

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
(НИУ «БелГУ»)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК  
КАФЕДРА МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ  
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ  
СПЛАВОВ**

Выпускная квалификационная работа  
обучающегося по направлению подготовки  
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов  
очной формы обучения  
группы 07001312  
Полева Сергея Анатольевича

Научный руководитель:  
Афонин А.Н

БЕЛГОРОД 2017

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	5
1.1 СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ .....	5
1.2 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ.....	13
1.3 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	15
1.3.1 СТРОГАНИЕ.....	16
1.3.2 ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА .....	17
1.3.3 СВЕРЛЕНИЕ .....	17
1.3.4 ФРЕЗЕРОВАНИЕ .....	18
1.3.5 ШЛИФОВАНИЕ .....	18
1.4 ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (ТМО) .....	21
1.5 ОБРАБОТКА ТИТАНА РЕЗАНИЕМ .....	25
2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	29
2.1 ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	29
2.2 DEFORM-3D.....	31
2.3 Постановка начальных и граничных условий.....	32
2.3 Экспериментальное оборудование.....	35
2.3.1 Токарный станок с ЧПУ Optimum D280 CNC Pro.....	35
2.3.2Тепловизор ThermoPro TP8.....	36
2.3.3 Микроскоп Olympus cx41.....	37
2.3.4 Твердомер по Виккерсу HVS-10 .....	39
3 Результаты исследования.....	40
3.1 Результаты моделирования методом конечных элементов.....	40
3.2 Термограммы.....	43
3.3 Зависимость температуры от режимов резания.....	46
3.4 Микро структура nano структурированного титанового сплава VT1-0 после точения с различными режимами резания.....	47
3.5 Твердость nano структурированного титанового сплава VT1-0 .....	50
Заключение.....	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Титан и его сплавы нашли применение во многих отраслях промышленности. К настоящему времени в мире разработана и используется достаточно широкая номенклатура титановых сплавов, различающихся по химическому составу, структуре и свойствам. Титановые сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в настоящее время в разных отраслях промышленности. Широкое их использование связано с присущими титану и его сплавам комплексу свойств – высокая удельная прочность, коррозионная стойкость во многих агрессивных средах, немагнитность, хорошая жаропрочность при температурах эксплуатации до 500–600°С.

Более эффективное использование титановых сплавов возможно при снижении затрат на производство из него полуфабрикатов и изделий. Весомый вклад в стоимость изделия вносят технологические операции при изготовлении полуфабрикатов, такие как фасонное литье, пластическая деформация, сварка, механическая и термическая обработка. Каждая из этих операций характеризуется определенным комплексом таких технологических свойств, как литейные, деформационные, свариваемость, мехобработываемость, прокаливаемость.

Особенностью субмикроструктурного и нано структурного состояний, полученных в металлах и сплавах воздействием ИПД, является активизация диффузионных процессов. Ряд экспериментов показывает, что возрастание влияния диффузии на эволюцию структуры, связанной с миграцией границ зерен, зёрнограницной сегрегацией атомов примесей, изменением размеров микропор, релаксацией внутренних напряжений и выделением вторичных фаз, в таких состояниях связано не только с большей площадью межзеренных областей, но и с увеличенной скоростью диффузии по границам зерен в сравнении с крупнокристаллическим состоянием [11]. Эта особенность является причиной понижения температур проявления

«высокотемпературных» диффузионно-контролируемых механизмов пластической деформации, например, таких, как зёрнограничное проскальзывание до температур, близких к комнатным. Последнее позволяет использовать контролируемые диффузией процессы как инструмент реализации сверх пластичности и целенаправленного формирования структурно-фазовых состояний, обеспечивающих повышение прочности при сохранении или, в некоторых случаях, увеличении пластичности при достаточной термической стабильности структуры. Однако использование указанных особенностей требует установления зависимостей характеристик диффузии по межзёренным областям от температуры, среднего размера зерен, химического состава и структурного состояния внутренних границ раздела. Интерпретация результатов экспериментальных исследований в этом случае серьезно затруднена, прежде всего в связи со сложностью полного описания дефектной структуры СМК- и НК-материалов, полученных воздействием пластической деформацией. Последнее связано с тем, что в такой структуре присутствуют нерелаксированные остаточные напряжения, возможна неоднородность состава и другие особенности, наблюдаемые в гетеро системах[1].

Цель работы: определить режимы резания, исключаящие рост зерна у нано структурированных титановых сплавов

# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Наиболее распространенными марками титана являются ВТ1-0, ВТ1-00, ВТ1-00св. Титан указанных марок называется техническим. Данные марки не содержат в своем составе легирующие элементы, только незначительное количество примесей. Содержание титана (Ti) в марке ВТ1-0 составляет приблизительно 99,24-99,7%, в ВТ1-00 - 99,58-99,9%, ВТ1-00св - 99,39-99,9%. Титан ВТ1-0, ВТ1-00 производится в виде листов, плит, прутков и труб. Проволока чаще всего используется для различных сварочных целей и производится из титана ВТ1-00св.

Известны две аллотропические модификации титана (две разновидности титана, имеющие одинаковый химический состав, но различное строение и свойства). Низкотемпературная  $\alpha$ -модификация, существующая до 882,5 °С и высокотемпературная  $\beta$ -модификация, устойчивая от 882,5 °С и до температуры плавления.

По плотности и удельной теплоемкости титан занимает промежуточное место между двумя основными конструкционными металлами: алюминием и железом. Стоит также отметить, что его механическая прочность примерно вдвое больше, чем чистого железа, и почти в шесть раз выше, чем алюминия. Но титан может активно поглощать кислород, азот и водород, которые резко снижают пластические свойства металла. С углеродом титан образует тугоплавкие карбиды, обладающие высокой твердостью.

Титан обладает низкой теплопроводностью, которая в 13 раз меньше теплопроводности алюминия и в 4 раза - железа. Коэффициент термического расширения при комнатной температуре сравнительно мал, с повышением температуры он возрастает.

Модули упругости титана невелики и обнаруживают существенную анизотропию. Модули упругости характеризуют способность материала упруго деформироваться при приложении к нему силы. Анизотропия заключается в различии свойств упругости в зависимости от направления действия силы. С повышением температуры до 350 °С модули упругости уменьшаются почти по линейному закону. Небольшое значение модулей упругости титана - существенный его недостаток, т.к. в некоторых случаях для получения достаточно жестких конструкций приходится применять большие сечения изделий по сравнению с теми, которые следуют из условий прочности[6].

Титан имеет довольно высокое удельное электросопротивление, которое в зависимости от содержания примесей колеблется в пределах от  $42 \cdot 10^{-8}$  до  $80 \cdot 10^{-6}$  Ом\*см. При температурах ниже 0,45 К он становится сверхпроводником.

Титан - парамагнитный металл. Обычно у парамагнитных веществ магнитная восприимчивость при нагревании уменьшается. Магнитная восприимчивость характеризует связь между намагниченностью вещества и магнитным полем в этом веществе. Титан составляет исключение из этого правила - его восприимчивость существенно увеличивается с температурой.

В настоящее время известно довольно большое число серийных титановых сплавов, отличающихся по химическому составу, механическим и технологическим свойствам. Наиболее распространенные легирующие элементы в титановых сплавах: Al, V, Mo, Mn, Cr, Si, Sn, Zr и Fe.

Титановый сплав ВТ5 содержит помимо титана 5% алюминия. Он отличается более высокими прочностными свойствами по сравнению с титаном, но его технологичность невелика. Сплав куется, прокатывается, штампуется и хорошо сваривается. Из титана (сплава) ВТ5 получают

титановые прутки (круги), проволоку и трубы, а также листы. Его применяют при изготовлении деталей, работающих при температуре до 400 °С.

Сплав титана VT5-1 помимо 5% алюминия содержит 2-3% олова. Олово улучшает его технологические свойства. Из титанового сплава VT5-1 изготавливают все виды полуфабрикатов, получаемых обработкой давлением: титановые плиты, а также листы, поковки, штамповки, профили, титановые трубы и проволоку. Он предназначен для изготовления изделий, работающих в широком интервале температур: от криогенных (отрицательных) до + 450 °С.

Титановые сплавы OT4 и OT4-1 помимо титана содержат алюминий и марганец. Они обладают высокой технологической пластичностью (хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии) и хорошо свариваются всеми видами сварки. Титан данных марок идет в основном на изготовление титановых листов и плит, лент и полос, а также изготавливаются титановые круги и прутки, поковки, профили и трубы[13]. Из титановых сплавов OT4 и OT4-1 изготавливают с применением сварки, штамповки и гибки детали, работающие до температуры 350 °С. Данные сплавы имеют недостатки:

- 1) сравнительно невысокая прочность и жаропрочность;
- 2) большая склонность к водородной хрупкости. В сплаве ПТЗВ марганец заменяется на ванадий.

Титановый сплав VT20 разрабатывали как более прочный листовой сплав по сравнению с VT5-1. Упрочнение сплава VT20 обусловлено его легированием, помимо алюминия, цирконием и небольшими количествами молибдена и ванадия. Технологическая пластичность сплава VT20 невысока из-за большого содержания алюминия. Однако титан VT20 отличается высокой жаропрочностью. Он хорошо сваривается, прочность сварного соединения равна прочности основного металла. Сплав предназначен для

изготовления изделий, работающих длительное время при температурах до 500 °С.

Титановый сплав ВТЗ-1 относится к системе Ti - Al - Cr - Mo - Fe - Si. Он обычно подвергается изотермическому отжигу. Такой отжиг обеспечивает наиболее высокую термическую стабильность и максимальную пластичность. Сплав ВТЗ-1 относится к числу наиболее освоенных в производстве сплавов. Он предназначен для длительной работы при 400 - 450 °С. Это жаропрочный сплав с довольно высокой длительной прочностью. Из него поставляют титановые прутки (титановые круги), профили, плиты, поковки, штамповки.

В настоящее время известно довольно много титановых сплавов, которые отличаются по химическому и фазовому составу, механическим и технологическим свойствам. В зависимости от класса легирующих элементов и их содержания структура титановых сплавов в отожженном состоянии может быть представлена  $\alpha$ -фазой,  $\beta$ -фазой и двумя фазами  $\alpha$  и  $\beta$  при различном их количественном сочетании. Основной классификацией титановых сплавов в настоящее время считается классификация по структуре в отожженном состоянии (или по фазовому составу). Классификация включает в себя:

1.  $\alpha$ -сплавы, структура которых представлена  $\alpha$ -фазой.
2. Псевдо  $\alpha$ -сплавы, структура которых представлена  $\alpha$ -фазой и небольшим количеством  $\beta$ -фазы или интерметаллидов (не более 5%).
3.  $(\alpha+\beta)$ -сплавы, структура которых представлена  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами; сплавы этого типа могут также содержать небольшое количество интерметаллидов.
4. Псевдо  $\beta$ -сплавы со структурой, представленной одной  $\beta$ -фазой после закалки или нормализации из  $\beta$ -области. Их химический состав превышает вторую критическую концентрацию. Структура этих



сплавов в отожженном состоянии представлена  $\alpha$ -фазой и большим количеством  $\beta$ -фазы.

5.  $\beta$ -сплавы, структура которых представлена термодинамически стабильной  $\beta$ -фазой.

6. Сплавы на основе интерметаллидов.

С. Г. Глазунов и В. И. Моисеев [10] выделяют также сплавы переходного класса, которые по структуре и протекающим в них превращениям занимают промежуточное положение между  $(\alpha+\beta)$ - и псевдо- $\beta$ -сплавами. По существу это сплавы, в которых в зависимости от колебаний и химического состава после закалки из  $\beta$ -области может сформироваться  $\beta$ -структура (возможно с  $\omega$ -состоянием внутри нее) или структура, представленная  $\beta$ -фазой и мартенситом. По химическому составу это сплавы, близкие ко второй критической концентрации.

Б. А. Колачев и В. А. Ливанов [11] предложили классификацию титановых сплавов по структуре в закаленном состоянии. Эта классификация включает в себя:

- сплавы мартенситного класса, структура которых после закалки с температур выше , представлена мартенситом.
- сплавы переходного класса, структура которых после закалки с температур выше , представлена мартенситом  $\alpha''$  и  $\beta$  - фазой.
- $\beta$ -сплавы, структура которых после закалки представлена  $\beta$ - или  $\beta$  ( $\omega$ 1)- фазами.

Существует также классификация по способу производства, по свойствам в закаленном состоянии, по уровню прочности (условная, так как методами термической обработки свойства сплавов можно менять в широких пределах), по химическому составу (подобно алюминиевым сплавам). С практической точки зрения интерес представляет классификация по

назначению: конструкционные, жаропрочные, криогенные, коррозионно-стойкие, функциональные. [2,14].

Так как при практическом использовании классификации титановых сплавов по структуре в отожженном состоянии возникают затруднения, обусловленные тем, что меняя режим отжига, можно получить разнообразные структуры, С.Г. Глазунов и В.Н. Моисеев ввели понятие о коэффициенте  $\beta$ -стабилизации ( $K_\beta$ ). Коэффициент  $\beta$ -стабилизации сплавов показывает, насколько данный сплав близок по составу ко второй критической концентрации ( $C''_{кр}$ ). Коэффициент  $K_\beta$  определяют по формуле 1. [2, 9, 15].

$$K_\beta = \frac{C_1}{C_{1кр}} + \frac{C_2}{C_{2кр}} + \frac{C_3}{C_{3кр}} + \dots + \frac{C_i}{C_{iкр}}; (1)$$

где  $C_1, C_2, C_3 \dots C_i$  – содержание различных  $\beta$ -стабилизаторов,  $C_{1кр}, C_{2кр}, C_{3кр} \dots C_{iкр}$  – критические концентрации ( $C_{\beta\phi\phi\phi\phi}$ ), выше которых в соответствующих двойных системах закалкой фиксируется только  $\beta$ -фаза с  $w$ -фазой внутри нее или без неё, а мартенситное превращение подавляется.

Для описания титановых сплавов применяют также понятие молибденового эквивалента  $[Mo]_{э\text{кв}}$ , принимая, что действие всех  $\beta$ -стабилизаторов можно выразить эквивалентным содержанием молибдена, при котором количество  $\beta$ -фазы, её стабильность к превращениям в двойном сплаве Ti-Mo будет таким же, как и в рассматриваемом сплаве. Молибденовый эквивалент определяют по соотношению 2 и 3:

$$[Mo]_{э\text{кв}} = \frac{x_i C''_{Mo}}{C''_i}; (2)$$

где  $C''_i$  и  $C''_{Mo}$  – вторая критическая концентрация легирующего элемента и молибдена соответственно. [9, 11, 15]

При оценке молибденового эквивалента сложнолегированного сплава действие различных  $\beta$ -стабилизаторов считают аддитивным, а влиянием  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей пренебрегают. Таким образом,

$$[Mo]_{\text{экв}} = \%Mo + \frac{\%Ta}{4} + \frac{\%Nb}{3,3} + \frac{\%W}{2} + \frac{\%V}{1,4} + \frac{\%Cr}{0,6} + \frac{\%Mn}{0,6} + \frac{\%Fe}{0,5} + \frac{\%Co}{0,9} + \frac{\%Ni}{0,8}; (3)$$

Молибденовый эквивалент и коэффициент  $\beta$ -стабилизации исходят из одного и того же принципа. Отличие состоит только в том, что  $[Mo]_{\text{экв}}$  даёт абсолютные эквивалентные значения, а  $K_{\beta}$  - относительные. Эти коэффициенты дают лишь приблизительную оценку  $\beta$ -стабилизации титановых сплавов, так как при расчёте не учитывается влияние  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей, а действие  $\beta$ -стабилизаторов считается аддитивным. Между этими характеристиками наблюдается простое соотношение 4. [9, 11, 15]:

$$K_{\beta} = \frac{[Mo]_{\text{экв}}}{C_{\text{кр}Mo}} = \frac{[Mo]_{\text{экв}}}{11}; (4)$$

Влияние алюминия и нейтральных упрочнителей на структуру и свойства многокомпонентных титановых сплавов можно оценить с помощью эквивалента по алюминию, который был введен Розенбергом. Эквивалент в работе [16],  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей по алюминию оценивают из условия образования упорядоченной  $\alpha''$ -фазы, которая снижает термическую стабильность сплавов.

Двойные сплавы Ti-Al теряют термическую стабильность в интервале концентраций от 8 до 9% масс. При дополнительном легировании сплавов Ti-Al оловом и цирконием содержание алюминия, при котором термическая стабильность становится неудовлетворительной, смещается к меньшим концентрациям, причём действие 1% Al эквивалентно 3% Sn и 6% Zr. Кислород в десять раз эффективнее, чем алюминий, уменьшает термическую стабильность. Влияние углерода и удвоенного азота на условия образования  $\alpha_2$ -фазы, в количествах снижающих термическую стабильность,

приравнивают к действию кислорода. Таким образом, эквивалент  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей по алюминию можно описать в виде соотношения 5.

$$[Al]_{\text{экв}} = \%Al + \frac{\%Sn}{3} + \frac{\%Zr}{6} + 10 \times [\%O + \%C + 2 \times (\%N)];(5)$$

В таблице 1 приведён коэффициент  $\beta$ -стабилизации и эквиваленты легирующих элементов по молибдену и алюминию в зависимости от класса сплава. [2, 9, 11].

Эквиваленты легирующих элементов по молибдену и алюминию и коэффициент  $\beta$ -стабилизации для отечественных промышленных титановых сплавов разных классов.

Класс сплавов	Марка сплава	$K_{\beta}$	$[Mo]_{\text{экв}}$	$[Al]_{\text{экв}}$
$\alpha$ -сплавы	BT1-0, BT5 0			0,8 - 7
Псевдо- $\alpha$ -сплавы	OT4, BT18Y, BT20	0,25	2,75	2-9
$(\alpha+\beta)$ -сплавы	BT6, BT9, BT16, BT23	0,3 - 0,9	3,3 - 10	4-8,5
Псевдо $\beta$ -сплавы	BT19, BT35	1,4 - 2,4	15,5 - 26,5	4-5
$\beta$ -сплавы		2,5	27,5	1

Таблица 1 приведён коэффициент  $\beta$ -стабилизации и эквиваленты легирующих элементов по молибдену и алюминию в зависимости от класса сплава.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные; по уровню механических свойств — на сплавы невысокопрочности и повышенной пластичности, средней прочности, высокопрочные; по условиям применения - на хладостойкие, жаропрочные,

коррозионностойкие. По способности упрочняться термообработкой они делятся на упрочняемые и неупрочняемые, по структуре в отожженном состоянии — на  $\beta$  -, псевдо- $\beta$  -, ( $\alpha + \beta$ )-, псевдо- $\beta$  - и  $\beta$  -сплавы.

Отдельные группы титановых сплавов различаются по величине условного коэффициента стабилизации  $K_\beta$ , который показывает отношение содержания  $\beta$  -стабилизирующего легирующего элемента к его содержанию в сплаве критического состава  $C_{кр}$ . При содержании в сплаве нескольких  $\beta$  -стабилизирующих элементов их  $K_\beta$  суммируется[18].

## **1.2 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Для изготовления конструкций и деталей из титановых сплавов применяются всевозможные виды механической обработки: шлифование, точение, сверление, фрезерование, полирование. Одной из важных особенностей при механической обработке деталей из титана и сплавов является то, что необходимо обеспечить ресурсные, в особенности усталостные характеристики, в значительной степени, зависящие от качества поверхностного слоя, который формируется при холодной обработке. Из-за низкой теплопроводности и др. специфических свойств титана, проведение шлифования как завершающей стадии обработки затруднено. Во время шлифовки очень легко могут образовываться прижоги, в поверхностном слое могут возникать дефектные структуры и остаточные напряжения, растяжения, которые существенно влияют на снижение усталостной прочности изделий. Поэтому, шлифование деталей из титана обязательно проводится при пониженных скоростях и в случае необходимости может быть заменено на лезвийную либо абразивную обработку низкоскоростными методами. В случае же применения шлифования, оно должно проводиться с применением строго регламентированных режимов с проведением последующего контроля поверхности деталей на наличие прижогов и сопровождаться теплопроводности влечет за собой значительное повышение температуры в поверхностных слоях разреза и затрудняет охлаждение зоны

резки. Из-за сильной адгезии титан накапливается на режущей кромке, что значительно повышает силу трения. Кроме того, приваривание и налипание титана в местах соприкосновения поверхностей приводит к изменению геометрии инструмента. Такие изменения, изменяющие оптимальную конфигурацию, влекут за собой дальнейшее повышение усилий для обработки, что, соответственно, приводит к еще большему повышению температуры в точке контакта и ускорению износа. Больше всего на повышение температуры в рабочей зоне влияет скорость резания, в меньшей степени это зависит от усилия подачи инструмента[20].. Наименьшее влияние на повышение температуры оказывает глубина проведения резания. Под действием высоких температур при резании происходит окисление титановой стружки и обрабатываемой детали. Это влечет в последующем для стружки проблему, связанную с ее утилизацией и переплавкой. Аналогичный процесс для обрабатываемой детали в последующем может привести к ухудшению ее эксплуатационных характеристик.

Процесс холодной обработки титановых сплавов по трудоемкости в 3–4 раза сложнее, чем обработка углеродистых сталей, и в 5–7 раз — чем обработка алюминия. Сплавы титана VT5 и VT5–1 в сравнении с углеродистой сталью (с 0,45% C), имеют коэффициент относительной обрабатываемости 0,35–0,48, а для сплавов VT6, VT20 и VT22 этот показатель еще меньше и составляет 0,22–0,26. Рекомендуется при механической обработке использовать низкую скорость резки при небольшой подаче, используя для охлаждения большое количество охлаждающей жидкости. При обработке изделий из титана применяются режущие в сплаве, вакуумным отжигом и соответствующей механической обработкой. Проведение легирования сплавов из титана при помощи водорода дает в конечном итоге значительное снижение температуры в зоне резания, дает возможность снизить силу резания, повышает стойкость твердосплавного инструмента до 10 раз в зависимости от природы сплава и режима резания. Этот способ дает возможность увеличить скорость обработки в 2 раза без

потери качества, а также увеличивать усилие и глубину при проведении резания без снижения скорости. Для механической обработки деталей из сплавов титана широкое применение получили технологические процессы, которые позволяют совместить несколько операций в одну за счет использования много инструментального оборудования. Наиболее целесообразно такого рода технологические операции проводить на многооперационных станках (обрабатывающих центрах).

Чтобы обеспечить оптимальные условия резания и высокое качество поверхности деталей, необходимо строгое соблюдение геометрических параметров инструмента из твердых сплавов и быстрорежущих сталей. Резцы с пластинками из твердого сплава ВК8 применяются для точения кованных заготовок. Рекомендуются стали (P9K5, P9M4K8, P6M5K5). Для резцов, изготовленных из быстрорежущей стали, разработана следующая геометрическая конфигурация: радиус при вершине  $r = 1$  мм, задний угол  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\varphi = 15^\circ$ . Допустимые режимы резки при точении титана достигаются при глубине резки  $t = 0,5-3$  мм,  $v = 24-30$  м/мин,  $s < 0,2$  мм[26].

### **1.3 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Для изготовления конструкций и деталей из титановых сплавов применяются всевозможные виды механической обработки: шлифование, точение, сверление, фрезерование, полирование. Одной из важных особенностей при механической обработке деталей из титана и сплавов является то, что необходимо обеспечить ресурсные, в особенности усталостные характеристики, в значительной степени зависящие от качества поверхностного слоя, который формируется при холодной обработке. Из-за низкой теплопроводности и др. специфических свойств титана, проведение шлифования как завершающей стадии обработки затруднено. Во время шлифовки очень легко могут образовываться прижоги, в поверхностном слое могут возникать дефектные структуры и остаточные напряжения, растяжения, которые существенно влияют на снижение усталостной

прочности изделий. Поэтому, шлифование деталей из титана обязательно проводится при пониженных скоростях и в случае необходимости может быть заменено на лезвийную либо абразивную обработку низкоскоростными методами. В случае же применения шлифования, оно должно проводиться с применением строго регламентированных режимов с проведением последующего контроля поверхности деталей на наличие прижогов и сопровождаться

### 1.3.1 СТРОГАНИЕ

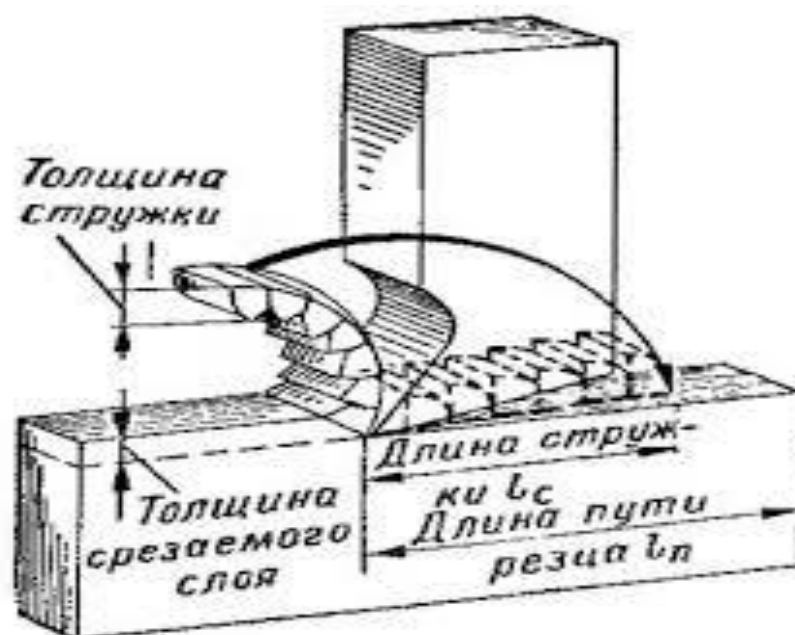


Рисунок 1.3.1 схема строгания

На металлургическом производстве строгают заготовки на специальных строгальных станках. Металл снимается одним или несколькими резцами постепенно, стружка за стружкой, до нужной глубины.



### 1.3.2 ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА

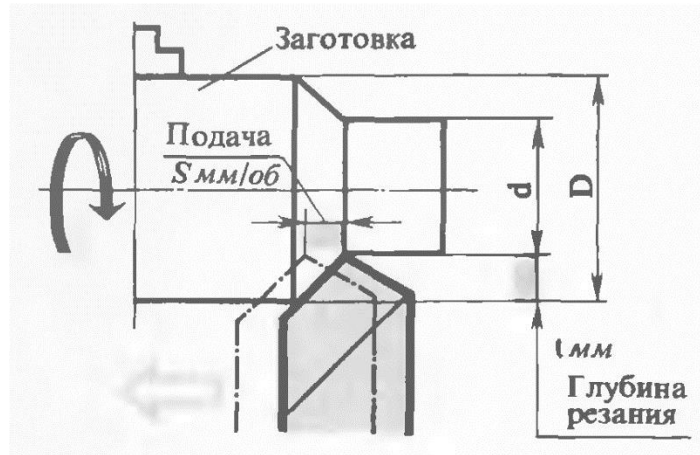


Рисунок 1.3.2 Схема точения

С помощью токарных станков обрабатывают цилиндрические поверхности внутри и снаружи детали. Резец снимает металл с вращающейся с заданной скоростью заготовки (как нож счищают кожуру с картофелины или яблока). Или, наоборот, заготовка неподвижна, а резец вокруг неё вращается.

### 1.3.3 СВЕРЛЕНИЕ

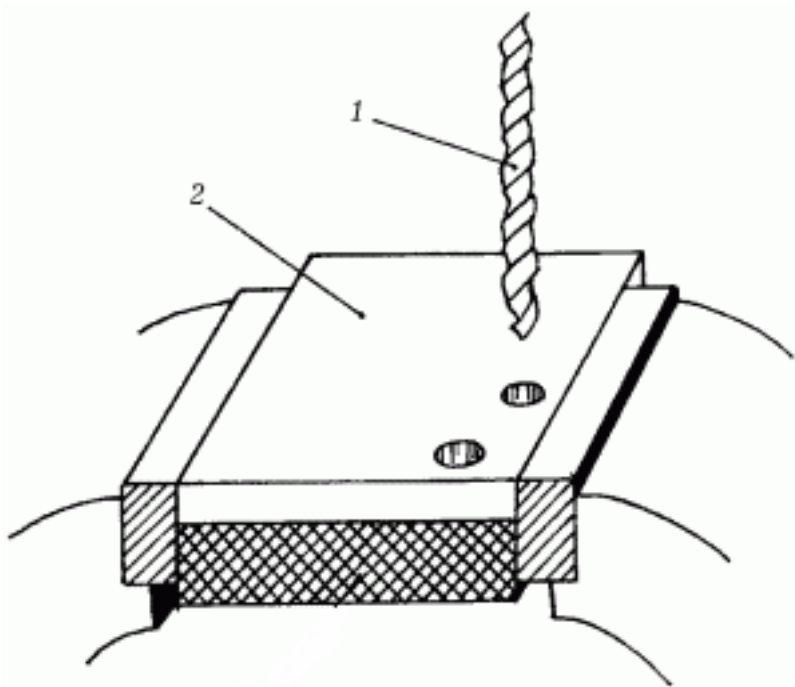


Рисунок 1.3.3 Схема сверления где 1 – сверло; 2 —деталь

Эти работы производят на сверлильных станках. На них можно сверлить - создавать в детали сквозные или глухие отверстия, рассверливать - увеличивать диаметр уже готового, зенковать - создавать в металле углубления, в которых потом спрячется головка (шляпка) винта или болта.

### 1.3.4 ФРЕЗЕРОВАНИЕ

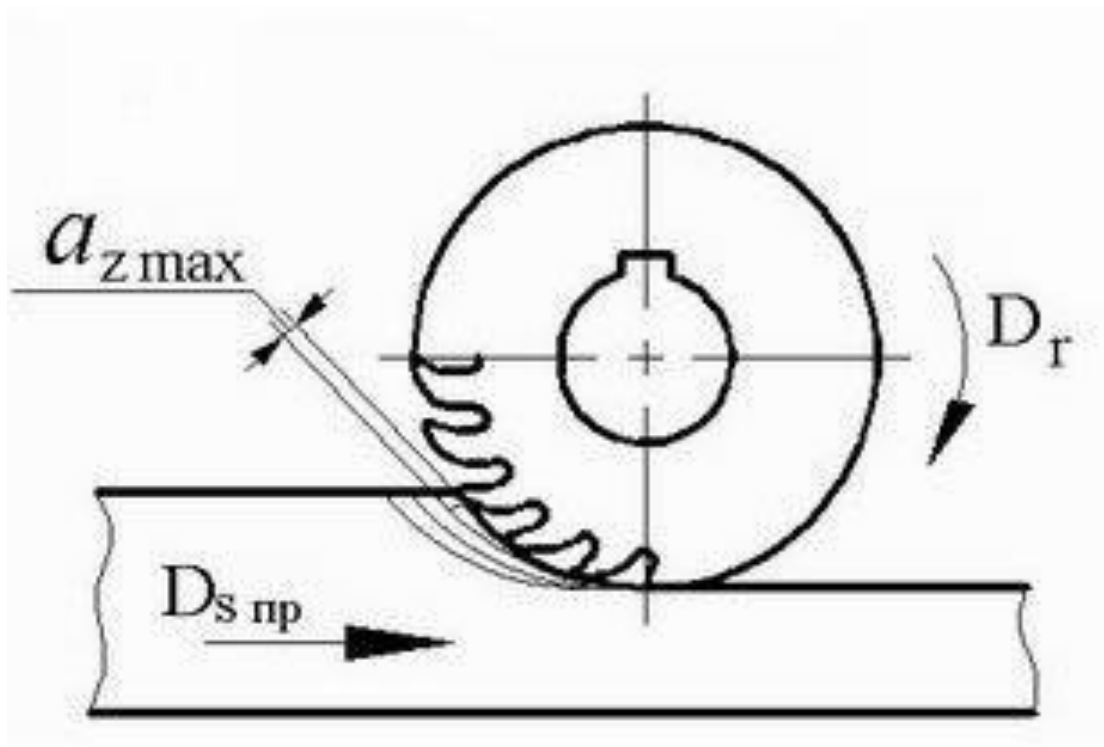


Рисунок 1.3.4 Схема фрезерования

На фрезервальном станке одновременно движется и фреза (похожа на сверло, но с зубьями), и обрабатываемая деталь. Заготовку любой формы можно обрабатывать сразу с нескольких сторон, создавая, например, пазы (углубления различной формы) или фаски (скошенное под определенным углом ребро детали).

### 1.3.5 ШЛИФОВАНИЕ

На обрабатываемость титановых сплавов существенно влияет их химический и фазовый состав, тип и параметры микроструктуры. Наиболее

затруднена обработка титановых полуфабрикатов и деталей, имеющих грубую пластинчатую структуру. Такого рода структура имеется у фасонных отливок. Кроме того, фасонные отливки из титана имеют газонасыщенную корку на поверхности, которая сильно влияет на износ инструмента.

Проведение шлифовки титановых деталей затруднено из - за высокой склонности контактного схватывания во время трения. Оксидная поверхностная пленка легко разрушается во время трения под действием удельных нагрузок. В процессе трения в местах соприкосновения поверхностей происходит активное перенесение материала из обрабатываемой детали на инструмент («схватывание»). Способствуют этому так же и другие свойства сплавов титана: более низкая теплопроводность, повышение упругой деформации при сравнительно низком модуле упругости. Из - за выделения тепла на трущейся поверхности утолщается оксидная пленка, что в свою очередь повышает прочность поверхностного слоя. При обработке деталей из титана применяются ленточное шлифование и шлифование абразивными кругами. Для промышленных сплавов наиболее распространено применение абразивных кругов из зеленого карбида кремния, который обладает большой твердостью и хрупкостью при стабильности физико - механических свойств с более высокими абразивными способностями, чем у черного карбида кремния.

Титан – уникальный конструкционный материал. Он обладает свойствами, позволяющими использовать его в самых ответственных областях: прочность, твердость, пластичность, упругость, низкая теплопроводность. Но те же свойства, что делают титан таким привлекательным, очень сильно усложняют обработку деталей из этого металла и его сплавов.

При механической обработке проявляется такое «вредное» качество титана, как способность налипать на инструмент из более твердого металла. Это связано с тем, что в месте соприкосновения инструмента с деталью во

время работы выделяется тепло. Но титан – металл с очень низкой теплопроводностью, то есть практически не поглощает образовавшееся тепло, не нагревается. В таких условиях частицы титана срываются с поверхности и «прилипают» к инструменту.

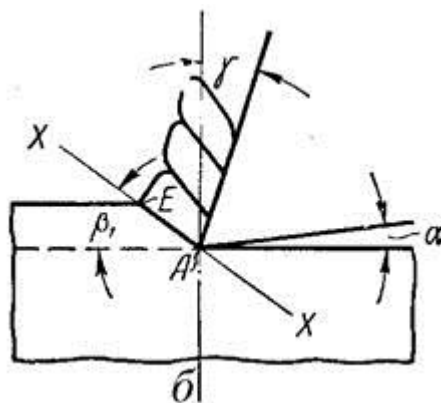


Рисунок 1.3.5 Схема стружкообразования

Налипание титана на режущую кромку инструмента приводит к изменению его геометрических параметров (меняется размер). Так что резание, токарная, фрезерная и другие виды механической обработки деталей из титановых сплавов сильно затруднены из-за быстрого изнашивания инструмента. Для того, чтобы снизить эффект налипания, применяют сильно охлажденные жидкости, отводящие излишнее тепло из зоны обработки. Еще один способ уменьшить количество тепла – ведение работ на низких скоростях.

Налипание может быть проблемой не только при обработке титановой детали, но и при её использовании. Например, в трущихся и скользящих изделиях, где поверхности соседних деталей постоянно соприкасаются друг с другом. Если металл соседней детали мягче титана, то он «отрывает» чужие частицы, «приклеивает» их на себя. А если тверже – деталь буквально «вязнет» в титане. Выход нашли, упрочняя поверхностный слой титановой продукции. Для этого проводят азотирование или оксидирование поверхности: при высокой температуре (850 – 950 градусов) деталь выдерживают в чистом азоте или кислороде. В результате образуется

нитридная (после обработки азотом) или оксидная (после обработки кислородом) очень твердая пленка, которая мешает титану проявлять свою «липкость».

## **1.4 ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (ТМО)**

В последние годы в практику внедряется термомеханическая обработка титановых сплавов, поскольку она в ряде случаев обеспечивает более высокий комплекс механических свойств по сравнению с собственно термической обработкой.

Высокотемпературная термомеханическая обработка титановых сплавов заключается в горячей деформации сплава в  $\alpha+\beta$ - или  $\beta$ -области, закалке и старении. В результате закалки, осуществляемой сразу после окончания горячей деформации, в металле подавляются рекристаллизационные процессы и сохраняются, хотя бы частично, особенности структуры и тонкого строения горячедеформированного металла. Старение сплава с такой структурой обеспечивает повышенные механические свойства по сравнению с упрочняющей термической обработкой, включающей стандартную закалку и старение.

Эффективность использования ВТМО для улучшения комплекса свойств титановых сплавов связаны с их способностью не только к деформационному упрочнению, но, к термическому упрочнению, обусловленному распадом метастабильных фаз, фиксируемых ускоренным охлаждением после завершения горячей деформации. Поэтому существенный эффект ВТМО наблюдается только у титановых сплавов с достаточным количеством нестабильной  $\beta$ -фазы. По этой же причине ВТМО следует проводить при температурах, близких к  $T_{кр}$ , после закалки с которых фиксируется максимальное количество  $\beta$ -фазы. Для сплавов, в которых при

закалке фиксируется мартенсит  $\alpha''$ , оптимальная температура деформации при ВТМО может быть выше  $T_{кр}$ .

Эффект ВТМО с ростом степени деформации сначала повышается в связи с увеличением плотности дефектов кристаллического строения  $\beta$ -фазы, подвергающейся распаду при старении, достигает максимума в определенном интервале степеней деформации, а затем уменьшается в результате развития в процессе деформации при больших ее степенях динамической рекристаллизации.

Оптимальным режимом ВТМО титановых  $\alpha+\beta$ -сплавов является деформация на 40—70% в верхнем интервале температур  $\alpha+\beta$ -области (850—920° С) с последующей закалкой с деформационного нагрева и старением. Оптимальные режимы старения при ВТМО для сплавов ВТ8 и ВТ14 близки к режимам, рекомендуемым для стандартных режимов термического упрочнения.

Лучшие свойства сплаву ВТЗ-1, подвергнутому ВТМО с оптимальными степенями деформации (50—70%) при 850 и 780° С, придает старение не при 550° С (в соответствии с режимами обычной термической обработки), а старение при 500° С.

Эффект ВТМО не является простой суммой деформационного и термического упрочнения, так как дефекты, созданные при деформации, благоприятно влияют на морфологию, размеры и однородность распределения частиц упрочняющей фазы в объеме стареющей фазы. В связи с этим при ВТМО возрастают (по сравнению со стандартной обработкой) не только прочностные пластические свойства  $\alpha+\beta$ -сплавов, вязкость разрушения, сопротивление усталости и длительная прочность при повышенных температурах.

Для обеспечения значительного эффекта ВТМО необходимо, чтобы перерыв между окончанием деформации и закалкой не превышал некоторых

критических значений. После деформации в  $\alpha+\beta$ -области перерыв деформацией и закалкой до 10 с не вызывает существенных изменений в свойствах после старения, по крайней мере, для сплавов ВТЗ-1 и ВТ8 (рис. 86). После деформации в  $\beta$ -области допустим перерыв до 30 с. При ВТМО сплава ВТ 14 с деформацией в  $\alpha+\beta$ -области необходима закалка сразу же после деформации, так как даже перерыв в несколько секунд заметно снижает эффект упрочнения.

ВТМО существенно влияет на механические свойства титановых  $\beta$ -сплавов. После охлаждения с температуры деформации на воздухе и в воде свойства сплава ВТ15 близки и мало зависят от степени деформации. Старение приводит к существенному повышению прочностных характеристик и снижению пластичности. Наиболее высокие прочностные характеристики наблюдаются после деформации осадкой на 10-40%. При увеличении степени деформации выше 40% эффект ВТМО снижается из-за развития рекристаллизации. Эффект ВТМО с деформацией 10-40; практически одинаков при охлаждении и в воздухе и в воде. Таким образом, ВТМО  $\beta$ -сплавов можно проводить с охлаждением после деформации на воздухе, а не в воде. Так как критическая скорость охлаждения, необходимая для фиксации метастабильной  $\beta$ -фазы, для сплава ВТ15 невелика. Методами ВТМО в сплаве ВТ15 можно получить временное сопротивление разрыву около 1700 Мпа при поперечном сужении 5—8% вместо 1500 Мпа и 10% после стандартной термической обработки.

Горячую деформацию при ВТМО  $\alpha+\beta$ -сплавов следует проводить при температурах, соответствующих  $\alpha+\beta$ -области, а  $\alpha$ - и  $\beta$ -сплавов при температурах выше  $A_{c3}$ . В первом приближении температуру горячей деформации  $\alpha+\beta$ -сплавов следует выбирать на 50—100° С ниже  $A_{c3}$ , а для сплавов критического состава (ВТ22) — на 50° С ниже  $A_{c3}$ . Упрочнение при ВТМО по оптимальным режимам возрастает с увеличением содержания

легирующих элементов до соответствующего эквиваленту по молибдену, равному 5%, а затем уменьшается.

Ни температурная термомеханическая обработка титановых сплавов состоит в закалке, последующей пластической деформации (холодной или теплой) в условиях достаточной стабильности твердого  $\beta$ -раствора при температурах ниже температуры рекристаллизации ( $T_r$ ) и старения на заключительной стадии. Теплая или холодная деформация закаленных титановых сплавов приводит к резкому ускорению распада метастабильных фаз, зафиксированных закалкой (чаще всего метастабильной  $\beta$ -фазы). Старение при НТМО по стандартным режимам, принятым при обычной термической обработке, приводит к сильному упрочнению при сохранении достаточной пластичности.

Оптимальные степени холодной деформации при НТМО  $\beta$ -сплавов и малолегированных  $\alpha+\beta$ -сплавов составляют, как правило, 40—50%. Получаемое при этом упрочнение достигает 15—25 кгс/мм<sup>2</sup> и возрастает с увеличением содержания  $\beta$ -фазы в сплаве. Для мало пластичных при низких температурах  $\alpha+\beta$ -сплавов типа ВТЗ-1, ВТ9 оптимальная степень холодной и теплой деформации ниже. НТМО позволяет получить более высокий уровень прочности по сравнению с ВТМО. Однако даже при одинаковом уровне достигаемой прочности пластичность после НТМО, как правило, ниже, чем после ВТМО.

Поскольку холодная и теплая деформации существенно ускоряют процесс старения, в ряде случаев необходима корректировка стандартных упрочняющих режимов. Упрочнение, достигаемое при НТМО, снимается при нагреве до сравнительно невысоких температур, в связи с чем ее применение наиболее целесообразно для высокопрочных термически упрочняемых не жаропрочных сплавов. Для жаропрочных сплавов более пригодна ВТМО, обеспечивающая более высокую термическую стабильность титановых сплавов.



Положительные результаты были получены при предварительной термомеханической (ПТМО) и комбинированной обработке. Последовательность операции при ПТМО — горячая деформация, охлаждение со скоростью, обеспечивающей сохранение не рекристаллизованной структуры, закалка с температур по режимам, которые позволяют сохранить нерекристаллизованную структуру, старение (см. рис. 84, в). ПТМО отличается от ВТМО тем, что операции горячей деформации и нагрева под закалку разделены. Комбинированная обработка сочетает элементы ВТМО и НТМО

В производстве полуфабрикатов из титановых сплавов наибольшее применение найдет, по-видимому, ВТМО, которая была успешно использована при прессовании прутков и труб, сортовой прокатке прутков и штамповке.

## **1.5 ОБРАБОТКА ТИТАНА РЕЗАНИЕМ**

Основные особенности обработки резанием титановых сплавов следующие. Малая пластичность, приближающая их по свойствам к высокопрочным материалам. При обработке титановых сплавов вследствие их пониженной пластичности величина составляющей силы резания на 20% ниже, чем для сплавов на основе железа. Малая пластичность титановых сплавов приводит к тому, что при их обработке образуется специфическая стружка, по внешнему виду похожая на сливную, имеющая трещины, которые разделяют ее на очень слабо деформированные элементы, прочно связанные между собой тонким и сильно деформированным контактным слоем. Образование такой формы стружки объясняется тем, что с ростом скорости резания пластическая деформация не успевает стружки у менее пластичных титановых сплавов или при обработке с большими подачами происходит при меньших скоростях резания. Так, при обработке титанового

сплава ВТ2 элементная стружка образуется при меньших скоростях резания, чем при обработке сплава ВТ1.

Высокая химическая активность, выражающаяся при обработке резанием способностью титановых сплавов к активному взаимодействию с окружающей средой. Благодаря этому по мере увеличения температуры в зоне резания происходит сильное поглощение кислорода и азота воздуха, что способствует повышенному окислению. Это вызывает интенсивное окалинообразование и охрупчивание материала вследствие диффузии кислорода в обрабатываемый материал и его наводороживания. Поэтому при обработке резанием титановых сплавов выделяется относительно меньшее количество тепла, чем при обработке резанием жаропрочных сплавов. Вместе с тем титановые сплавы имеют еще более худшую теплопроводность, чем жаропрочные стали и сплавы; следствие этого при резании титана возникает в среднем в 2,2 раза большая температура, чем при обработке стали 45. Поэтому температура в зоне резания вследствие плохой теплопроводности титана продолжает оставаться высокой, вызывая тем самым структурные превращения и сильное взаимодействие с воздухом.

В результате пониженных пластических свойств титановых сплавов образование в процессе деформации опережающих макропротекать в основном объеме, концентрируясь в контактном слое, где возникают высокие давления и температуры. В связи с этим в отличие от обычных сталей у титановых сплавов меняется вид стружки с ростом скорости резания в обратном направлении: сливная стружка переходит в элементную. Это изменение формы и микротрещин занимает значительное место. Это объясняет также образование при резании титановых сплавов больших углов сдвига с малой усадкой стружки; как правило, коэффициент усадки ее по длине близок к единице. Это видно из значений коэффициента усадки различных марок титановых и твердых сплавов, а также зависимости продольной деформации стружки от скорости резания (б) и подачи. В ряде

случаев в результате поглощения кислорода и азота воздуха при обработке титановых сплавов получается так называемая отрицательная усадка, т. е. длина образующейся стружки  $l_c$  больше пути резания. При обработке на тех же режимах резания, но в струе аргона, отрицательной усадки не наблюдается. Уменьшение усадки стружки с ростом скорости резания объясняется также резким снижением сил трения стружки о переднюю поверхность режущей части резца. Титановые сплавы характеризуются высокими коэффициентами трения, что ограничивает их применение для подвижных соединений. Несмотря на это, в процессе резания на контактных поверхностях коэффициент трения снижается до 0,2-0,4. Это примерно в 1,5 раза меньше, чем для жаропрочной стали ЭИ787. Малая усадка стружки приводит к повышенной скорости скольжения ее по передней поверхности инструмента при тех же скоростях резания.

Рассмотренные выше особенности резания титановых сплавов и прежде всего высокая активность титана по отношению к кислороду и азоту воздуха резко снижает площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента; по сравнению с обработкой конструкционной стали той же твердости эта площадь снижается в 2—3 раза. Окисление контактного слоя стружки приводит к повышению ее твердости. Малая площадь контакта стружки, сочетаясь с достаточно высокой прочностью титановых сплавов, приводит к большим нормальным давлениям и при повышенной твердости стружки — к повышенному износу, а при малой теплопроводности титана — к высоким температурам, вызывающим явления схватывания и задиры. С другой стороны, активное воздействие внешней среды при обработке титана резанием вызывает интенсивное наростообразование. Так же как и при обработке нержавеющей и жаропрочных материалов, титановые сплавы оказывают высокое абразивное воздействие на инструмент вследствие содержания в них высокотвердых включений в виде окислов нитридов и карбидов; титановые сплавы характеризуются и пониженной виброустойчивостью движения резания. При обработке титановых сплавов

происходит увеличение составляющих силы резания при относительно небольшой. В отличие от жаропрочных титановые сплавы сильно снижают свою прочность при повышении температуры. Интенсивность уменьшения прочности превышает даже эти значения для сплавов на основе железа.

Обработка резанием по корке многих кованных, прессованных или литых заготовок из титановых или других видов труднообрабатываемых материалов вызывает дополнительное ухудшение обрабатываемости. Это обусловлено усиленным абразивным и ударным воздействием на рабочие поверхности инструмента неметаллических включений, окислов сульфидов-силикатов, а также многочисленных пор, образующихся в поверхностном слое при отливке или прессовании. Последнее еще более усиливается значительными поверхностными неровностями корки[29].

При определении оптимальных режимов резания титановых сплавов особое внимание следует уделять вопросам техники безопасности. Образование тонкой стружки, тем более пыли, в процессе стружкообразования приводит к ее легкому воспламенению с интенсивным горением. Титановая стружка, покрытая маслом, склонна к самовозгоранию. Пылеобразная стружка взрывоопасна и вредна для здоровья обслуживающего персонала. Учитывая изложенное, не следует допускать скоплений титановой стружки; при обработке резанием титановых сплавов не следует назначать подачи менее 6,08 мм/об, работать инструментом с износом более 0,8—1,0 мм, со скоростями резания более 100 мм/мин. При точении титанового сплава ВТ1 допускается большая скорость резания— до 150 м/мин.

## 2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При использовании МКЭ исследуемое тело делится на некоторое количество элементов конечных размеров, например, треугольной формы и примем за узловые точки их вершины. Очевидно, что если тело находится в равновесии то и его элемент, определенный узлами  $i, j, k$ , под воздействием напряжений от смежных элементов, также уравновешен. Приложим затем к элементу вместо фактических усилий, действующих вдоль его граней статически эквивалентные узловые силы, т. Е. силы, вызывающие внутри элемента действительное напряженно-деформированное состояние (рис. 2.1).

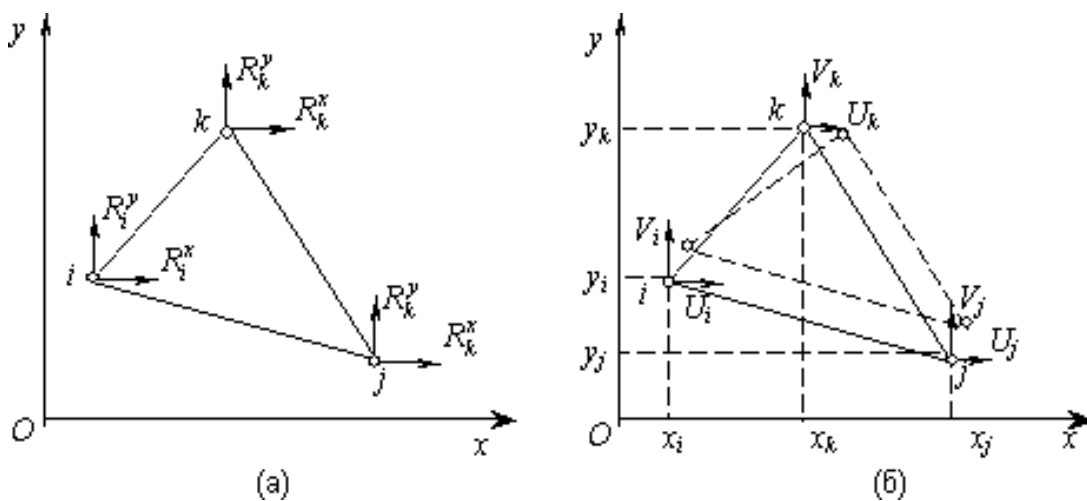


Рисунок 2.1 Конечный элемент

Такой подход позволяет в дальнейшем использовать один из известных классических методов механики, например метод перемещений (возможно также применение метода сил, либо смешанного).

Такой подход позволяет в дальнейшем использовать один из известных классических методов механики, например метод перемещений (возможно также применение метода сил, либо смешанного). Для этого необходимо установить матрицы жесткости всех конечных элементов и, из условия

равновесия узлов, получить разрешающие уравнения задачи. Найденные узловые перемещения не дают, однако, полной характеристики напряженно-деформированного состояния деформируемого тела. Необходим переход от этих величин к перемещениям, напряжениям и деформациям внутри конечных элементов, т.е. речь идет о решении плоской задачи для каждого конечного элемента, находящегося под воздействием узловых перемещений. Такой переход в МКЭ осуществляется приближенно, путем задания интерполяционных (координатных) функций (функций формы), что и делает метод приближенным. Функции эти (обычно полиномы) такие, что обеспечивают неразрывность перемещений при переходе от одного элемента к другому. Решение задач по методу конечного элемента содержит следующие этапы:

1. Разбиение заданной области на конечные элементы. Нумерация узлов и элементов.
2. Построение матриц жесткости конечных элементов.
3. Сведение нагрузок и воздействий, приложенных к конечным элементам, к узловым силам.
4. Формирование общей системы уравнений; учет условий закрепления. Решение системы уравнений.
5. Определение напряжений и (при необходимости) деформаций в. Конечных элементах.

Дискретизация области (тела) включает задание числа, размеров и формы подобластей, которые используются для построения дискретной модели реального тела. При этом, с одной стороны, элементы должны быть выбраны достаточно малыми, чтобы получить приемлемые результаты, а с другой стороны, применение достаточно крупных элементов сокращает вычислительную работу. Нужно иметь некоторые общие соображения об окончательных результатах, с тем, чтобы можно было уменьшить размеры

элементов в тех областях, где ожидаемый результат может сильно меняться[31].

## **2.2 DEFORM-3D**

DEFORM-3D – мощная система моделирования технологических процессов, предназначенная для анализа трехмерного (3D) поведения металла при различных процессах обработки давлением. DEFORM-3D предоставляет важную информацию о течении материала в штампе и распределении температур во время процесса деформирования.

DEFORM-3D позволяет моделировать такие процессы как: ковка, горячая, полугорячая и холодная штамповка, прессование, прокатка, вытяжка и многие другие процессы.

DEFORM-3D имеет простой и удобный русифицированный Windows интерфейс, не требующий длительного изучения. Специальные шаблоны облегчают новичкам работу с системой и помогают быстро задавать несложные процессы и запускать их на счет.

DEFORM-3D основан на методе конечных элементов, одном из самых известных, надежных и применяемых в настоящее время расчетных методов.

Автоматический сеточный генератор DEFORM-3D строит оптимизированную конечно-элементную сетку, сгущая её в наиболее критичных зонах. Благодаря этому с системой могут работать даже пользователи без опыта работы с конечно-элементными системами. Кроме того, пользователь имеет возможность самостоятельно настраивать плотность сетки, распределение ее элементов по сечению и параметры ее автоматического перестроения.

DEFORM-3D позволяет решать задачи деформирования, теплопередачи, а также разделительные операции, такие как вырубка и пробивка. Дополнительно к этому есть возможность подключения модуля DEFORM-NT, что позволяет моделировать всю технологическую цепочку,

начиная с разделительных заготовительных операций, операции нагрева заготовки, формообразующих операций и заканчивая операциями окончательной термической обработки.

## 2.3 Постановка начальных и граничных условий

Конечно элементная модель для исследования пластической деформации при резании строится на основе объемной геометрической модели. Для построения геометрии инструмента и заготовки использовались возможности препроцессора DEFORM (модуль механической обработки)

На рисунке 2.3 показано разбиение образца конечных элементов

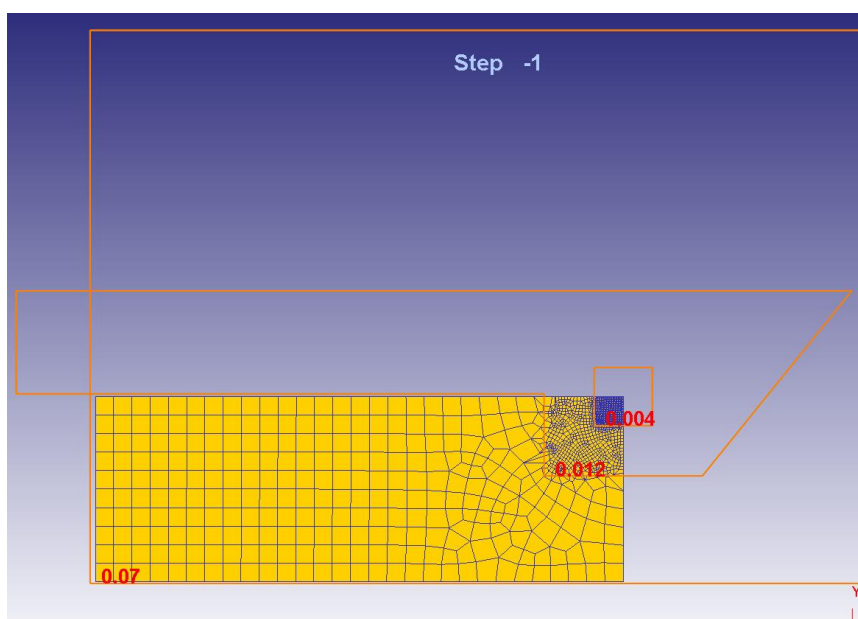


Рисунок 2.3. Разбиение заготовки на конечные элементы

Применение МКЭ требует корректной постановки граничных и начальных условий и тщательной проработки методики моделирования. Принимаемые при моделировании допущения и упрощения должны быть обоснованы и не вызывать существенных погрешностей. Порядок задания условий решаемой задачи в системе DEFORM следующий:



1. определение количества и типа взаимодействующих тел (жесткие, упругие, упруго-пластические, жесткопластические), их взаимного расположения;
2. задание геометрии взаимодействующих тел (инструмента и заготовки);
3. разбиение деформируемых тел на конечные элементы;
4. задание механических свойств материала деформируемых тел;
5. определение кинематики взаимного перемещения взаимодействующих тел;
6. задание параметров контакта взаимодействующих тел.

Скорость резания задается в качестве граничного условия – перемещения, приложенного к нижней границе заготовки (рис. 2.4).

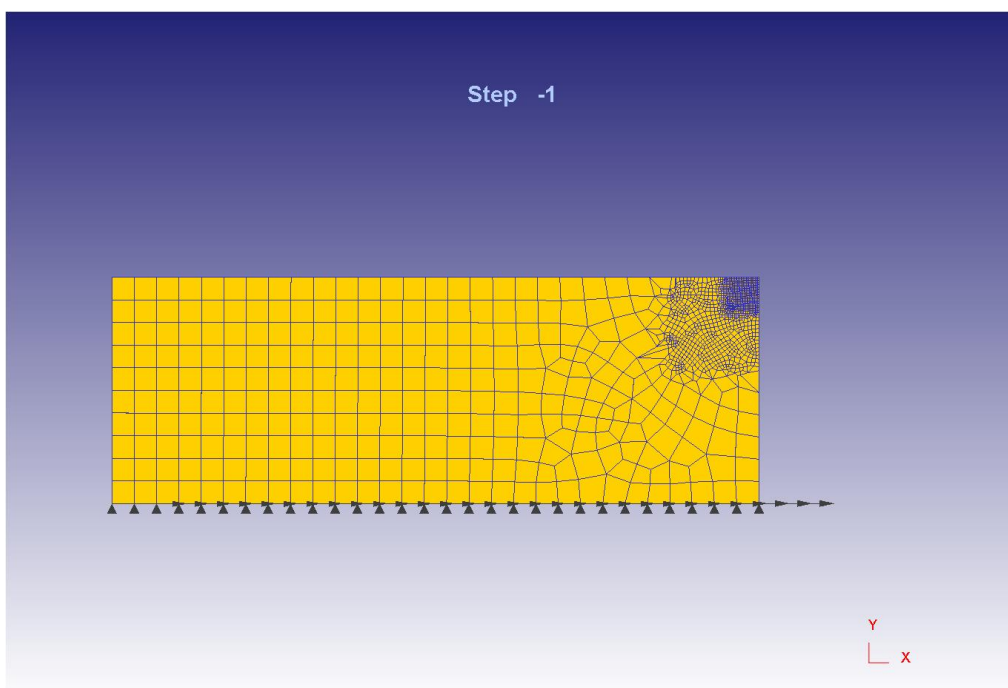


Рисунок 2.4 Приложение граничных условий

Поскольку упругая составляющая деформации заготовки при резании составляет не более 0,1%, заготовка для ускорения времени расчета принимается жестко-пластичной. Инструмент при расчете полей напряжений и деформаций в заготовке принимается упругим (рис. 2.5, 2.6). Подобные упрощения не вносят существенной погрешности в результаты расчета

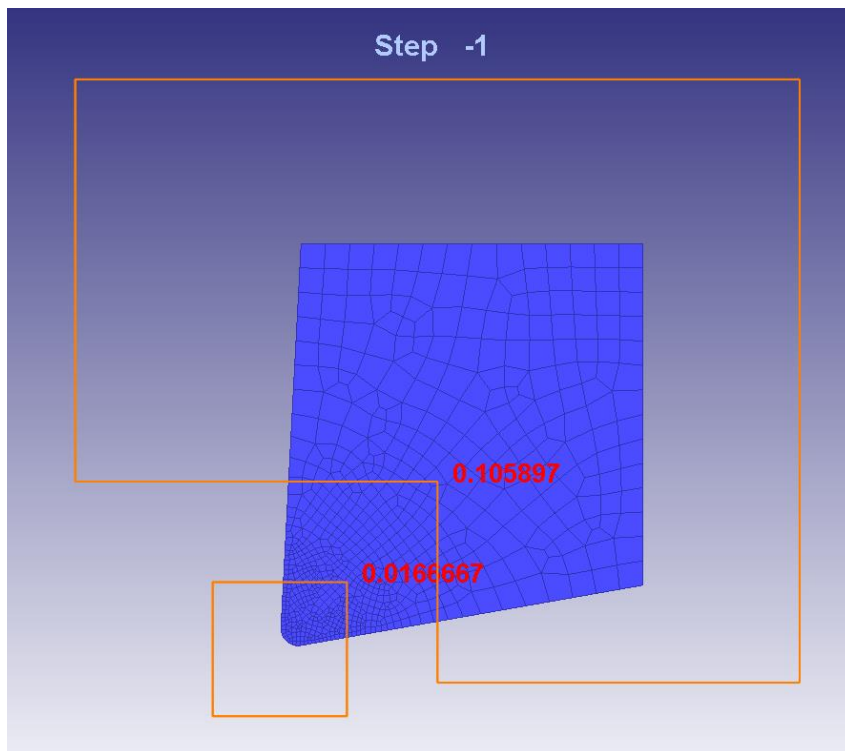


Рисунок 2.5 Разбиение инструмента на конечные элементы

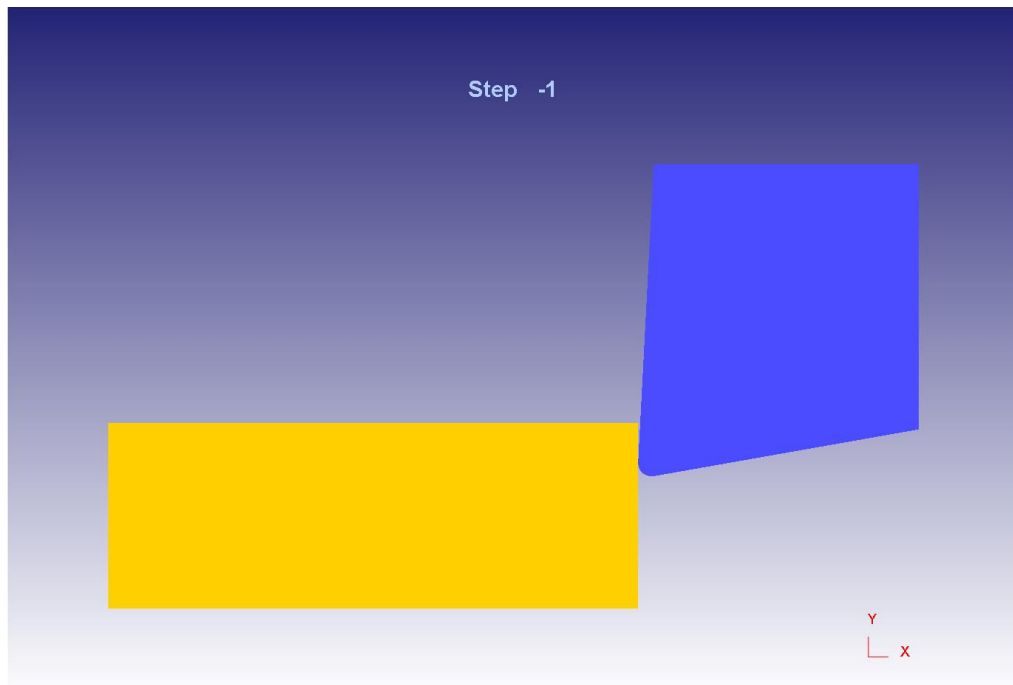


Рисунок 2.6 Совмещение инструмента и заготовки

## 2.3 Экспериментальное оборудование

### 2.3.1 Токарный станок с ЧПУ Optimum D280 CNC Pro

Для проведения натурального эксперимента по точению титановых сплавов использовался токарный станок с ЧПУ Optimum D280 CNC Pro (рис. 2.7).



Рисунок 2.7. Токарный станок с ЧПУ Optimum D280 CNC Pro

Особенностями станка являются:

1. Предназначен для обработки деталей из стали, чугуна и цветных сплавов.
2. Недорогой станок с ЧПУ начального уровня - может работать как в автоматическом, так и в ручном режиме.
3. Две одновременно управляемые оси.
4. Бесконтактные индуктивные датчики конечного положения.
5. Шаговые двигатели с высоким крутящим моментом по всем осям: ось Z - двигатель 4,2 Нм, ось X - двигатель 2,2 Нм.
6. Ходовые винты скольжения с точностью позиционирования 0,05 мм.
7. Управление от персонального компьютера (в комплект поставки не входит), подключение по USB.

8. Недорогая и производительная система ЧПУ NCdrive eco производства компании 4CAM GmbH (Германия)..
9. Автоматическое выполнение управляющих программ в G-кодах.
10. Нарезание резьбы только в ручном режиме.
11. Мощный шпиндель с увеличенным проходным отверстием 26 мм.
12. Закаленный шлифованный шпиндель (радиальное биение менее 0,009 мм), установленный на точные роликоподшипники класса точности P5.
13. Закаленные и шлифованные направляющие станины (HRC 42 - 52) шириной 180 мм.
14. Станина прошла естественное старение в течение не менее 6 месяцев.
15. Двойная подшипниковая опора ходового винта по оси Z.
16. Линейная, круговая и спиральная интерполяции.

Предпочтительный инструмент для работы на станке TU2807V CNC - резцы со сменными твердосплавными пластинами.

### **2.3.2 Тепловизор ThermoPro TP8**

Для измерения температуры резания при натурном эксперименте использовался тепловизор ThermoPro TP8 . Модель тепловизора ThermoPro TP8 (рис. 2.8) предназначена для выполнения термографических исследований и измерений высокой точности. Рабочий диапазон -20 – +800 градусов Цельсия. По индивидуальному заказу верхняя граница диапазона может быть поднята до 2000 градусов Цельсия. Чувствительность по температуре – 0,08 градуса Цельсия. В этой инфракрасной камере в качестве детектора применяется матрица повышенного разрешения, состоящая из 384x288 элементов. Имеется возможность записи инфракрасного изображения на компьютер. Видоискатель – оптический. Видимое изображение регистрируется по независимому каналу, выводится на

встроенный сенсорный дисплей большого размера и записывается в память камеры. Камера, работающая в видимой области, имеет три объектива – стандартный, широкоугольный и телескопический, а также режим 10-кратного цифрового увеличения. Имеется режим поточечных измерений до 8 точек. Тепловизор ThermoPro TP8 собран в прочном корпусе из алюминиевого сплава. Имеется возможность записи голосовых заметок и управления прибором с помощью голосовых команд. Предусмотрена возможность подключения камеры к компьютеру с помощью USB-кабеля или RS-232-кабеля или по каналу Bluetooth. Одной зарядки аккумуляторов достаточно для работы в течение 2,5 часов.



Рисунок 2.8. Тепловизор ThermoPro TP8

### **2.3.3 Микроскоп Olympus cx41**

Для проведения металлографических исследований использовался микроскоп Olympus CX41 (рис. 2.5).



Рисунок 2.8. Микроскоп Olympus CX41

Микроскоп Olympus CX41, тринокулярный, правосторонний препаратоводитель – современный цифровой микроскоп с удобной тринокулярной насадкой для проведения профессиональных исследований по методу светлого поля. Качественная оптика, удобство и функциональность использования делают данную модель одной из лучших в своем классе.

Высококачественные объективы План Ахромат позволят вам получать четкие контрастные изображения по всему полю зрения, а не только по центру. Окуляры 10х, входящие в комплект поставки, обладают широким полем зрения FN20. Окулярная насадка микроскопа имеет угол наклона 30 градусов, что очень удобно, если вы проводите за исследованиями многие часы.

Производители предусмотрели необходимую функциональность прибора для индивидуальной подстройки: левый окуляр имеет возможность диоптрийной подстройки, а межзрачковое расстояние регулируется в широких пределах.

При необходимости, модель можно дооснастить до проведения следующих видов исследований: темное поле, фазовый контраст, поляризация. А также возможна комплектация дополнительными модулями: дискуссионной приставкой для двух наблюдателей; рисовальной приставкой; флуоресцентным модулем.

### 2.3.4 Твердомер по Виккерсу HVS-10

Для измерения твердости образцов использовался твердомер HVS-10 (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 Твердомер по Виккерсу HVS-10

Прибор предназначен для измерения твердости материалов по методу Виккерса. Твердомер используется для мелких изделий и образцов после нанесения на них покрытия. Прибор оснащен цифровым дисплеем, что позволяет выводить на него результаты исследований, а так же прибор может работать в автоматическом режиме. Данный твердомер используется стационарно в лабораториях, научно исследовательских институтах, машиностроительных и металлургических предприятиях.

### 3 Результаты исследования

#### 3.1 Результаты моделирования методом конечных элементов

На рисунке 3.1 представлены полученные при компьютерном моделировании поля напряжений заготовки из титанового сплава ВТ1-0 при различных условиях резания

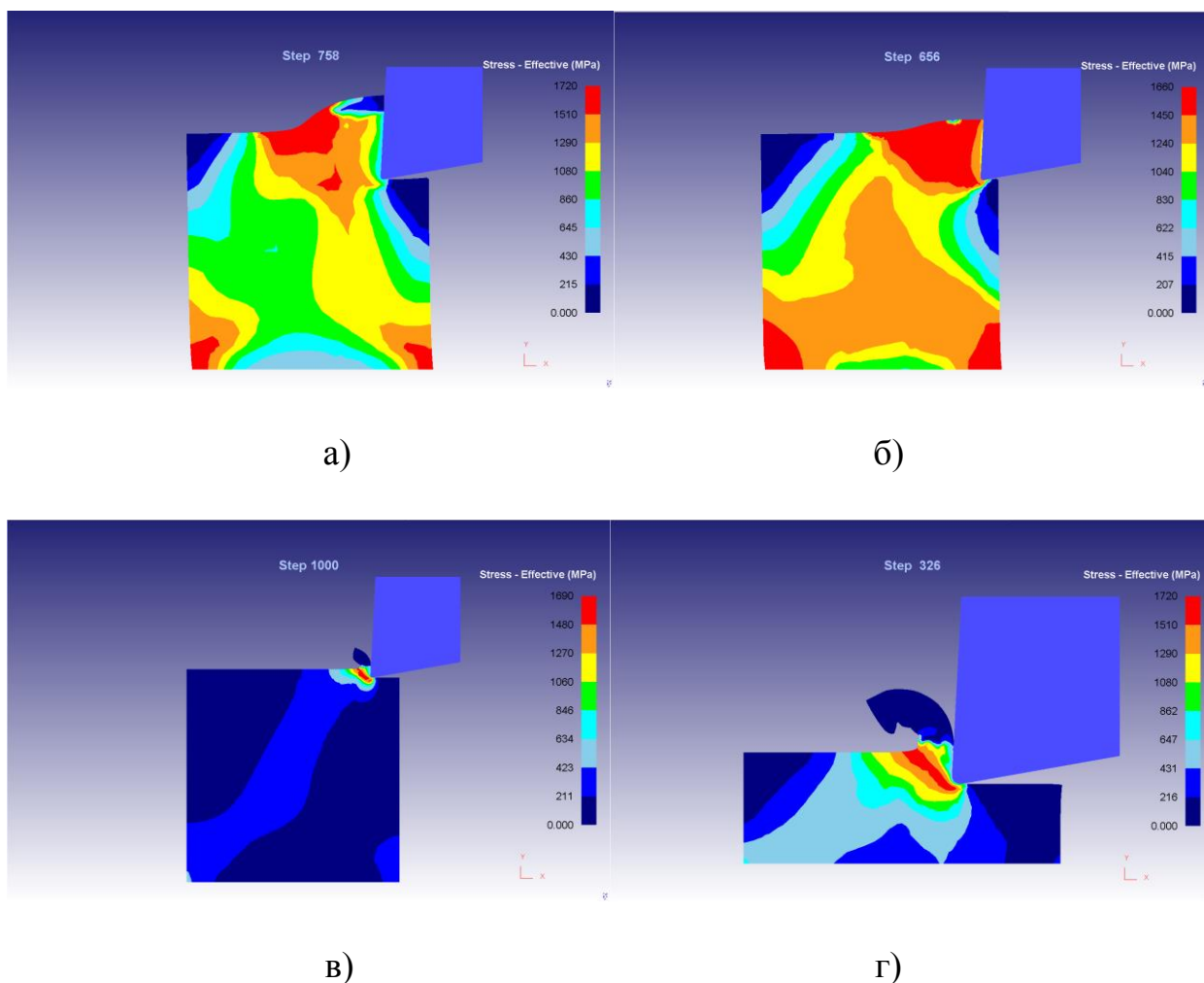
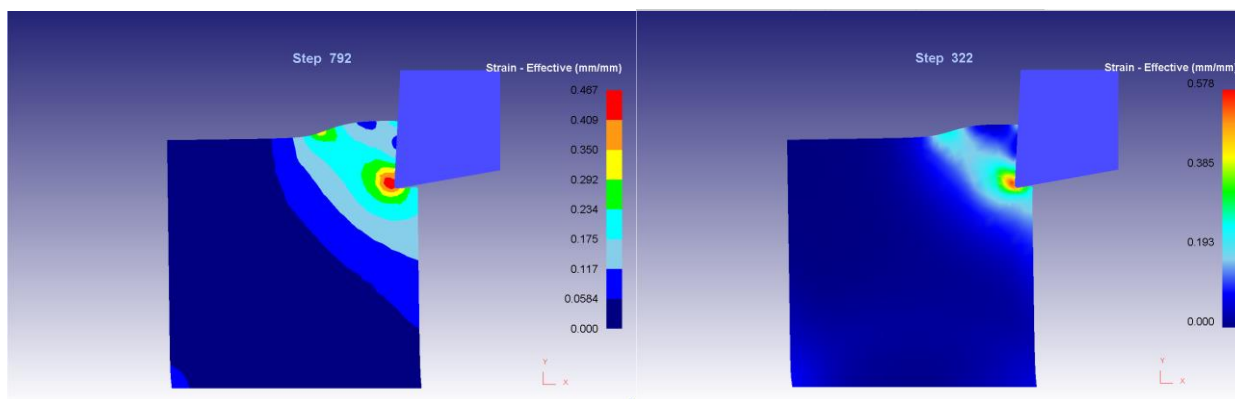


Рисунок 3.1 Поля эквивалентных напряжений по Мизесу при различных условиях резания

Из рисунка 3.1 видно, что максимальные напряжения возникают при глубине резания 1мм и скорости резания 125 м/мин и составляют 1720 МПа. Картина распределения напряжений соответствует известным из литературы данным.

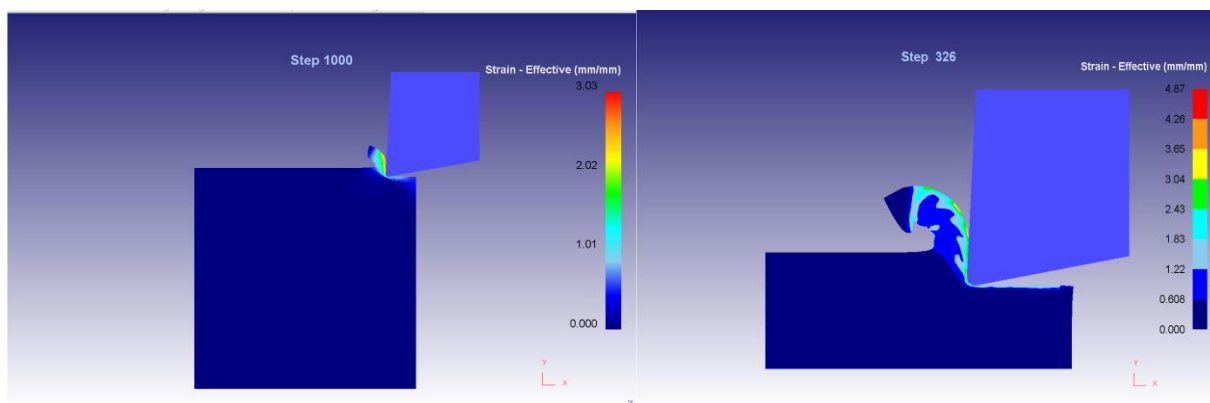


На рисунке 3.2 показаны поля эквивалентных деформаций при различных условиях резания



а)

б)



в)

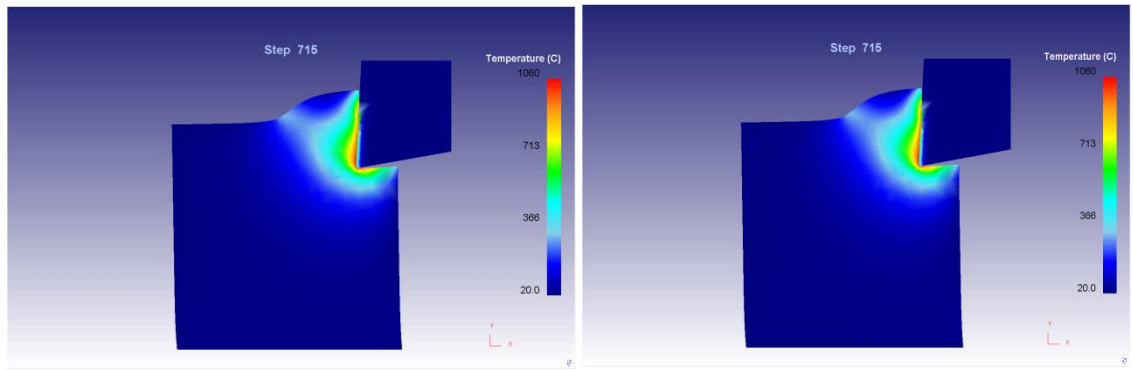
г)

Рисунок 3.2 Поля деформаций

Деформация зависит от глубины резания

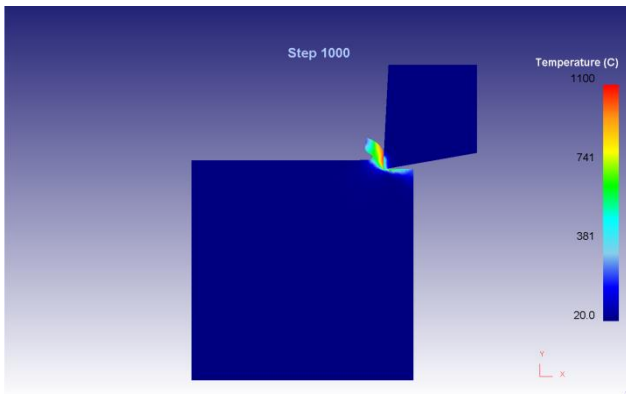
На рисунке 3.3 показаны поля эквивалентных температур при различных условиях резания

Из рисунка 3.3 видно, что максимальная температура возникает при глубине резания 1мм и скорости резания 125 м/мин и составляет 1250 . Картина распределения напряжений соответствует известным из литературы данным.

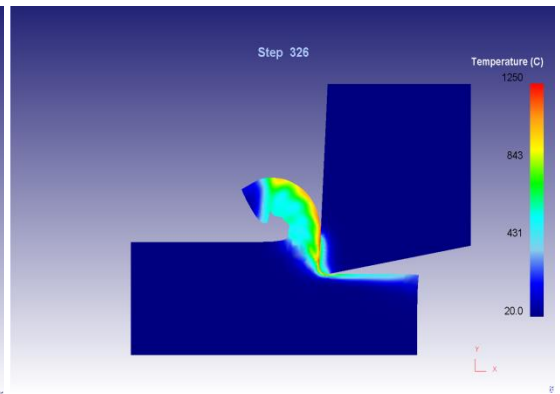


а)

б)



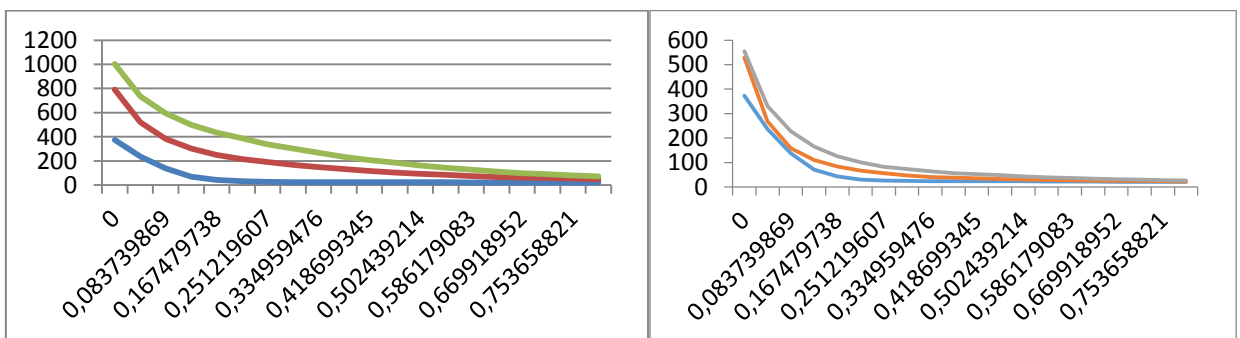
в)



г)

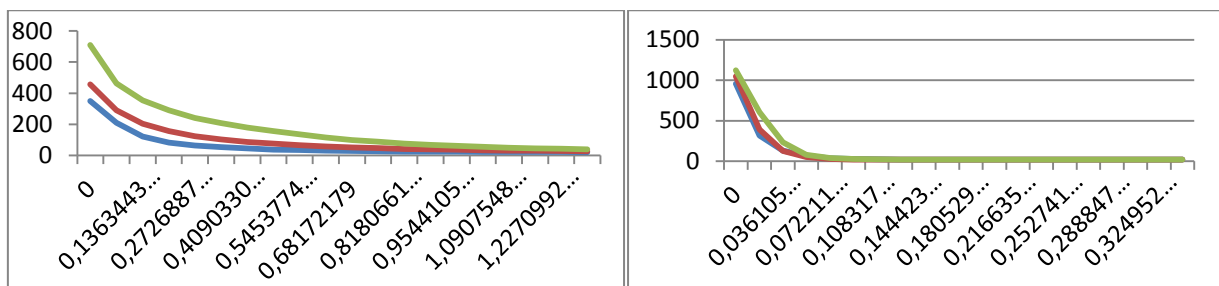
Рисунок 3.3 Поля температуры при различных условиях резания

Графики распределения температуры по глубине в заготовках из титанового сплава ВТ1-0 при точении на различных режимах представлены на рисунке 3.4



а)

б)



в)

г)

Рисунок 3.4 Графики распределения температуры по глубине в заготовках из титанового сплава VT1-0 при точении на различных режимах

### 3.2 Термограммы

По методике, проведенной в главе 2, проведен натурный эксперимент по точению образцов из nano структурированного титанового сплава VT1-0 (рисунок 3.5). Точение производилось со скоростью 125 м/мин при глубине резания 0,2 и 1,0 мм и подаче 0,05 и 0,2 мм/об. Точение производилось резцом из сплава BK8 с главным углом в плане 90°, задним углом 12° и передним углом 3°.

Обработка производилась без охлаждения. Образец имел, ступенчатую форму с максимальным диаметром 20 мм. Температура измерялась с помощью тепловизора ThermoPro TP8. Полученные термограммы представлены на рисунке 3.6

Обработка термограмм производилась с помощью программы Guide IRanalyser (рисунок 3.7). В результате было установлена что температура резания полученная экспериментально из Deform не более чем на 15%.

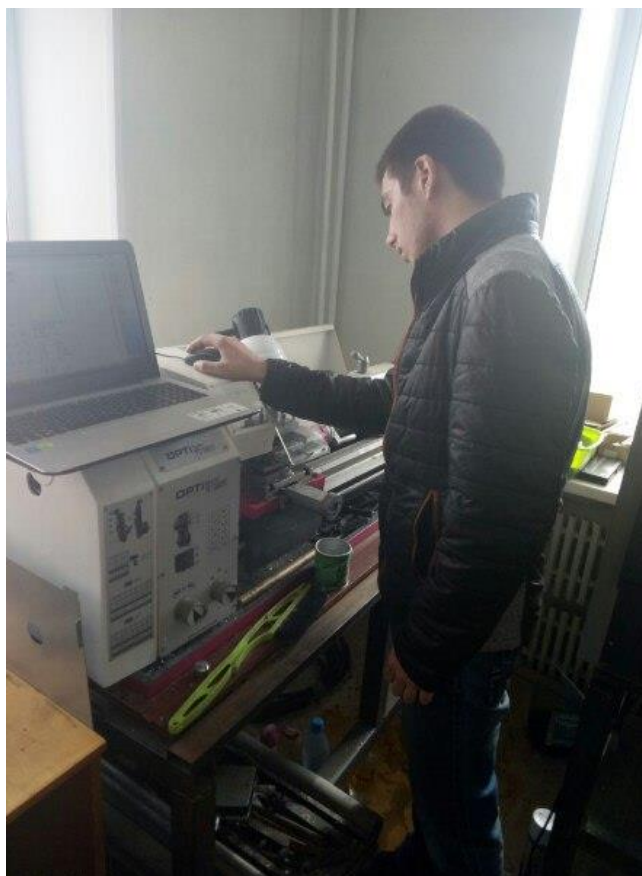
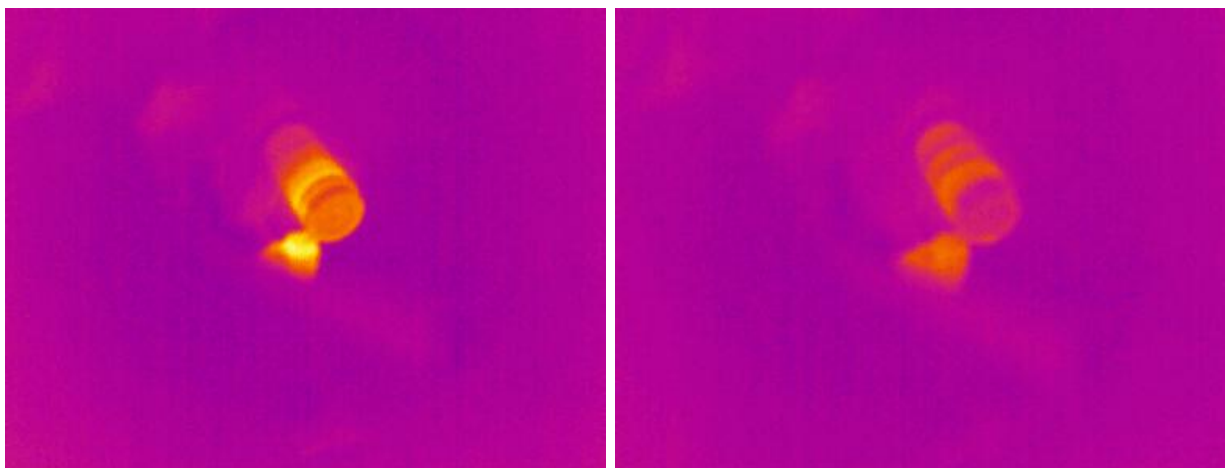
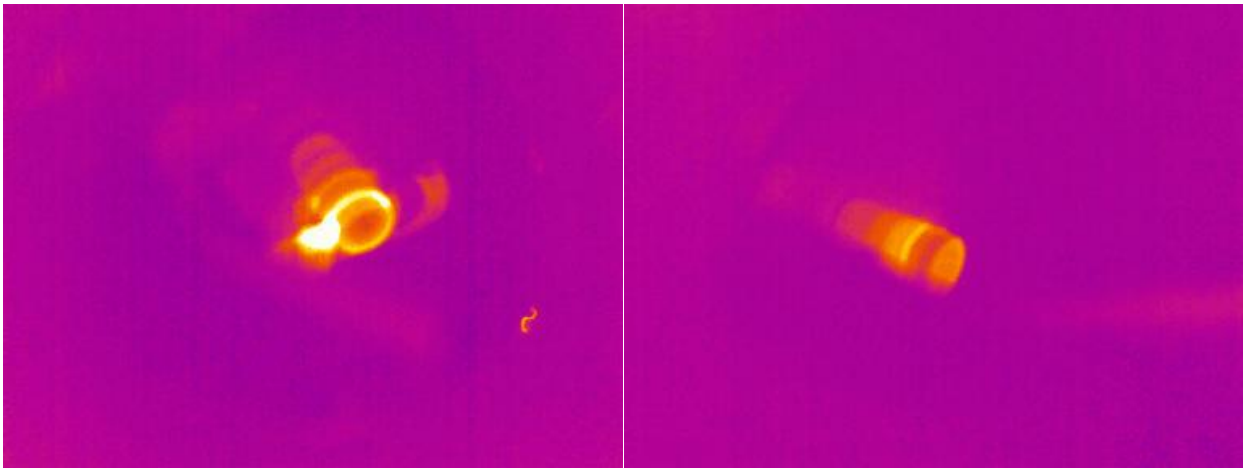


Рисунок 3.5 Точение образца из nano структурированного титанового сплава  
BT1-0



a)

б)



в)

г)

Рисунок 3.6 термограммы точения образца титанового сплава ВТ1-0 с различными режимами резания

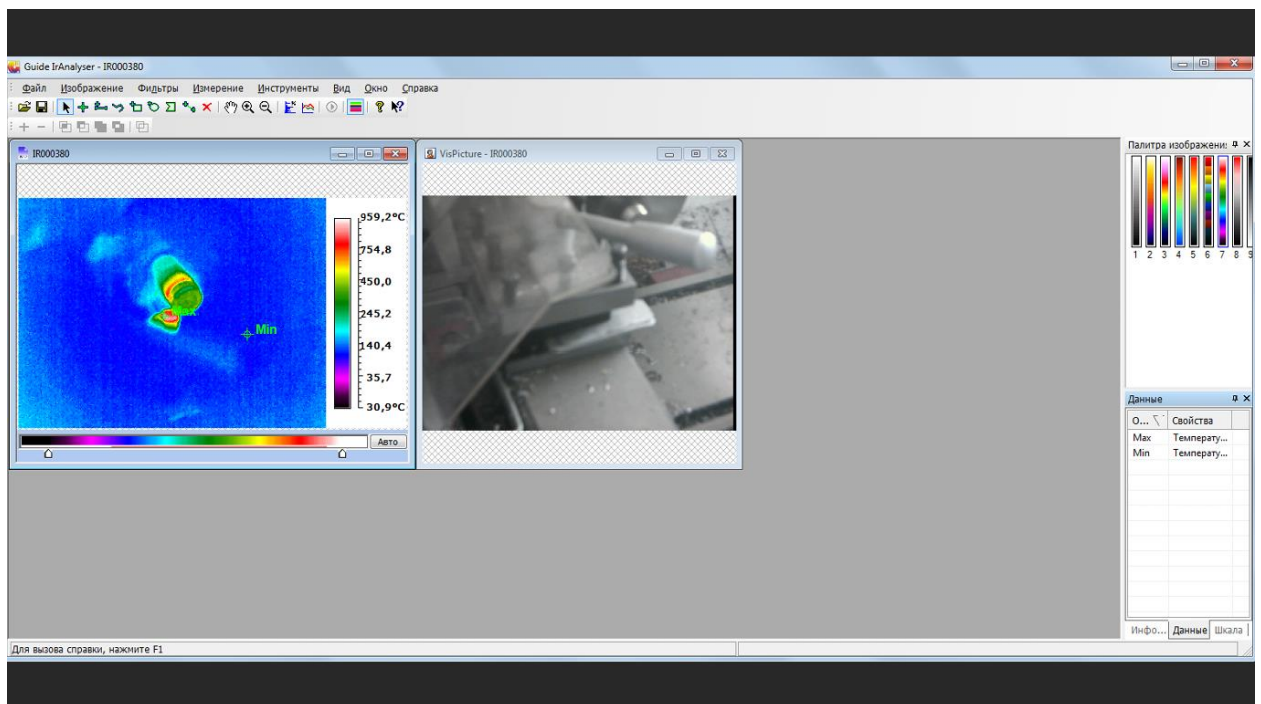


Рисунок 3.7 Обработка термограмм

### 3.3 Зависимость температуры от режимов резания

Графики зависимости температуры от скорости и глубины резания, построенные по результатам моделирования, приведены на рисунках 3.8 и 3.9 соответственно

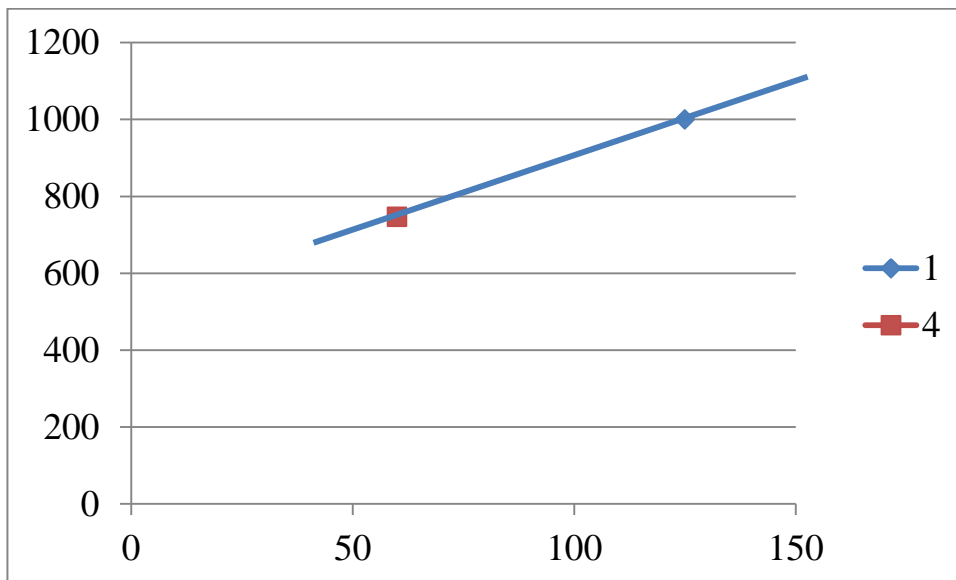


Рисунок 3.8 График зависимости температуры от скорости резания

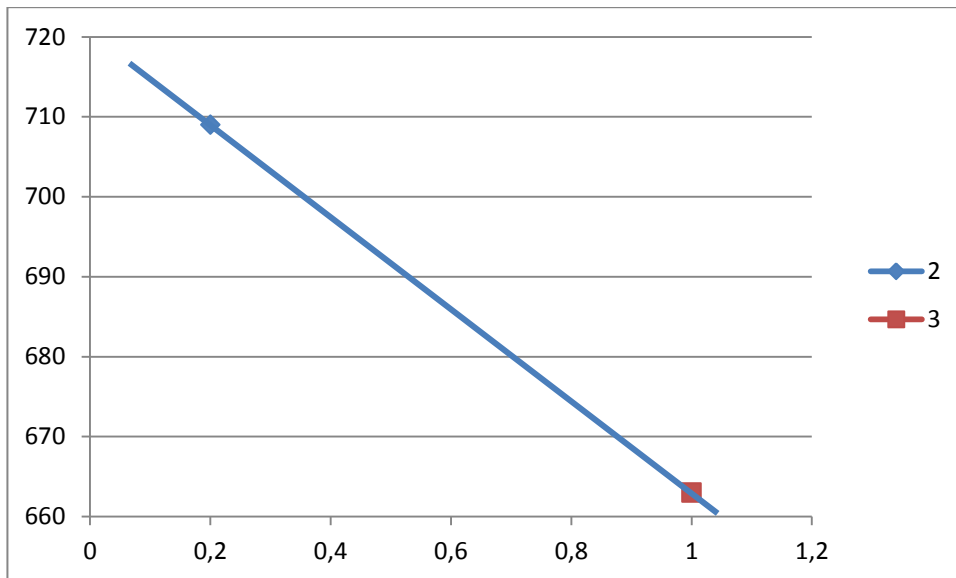
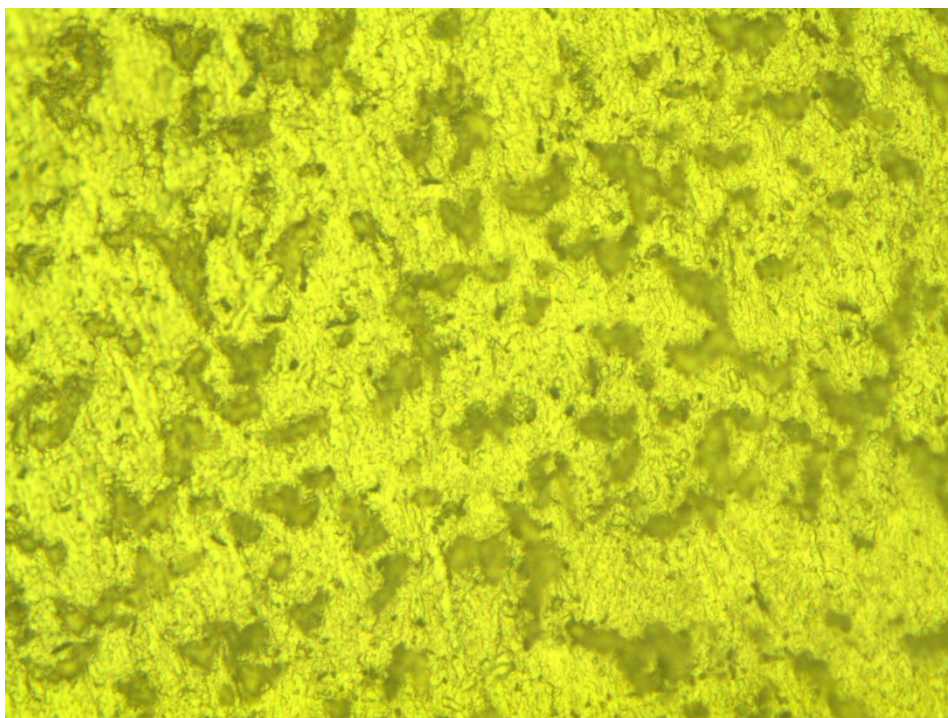


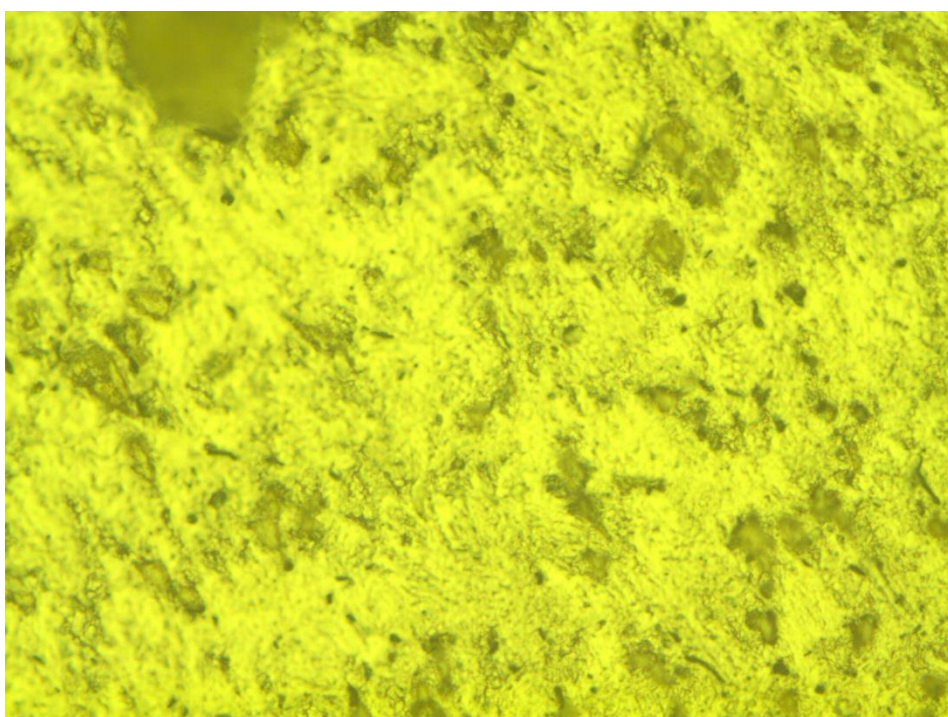
Рисунок 3.9 График зависимости температуры от глубины резания

### **3.4 Микро структура nano структурированного титанового сплава VT1-0 после точения с различными режимами резания**

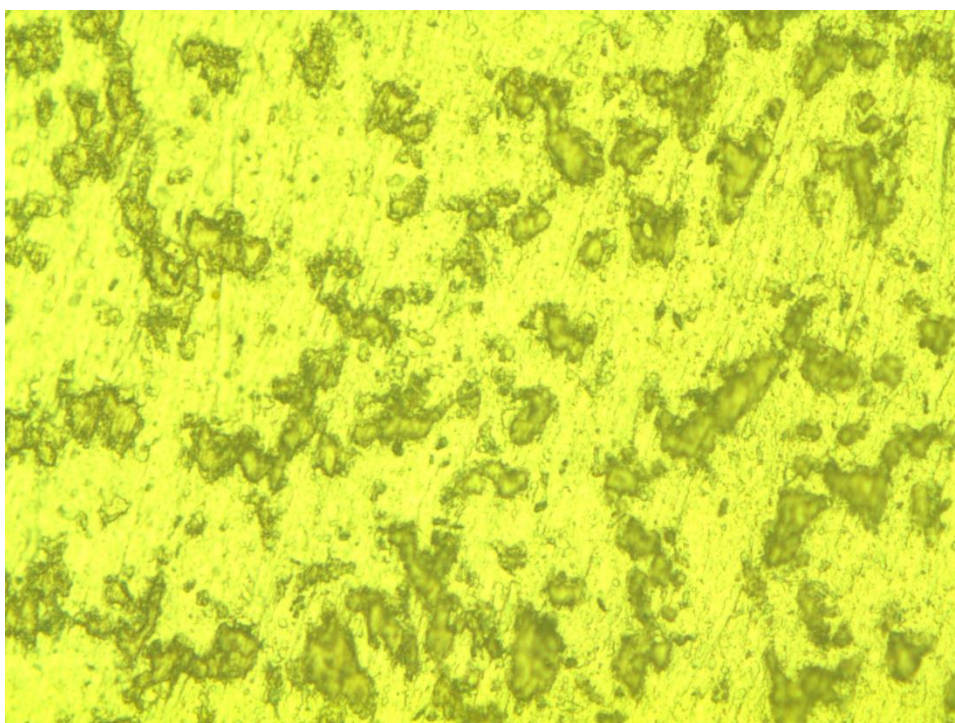
Микро структура nano структурированного титанового сплава VT1-0 после точения с различными режимами резания представлена на рисунке 3.10



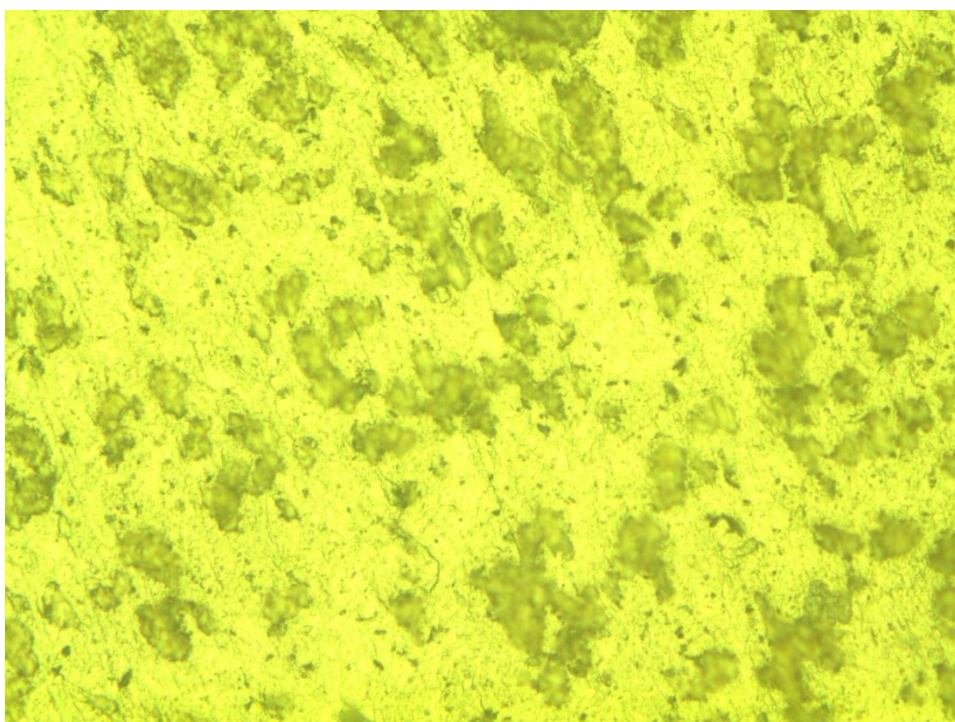
a)



б)



в)



г)

Рисунок 3.10 Микроструктура наноструктурированного титанового сплава VT1-0 после точения с различными режимами резания



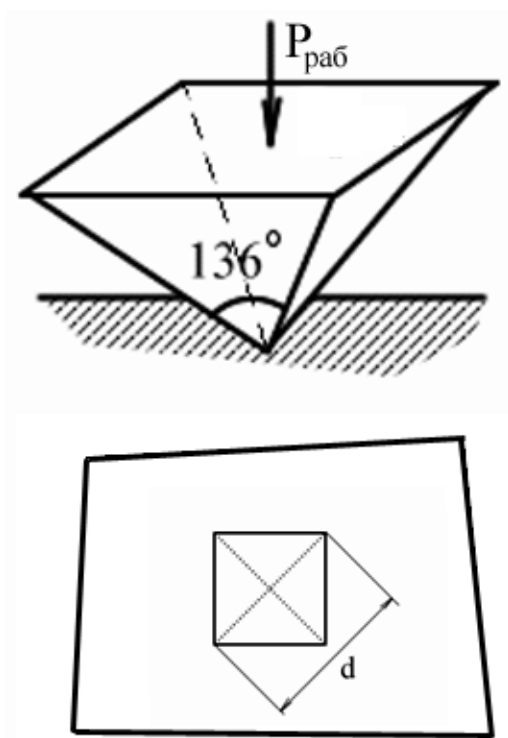
В наноструктурированном титановом сплаве VT1-0 формируется гетерогенная микроструктура, состоящая из зерен, содержащих части двойников и субзерна. Деформация приводит к формированию ячеистой структуры с высокой плотностью дислокаций. В структуре присутствуют зерна/субзерна, размер которых варьируется в интервале от 0.6 до 0.3 мкм, содержащие внутри себя дислокационные стенки и дислокационные ячейки. Наличие подобной субструктуры внутри зерен указывает на тенденцию продолжения измельчения структуры при условии дополнительной деформации. В ходе анализа микроструктуры было установлено, что размер ячеек в среднем равен 200 нм. Помимо ячеек наблюдаются зерна и субзерна с четкими, тонкими границами размером около 150 нм, не содержащие никаких дислокационных конфигураций внутри себя [32]

В поликристаллах, имеющих размеры нескольких микрометров и выше, скольжение происходит по телу зерен, и границы зерен в них являются стопорами для дислокаций. Это приводит к тому, что передача скольжения от зерна к зерну вносит существенный вклад в напряжение течения. В случае же материалов с субмикро- и нанокристаллической структурой границы зерен имеют неупорядоченную структуру атомов, близкую к аморфной, и являются наиболее слабым местом. Пластическая деформация идет вдоль этих границ путем проскальзывания зерен относительно друг друга. При этом дислокационное скольжение в теле зерен такого размера сильно затруднено в связи с тем, что несмотря на низкую плотность дислокаций, источники дислокаций типа Франка-Рида не могут работать эффективно при малых размерах зерен (ниже определенной критической величины) [30].

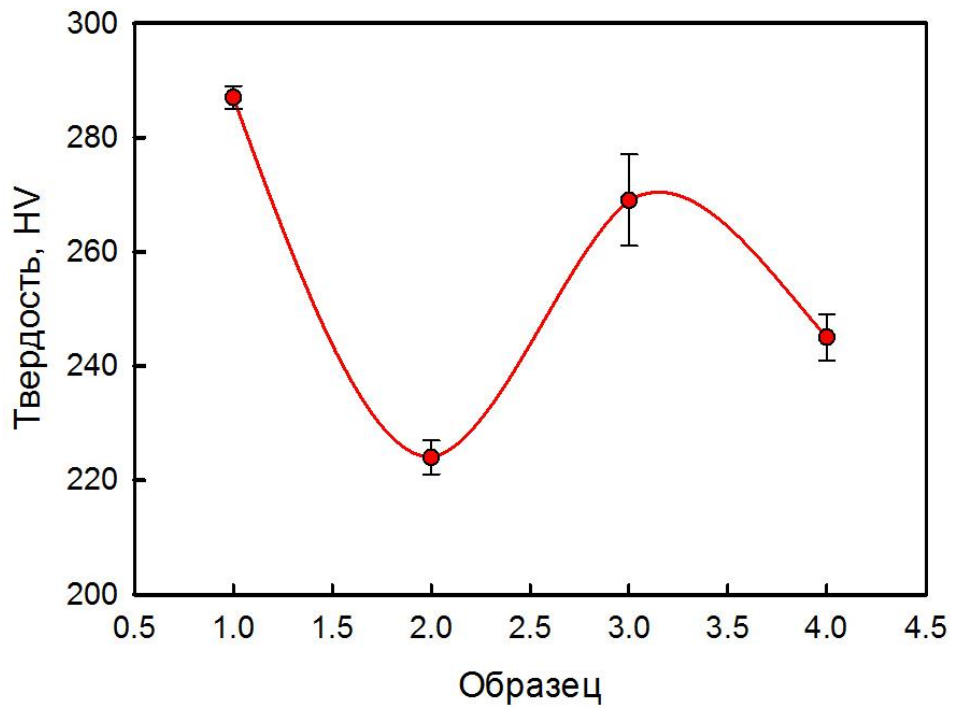
В результате резания при температурах свыше 700°C (рис. 3.10,г) происходит частичный рост зерен.

### 3.5 Твердость nano структурированного титанового сплава BT1-0

На рисунке 3.11 показан замер твердости на образцах из титанового сплава BT1-0



Рисунке 3.11 показон замер твердости на образцах



На рисунке 3.12 показан график измеренной твердости на образцах из титанового сплава VT1-

## Заключение

В результате выполнения ВКР провели анализ и разработана методика моделирования методом конечных элементов, освоен функционал системы DEFORM, проведен вычислительный эксперимент по моделированию точения с различными режимами резания .

Проведен натурный эксперимент по точению титанового сплава BT1-0, подтвердивший адекватность вычислительного эксперимента.

Исследована микроструктура и твердость титанового сплава BT1-0 после точения с различными режимами резания.

В результате проведенных исследований установлено что максимальная температура резания в поверхностном слое образца при точении в выброном диапазоне режимов резания изменяется от 663 до 1000 С.

Установлено что повышение температуры резания свыше 700 С приводит к частичному росту зерен и ухудшению механических свойств.

Таким образом рекомендуемым режимом резания при точении наноструктурированного титанового сплава BT1-0 является:  $V=60\text{м/мин}$ ;  $t=0.2\text{мм}$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. -М.: Металлургия, 1974. -368 с.
2. Ильин А.А., Колачёв Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. –М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. -520 с.
3. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «МИСиС», 2005. – 432 с.
4. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
5. Полуфабрикаты из титановых сплавов / Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров А.П. и др. – М.: ВИЛС, 1996. – 581 с.
- 6.] Колачев Б.А., Ливанов Б.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
7. Полуфабрикаты из титановых сплавов / Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров А.П. и др. – М.: ВИЛС, 1996. – 581 с.
8. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
9. Колачёв Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической технике. / Под. ред. д-ра техн. наук, проф А.Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 416 с.: ил.
10. Белов С.П., Брун М.Я., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. –М.: Металлургия, 1992. -352 с.

11. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. -3-е изд. –М.: МИСиС, 1999. -416 с.; 4-е изд. 2005. -432 с.
12. Новиков И.И., Строганов Г.Б., Новиков А.И. Металловедение, термообработка и рентгенография. М.: МИСИС, 1994. – 480 с.
13. Металлография титановых сплавов. Коллектив авторов. Под общ. ред. д.т.н., проф. Глазунова С.Г., д.т.н., проф. Колачева Б.А. – М.: Metallurgia, 1980. – 464 с.
14. Сплавы цветных металлов для авиационной техники / Воздвиженский В.М., Жуков А.А., Постнова А.Д., Воздвиженская М.В. Под общ. ред. В.М. Воздвиженского. – Рыбинск: РГАТА, 2002. – 219 с.
15. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. – М.: Наука, 1994. – 304 с.
16. Хорев А.И. Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития // ВИАМ.
17. Хорев А.И. Титан – это авиация больших скоростей и космонавтика // Технология легких сплавов, 2002, №4, с. 92-97.
18. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов. – М.: Машиностроение. 1979. – 228 с.
19. Моисеев В.Н., Поляк Э.В. Соколова А.Ю. //МиТОМ, 1975, №8, с. 45-49.
20. Должанский Ю.М., Моисеев В.Н., Сибелева Л.И., Тереньтьева Л.Н.- «Изв. вуз. Цветная металлургия», 1973, №4, с. 132-137.

21. Воробьев И.А., Володин В.А., Панфилов А.Н. Научные основы проектирования технологий для изделий из титановых сплавов. – Н.Новгород: Волго-Вятское кн. изд-во, 1994. – 253 с.
22. Колачев Б.А., Габидулин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1992. – 272 с.
23. Технология изготовления титановых деталей крепления / Володин В.А., Колачев Б.А., и др. Под ред. Б.А. Колачева. – М.: Металлургия, 1996. – 144 с.
24. Корнилов И.И Титан, М.Наука ,1975.
25. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. и др. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М: Металлургия. 1980г. 464с.
26. Авиационные материалы. Справочник в девяти томах. т.5: Магниево-титановые сплавы. М. ОНТИ-1973. 586 с.
- 27.Формирование текстуры листовых полуфабрикатов титановых сплавов разных классов при пластической деформации и термической обработке. Дзунович Дмитрий Анатольевич// 2006.
28. М.А. Филиппов, В.Р. Бараз, М.А. Гервасьев., Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие: в 2 т. Т. II. Цветные металлы и сплавы ./ – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 236 с.
29. Бочвар Г.А. Структура и свойства литых титановых сплавов и их связь с условиями фазовой перекристаллизации. Автореферат кандидатской диссертации.М.1966.
30. Д. В. Ткач, канд. техн. наук Д. В. Павленко, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий Особенности структуры и разрушения титана марки вт1-0 в субмикроструктурном состоянии при циклическом нагружении

31. Шалин А. В. Влияние химического состава и структурного состояния двухфазных титановых сплавов на технологическую пластичность // Москва , 2013.

32. Дьяконов Г.С., Жеребцов С.В., Салищев Г.А. Эволюция микроструктуры титана VT1-0 в ходе комнатной и криогенной прокатки // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013, № 2 (2), с. 72–78.