

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
(наименование)

22.03.01. «Материаловедение и технологии материалов»
(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Современные материалы и технологии их производства»
(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Испытание медицинского наноструктурированного титана на кручение»

Студент

М.В Кайданович

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., профессор Г.В Клевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультанты

к.т.н., доцент А.Н.Москалюк

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

к.п.н., доцент А.В.Кириллова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Аннотация

Объём выпускной квалифицированной работы составляет 43 страницы, 12 таблиц, 24 рисунка и 22 источников.

Данная работа посвящена исследованию медицинского наноструктурированного титана марки Grade 4 на кручение, в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состоянии.

Целью нашей работы является сравнение механических свойств и механизмов разрушения при кручении медицинского титана Grade 4 в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии и в крупнозернистом (КЗ) состоянии.

В данной работе представлены новейшие технологии для получения ультрамелкозернистой структуры титана, с целью достижения нужного комплекса механических свойств.

В ходе работы мы выбрали методики и провели испытания для получения необходимой нам структуры титана, проанализировали их, определили основные характеристики, и сравнили с исходным составом титана.

Наше исследование позволяет выявить особенности структуры и комплекс механических свойств Grade 4 с ультрамелкозернистой структурой, который был получен с помощью равноканального углового прессования по схеме «Конформ» (РКУП-К) .

ABSTRACT

The title of the graduation work is Torsion research of medical nanostructured titanium.

This graduation work is devoted to medical Grade 4 nanostructured titanium for torsion in the coarse-grained and ultrafine-grained state.

The work touches upon the study of mechanical properties, evaluation of strength and mechanical failure of Grade 4 alloy.

«We start with the statement of the problem and then logically pass over to its possible solutions» [27].

This senior thesis presents the latest technologies for obtaining an ultrafine-grained titanium structure in order to achieve the desired set of mechanical properties.

Much attention is given to the selection of methods and conducting tests to obtain the necessary structure of the titanium alloy. We analyze the methods, determine the main characteristics, and compare them with the original composition of the alloy [28].

It can be concluded that our results allow us to identify the features of the structure and the complex of mechanical properties of Grade 4 with an ultra-fine-grained structure, which was obtained using equal-channel angular pressing according to the "Conform" scheme (RCUP-K).

«The graduation project consists of an explanatory note on 43 pages, introduction, including 24 figures, 12 tables, the list of references including 3 foreign sources».

The work is of interest for wide circle of readers.

Содержание

Введение	8
Раздел 1. Аналитический обзор. Металлические материалы для медицины. Получение и свойства наноструктурированных материалов	10
1.1 Современные металлические материалы для медицины	10
1.2 Получение и свойства наноструктурированных материалов	11
1.3 Методы испытания медицинских материалов	13
1.4 Крупнозернистый и ультрамелкозернистый титан как материал для медицины	16
Раздел 2. Материал и методика исследования	19
2.1 Исследуемый материал, выбор режима обработки и образцы	19
2.2 Методика исследования структуры титана	19
2.3 Механические испытания образцов	20
2.4 Методика фрактографического анализа изломов	23
Раздел 3. Результаты исследования	26
3.1 Структура и механические свойства сплава Grade 4 при растяжении	26
3.2 Свойства титана при кручении образцов	27
Раздел 4. Безопасность и экологичность технического объекта	32
Заключение	39
Список используемой литературы	40

Введение

Актуальность нашей работы заключается в том, что в современном мире всё чаще возникает потребность в замене и восстановлении органов и тканей пораженной области человеческого организма. Это является одной из важнейших проблем в современной медицине. «В настоящее время огромное количество исследований посвящено поиску биоматериала, который бы отвечал требованиям и являлся биологически совместимым с окружающими тканями». «Но главная проблема заключается в том, что чем больше размер дефекта, тем большая вероятность неудовлетворительного результата лечения» [19]. «Я считаю, что для замещения костных дефектов используют широкий спектр материалов и способов, в основу которых положено применение аллотрансплантатов, а также имплантатов». «Мы можем предположить что, в этих целях применение аллогенных трансплантатов не эффективно, что обусловлено резорбцией или реакцией отторжения пересаженных материалов» [19]. За последнее время был достигнут значительный прогресс в производстве медицинского оборудования и потребности медицинской промышленности побуждают современную науку о наноматериалах разрабатывать новые подходы для улучшения свойств существующих биоматериалов.

«Grade 4 - титановый сплав 4-го класса из нелегированного титана (отечественный аналог ВТ6) на данный момент является наиболее лучшим и чистым титановым сплавом в мире». «Мы знаем, что он используется для производства крупногабаритных сборных конструкций в самолётостроение и ракетостроении, а так же существенного целого ряда других конструктивных элементов» [24].

В нашей исследовательской работе мы занимаемся изучением и определением комплекса механических свойств получаемых при кручении

титанового сплава Grade 4 (аналог отечественной марки ВТ-6), а так же оценка прочности и механизма разрушения при кручении медицинского УМЗ титана по сравнению с крупнозернистым (КЗ) титаном который находится в ультрамелкозернистом состоянии (УМЗ), полученном путем равноканального углового прессования (РКУП), в сравнении с начальным состоянием, где сплав находился в крупнозернистом состоянии .

Цель дипломной работы является сравнение механических свойств и механизмов разрушения при кручении медицинского титана Grade 4 в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии и в крупнозернистом (КЗ) состоянии.

Раздел 1. Аналитический обзор

1.1 Современные металлические материалы для медицины

«Титан – это современный, прочный металл бело-серебристого цвета. Существует в двух кристаллических модификациях как: α -Ti который имеет гексагональную плотноупакованную решётку, β -Ti который представлен объёмно-центрированной кубической упаковкой» [30].

Grade 4 – нелегированный титан четвертого класса, сплав самой высокой чистоты и имеющий повышенные прочностные характеристики. Такой материал характеризуется повышенной прочностью, а так же в нем удачно сочетаются хорошая свариваемость и пластичность к приданию нужной формы, температурная устойчивость и, что не маловажно низкий вес. Такой материал, мы считаем, очень хорошо устойчив к коррозии в окислительных и весьма слабо восстановительных средах, что дает в результате возможность долговременной эксплуатации. Данный сплав поддаётся литью и его часто используют при производстве литых клапанов и фитингов. Основная сфера использования Grade 4 – аэрокосмическая промышленность [30].

Так же Grade 4 есть и как марка нелегированного титана в американском стандарте ASTM. Он отличается от более распространенной марки Grade 2 более высокими прочностными характеристиками при относительно высоком уровне пластичности. По прочностным характеристикам похожа на российскую марку OT4-1, но в отличии от нее у Grade 4 нет легирующих элементов. Листы и плиты Grade 4 применяются в изделиях, где важны прочность и высокая чистота титана. Титановые листы такой марки преимущественно используются в медицинских изделиях к которым предъявляются особые требования долговечности и устойчивости к биологическим нагрузкам [30]. Титановые листы содержат в себе

наименьшее количество примесей по сравнению с любыми металлами, используемыми в медицине.

1.2 Получение и свойства наноструктурированных материалов

«Существует два принципиально разных подхода к развитию нанотехнологий. Эти подходы мы условно разделяем на такие технологии, как «сверху-вниз» и «снизу-вверх»».

Суть таких процессов, как «снизу-вверх» заключается в создании нано частиц на атомарном или молекулярном уровне, основанном на химических процессах. «Технология таких методов заключается в том, что создаваемый нами нанообъект собирается из индивидуальных атомов, молекул, биологических клеток и т.д» [21].

- «Получение нано частиц в паровой фазе это наиболее универсальный процесс, в котором исходный материал в газообразном виде использован для создания частиц порошков, которые переносятся за счёт конвекции и накопления на холодном основании» [21]. Такой процесс подходит для металлических и не металлических материалов, изменяется только способ превращения массивного материала в пар.

- Напыление является разновидностью предыдущего метода и используется для создания металлических плёнок. «Атомы исходного материала наносятся на диск из чистого металла, с заряженными химически не активными атомами». «Образовавшиеся ионы металла, которые осаждаются на поверхности, образуют плёнку с размером частиц 3-12 нм» [21].

- Осаждение и кристаллизация – это наиболее распространённый метод получения частиц и порошков, которые используются при получении алюминия и титана. Кристалл вещества перенасыщают, что ведёт к формированию ядра и появлению кристалла. В обоих случаях продукт требует фильтрации и промывки. Наибольшее применение этот метод

получил при производстве катализаторов и в фармацевтической промышленности.

Существует несколько процессов «сверху-вниз», которые основаны на физических и химических методах, на методах паровой фазовой конденсации.

- К физическим методам относится высокоэнергитическое измельчение. Этот метод заключается в дроблении массивных материалов, для чего к ним применяются физические силы (поперечные силы удара) в результате чего происходит разрыв материала на более мелкие частицы. «Исходный материал вводят в камеру для измельчения в которой содержится специальная среда» [14]. Измельчение может производиться за счёт опрокидывания, встряхивания, вибрации. Преимуществом является простота реализации, лёгкая масштабированность. Таким методом можно получать наноматериалы в виде нанопорошков размер которых 3-30 нм. При этом, если в качестве исходного материала использованы сплавы, то в итоге могут формироваться нестабильные промежуточные материалы. Для исходных металлических материалов процесс происходит не за счёт уменьшения размера зерна, а за счёт вынужденной пластической деформации.

Паровая фазовая конденсация делится в свою очередь на несколько методов.

- Электроосаждение проводится в не окисленной среде, где к металлическому проводу прикрепляется электрический импульс высокого тока и напряжения, в результате чего провод разрывается [14]. При этом достигается очень высокая температура (свыше 20000°C) в сочетании с высокой скоростью (близкая к скорости звука) распространение процесса, поэтому наночастицы обладают уникальными термическими свойствами. Такой метод мы можем применять для любых металлов выполненных в форме проводов, так же этот метод можно использовать для получения оксидов и нитридов. Мы можем получить частицы размером 8-10 нм [14].

1.3 Методы испытания медицинских материалов

«Одним из способов определения сопротивления деформации, при котором возможно достижение высоких степеней деформации реализуемых в любых процессах обработки металлов давлением получаемых при прессовании это усовершенствованный метод испытания на кручение который разработал профессор Д. И. Суяров» [15]. «При использовании этого метода удастся определить истинные напряжения сдвигу с последующим их пересчетом на величину сопротивления деформации» [15].

«Данный способ получил наибольшее распространение так как при кручении реализуется не линейное напряженное состояние, а чистый сдвиг, гидростатическое давление при котором равно нулю» [16].

«Когда мы берем элемент в материале, то мы мысленно в выделенном из наружных слоев бруса сечениями, параллельными и перпендикулярными к образующим, по граням будут действовать только касательные напряжения, т.е. элемент будет находиться в условиях деформации чистого сдвига» [15]. В любом наклонном сечении выделенного элемента будут действовать нормальные касательные напряжения. «Наибольшие нормальные напряжения действуют на главных площадках, которые, как известно, наклонены под углом 45° к образующей». «Из теории чистого сдвига нам известно, что главные напряжения по абсолютной величине равны между собой и равны касательным напряжениям:

$$\sigma_1 = |\sigma_3| = |\tau|$$

где τ - это касательные напряжения» [16].

«Таким образом, мы можем наблюдать что, при кручении круглых заготовок опасными могут быть как касательные напряжения» [27]. «В связи с этим характер разрушения вала будет зависеть от способности материала сопротивляться действию касательных и нормальных напряжений, отображенный на рисунке 1».

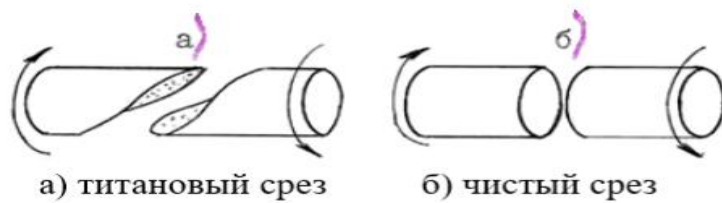


Рисунок 1 - Схема разрушения материала при кручении

«При кручении (как и при растяжении или сжатии) в начальной стадии деформации образца для большинства металлов имеет место линейная зависимость между углом закручивания и крутящим моментом».

«По диаграмме кручения, аналогично диаграмме растяжения, можно видеть все характерные участки (кроме участка разрушения, т.к. при кручении “шейка” на образце не образуется) и точки, соответствующие моментам пропорциональности, текучести и максимальному моменту» [27].

Закон изменения касательных напряжений в поперечном сечении образца в зависимости от величины нагружения схематично изображен на рисунке 2.

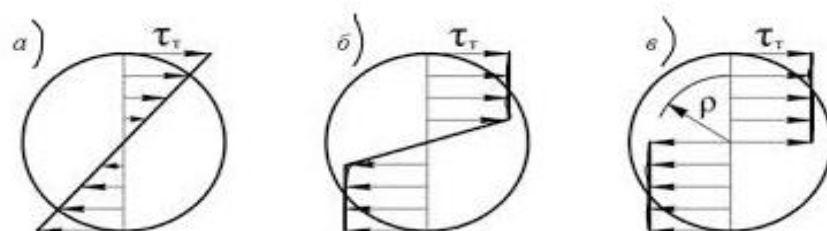


Рисунок 2 - Эпюры касательных напряжений в поперечном сечении при кручении

«На рисунке 2 а) изображена эпюра распределения касательных напряжений в поперечном сечении образца тогда, когда его максимальные касательные напряжения на поверхности образца не превышают предела пропорциональности, то есть образец работает в пределах применимости закона Гука» [27].

«С увеличением крутящего момента напряжения на поверхности образца достигают предела текучести и может образоваться некоторый слой, где напряжения во всех точках будут равны пределу текучести (рис. 2 б)» [27].

«При еще большем нагружении напряжение на поверхности образца превысит предел текучести и уже может образоваться внутренний слой, где напряжения во всех точках будут равны пределу текучести (рис. 2 в)» [27].

1.4 Крупнозернистый и ультрамелкозернистый титан как материал для медицины

«Образование субмикроструктурного и наноструктурированного состояния в титановых сплавах улучшает набор их механических свойств в том числе тех, которые необходимы при использовании их в качестве материала для медицинских имплантатов» [22]. «К примеру если мы возьмем прокат технически чистого титана марки ОТ4-1 в обычных условиях формируются неоднородные по размерам зерна структура, а под воздействием интенсивной пластической деформации методом РКУП в сочетании с холодным прокатом и отжигом формируются высокая однородность в распределение зерен по размеру». «При этом в

ультрамелкозернистой структуре повышается уровень прочности и не ухудшается пластичность, тогда как предел прочности при циклическом нагружении также повышается». Это происходит за счет подавления в структуре локализации деформации на микроуровне [22]. Особенностью структуры сплавов, прошедших ИПД является активизация диффузионных процессов.

Изменение таких свойств определяется не только с увеличением роли межзеренных связей, но и с повышенной скоростью диффузии на границах. «Из-за этого фактора снижается температура осуществления диффузионных контролируемых процессов, таких как зернограницные проскальзывания при относительно низких температурах». «Это позволяет реализовывать сверхпластичность и целенаправленные формирования структурно-фазовых состояний, которые обеспечивают повышенную прочность при такой же или иногда повышенной пластичности при достаточно термически стабильной структуре» [22] .

«Однако, для того чтобы мы могли использовать вышеуказанные особенности требуется установить зависимость характеристики диффузии в области границ зерен от температуры, химического состава, состояния структур внутренних границ и среднего размера зерна». «Толкование результатов наших испытаний в таком случае затруднительно, в первую очередь из-за сложности полноценного описания дефектной структуры металлов, полученных путем ИПД» [22]. «Однако, мы можем подобные трудности решить, прибегая к современному компьютерному моделированию на атомном уровне». И активно используем при исследовании диффузионных процессов на границах зерен металлов.

«Среди металлов со структурой УМЗ и нано, титан является наиболее перспективным материалом для создания и проведения биомедицинских исследований». «Так как за счет образования на его поверхности оксидной пленки, обладающие высокой биосовместимостью, образующаяся из-за соприкосновения с кровью или воздухом» [7]. Образующиеся при контакте

с воздухом пленка диоксида титана имеет толщину 2–6 нм, обладает термодинамической стабильностью и химической инертностью. «Также в исследованиях Забелина В. Ф. показано, что при наноструктурировании изменяется морфология и состав пленки, а также наблюдается увеличение протеинового взаимодействия и последующая адгезия клеток, что приводит к повышению параметров остеоинтеграции УМЗ и наноструктурного титана» [7].

Нами были проведены исследования по оценке прочности и механизма разрушения при кручении медицинского титана находящегося в двух состояниях: УМЗ и КЗ. На рисунке 1.1 показана структура УМЗ титана полученная путем РКУП-К. «Мы можем наблюдать значительную разницу в шероховатости поверхностей, так как шлиф наноструктурного УМЗ титана имеет большую дисперсность рельефа и более однородной относительно КЗ титана (рисунок 3; 4)».

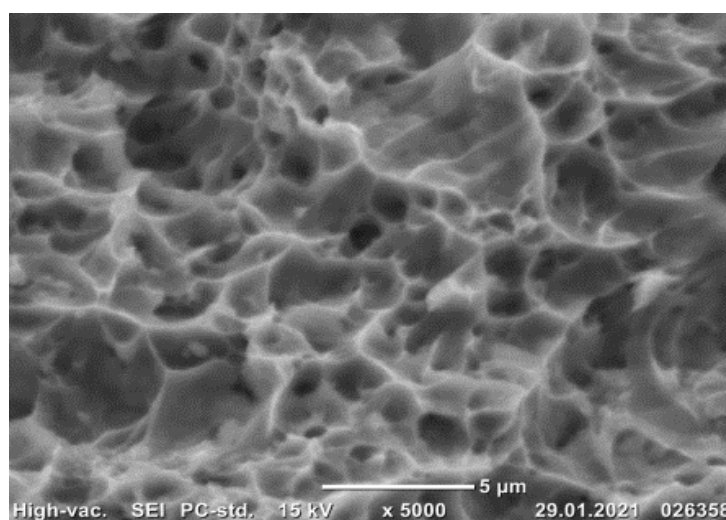


Рисунок 3 – Фрактография УМЗ титана полученная путем РКУП-К

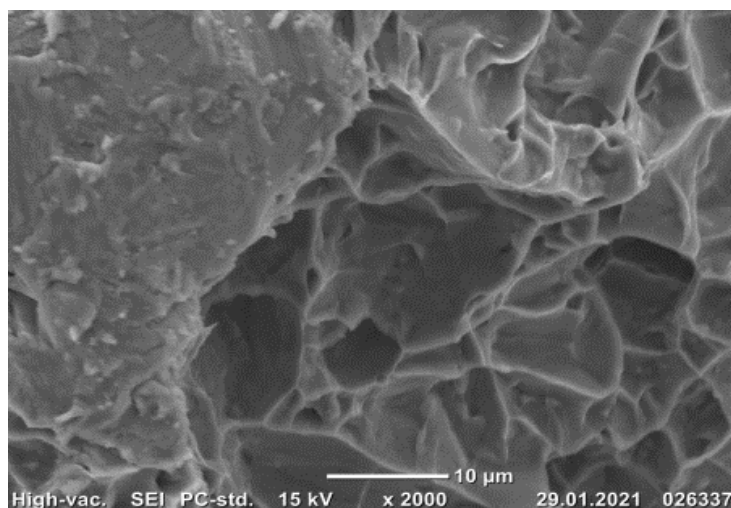


Рисунок 4 – Фрактография КЗ титана

Раздел 2. Материал и методика исследования

2.1 Исследуемый материал, выбор режима обработки и образцы

В качестве исследуемых материалов мы выбрали титан, находящийся в КЗ и УМЗ состояниях, который был изготовлен из широко применяемого в медицине титана Grade 4. Титан в КЗ состоянии исследовали после гомогенизационного отжига горячекатанных заготовок при температуре 680 °С, 1 час. УМЗ состояние было получено по двум режимам *):

По первому режиму: предварительная термообработка в виде гомогенизационного отжига при температуре 680 °С, 1 час + шесть проходов равноканального углового прессования по схеме «Конформ» (РКУП-К) при температуре заготовки и оснастки 250 °С (маршрут Вс, $\varphi=120^0$) [17]. Средний размер зерна после такой обработки составил 0.4 мкм. По второму режиму: после гомогенизационного отжига заготовки подвергали РКУП-конформ (маршрут Вс, $n=6$) и последующему отжигу при 700 °С (РКУП-К+О). (РКУП было проведено сотрудниками УГАТУ (г. Уфа) [17].

2.2 Методика исследования структуры титана

Исследование структуры КЗ материалов проводили с использованием металлографического микроскопа Axiovert 40 MAT [9]. Тонкую структуру УМЗ материалов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEM-6390 и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM-2100 **).

*) Выбор режимов РКУП-К и УМЗ состояние было получено сотрудниками УГАТУ (г. Уфа).

**) Тонкая структура УМЗ титана была изучена сотрудниками УГАТУ (г. Уфа).

Фрактографию изломов (РД 50-672-88 расчёты и испытания на прочность) на кручение титана в КЗ и УМЗ состоянии, полученным путем РКУП-К и РКУП-К+отжиг проводили на растровом электронном микроскопе JEOL. При увеличении в 1000,2000 и 5000 крат, т.к. такое увеличение позволит изучить размеры зерен (в КЗ состоянии — 25 мкм, в УМЗ состоянии – 0,4 мкм), морфологические признаки и тип разрушения; с помощью детектора SEI (сцинтилляционный детектор измерений, позволяющий получить изображение во вторичных электронах) при напряжении 15кВ (стандартное напряжение для анализа металлических материалов [25]).

Измерение твёрдости по Бринеллю (данный метод вполне подходит для измерения твердости нашего титана, т.к. лежит в диапазоне твёрдости НВ $10^{-1} = 293 - 361$ [20]) мы проводили по ГОСТ 9012 на твердомере ТН 300, со стандартной нагрузкой 1839 НВ, шариком диаметром 2,5мм при усилии 3000кг.

2.3 Механические испытания образцов

Для измерения твёрдости мы использовали твердомер ТН 300. Твердомер ТН300, удобен в эксплуатации и имеет достаточно высокую точность (от 45 до 174НВ-±3%; от 174 до 241НВ±2%) [10]. Хорошо зарекомендовал себя стационарный твердомер для измерений по Бринеллю, позволяющий измерять твердость малогабаритных и тонких изделий [28]. Диапазон измерений и приведенные характеристики помогают гарантировано решить задачу измерения твердости образцов как в КЗ так и после РКУП, поэтому данный прибор удовлетворяет нашей задаче.



Рисунок 5 - Твердомер ТН 300

Экспериментальные исследования заключались в испытании образцов из титанового сплава на растяжение, по ГОСТ 1497, где мы изучали предел прочности и относительное удлинение. Для испытания на растяжение по ГОСТ 1497 нами использовалась универсальная испытательная машина Н50КТ [26].

«Машины испытательные универсальные серии КТ, предназначены для измерения силы при испытаниях образцов материалов на растяжение, сжатие, изгиб» [18]. «Такие машины для испытания могут применяться для проведения механических испытаний в режиме растяжения или сжатия

образцов (металлы, пластики, резина и др.) и изделий во всех отраслях промышленности, предприятий и лабораториях» [2]. Испытания на растяжение проводились с помощью универсальной испытательной машины Н50КТ с предельным усилием до 50 КН (так как прочность титана лежит в интервалах от 24,5 кг/мм² до 70 кг/мм²), с погрешностью не более ±0,5% [23].

Исследование материалов на кручение, где мы изучали измерение угловой деформации, было проведено на установке КТС 403-20-0,5 согласно ГОСТ 3565^{***}).

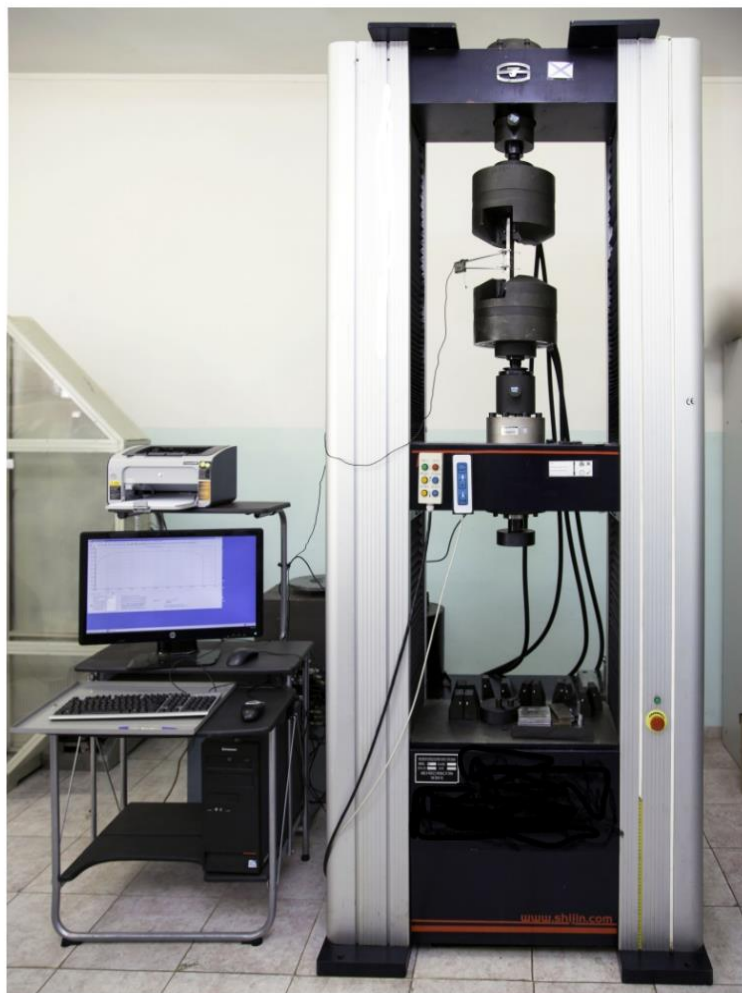


Рисунок 6 - Испытательная машина Н50КТ, с компьютерным управлением, предназначена для определения механических свойств материалов

Для измерения деформации чистого сдвига используем установку МК-50. «Машины для испытаний на кручение серии МК предназначены для измерения величины крутящего момента силы и осевого усилия при проведении испытаний образцов различных материалов на кручение, в том числе возможность изготовления машин с пределами допускаемой относительной погрешности измерений крутящего момента силы $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ » [5]. Измерение нагрузки с погрешностью, не превышающей $\pm 1\%$ от величины измеряемой нагрузки, сохранение постоянства показаний силоизмерителя в течение не менее 30 с; измерение угла закручивания с погрешностью, не превышающей 1° [6].

***) Испытание образцов на кручение было проведено сотрудниками «ПО Стрела» г. Оренбург).



Рисунок 7 - Установка МК-50 для испытания образцов на кручение

2.4 Методика фрактографического анализа изломов

Для фрактографического анализа изломов использовали растровый электронный микроскоп JSM-6000 фирмы JEOL. JSM-6000 фирмы JEOL - это современный прибор, предназначенный для изучения небольших образцов с субмикронным разрешением [1]. Разрешение во вторичных электронах 1,2 нм (при ускоряющем напряжении 30кВ), 3.0 нм (при

ускоряющем напряжении 1кВ). Благодаря возможности исследования на суб-ангстремном уровне, высокому качеству оптики и возможности быстро получить хорошие результаты, данный микроскоп является наилучшим выбором для решения наших задач.

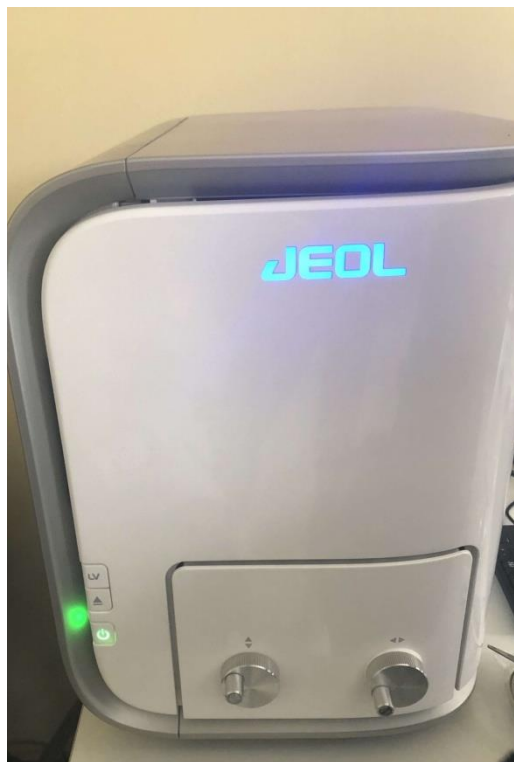


Рисунок 8 - Микроскоп JEOL

Для измерения твёрдости мы использовали твердомер ТН 300. Твердомер ТН300, удобен в эксплуатации и имеет достаточно высокую точность (от 45 до 174НВ - $\pm 3\%$; от 174 до 241НВ $\pm 2\%$). Хорошо зарекомендовал себя стационарный твердомер для измерений по Бринеллю, позволяющий измерять твердость малогабаритных и тонких изделий [18]. Диапазон измерений и приведенные характеристики помогают гарантированно решить задачу измерения твердости образцов как в КЗ так и после РКУП, поэтому данный прибор удовлетворяет нашей задаче.

Раздел 3. Результаты исследования

3.1 Структура и механические свойства сплава Grade 4 при растяжении

Титан Grade4 в исходном (горячекатанном) состоянии имел средний размер зерна $d_{\text{ср.}} = 25$ мкм. Тонкая структура титана после РКУП-К (рис. 3.1) характеризуется измельчением зерна и значительным повышением дефектов кристаллической структуры по сравнению с КЗ состоянием. После РКУП-К+О структура и свойства титана практически полностью соответствуют исходному состоянию. Средний размер зерна и механические свойства титана после различных видов обработки представлен в таблице 9.

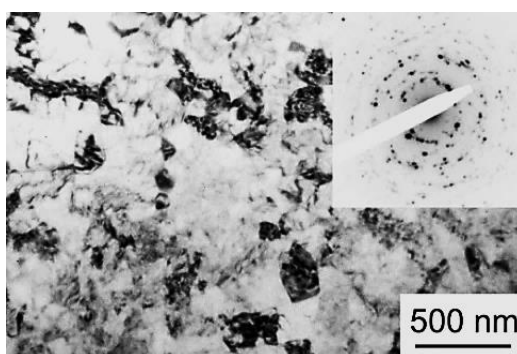


Рисунок 9 – Тонкая структура титана Grade4 после РКУП-К (ПЭМ)

Таблица 1 – Средний размер зерна и механические свойства титана Grade 4 при растяжении

Состояние	$d_{\text{ср.}}$, мкм	НВ	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
КЗ (исходное)	25	238	710±15	565±11	19.6±0.5
УМЗ (РКУП-К)	0.4	249	1050±15	900±25	14±0.7
УМЗ (РКУП-К+О)	15	240	750±10	650±30	20±0.5

Из таблицы 1 видно, что РКУП-К увеличивает прочностные свойства при растяжении титана Grade4 в 1.5-1.6 раз, а пластичность снижает в 1.4 раза. При этом твердость титана увеличивается незначительно (в 1.05 раз). Последующий после РКУП-К отжиг незначительно повышает твердость, предел прочности и относительное удлинение, по сравнению с исходным состоянием титана, однако предел текучести возрастает в 1.2 раза.

3.2 Свойства титана при кручении образцов

Анализ диаграммы «крутящий момент–угол закручивания» показал, (рис. 10) что при испытании образцов из КЗ и РКУП-К+О титана на кручение диаметром 6.8 мм, угол закручивания монотонно возрастает с увеличением крутящего момента, что является характерным для большинства материалов (рис. 10, кривые 1, 3) [12]. В случае РКУП-К имеет место увеличение угла закручивания практически при постоянном значении крутящего момента (рис. 10 кривая 2). Можно предположить, что такой характер кривой обусловлен наличием ячеистой дислокационной структуры, образующейся в процессе РКУП-К (рис. 1). Титан имеет высокую энергию дефектов упаковки, что затрудняет расщепление дислокаций и облегчает поперечное скольжение [12]. При этом область около источников остается практически свободной от дислокаций, что позволяет вновь образующимся дислокациям свободно скользить внутри ячеек, обеспечивая деформацию практически без увеличения нагрузки. После последующего отжига этот эффект устраняется.

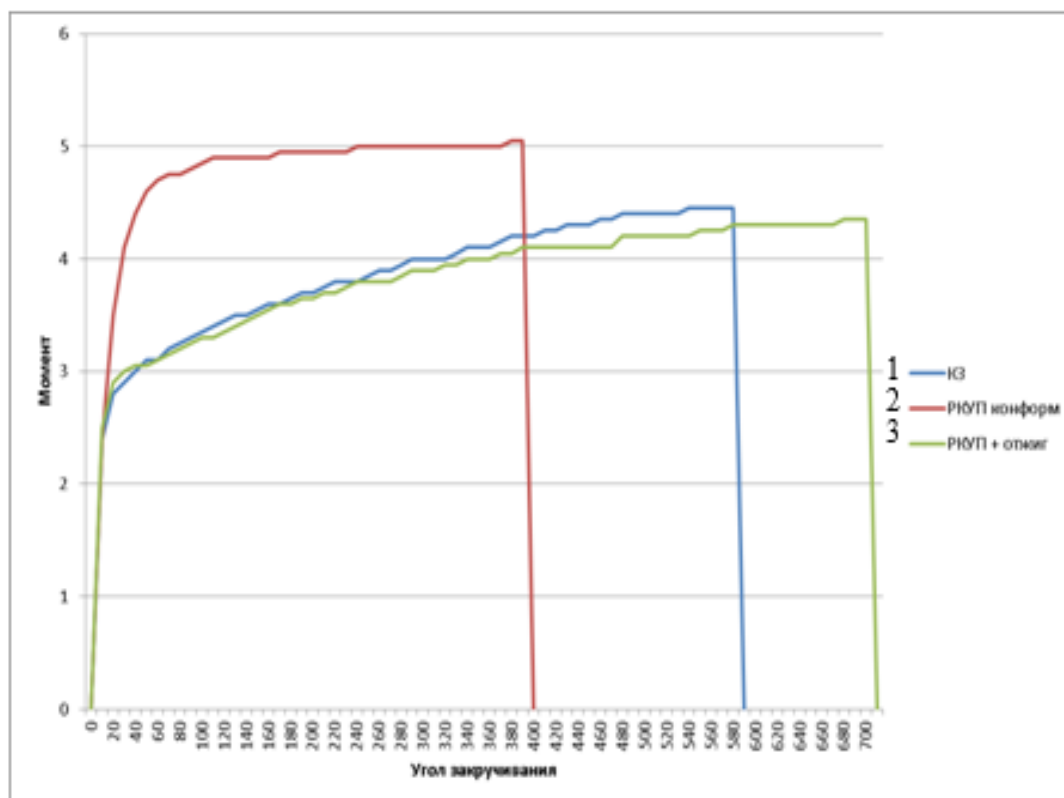


Рисунок 10 – Диаграмма «крутящий момент – угол закручивания» при испытании на кручение образцов из КЗ (1) и УМЗ титана: (РКУП-К) (2) и (РКУП-К+отжиг) (3)

Из таблицы 2 видно, что после РКУП-К крутящий момент образцов из титана увеличился в 1.2 раза, угол закручивания уменьшился в 1.5 раза. Последующий после РКУП-К отжиг при температуре 700 °С в течение 1 часа практически доводит крутящий момент образцов до состояния, характерное при исходном состоянии, в то время как угол закручивания возрастает по сравнению с исходным состоянием в 1.2 раза.

Таблица 2 – Свойства титана при кручении образцов диаметром (\varnothing) 6.8 мм

Состояние	\varnothing , мм	Крутящий момент, Н·м	Обороты, n	Угол закручивания, гр.
КЗ (отжиг)	6.8	44.5	1.61	580
УМЗ (РКУП-К)	6.8	50.5	1.08	390
УМЗ (РКУП-К+О)	6.8	43.5	1.94	700

Рассмотрим макро и микро строение изломов образцов из титана Grade 4 на кручение. Из рисунка 11 видно, что разрушение образцов как КЗ, так и УМЗ титана произошло по механизму среза. На поверхности всех полученных изломов, независимо от состояния титана и диаметра образцов, можно выделить три области: центральную часть излома (отличающуюся большой шероховатостью), переходную (среднюю) часть и относительно гладкую периферийную часть.

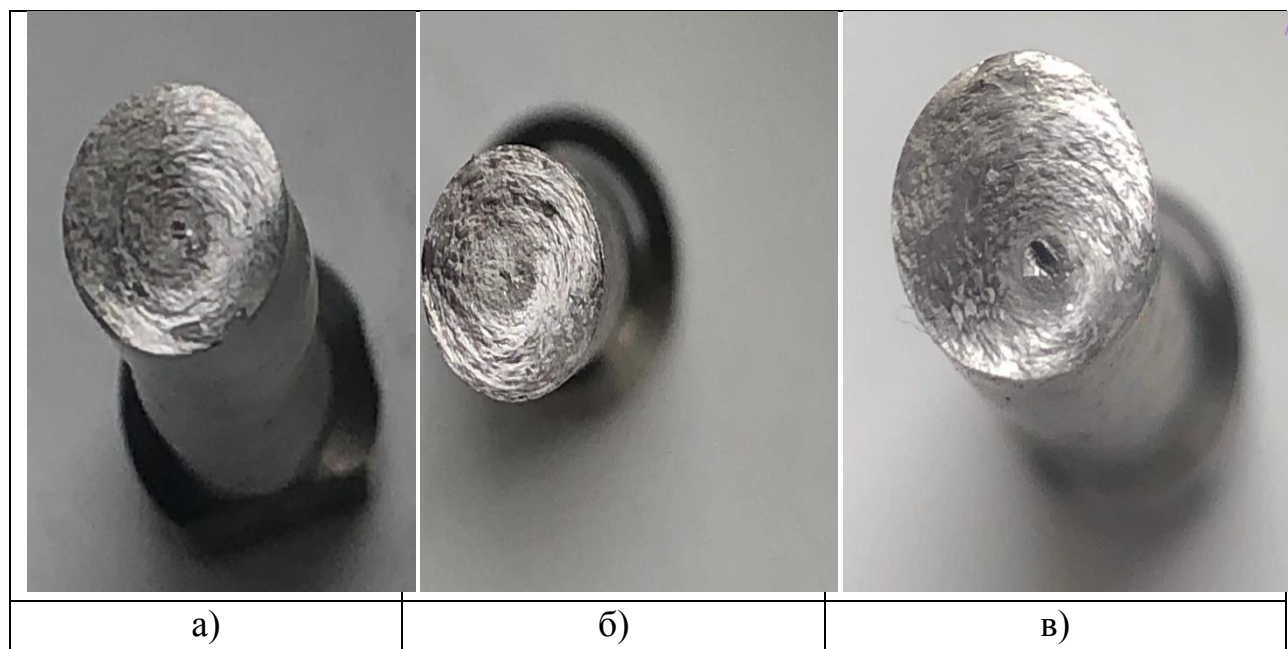
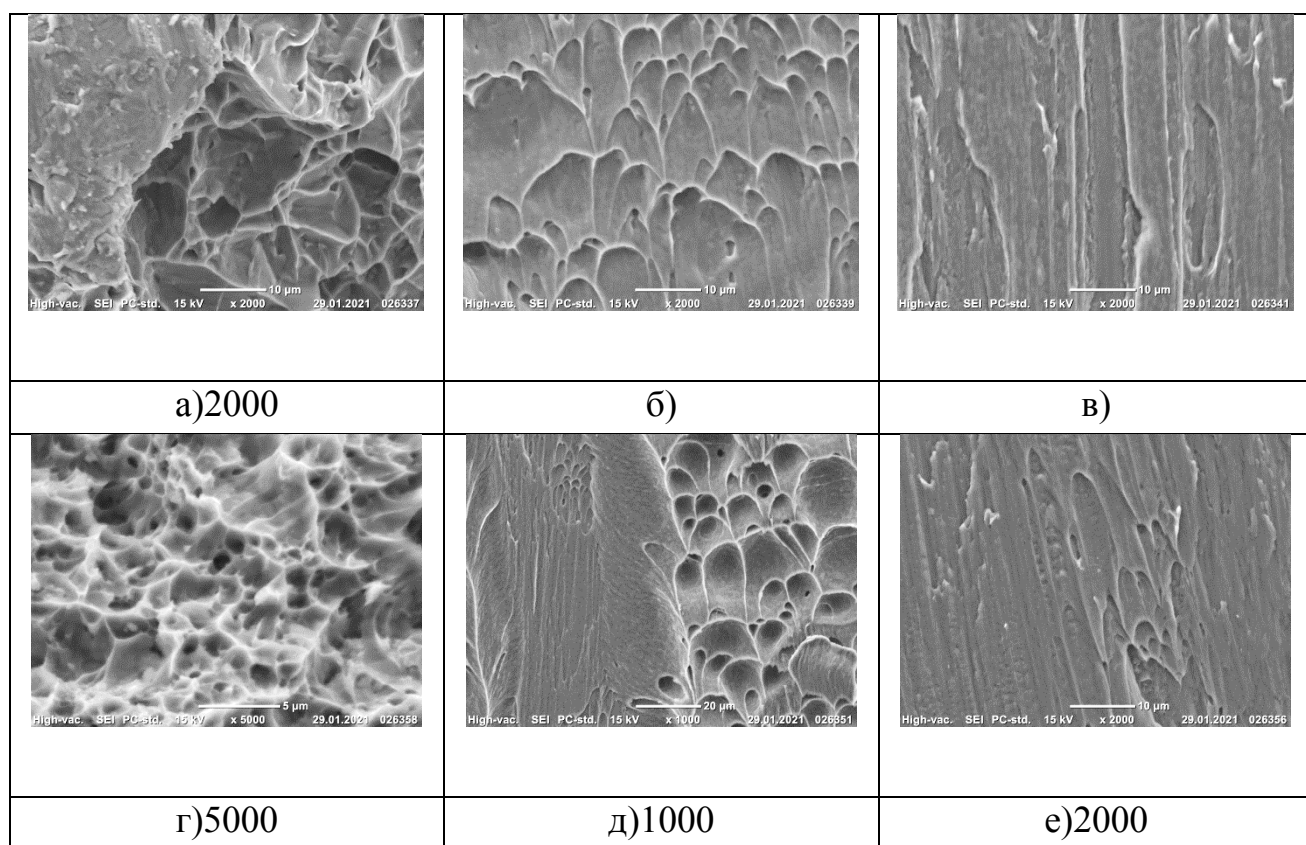


Рисунок 11 –Общий вид изломов на кручение образцов из КЗ титана (а) и УМЗ титана, полученного путем РКУП-К (б) и РКУП-К+ О (в)

В центральной части изломов, независимо от состояния титана, микрорельеф состоит из равноосных ямок отрыва и небольших бесструктурных участков (рис. 12 а, г, ж), образованных, по-видимому, от контакта ответных поверхностей излома [29]. Причем, при разрушении УМЗ титана, полученного путем РКУП-К ямки более мелкие по сравнению с КЗ состоянием и УМЗ состоянием после РКУП-К+О (рис. 12 а, г, ж). В средней части изломов доминируют ямки сдвига (рис. 12 б, д, з) с небольшими затертыми участками. В периферийной части изломов отдельные участки с неглубокими ямками сдвига также чередуются с участками затертой поверхности (рис. 12 в, е, и).



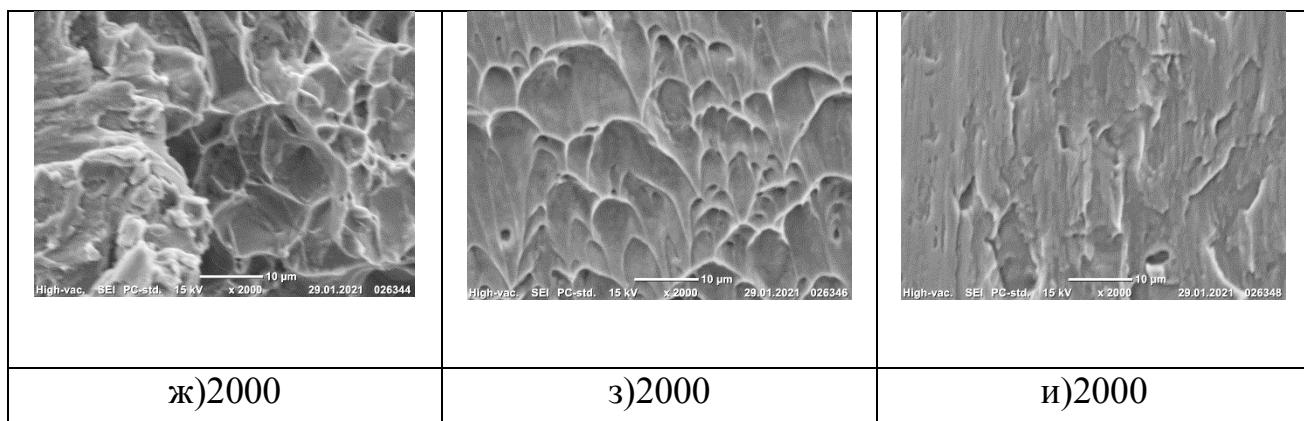


Рисунок 12 – Микрорельеф изломов на кручение титана в КЗ (а-в) и УМЗ состоянии, полученным путем РКУП-К (г-е) и РКУП-К+отжиг (ж-и). Микрорельеф в центральной части изломов (а, г, ж), переходной части (б, д, з) и в периферийной части (в, е, и). Увеличение: а-в, е, ж-и – х2000; г- х5000; д- х1000

Вышеописанный микрорельеф поверхности полученных изломов отражает процесс разрушения образцов при кручении. Разрушение образцов, независимо от состояния титана, начинается с периферийной области, где образуются ямки сдвига под действием касательного напряжения. При дальнейшем кручении ямки сдвига в средней и периферийной части изломов становятся полностью или частично затертыми (рис. 12 б, в, д, е, з, и) из-за контакта с ответными поверхностями изломов. В центральной части изломов доминируют нормальные напряжения отрыва, о чем свидетельствуют преимущественно равноосные ямки (рис. 12 а, г, ж).

Выводы по разделу

В результате проведения испытания на растяжение по выбранным режимам при комнатной температуре, мы видим, что РКУП-К увеличивает

прочностные свойства титана в 1,5 раза, а пластичность снижает в 1,4 раза; при этом твердость увеличивается незначительно в 1,05 раз.

При испытании образцов на кручение и анализе диаграммы «крутящий момент–угол закручивания» мы можем сказать что, после РКУП-К крутящий момент образцов из титана увеличился в 1,2 раза, угол закручивания уменьшился в 1,5 раза по сравнению с КЗ титаном, что является благоприятным фактором с позиции сопротивления титана кручению.

Следовательно, УМЗ титан Grade4 является более перспективным материалом для изготовления медицинских шурупов, по сравнению с КЗ титаном.

Микрорельеф изломом сплава Grade 4 состоит из равноосных ямок отрыва, ямок сдвига, а так же в периферийной части изломов отдельные участки с неглубокими ямками сдвига также чередуются с участками затертой поверхности. Следует отметить, что при разрушении УМЗ титана, полученного путем РКУП-К ямки более мелкие по сравнению с КЗ состоянием и УМЗ состоянием после РКУП-К+О.

Раздел 4. Безопасность и экологичность технического объекта

«Технический объект выпускной квалификационной работы (технологический процесс, технологическая операция, производственно-технологическое или инженерно-техническое оборудование, согласно Постановления Госстандарта РФ №367» [3] (табл. 4.1).

Таблица 3 - Технологический паспорт технического объекта

№ п/п	«Технологический процесс»	«Технологическая операция вид выполняемых работ»	«Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию»	«Оборудование, техническое устройство, приспособление»	«Материалы, вещества»
1	Испытание на растяжение	Устанавливаем оснастку и образцы, проведение испытаний и снятие образцов	Старший научный сотрудник	Универсальная испытательная машина Н50КТ	Образцы

Продолжение таблицы 3

2	Испытание на кручение	Установка образца в клеймы держателей, проведение испытаний и снятие образцов	Старший научный сотрудник, техник	Установка на кручение серии КТС-403	Образцы
3	Исследование изломов	Установление образцов на предметный столик, изучение образцов при нужных увеличениях, снятие образцов	Старший научный сотрудник	Растровый электронный микроскоп JCM-6000 фирмы JEOL	Образцы
4	Измерение твёрдости	Помещение образца на испытательный столик; проведение замера.	Младший научный сотрудник	Твердомер ТН 300	Образцы

«Результаты выполненной бакалавром идентификации профессиональных рисков приводятся в таблице 4».

Таблица 4 – Идентификация профессиональных рисков.

№п/п	«Производственно технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ»	«Опасный или вредный производственный фактор»	«Источник опасного и / или вредного производственного фактора»
1	Испытание на кручение	повышенный уровень шума на рабочем месте	Установка на кручение серии КТС-403
2	Испытание на растяжение	повышенный уровень шума на рабочем месте	Универсальная испытательная машина Н50КТ

«Организационно-технические методы и технические средства (технические устройства) устранения негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов отражены в виде сводной таблицы 5» [4].

Таблица 5 - Методы и средства снижения профессиональных рисков

№ п/п	«Опасный или вредный производственный фактор»	«Организационно технические методы и технические средства защиты, частичного снижения, полного устранения опасного и / или вредного производственного фактора»	«Средства индивидуальной защиты работника»
1	Высокий уровень шума на рабочем месте, риск получения травмы от неисправных частей оборудования, риск возникновения осколков и электротравма	Установка заграждений оборудования, кожухи	Шумоподавляющие наушники

«Проводим идентификацию источников потенциального возникновения класса пожара и выявленных опасных факторов пожара, с последующей разработкой модифицированных или альтернативных технических средств и/или организационных методов по обеспечению (улучшению) пожарной безопасности технического объекта» [4].

Таблица 6 – Идентификация классов и опасных факторов пожара .

№ п/п	«Участок или подразделение»	«Оборудование»	«Класс пожара»	«Опасные факторы пожара»	«Сопутствующие проявления факторов пожара»
1	Лаборатория по испытанию механических свойств	Испытательная машина Н50КТ	Д	Пламя и искры	Появление высокого электрического напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов

«Разработка технических средств и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности заданного технического объекта должна опираться на ГОСТ Р 12.3.047» [4].

Таблица 7 - Технические средства обеспечения пожарной безопасности

«Первичные средства пожаротушения»	«Стационарные установки системы пожаротушения»	«Пожарное оборудование»	«Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре»	«Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)»	«Пожарные сигнализация, связь и оповещение»
Песок, пенный огнетушитель	Аэрозольная система пожаротушения	Пожарный шкаф с рукавом	Противопожарный	Лом, топор, лопата находятся внутри термошкафа	Автоматический извещатель

«Организационно-технические мероприятия для предотвращения пожара, по ГОСТ Р 12.3.047» [4].

Таблица 8 – Организационные (организационно-технические) мероприятия по обеспечению пожарной безопасности.

<p>«Наименование технологического процесса, используемого оборудования в составе технического объекта»</p>	<p>«Наименование видов реализуемых организационных (организационно-технических) мероприятий»</p>	<p>«Предъявляемые нормативные требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты»</p>
--	--	---

Продолжение таблицы 8

<p>Испытание на растяжение, универсальная испытательная машина Н50КТ</p>	<p>1. «Организация служб по пожарной безопасности в соответствии с законодательством; 2. Проведение инструктажей по технике производстве и общественных объектов пребывания людей; 3. Разработка и применение норм и правил по пожарной безопасности, инструкции по эксплуатации пожароопасных веществ, материалов, по соблюдению противопожарного режима и по действиям при возникновении пожароопасной ситуации»</p>	<p>Заземление электрических устройств; исключение условий для теплового, химического и микробиологического самовозгорания используемых веществ, материалов, изделий и конструкций, применение качественных низковольтных приводов</p>
--	--	---

Заключение

1. В результате проведения испытания на растяжение по выбранным режимам при комнатной температуре, мы видим, что РКУП-К увеличивает прочностные свойства титана в 1,5 раза, а пластичность снижает в 1,4 раза; при этом твердость увеличивается незначительно в 1,05 раз.
2. При испытании образцов на кручение и анализе диаграммы «крутящий момент–угол закручивания» мы можем сказать что, после РКУП-К крутящий момент образцов из титана увеличился в 1,2 раза, угол закручивания уменьшился в 1,5 раза по сравнению с КЗ титаном, что является благоприятным фактором с позиции сопротивления титана кручению.
3. Предел прочности и предел текучести УМЗ титана Grade 4 при кручении возрастают, а значение относительного сдвига снизится по сравнению с КЗ титаном, что является благоприятным фактором, снижающим вероятность разрушения при откручивании сросшихся с костью шурупов при остеосинтезе. Следовательно, УМЗ титан является более перспективным материалом для изготовления медицинских шурупов и других медицинских изделий, испытывающих в процессе эксплуатации нагрузки кручения, по сравнению с КЗ титаном.
4. На поверхности всех изломов образцов, независимо от состояния титана, можно выделить три области, отличающиеся микрорельефом поверхности и отражающие процесс разрушения образцов при кручении. Разрушение начинается с образования ямок сдвига в средней и периферийной области, которые при дальнейшем вращении образца полностью или частично затираются. Окончательное разрушение происходит под действием нормальных напряжений в центральной части образца.

Список используемой литературы

1. А.Г. Илларионов, А.А. Попов. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов №1 – Екатеринбург, 2014. С. 138.
2. Валиева Р.З. Создание nano структурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации. // Российские nano технологии, 2006. Т.1. С. 208–216.
3. ГОСТ 12.0.003-74 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1); Дата введения 1976-01-01. – Москва: 1978 г
4. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Национальный стандарт Российской Федерации. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. — ВЗАМЕН ГОСТ Р 12.3.047-98; Дата введения 2014-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 3с
5. Забелин, С.Ф. Анализ nano кристаллизации и формирования nano фазных систем в поверхностном слое металлов и сплавов /С.Ф. Забелин, Дорожков А. А. и др.. – №11. – Москва: Технология машиностроения, 2010. – 312- 314с.
6. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСИС, 1998.- 400 с.
7. Институт машиностроения. (институт) Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей» - PDF. [Электронный ресурс]. <http://docplayer.ru> (дата обращения 23.04.2021)
8. Изучение работы сцинтилляционного счетчика : методические указания к лабораторной работе № 68-1 по физике для студентов всех форм обучения / сост. А. В. Казарбин. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. унта, 2009. – 12 с.

9. Измерение твердости металлов. [Электронный ресурс]. <http://www.modificator.ru/terms/hardness.html> (дата обращения 23.04.2021)
10. Испытательные машины на кручение. [Электронный ресурс]. <https://test-systems.ru/produkcija/mashiny-dlya-ispytaniy-na-skruchivanie/kts/kts-405-20-0.5> (дата обращения 23.04.2021)
11. Клевцов Г.В., Бобрук Е.В., Семенова И.П., Клевцова Н.А., Валиев Р.З. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных металлических материалов: учебное пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 240 с.
12. Кручение. [Электронный ресурс]. <http://www.soprotmat.ru/kruch.htm> (дата обращения 23.04.2021)
13. М.Б. Иванов, Ю.Р. Колобов, Е.В. Голосов, И.Н. Кузьменко, В.П. Вейнов, Д.А. Нечаенко, Е.С. Кунгурцев // Механические свойства наноструктурного титана серийного производства // Российские нанотехнологии, 2011. Т.7.
14. Нестеров, Константин Михайлович Прочность и электропроводность ультрамелкозернистого медного сплава системы Cu-Cr : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 05.16.08 Уфа 2017. [Электронный ресурс]. <http://dlib.rsl.ru> (дата обращения 23.04.2021)
15. Наноструктурный титан для биомедицинских применений: новые разработки и перспективы коммерциализации. [Электронный ресурс]. <http://elibrary.ru> (дата обращения 23.04.2021)
16. Наноструктурные материалы. [Электронный ресурс]. <http://bibliorossica.com> (дата обращения 23.04.2021)
17. Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук (31 января 2007 г.). Атомно-проекционная параллельная фабрикация наноструктур. [Электронный ресурс]. <http://elibrary.ru> (дата обращения 23.04.2021)

18. Настольный растровый электронный микроскоп JSM 6000. [Электронный ресурс]. <https://www.arttool.ru/catalog/equipment/tekhnicheskaya-mikroskopiya/nastolnyy-rastrovyy-elektronnyy-mikroskop-jcm-6000/> (дата обращения 23.04.2021)
19. Попова А.А, Яковлев В.И. Получение биосовместимых механокомпозитов для нанесения на импланты медицинского назначения. Ползуновский вестник. 2017. №4. С. 164-169.
20. Разрывная машина до 50кН. [Электронный ресурс]. <https://www.metrotex.ru/products/mt120-50> (дата обращения 23.04.2021)
21. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС для студентов специальности 1-70 02 01 Промышленное и гражданское строительство В двух частях Часть I. [Электронный ресурс]. <http://kniga.seluk.ru> (дата обращения 23.04.2021)
22. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАНТОВ БИОМЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ - тема научной статьи по машиностроению, читайте бесплатно текст научно-исследовательской работы в электронной библиотеке КиберЛенинка. [Электронный ресурс]. <https://cyberleninka.ru> (дата обращения 23.04.2021)
23. Стационарный твердомер ТН 300. [Электронный ресурс]. <https://www.geo-ndt.ru/pribor-1046-stacionarnii-tverdomer-th300-porokvelly.htm> (дата обращения 23.04.2021)
24. Титан Grade 4 / Ti Grade 4 / R50700. [Электронный ресурс]. https://emk24.ru/wiki/titan_i_ego_splavy/titan_grade_4_ti_grade_4_r50700_4338802/ (дата обращения 23.04.2021)

25. УМК "Сопротивление материалов" для студентов спец. 700201 (Промышленное и гражданское строительство). Часть 1. [Электронный ресурс]. <http://psu.by> (дата обращения 23.04.2021)
26. BIOMIMETIC HYDROXYAPATITE FORMATION ON TITANIUM SURFACE IN SIMULATED BODY FLUIDS OF DIFFERENT CHEMICAL COMPOSITION. Nylypchuk Ie.V., Petranovska A.L., Оранська О.І., Gorbyk P.P. Chemistry, Physics and Technology of Surface. 2014. Т. 5. № 4. С. 415-420.
27. Improving the technology of obtaining metal implants for biomedical purposes. [Электронный ресурс]. <http://elibrary.ru> (дата обращения 23.04.2021)
28. IMPROVEMENT OF SURGICAL METHODS FOR THE TREATMENT OF LOWER JAW DEFECTS WITH BIOCOMPATIBLE MATERIALS FROM TITANIUM NICKELIDE. [Электронный ресурс]. <http://elibrary.ru> (дата обращения 23.04.2021)
29. Ruslan Z. Valiev, Alexander P. Zhilyaev, Terence G. Langdon. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons (2014), 440 p.
30. Valiev R.Z. Nanostructured Materials, 1995, v. 6, p. 73.