова, Е.А. Лукина, В.Н. Карпов, О. А. Поляков // Металлы. – 2005.– №2.– С. 38 – 44.

73. Бондарь В.К. Роботоспроможність шарнірного зчленування ендопротезів з титановим та хіруленовим компонентами [Текст] / В.К. Бондарь, С.Є. Шейкин, О.В. Грушко, Д.А. Сергач // Ортопедия, травматология и протезирование. –2013. –№4(593). –С. 55–55.

74. Шейкин С.Е. О выборе смазывающей жидкости для триботехнических испытаний пар трения искусственных суставов [Текст] / С.Е. Шейкин, С.Ф. Ермаков, Ю.А. Цеханов и др. // Вістник СевНТУ. – 2013. – №137. – С. 137-141.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Документы, подтверждающие практическое использование
результатов работы**

УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор

ПАО «ВАСО»

А.А. Анохин



» 02.09.15 2015г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Мы, нижеподписавшиеся, представители Воронежского акционерного самолетостроительного общества (ВАСО) и Воронежского государственного архитектурно-строительного университета (ВГАСУ) составили настоящий акт о том, что на предприятии ВАСО планируется создание опытного участка по производству эндопротезов тазобедренного сустава человека из чистого титана.

Опытные работы в производственных условиях ВАСО произведены при реализации технологического процесса изготовления сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава, разработанного по Договору о международном научно-техническом сотрудничестве ВГАСУ совместно с институтом сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины. Одним из авторов разработки является аспирант ВГАСУ Карих Д.В.

Разработана и реализована лабораторная установка, позволяющая производить упрочняющую отделочную операцию накатыванием сферических заготовок плоскими инструментальными поверхностями. Проведенные работы позволят применить технически чистый титан марки ВТ1-0 в паре трения сферическая головка – вертлужная чашка.

Себестоимость протеза тазобедренного сустава при годовой программе в 10 тысяч штук составит 35 тысяч рублей в ценах 2015 года.


От ВГАСУ:

Аспирант


 Д.В. Карих

От ВАСО:

Главный технолог


 М.В. Кузнецов

Дубл.													
Взам.													
Подел.													
									25				
										О ₁			

ГОСТ 3.1105-84 Форма 2

СОГЛАСОВАНО		УТВЕРЖДАЮ
_____		_____
_____		_____

КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ
на технологический процесс
механической обработки
(опытный)

головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВГ1-0

_____		_____
-------	--	-------

ТЛ	
----	--

ГОСТ 3.1118-82										Форма 1		
Дубл.												
Взам.												
Подл.												
											7	1
Разраб.	Ефросинин Д.В.											
Пров.	Мельниченко В.В.											
Н. контр.	Тимошенко Л.М.											
Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0												
О ₁												
М01 Пруток ВТ1-0 ГОСТ 19807-91												
	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н. расх.	КИМ	Код загот.	Профиль и размеры		КД	МЗ	
М02	Кг	0,05	100		0,13		прокат	Пруток Ø40x55		1	0,38	
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции							
Б	Код, наименование оборудования											
Обозначение документа												
	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Клпг.	Тп.з.	Тшт.	
А 03	20		005		Токарная							
Б 04	1К62											
О 05	Подрезать торец выдерживая размер L=35±1											
Т 06	Резец правый проходной отогнутый; ШЦЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль											
07												
А 08	20		010		Токарная							
Б 09	1К62											
О 10	Точить канавку выдерживая размеры L=28,5±0,3 D=10±1											
Т 11	Резец отрезной; ШЦЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль											
12												
А 13	20		015		Токарная							
Б 14	1К62											
										31,8	95,54	
МК												
										2		

ГОСТ 3.1118-82															Форма Ia			
Дубл.																		
Взам.																		
Подл.																		
																	2	
Обозначение документа																		
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код. наименование оборудования	Код. наименование операции	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОНД	ЕН	ОН	Клпг.	Тп.з.	Тип.	
Б																		
О 01	Точить поверхность выдерживая размер Ø28,1±0,02																	
Т 02	Резец фасонный; МКЦ(1)-50 микрометр																	
03																		
А 04	20			020	Отделочная													
Б 05				2А150						1	1	100				16,5	120,2	
О 06	Накатать поверхность																	
Т 07	Оснастка для накатывания; ШЦЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль																	
08																		
А 09	20			025	Токарная													
Б 10				1К62						1	1	100				16,5	59,95	
О 11	Подрезать поверхность, снять фаску выдерживая размеры 29,4±0,2; 30°																	
Т 12	Резец правый проходной отогнутый; ШЦЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль																	
13																		
А 14	20			030	Токарная													
Б 15				1К62						1	1	100				36	129,8	
О 16	Сверлить отверстие выдерживая размеры 18,5; Ø12,5 ^{+0,018}																	
МК																		
	3																	

Дубл.														ГОСТ 3.1118-82		Форма 1а	
Взам.																	
Подл.																	
3																	
А		Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции				Обозначение документа							
Б		Код, наименование оборудования				СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Клпг.	Тп.з.	Тип.	
Т 01	Сверло; ШЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль																
02																	
А 03	20	035				Токарная											
Б 04	1К62									1	1	100	29,7		107,9		
О 05	Расточить отверстие выдерживая размер 15±0,2																
Т 06	Резец расточной; ШЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль																
07																	
А 08	20	040				Токарная											
Б 09	1К62									1	1	100	63,9		227,91		
О 10	Отрезать заготовку выдерживая размер Ø28,1±0,02																
Т 11	резец отрезной; МКЦ (1)-50 микрометр																
12																	
А 13	20	045				Токарная											
Б 14	1К62									1	1	100	30,9		112,27		
О 15	Точить поверхность выдерживая размер Ø28,1±0,02																
Т 16	резец фасонный; МКЦ(1)-50 микрометр																
МК																	
		4															

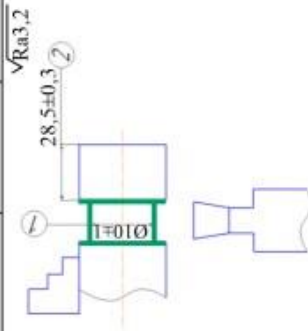
		ГОСТ 3.1118-82										Форма 1а					
Дубл.	Взам.																
Подл.																	
														5			
		Обозначение документа															
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Клпг.	Тп.з.	Тшт.	
Б	Код, наименование оборудования																
А 01	20			065	Токарная												
Б 02			1К62							1	1	100			204	741,2	
О 03					Притереть поверхность выдерживая размер $\varnothing 28,02 \pm 0,01$												
Т 04					28/20 Притир; МКЦ(1)-50 микрометр												
05																	
А 06	20			070	Токарная												
Б 07			1К62							1	1	100			360	1308	
О 08					Притереть поверхность выдерживая размер $\varnothing 28,01_{-0,01}$												
Т 09					20/14 Притир; МКЦ(1)-50 микрометр												
10																	
А 11	20			075	Токарная												
Б 12			1К62							1	1	100			360	1308	
О 13					Полировать поверхность выдерживая размер $\varnothing 28,00_{-0,2}$												
Т 14					1 Круг полировочный; 1 компаунд полировочный; МКЦ(1)-50 микрометр												
15																	
16																	
МК																6	

Дубл.		Взам.		Подл.		ГОСТ 3.1118-82										Форма Ia	
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код. наименование операции	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Клпг.	Тп.з.	Тшт.	
Б	Код. наименование оборудования				Обозначение документа												
А 01	20		080		Токарная												
Б 02		1К62						1	1	100					105	381,5	
О 03	Полировать поверхность выдерживая размер $\text{Ø}28,00_{-0,2}$																
Т 04	2 Круг полировочный; 2 компаунд полировочный; МКЦ(1)-50 микрометр																
05																	
А 06	20		085		Токарная												
Б 07		1К62						1	1	100					105	381,5	
О 08	Полировать поверхность выдерживая размер $\text{Ø}28,00_{-0,2}$																
Т 09	3 Круг полировочный; 3 компаунд полировочный; МКЦ(1)-50 микрометр																
10																	
А 11	20		090		Токарная												
Б 12		1К62						1	1	100					105	381,5	
О 13	Полировать поверхность выдерживая размер $\text{Ø}28,00_{-0,2}$																
Т 14	4 Круг полировочный; 4 компаунд полировочный; МКЦ(1)-50 микрометр																
15																	
16																	
МК																7	

Дубл.														ГОСТ 3.1118-82		Форма Ia					
Взам.																					
Подл.																					
																7					
А	Цех	Уч.	PM	Опер.	Код. наименование операции						Обозначение документа										
					Код. наименование оборудования			Код. наименование операции			CM	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Клпг.	Тп.з.	Тпт.
Б																					
A 01	20			095	Моечная																
B 02					Ультразвуковая мойка								1		1	100		500	1234,97		
O 03					Промыть деталь																
T 04					Раствор Prosol																
05																					
A 06				100	Азотирование																
B 07					Установка для азотирования								1		1	100		340	33245		
O 08					Азотировать поверхность t=5 ч; P=30 Па; I=2 А; U=400 В T°=540-620 °C																
T 09					МКЦ(1)-50 микрометр																
10																					
11				105	Контрольная																
12					Miston-alpha								1		1	100		60	78		
13					Контроль рабочей поверхности Ra 0,05 мкм																
14					МКЦ(1)-50 микрометр																
15																					
16																					
МК																	8				

Дубл.																																																
Взам.																																																
Подл.																																																
Разраб.	Ефросини Д.В.																																															
Пров.	Мельниченко В.В.																																															
Н. контр.	Тимошенко Л.М.																																															
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> </div> <div style="width: 50%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0</p> <p>Наименование операции: Токарная</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th>Твердость</th> <th>ЕВ</th> <th>МД</th> <th>Профиль и размеры</th> <th>МЗ</th> <th>КОИД</th> </tr> <tr> <td>160 НВ</td> <td>кГ</td> <td>0,05</td> <td>Пруток Ø40x55</td> <td>0,38</td> <td>1</td> </tr> </table> <p>Оборудование, устройство ЧПУ: ИК62</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th>То</th> <th>Тв</th> <th>Плз.</th> <th>Тшт.</th> <th colspan="3">СОТС</th> </tr> <tr> <td>0,33</td> <td>1</td> <td>0,4</td> <td>1,46</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Обозначение программы: S n p V</p> </div> </div>																							Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД	160 НВ	кГ	0,05	Пруток Ø40x55	0,38	1	То	Тв	Плз.	Тшт.	СОТС			0,33	1	0,4	1,46			
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД																																											
160 НВ	кГ	0,05	Пруток Ø40x55	0,38	1																																											
То	Тв	Плз.	Тшт.	СОТС																																												
0,33	1	0,4	1,46																																													
Р																																																
О 01	Подрезать торец выдерживая размер 1																																															
Т 02	Резец правый проходной отогнутый; ШЦЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль																																															
Р 03					3		1		0,28		315		39																																			
04																																																
О 05	Контроль исполнителем																																															
06																																																
07																																																
08																																																
09																																																
10																																																
ОК																					9																											

Дубл.		Взам.		Подл.		ГОСТ 3.1404-86		Форма 2	
Разраб.		Ефросини Д.В.							
Пров.		Мельниченко В.В.							
Н. контр.		Тимошенко Л.М.				20		010	
						Головка эндопротеза тазобедренного сустава			
						Наименование операции		Материал	
						Токарная		ВТ1-0	
						Твердость		Профиль и размеры	
						160 НВ		Пруток Ø40x55	
						кГ		0,05	
						Оборудование, устройство ЧПУ		Обозначение программы	
						ИК62			
						То		Тп.з.	
						0,7		0,31	
						Д или В		L	
						ПИ		t	
								i	
								S	
								n	
								V	
О 01		Точить канавку выдерживая размеры 1 и 2							
Т 02		Резец отрезной; ШЦЦ-1-150 (0,01) штангенциркуль							
Р 03						1		0,14	
04								315	
05		Контроль исполнителем							
06									
07									
08									
09									
10									
ОК								10	



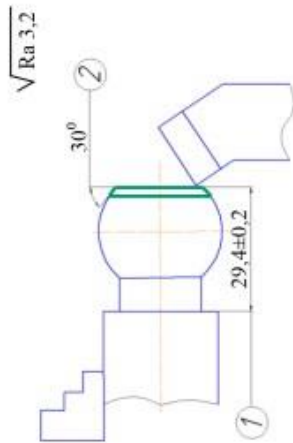
Дубл.					
Взам.					
Подл.					
Разраб.	Ефросини Д.В.				1
Пров.	Мельниченко В.В.				
Н. контр.	Тимошенко Л.М.	Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0			20
		Наименование операции		Материал	
		Токарная		ВТ1-0	
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД
160 НВ	кГ	0,05	Пруток Ø40x55	0,36	1
Оборудование, устройство ЧПУ					
ИК62					
То	Тв	Тпз.	Тпт.		
0,4	0,66	0,32	0,95		
Р	Д или В	L	t	i	S
					p n V
О 01	Точить поверхность выдерживая размер 1				
Т 02	Резец фасонный; МКЦ(1)-50 микрометр				
Р 03	1				
04	315 39				
О 05	Контроль исполнителем				
06					
07					
08					
09					
10					
ОК					11

Дубл.																						
Взам.																						
Подл.																						
Разраб.	Карих Д.В.																				1	
Пров.	Мельниченко В.В.																					
Н. контр.	Тимошенко Л.М.																			20	020	
Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0																						
										Наименование операции		Материал										
Отделочная										ВТ1-0												
Твердость		ЕВ	МД	Профиль и размеры		МЗ		КОИД														
160 НВ		кГ	0,05			0,36		1														
Оборудование, устройство ЧПУ										Обозначение программы												
2A150																						
То		Тв	Тпз.	Тпт.																		
0,9		2	0,74	3,2																		
D или B		L	t	i	S	p	V															
P	ШИ																					
O 01	Накатать поверхность выдерживая размер 1																					
T 02	Оснастка для накатывания; МКЦ(1)-50 микрометр																					
P 03	P=2000H																					
04																						
O 05	Контроль исполнителем																					
06																						
07																						
08																						
09																						
10																						
OK																				12		

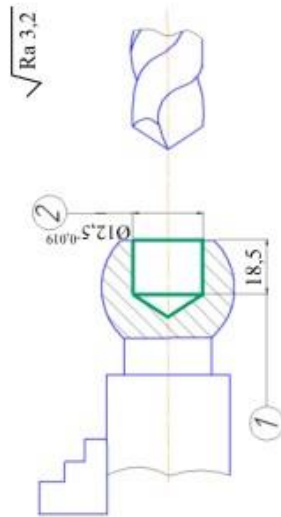
ГОСТ 3.1404-86

Форма 2

Дубл.										
Взам.										
Подл.										
Разраб.	Ефросини Д.В.									
Пров.	Мельниченко В.В.									
Н. контр.	Тимошенко Л.М.				20		025		1	
<p style="text-align: center;">Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0</p>										
		Наименование операции			Материал					
		Токарная			ВТ1-0					
		Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры			МЗ	КОИД	
		160 НВ	кг	0,05	Пруток Ø40x55			0,334	1	
		Оборудование, устройство ЧПУ			Обозначение программы					
		ИК62								
		То	Тв	Тп.з.	Тип.	СОТС				
		0,22	0,33	0,16	0,6					
		D или B	L	t	i	s	n	v		
		ПИ								
Р		Подрезать поверхность выдерживая размер 1								
О 01										
Т 02		Резец правый проходной отогнутый; ШЦЦ-I-150 (0,01) штангенциркуль								
Р 03				2		2		0,28 315 39		
04										
О 05		Снять фаску выдерживая размер 2								
Т 06		Резец правый проходной отогнутый								
Р 07									315 39	
08										
О 09		Контроль исполнителем								
10										
ОК									13	



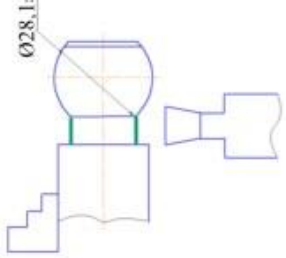
ГОСТ 3.1404-86		Форма 2	
Дубл.			
Взам.			
Подл.			
			1
Разраб.	Ефросини Д.В.		
Пров.	Мельниченко В.В.		
Н. контр.	Тимошенко Л.М.	20	030
Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0			
		Наименование операции	Материал
		Токарная	ВТ1-0
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры
160 НВ	кГ	0,05	Пруток Ø40x55
		Оборудование, устройство ЧПУ	Обозначение программы
		ИК62	
То	Тв	Тплз	Тплт
0,2	1	0,36	1,3
Д или В	L	l	i
		S	n
			V
Р			Ш
Сверлить отверстие выдерживая размеры 1 и 2			
Т 02	сверло; ШЦД-1-150 (0,01) Штангенциркуль		
Р 03			315 39
04			
Контроль исполнителем			
06			
07			
08			
09			
10			
ОК			14



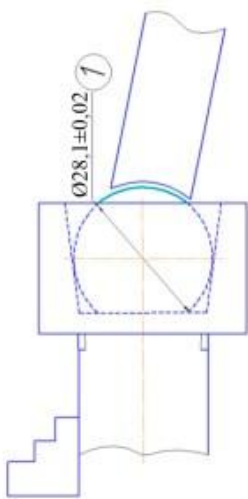
Дубл.																				
Взам.																				
Подл.																				
Разраб.	Ефросини Д.В.																			
Пров.	Мельниченко В.В.																			
Н. контр.	Тимошенко Л.М.																			
		Головка эндопротеза газобедренного сустава из ВТ1-0																		
		20																		
		035																		
		Материал ВТ1-0																		
		Наименование операции Токарная																		
		Оборудование, устройство ЧПУ ИК62																		
		Обозначение программы СОТС																		
		Профиль и размеры МЗ КОИД																		
		Твердость ЕВ МД 160 НВ кг 0,05 Пруток Ø40x55 0,3 1																		
		То Тв Тплз Типл Типл																		
		0,66 0,33 0,3 1,07																		
		D или B L t i s n V																		
P	ПИ																			
O 01	Расточить отверстие выдерживая размер 1																			
T 02	резец расточной; калибр пробка																			
P 03	1																			
04	315 39																			
O 05	Контроль исполнителем																			
06																				
07																				
08																				
09																				
10																				
OK		15																		

ГОСТ 3.1404-86

Форма 2

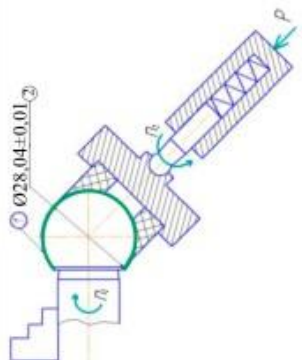
Дубл.																		
Взам.																		
Подл.																		
Разраб.	Ефросинин Д.В.																	
Пров.	Мельниченко В.В.																	
Н. контр.	Тимошенко Л.М.															040		
<p style="text-align: center;"> $\sqrt{Ra\ 3,2}$ $\varnothing 28,1_{\pm 0,02} (I)$ </p> 																		
		Наименование операции								Материал								
		Токарная								ВТ1-0								
		Твердость		ЕВ		МД		Профиль и размеры		МЗ			КОИД					
		160 НВ		κГ		0,05		Пруток Ø40x55		0,297			1					
		Оборудование, устройство ЧПУ								Обозначение программы								
		1К62																
		То		Тв		Тп.з.		Тшт.		СОТС								
		0,18		0,33		0,64		2,28										
Р		D или B				L		t		i		s			n		V	
Отрезать заготовку выдерживая размер 1																		
резец отрезной; МКЦ(1)-50 микрометр																		
P 03		0,14				315		39										
04																		
Контроль исполнителем																		
06																		
07																		
08																		
09																		
10																		
OK																		
															16			

		ГОСТ 3.1404-86				Форма 2	
Дубл.							
Взам.							
Подл.							
Разраб.	Ефросини Д.В.						
Пров.	Мельниченко В.В.						
Н. контр.	Тимошенко Л.М.						
	Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0			20	045		
				Материал			
Наименование операции							
Токарная							
	Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД	
	160 НВ	кГ	0,05		0,055	1	
Оборудование, устройство ЧПУ							
IK62							
	То	Тв	Тлз.	Тлг.			
	0,03	1	0,3	1,12			
		Д или В	L	l	i	S	V
Р	ШИ						
O 01	Точить поверхность выдерживая размер 1						
T 02	резец фасонный; МКЦ(1)-50 микрометр						
P 03					315		39
04							
O 05	Контроль исполнителем						
06							
07							
08							
09							
10							
OK							17

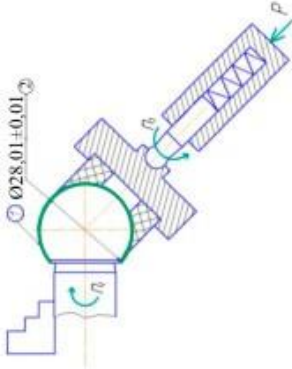


Дубл.																									
Взам.																									
Подл.																									
Разраб.	Ефросини Д.В.																								
Пров.	Мельниченко В.В.																								
Н. контр.	Тимошенко Л.М.										Головка эндобротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0 					20		070							
					Наименование операции Токарная Твердость 160 НВ ЕВ кГ 0,05 МД Профиль и размеры 0,051 МЗ КОИД 1 Оборудование, устройство ЦПУ ИК62 Обозначение программы Масло И20-А										Материал ВТ1-0										
Р	О 01	Т 02	Р 03	04	О 05	06	07	08	09	10	ПИ	L	t	i	s	п	v								
	Притереть поверхность 1 выдерживая размер 2																								
	20/14 притир; МКЦ(1)-50 микрометр																								
	P=50 Н																								
	Контроль исполнителем																								
										ОК															
										22															

Дубл.																																																									
Взам.																																																									
Подл.																																																									
Разраб.	Ефросини Д.В.																																																								
Пров.	Мельниченко В.В.																																																								
Н. контр.	Тимошенко Л.М.																																																								
			<p style="text-align: center;">Головка эндопротеза газобедренного сустава из ВТ1-0</p> <p style="text-align: center;">Материал: ВТ1-0</p> <p style="text-align: center;">Наименование операции: Токарная</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Твердость</td> <td>ЕВ</td> <td>МД</td> <td>Профиль и размеры</td> <td>МЗ</td> <td>КОИД</td> </tr> <tr> <td>160 НВ</td> <td>кГ</td> <td>0,05</td> <td></td> <td>0,052</td> <td>1</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Оборудование, устройство ЧПУ: IK62</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>То</td> <td>Тв</td> <td>Тп.з.</td> <td>Тшт.</td> <td>СОТС</td> </tr> <tr> <td>1,6</td> <td>1</td> <td>0,78</td> <td>2,83</td> <td>Масло И20-А</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Обозначение программы: PII</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>D или B</td> <td>L</td> <td>t</td> <td>i</td> <td>s</td> <td>n</td> <td>v</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>																			Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД	160 НВ	кГ	0,05		0,052	1	То	Тв	Тп.з.	Тшт.	СОТС	1,6	1	0,78	2,83	Масло И20-А	D или B	L	t	i	s	n	v							
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД																																																				
160 НВ	кГ	0,05		0,052	1																																																				
То	Тв	Тп.з.	Тшт.	СОТС																																																					
1,6	1	0,78	2,83	Масло И20-А																																																					
D или B	L	t	i	s	n	v																																																			
P	Притереть поверхность 1 выдерживая размер 2																																																								
O 01	125/100 притир; МКЦ(1)-50 микрометр																																																								
T 02	Р=50 Н																																																								
P 03	Контроль исполнителем																																																								
04																																																									
O 05																																																									
06																																																									
07																																																									
08																																																									
09																																																									
10																																																									
OK																																																									
19																																																									

ГОСТ 3.1404-86			Форма 2					
Дубл.								
Взам.								
Подл.								
Разраб.	Ефросини Д.В.						VT1-0	
Пров.	Мельниченко В.В.							
Н. контр.	Тимошенко Л.М.							
Головка эндопротеза тазобедренного сустава из VT1-0							20	060
Наименование операции			Материал					
Токарная			VT1-0					
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры		МЗ	КОИД		
160 HB	кГ	0,05			0,051	I		
Оборудование, устройство ЧПУ			Обозначение программы					
IK62								
То	Лв	Плз.	Пшт.				СОТС	
3	1	1,2	4,36				Масло И20-А	
D или B	L	t	i	S	n	V		
P	ШИ					V		
O 01	Пригреть поверхность 1 выдерживая размер 2							
T 02	63/50 притир; МКЦ(1)-50 микрометр							
P 03	P=50 Н						1000	
04							81	
O 05	Контроль исполнителем							
06								
07								
08								
09								
10								
OK							20	

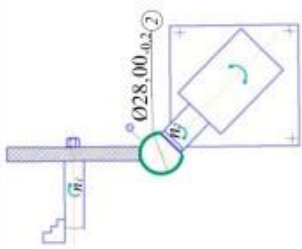
Дубл.																							
Взам.																							
Подл.																							
Разраб.	Ефросини Д.В. Мельниченко В.В.										I												
Пров.	Мельниченко В.В.																						
Н. контр.	Тимошенко Л.М.										20 070												
Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0																							
												Наименование операции Материал											
												Токарная ВТ1-0											
Твердость		ЕВ		МД		Профиль и размеры				МЗ		КОИД											
160 НВ		кГ		0,05						0,051		1											
												Оборудование, устройство ЧПУ Обозначение программы											
												ИК62											
То		Тв		Тп.з.		Тип.						СОТС											
11		1		3,6		13,08						Масло И20-А											
D или B				L		t		i		s		n		V									
ПИ																							
Притереть поверхность 1 выдерживая размер 2																							
20/14 притир; МКЦ(1)-50 микрометр																							
Р=50 Н																							
04																							
Контроль исполнителем																							
06																							
07																							
08																							
09																							
10																							
ОК																				22			

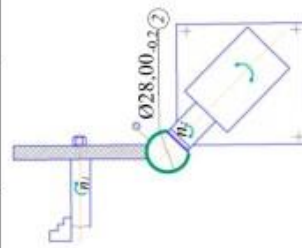


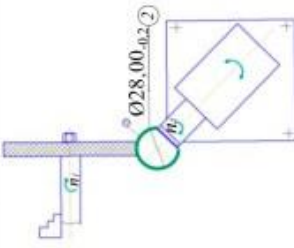
ГОСТ 3.1404-86 Форма 2

Дубл.																					
Взам.																					
Подл.																					
Разраб.	Ефросиния Д.В.			Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0			20			075			1								
Пров.	Мельниченко В.В.																				
Н. контр.	Тимошенко Л.М.																				
				<p>Наименование операции</p> <p>Токарная</p> <p>Твердость</p> <p>160 HB</p> <p>Оборудование, устройство ЧПУ</p> <p>1К62</p>								<p>Материал</p> <p>ВТ1-0</p> <p>Профиль и размеры</p> <p>МЗ</p> <p>0,05</p> <p>1</p> <p>Обозначение программы</p> <p>СОТС</p>									
				То		Тв		Тп.з.		Тшт.											
				D или B		L		t		i		s		n		v					
P				ШИ																	
O 01	Полировать поверхность 1 выдерживая размер 2																				
T 02	1 полировочный круг. 1 комплект полировочный. МКЦ(1)-50 микрометр																				
P 03	p ₂ = 120 об/мин															3000			1120		
04																					
O 05	Контроль исполнителем																				
06																					
07																					
08																					
09																					
10																					
OK																		23			

Дубл.									
Взам.									
Подп.									
Разраб.	Ефросини Д.В.								1
Пров.	Мельниченко В.В.								
Н. контр.	Тимошенко Л.М.						20	080	080
Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0		Наименование операции			Материал				
		Токарная			ВТ1-0				
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД				
160 НВ	кГ	0,05		0,05	1				
Оборудование, устройство ЧПУ			Обозначение программы						
			1К62						
То	Лв	Плз.	Плг.						
2	1,5	1,05	3,81						
D или B		L	l	i	S	п	V		
P	Полировать поверхность 1 выдерживая размер 2			ШИ					
O 01	2 полировочный круг; 2 компаунд полировочный; МКЦ(1)-50 микрометр								
T 02	п ₂ =120 об/мин								
P 03	Контроль исполнителем								
04									
O 05									
06									
07									
08									
09									
10									
OK									24



Дубл.																			
Взам.																			
Подл.																			
Разраб.	Ефросин Д.В.																		
Пров.	Мельниченко В.В.																		
Н. контр.	Тимошенко Л.М.																		
																			
<p>Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0</p> <p>Наименование операции: Токарная Материал: ВТ1-0</p> <p>Твердость: 160 НВ ЕВ МД МЗ КОИД Профиль и размеры 0,05 0,05 1</p> <p>Оборудование, устройство ЧПУ: ИК62 Обозначение программы: СОТС</p> <p>То: 2 Тв 1,5 Тп.з. 1,05 Тип. 3,81</p> <p>Диаметр В L t i s n V</p>																			
Р	ПИ																		
О 01	Полировать поверхность 1 выдерживая размер 2																		
Т 02	3 полировочный круг. 3 компаунд полировочный: МКЦ(1)-50 микрометр																		
Р 03	n ₂ =120 об/мин																		
04	3000 1120																		
О 05	Контроль исполнителем																		
06																			
07																			
08																			
09																			
10																			
ОК																			
25																			

ГОСТ 3.1404-86				Форма 2		
Дубл.						
Взам.						
Подл.						
Разраб.	Ефросини Д.В.			Головка эндопротеза тазобедренного сустава из ВТ1-0		090
Пров.	Мельниченко В.В.					
Н. контр.	Тимошенко Л.М.					
				Наименование операции		Материал
Токарная						
Твердость		ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД
160 HB		кГ	0,05		0,05	1
Оборудование, устройство ЧПУ				Обозначение программы		
ИК62						
То		Тв	Тп.з.	Тшт.	СОТС	
2		1,5	1,05	3,81		
D или B		L	t	i	s	n
ПИ						
Р	Полировать поверхность 1 выдерживая размер 2					
О 01						
Т 02	4 полировочный круг; 4 компаунд полировочный; МКЦ(1)-50 микрометр					
Р 03	$n_2 = 120$ об/мин					
04						
О 05	Контроль исполнителем					
06						
07						
08						
09						
10						
OK						26