

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьева"**

На правах рукописи



Головкин Сергей Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ ШТАМПОВОК
ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 И
СТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ЗА СЧЕТ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ШТАМПОВКИ**

Специальность 05.16.05– Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Первов Михаил Леонидович

Рыбинск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1. Получение заготовок лопаток ГТД методами объемного деформирования из титановых сплавов и пути интенсификации технологического процесса. Цели и задачи исследования	9
1.1 Технологии изготовления штамповок лопаток.....	9
1.2 Влияние структуры сплава на его свойства.....	14
1.3 Способы получения ультрамелкозернистой структуры.....	16
1.3.1. Интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением.....	17
1.3.2. Равноканальное угловое прессование.....	18
1.3.3. Всесторонняя изотермическая ковка.....	21
1.3.4. Винтовая экструзия.....	22
1.4 Использование выдавливания для изготовления штамповок лопаток ГТД.....	23
1.5 Методика получения мелкозернистой структуры в заготовках.....	26
1.5.1 Применение изотермического выдавливания для формирования УМЗ структуры	27
1.5.2 Условия протекания процесса динамической рекристаллизации.....	29
1.5.3 Механизмы процесса рекристаллизации	31
1.6 Выводы по главе. Постановка цели и задач исследования.....	35
ГЛАВА 2. Материалы и методы исследования.....	38
2.1 Методика исследования напряженно- деформированного состояния заготовок при прямом изотермическом выдавливании с применением программного комплекса QForm 3D	38
2.2 Разработка способа получения мелкозернистой структуры в заготовках.....	42
2.3 Методы исследования структуры образцов.....	50
2.3.1 Методика подготовки микрошлифов для выявления границ зерен.....	50
2.3.2 Методика выявления и определения величины зерна.....	51
2.4 Методика построения кривых упрочнения титанового сплава ВТ6	53
ГЛАВА 3. Исследование процесса изотермического выдавливания титанового сплава ВТ6.....	59
3.1 Разработка плана эксперимента и обоснование варьируемых параметров.....	59
3.2 Моделирование прямого изотермического выдавливания	62

3.3 Исследование влияния параметров процесса изотермического выдавливания на величину образования осевой утяжины в заготовке.....	73
3.4 Экспериментальное исследование процесса изотермического выдавливания.....	77
3.5 Анализ микроструктуры образцов.....	81
3.6 Исследование напряжения течения при изотермическом деформировании заготовок, имеющих мелкозернистую структуру.....	84
3.7 Разработка математической модели влияния технологических параметров процесса на формирование зерна при динамической рекристаллизации.....	89
3.8 Анализ полученных результатов.....	93
3.9 Выводы по главе.....	99
ГЛАВА 4. Разработка технологии штамповки детали типа «лопатка ГТД» из титанового сплава, обеспечивающей заданную размерную точность получения деталей.....	101
4.1 Анализ существующих технологических процессов штамповки лопаток.....	101
4.2. Разработка технологического процесса изготовления лопаток ГТД из титановых сплавов с применением изотермического выдавливания.....	106
4.3. Перспективы совершенствования устройства установки для изотермического выдавливания.....	111
ГЛАВА 5 Оценка стойкости штампа для выдавливания.....	113
Заключение.....	126
Список литературы.....	128
Приложения.....	140
Приложение А. (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ).....	141
Приложение Б. (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ).....	143

ВВЕДЕНИЕ

С момента появления титановых сплавов в конструкции авиационных газотурбинных двигателей доля деталей, изготавливаемых из титановых сплавов, постоянно увеличивается. В современных экономических условиях одним из критериев успешности производства является себестоимость продукции, позволяющая конкурировать не только на внутреннем рынке, но и на мировом уровне. Наиболее массовыми деталями в современных ГТД, изготавливаемыми из титановых сплавов, являются лопатки компрессора, важными составляющими стоимости изготовления которых являются металлоемкость и общая трудоемкость процесса. Со временем конструкция газотурбинной техники совершенствуется, что влечет за собой усложнение геометрии лопаток компрессора и применение новых труднообрабатываемых материалов. Очень часто это приводит к низкому коэффициенту использования металла и усложнению технологии обработки. Надёжность их работы при эксплуатации двигателей в значительной мере определяется технологией изготовления. При этом качество и надёжность лопаток закладываются уже на начальных стадиях их производства – штамповке заготовок лопаток компрессоров ГТД.

Лопатки компрессоров ГТД работают в условиях высоких температур, достигающих 600 °С. Многократное изменение тепловых режимов работы двигателя - быстрый нагрев в момент запуска и быстрое охлаждение при остановке двигателя - вызывает циклическое изменение термических напряжений, которое приводит к разрушению лопатки из-за тепловой усталости. Кроме этого, перо и хвостовик лопатки, помимо растяжения, изгиба и крутящего момента от скоростного газового потока, испытывают знакопеременные напряжения от вибрационных нагрузок, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах.

Надёжность работы рабочих и направляющих лопаток компрессора зависит не только от их конструктивной прочности, сопротивления циклическим и

длительным статическим нагрузкам, но и от технологии их изготовления, которая непосредственно влияет на качество поверхностного слоя хвостовика и пера лопаток. В поверхностном слое образуются конструктивные и технологические концентраторы напряжений от наклепа и внутренних остаточных напряжений после механической обработки. Кроме того, поверхностный слой подвергается воздействию внешних нагрузок, при основных видах напряженного состояния (изгибе, растяжении, кручении) внешней среды. Эти негативные факторы могут привести к разрушению лопатки и, следовательно, к выходу из строя газотурбинного двигателя. Поэтому целесообразно при разработке технологических процессов изготовления лопаток компрессора ГТД стремиться максимально сократить, а по отдельным поверхностям полностью исключить механическую обработку.

Производство лопаток ГТД занимает особое место в авиадвигателестроении, что обуславливается рядом факторов, главными из которых являются:

- сложная геометрическая форма пера и хвостовика лопаток;
- высокая точность изготовления;
- применение дорогостоящих материалов, таких, как легированные стали и титановые сплавы;
- массовость производства лопаток;
- оснащённость технологического процесса дорогостоящим специализированным оборудованием;
- высокая трудоёмкость изготовления.

В связи со всеми выше перечисленными аспектами изготовления лопаток компрессора ГТД в настоящее время перед предприятиями, создающими газотурбинную технику, актуален вопрос разработки технологических процессов производства дорогостоящих компонентов с наименьшими затратами как людских ресурсов, так и с уменьшенными затратами на энергию и основные материалы. Достичь этих целей можно за счет уменьшения припусков на заготовках, снижения общей трудоёмкости изготовления за счет

минимизации ручных полировальных работ, использования новых прогрессивных методов обработки, как в заготовительных, так и в механообрабатывающих цехах.

Поэтому совершенствование технологического процесса изготовления заготовок лопаток ГТД с целью получения заготовок высокой точности с размерами максимально приближенным к размерам окончательной детали с сохранением или улучшением достигнутых экономических показателей производства является актуальной задачей.

Цель и задачи исследований

Целью работы является повышение размерной точности штамповок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 и стойкости штампового инструмента за счет совершенствования технологического процесса штамповки.

Для реализации этой цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

1. Исследовать влияние технологических режимов процесса изотермического выдавливания на формирование мелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6.

2. Установить влияние размера зерна титанового сплава на сопротивление деформации при температурах деформации.

3. Разработать технологический процесс изготовления заготовок лопаток ГТД из титанового сплава под безразмерную обработку профиля пера.

4. Оценить стойкость штампового инструмента при использовании усовершенствованного технологического процесса.

5. Апробировать установленные закономерности при производстве заготовок лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов производственных условиях.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач, обоснованным использованием допущений, применением

известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с проведенными экспериментальными исследованиями автора, а также использованием комплекса современных методов исследования пластической деформации и структуры. Проведенная оценка параметров механического поведения материалов соответствует требованиям стандартов. Анализ пластической деформации титанового сплава ВТ6 при различных параметрах процесса выдавливания проводили с использованием конечно-элементного комплекса QForm 3D.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- разработан метод получения регламентированной ультра мелкозернистой структуры в двухфазном титановом сплаве путем интенсивной пластической деформации при изотермическом выдавливании по режимам, обеспечивающим протекание динамической рекристаллизации;
- установлена регрессионная зависимость, связывающая параметры процесса (коэффициент вытяжки, скорость деформирования и температура деформации) изотермического выдавливания и размер, получаемого в результате, зерна в титановом сплаве ВТ6 при динамической рекристаллизации;
- установлено, что при уменьшении размеров зерна в титановом сплаве ВТ6 в 2 раза напряжение течения при температуре $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижается на 42 %.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработан способ получения заготовок с регламентированной структурой под дальнейшую изотермическую штамповку методом изотермического выдавливания (Способ выдавливания малопластичных материалов и устройство для его осуществления защищен патентом RU №2637451);
- разработаны технологические режимы изотермической штамповки, обеспечивающие уменьшение сопротивления деформации штампуемого материала, повышение стойкости штамповой оснастки при изотермической штамповке и повышение размерной точности штамповок лопаток ГТД (Способ

изготовления штамповок лопаток из титановых сплавов защищен патентом RU №2614294).

- разработан штамп для получения заготовок дисков с лопатками из титанового сплава методом изотермической штамповки (Изотермический штамп для получения дисков с лопатками защищен патентом RU №142904);
- результаты диссертационной работы используются при разработке технологических процессов штамповки заготовок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 в ПАО «ОДК - Сатурн».
- разработанные по результатам исследований математические модели, используются в учебном процессе на кафедре «Мехатронные системы и процессы формообразования» РГАТУ им. П.А. Соловьева.

Апробация работы. По содержанию диссертационной работы был сделан ряд докладов на научно-технических конференциях, в том числе: в рамках I, II, VI Международных технологических форумов «Инновации. Технологии. Производство», 2014 г., 2015 г., 2019 г. Симпозиум «SCHULERAEROSPACE в университете Машиностроения» (г. Москва, 2015 г.) XLII Гагаринские чтения Международная молодежная научная конференция (г. Москва, МАИ, 2016 г.).

Публикации. Основные результаты работы представлены в 5 публикациях, из них 3 – в ведущих научных журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК. По теме диссертации опубликовано 3 патента РФ.

Структура и объем работы. Работа состоит из 5 глав, библиографического списка, 2-х приложений и изложена на 144 страницах, содержит 62 рисунка, 16 таблиц.

ГЛАВА 1 Получение заготовок лопаток ГТД методами объемного деформирования из титановых сплавов и пути интенсификации технологического процесса. Цели и задачи исследования

1.1 Технологии изготовления штамповок лопаток

При изготовлении опытных изделий, когда геометрия пера уточняется и меняется в широких пределах, в качестве заготовок лопаток используют грубые заготовки, получаемые методом выдавливания или, в крайнем случае, призматические поковки с большими припусками.

После того, как геометрия лопаток определена и получены характеристики компрессора, в качестве заготовок целесообразно использовать профилированные штамповки, точность которых может повышаться с ростом серийности выпуска изделий [1].

Основными конструктивными элементами, оказывающими влияние на технологию изготовления лопаток компрессора, являются: материал лопатки, габаритные размеры, наличие одной или двух полок, закрутка пера, толщина кромок, форма хвостовика, величина радиусов сопряжения профильной части пера с полкой, форма проточной поверхности хвостовика, заданная точность выполнения этих элементов [2].

В настоящее время существует несколько методов обработки профиля пера лопатки. От выбора метода обработки зависит вид исходной заготовки [7]:

- 1) холодное вальцевание.
- 2) фрезерование на станках с ЧПУ.
- 3) шлифование абразивной лентой, алмазное и электроалмазное шлифование.
- 4) размерная электрохимическая обработка (ЭХО).

При анализе существующих технологий обработки профиля пера лопаток ГТД выявлен ряд недостатков каждого из методов.

При холодном вальцевании возможно возникновение микротрещин, образование наплыва на прикомлевой части пера. При фрезеровании прикомлевого

участка и удалении облоя по перу возможны прижоги обрабатываемых поверхностей. К недостаткам этой технологии также относятся необходимость получения точных заготовок, значительное ограничение по материалам (некоторые жаропрочные стали, ВТЗ-1) и площади лопаток, высокая стоимость оснастки [1].

Фрезерование лопаток на станках с ЧПУ позволяет получать лопатки с точностью порядка 0,1 мм. Значительные усилия резания, приводящие к деформациям и снижению усталостной прочности тонкостенных лопаток, вызывают необходимость в последующей ручной доработке и дробеструйном упрочнении пера. Недостатком данной технологии являются также низкая производительность, высокая стоимость оборудования, большие затраты на инструмент.

При шлифовании профиля пера абразивной лентой возможно возникновение прижогов на обрабатываемых поверхностях. К недостаткам этой технологии также относится необходимость получения точных заготовок.

При обработке профиля пера лопаток методом ЭХО существует необходимость последующей обработки кромок механическим методом и ручной отделки пера. Это связано с недостаточной точностью и качеством обрабатываемых поверхностей. К недостаткам данной технологии можно также отнести высокую стоимость оснастки.

Как ясно из выше сказанного процесс получения заготовок лопаток компрессора и дальнейшая их механическая обработка сопряжены с высокими материалоемкостью и трудоемкостью. Для обеспечения экономической выгоды и сокращения сроков изготовления, как ГТД в целом, так и лопаток компрессора в частности в условиях мелкосерийного или штучного производства, что характерно для газотурбостроения, необходимо совершенствовать метод получения заготовок. Данное направление деятельности позволит снизить материалоемкость, трудоемкость и объем ручных работ при последующей механической обработке компрессорных лопаток из теплостойких сталей, титановых и жаропрочных сплавов. И в конечном итоге уменьшит себестоимость производства ГТД.

Одним из перспективных направлений в производстве лопаток компрессора является изготовление заготовок наиболее массовых лопаток с высотой пера до 120 мм без припуска по перу [3].

На ПАО «ОДК – Сатурн» ведутся работы по разработке современной перспективной технологии получения заготовок лопаток компрессора ГТД под безразмерную обработку профиля пера, так называемых бесприпусковых заготовок лопаток. Для реализации данного технологического процесса необходимо обеспечить получение точных штамповок с параметрами профиля пера идентичными параметрам конструктивного чертежа лопатки.

Заготовка для получения лопаток - прутки круглого сечения, диаметр которого в случае высадки на горизонтально ковочной машине выбирается из имеющегося сортамента с учетом условия усреднения площади поперечного сечения замковой и перовой части.

Для предварительного фасонирования замковой части, в зависимости от вида лопатки, применяют операции высадки на ГКМ или выдавливания на кривошипных или гидравлических прессах. Далее возможно, в случае необходимости удлинить перовую часть, выполняют операцию вальцевания на ковочных вальцах в специальных штампах. Окончательное формирование геометрических размеров лопаток происходит при объемной штамповке на механических прессах, преимущественно в открытых штампах. Далее следует обрезка облоя и восстановление геометрии в калибровочных штампах при температурах ниже ковочных. [4].

Повышение точности изготовления заготовок снижает межремонтный ресурс штампов в виду отсутствия припуска и минимальных допусков на перо лопатки. В ряде случаев затраты на большое количество штампов из-за их низкой стойкости, а также высокую стоимость восстановления, превышают экономию, получаемую в механических цехах в результате сокращения припусков под механическую обработку [3].

Кроме того, при изготовлении лопаток компрессора с уменьшенными

припусками возникают технические трудности:

- крутоизогнутая геометрия профиля пера лопатки, толщина которого сопоставима с толщиной облоя;
- площадь поперечного сечения замковой части в несколько раз больше аналогичной величины на пере лопатки.
- применение трудно деформируемых материалов обуславливает схему пластического деформирования

Известно, что при объемной штамповке на кривошипных – горячештамповочных и винтовых прессах имеет место дефект деформационной неоднородности в виде линий интенсивного течения, проявляющегося на деталях в виде полос белого цвета [5, 6]. Данная полосчатость выявляется на деталях при травлении и является следствием интенсивного локального течения металла при штамповке. Полосы образуются, как правило, при высокой степени деформации за один нагрев. При этом интенсивность линий течения (их резкая выраженность) тем больше, чем ниже температура штамповки от температуры полиморфного превращения сплава. С целью устранения данного дефекта заготовки лопаток изготавливают с большими припусками под механическую обработку за несколько переходов штамповки для уменьшения степени деформации. Следовательно, можно сделать вывод о нерациональности классических методов штамповки заготовок лопаток компрессора применительно к изготовлению бесприпусковых заготовок лопаток. При изотермической штамповке лопаток данный дефект отсутствует полностью, даже при степенях деформации до 90 процентов за один нагрев.

Наиболее оптимальным способом получения точных штамповок лопаток из титановых сплавов является изотермическая штамповка. При этом формоизменение нагретой заготовки происходит в инструменте, нагретом до температуры деформации. Происходящие при малых скоростях деформирования процессы разупрочнения металла повышают пластичность материала и позволяют снизить требуемую силу деформации, в отдельных случаях возможно достижение

эффекта сверхпластичности. К преимуществу изотермической штамповки перед обычной горячей объемной штамповкой можно отнести существенное уменьшение упругой составляющей деформации инструмента, что позволяет повысить точность получаемых штамповок и как следствие уменьшить припуски и допуски по перу лопаток [7].

Наряду с выше перечисленными преимуществами изотермическая штамповка имеет один существенный недостаток, сдерживающий широкое внедрение данного процесса в производство, это низкая стойкость дорогостоящего штампового инструмента.

Низкая стойкость штамповой оснастки для изотермической штамповки обусловлена следующими причинами:

1) высокое сопротивление пластической деформации штампуемого сплава (типа ВТ6).

2) высокое значение контактных напряжений при штамповке. Они могут превышать сопротивление деформации металла более чем в пять раз [8, 9].

3) низкая прочность материала штампа при температурах деформации составляющей для титановых сплавов 910 – 980 °С. Например, часто используют при изготовлении штампов для изотермической штамповки жаропрочный сплав на никелевой основе ЖС6У при этих температурах имеет предел текучести около 230 МПа [10], а титановый сплав ВТ6 при этих же условиях имеет предел текучести 184-243 МПа [11].

Таким образом, для увеличения стойкости штамповой оснастки для изотермической штамповки можно обозначить следующие направления:

- 1) подбор новых жаропрочных материалов для изготовления штампов.
- 2) уменьшение действующих на поверхности штампа контактных напряжений путем:
 - подбора новых защитно-смазывающих покрытий для заготовок, способных обеспечивать режим жидкостного трения и тем самым уменьшать коэффициент трения в условиях изотермического формообразования (рис. 1.1) [12].

- уменьшения сопротивления пластическому деформированию штампуемого материала, за счет уменьшения размера зерна заготовки перед операцией объемной изотермической штамповки [13-16].

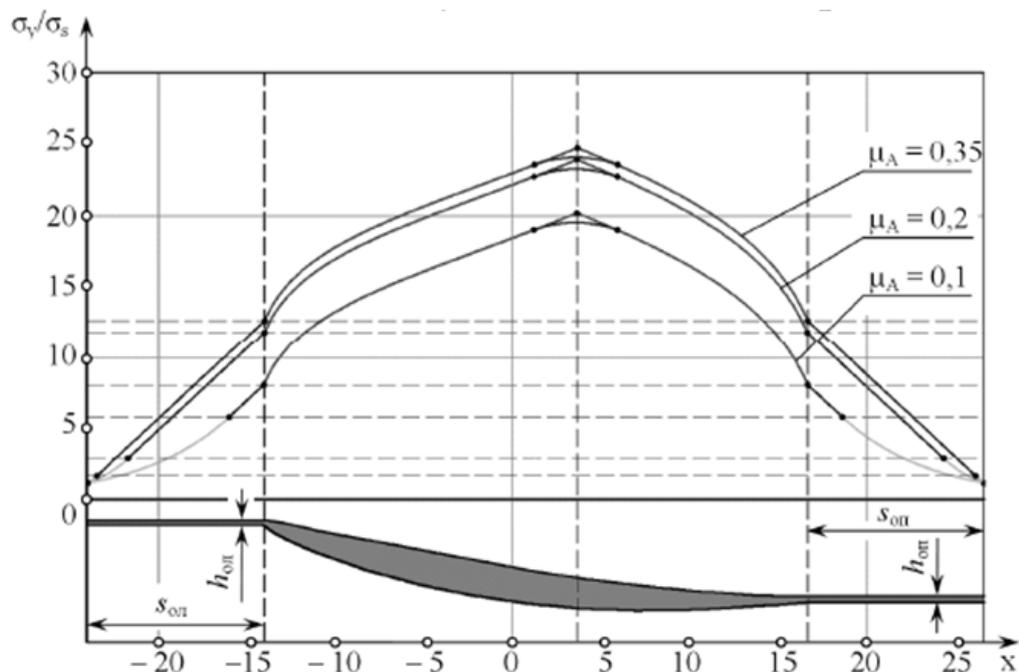


Рисунок 1.1 - Влияние величины контактного трения μ_A на форму эпюры и величину относительных нормальных напряжений σ_y/σ_s [12],

где $h_{обл}$, $h_{обп}$ – высота обля соответственно у входной (слева) и выходной (справа) кромках пера лопатки, $s_{обл}$, $s_{обп}$ – ширина обля соответственно у входной (слева) и выходной (справа) кромках пера лопатки

1.2 Влияние структуры сплава на его свойства

При определенных условиях деформации и термической обработки преобразование структуры вызывает существенное изменение механических свойств металлических материалов, как технологических, так и эксплуатационных. В некоторых случаях (например, когда предъявляют высокие требования в отношении вибропрочности или усталости) никакими другими способами, кроме

пластической деформации, невозможно получить необходимые свойства металла [17].

Получение штамповок с заданным уровнем свойств возможно только при обеспечении получения регламентированной микроструктуры, формирующейся в процессе обработки. Под микроструктурой, в первую очередь понимают форму и размер зерен [18, 19].

Таким образом, управление процессами упрочнения, возврата, рекристаллизации и фазовых превращений, лежащих в основе формирования зерен, представляют собой особый интерес многих исследователей [20].

В настоящее время множество авторов посвящают свои работы вопросу получения ультрамелкозернистой, субмикроструктурной и нанокристаллической структуры в металлах. Для УМЗ структуры средний размер зерен меняется от 1 до 10 мкм, в случае субмикроструктурной структуры средний размер зерен не превышает одного микрометра, а у нанокристаллической структуры имеют в виду зерна с размером от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров [22 - 24]. Результаты новейших исследований в данной области однозначно указывают на уникальное сочетание механических свойств, присущее такому классу металлических материалов. С одной стороны, УМЗ и субмикроструктурные сплавы проявляют пониженные напряжения течения в процессе горячей деформации, это в сочетании с высокой пластичностью является отправной точкой при разработке многих современных технологических процессов [25]. Также уменьшение среднего значения размера зерна во многих случаях ведет к повышению прочностных характеристик изделия, как при статических, так и при динамических испытаниях [26].

Использование интенсивной пластической деформации в настоящее время является наиболее перспективным направлением развития методов обработки металлов давлением для получения УМЗ, субмикроструктурных и нанокристаллических материалов.

Давление деформирования напрямую зависит от сопротивления материала

пластической деформации. Снижение сопротивления материала пластической деформации может быть достигнуто за счет уменьшения размера зерна (закон Холла – Петча).

Связь между напряжением текучести и средним размером зерна, согласно многочисленным экспериментальным данным, определяется уравнением (1) известным как закон Холла-Петча [27 - 29]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где

σ_0 и k – эмпирические константы, зависящие от материала и условий деформации
 d – размер зерна.

Из соотношения Холла – Петча следует, что с уменьшением размера зерна напряжение течения уменьшается. Некоторые исследователи данный эффект пытаются применить при штамповке лопаток из титановых сплавов, в том числе ВТ6, в состоянии сверхпластичности. Скорость деформации при этом должна быть достаточно малой и составлять около $10^{-2} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ [30].

1.3 Способы получения ультрамелкозернистой структуры

Процессы получения УМЗ, субмикро- и нанокристаллических материалов с помощью пластической деформации часто называют общим термином - интенсивные пластические деформации (ИПД). Метод ИПД заключается в обжати с большими степенями деформации и высокими приложенными давлениями при температурах ниже температуры рекристаллизации [31]. В работах [32, 33] подробно рассмотрены схемы и режимы объемного наноструктурирования с использованием методов интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) и равноканального углового прессования (РКУП), а также винтовой экструзии (Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин и др.),

мультиосевой деформацией (Г.А. Солищев, О.А. Кайбышев и др.), знакопеременный изгиб, аккумулируемая прокатка с соединением (Н. Цужи и др.).

1.3.1 Интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением

Установки для реализации деформации кручением под высоким гидростатическим давлением являются развитием идеи наковальни Бриджмена. В работе [34] отмечено, что напряжения течения стремятся к насыщению и сильно повышаются с увеличением гидростатического давления. В случае кручения под высоким давлением геометрическая форма образцов такова, что основной объём материала деформируется в условиях квазигидростатического сжатия. При деформации кручением под высоким давлением как исходные, так и полученные образцы имеют форму дисков. При этом образец помещается между бойками и сжимается под приложенным давлением P в несколько ГПа. Схема метода представлена на рис.1.2. Нижний боек вращается, и силы поверхностного трения заставляют образец

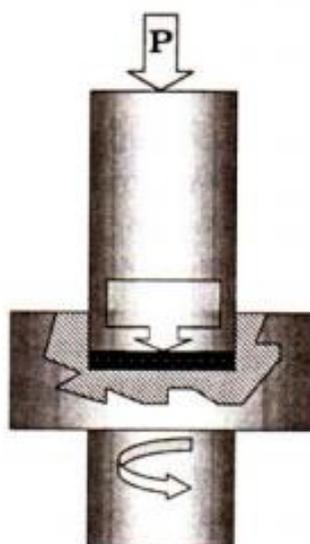


Рисунок 1.2 – Схема метода кручения под высоким давлением

деформироваться сдвигом. В результате, несмотря на большие степени пластической деформации, образец не разрушается. В настоящее время метод ИПДК позволяет получать образцы $\varnothing 20 \times 1$ мм при давлении до 5-6 ГПа и реверсировании по направлению вращения образца. Температура деформирования может варьироваться в интервале 500-550 °С [35].

1.3.2 Равноканальное угловое прессование

Способ РКУ-прессования, реализующий деформацию массивных образцов простым сдвигом, был разработан В.М. Сегалом в 1970-х, в 1990-х был развит Р.В. Валиевым с соавторами и впервые применён как метод ИПД. Метод РКУП характеризуется большим количеством параметров, определяющих качество, структуру и свойства получаемых образцов. Сущность процесса состоит в продавливании заготовки через два пересекающихся под углом $\Phi = 90^\circ - 150^\circ$ (рис. 1.3) канала равного поперечного сечения.

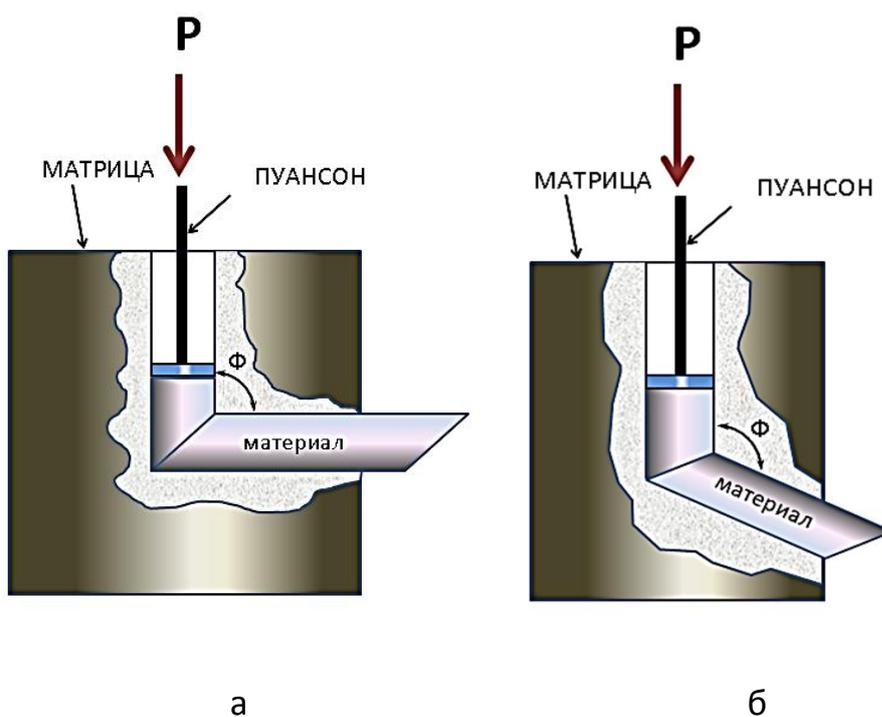


Рисунок 1.3 - Схемы РКУП: а) $\Phi = 90^\circ$; б) $\Phi = 150^\circ$

Наиболее целесообразно использование углов 2Φ , близких к 90° , при которых достигается самый высокий уровень интенсивности деформаций при незначительном росте контактного трения [32]. Для сведения к минимуму контактного трения используется смазка. В общем случае структура материала, полученного равноканальным угловым прессованием, зависит не только от природы материала и величины приложенной деформации, но также от таких технических параметров, как размер и форма поперечного сечения каналов (диагональ квадратного сечения или диаметр круглых каналов) и направление прохода заготовки через каналы (рис. 1.4). Если материал трудно деформируется, то равноканальное угловое прессование проводят при повышенной температуре.

Контролируя и варьируя основные параметры и режимы, возможно получение регламентированной структуры, для всех титановых сплавов структурное состояние перед прессованием выбирается хорошо отожженным [35].

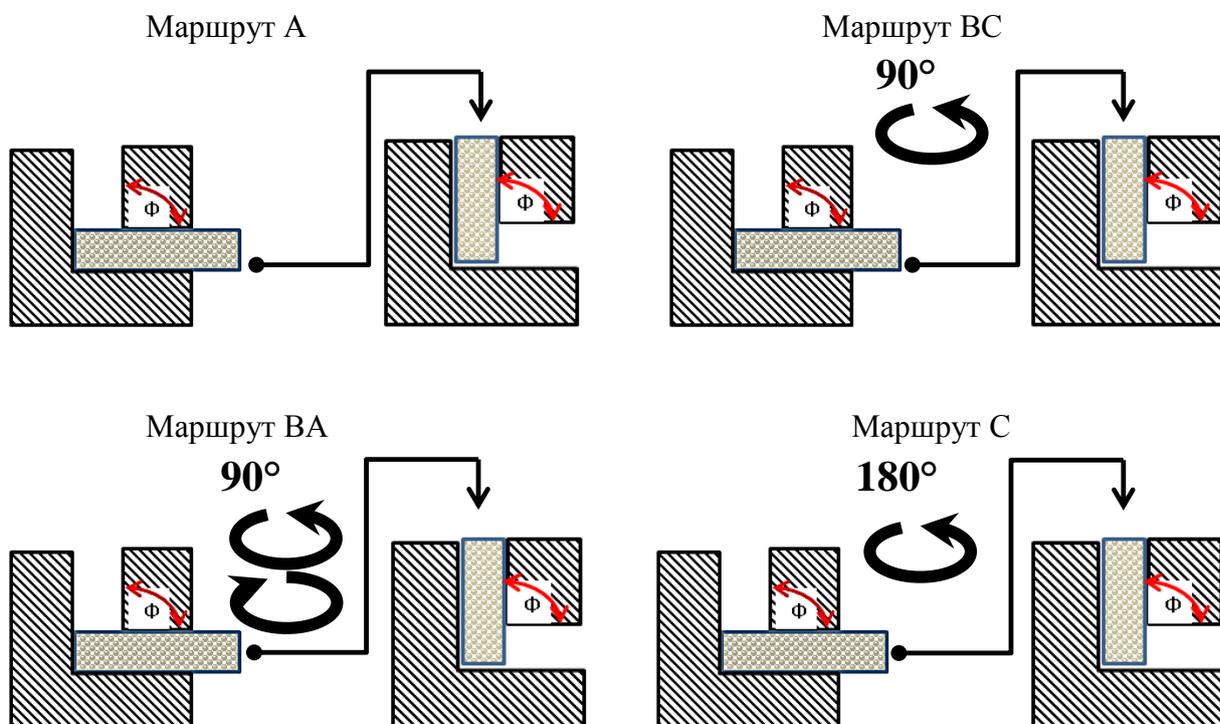


Рисунок 1.4 - Маршруты РКУП

Следует отметить, что метод РКУП не ограничивается его применением в лабораторных исследованиях, так известны примеры разработки технологий получения разнообразных полуфабрикатов на основе метода.

Однако при РКУ прессовании имеет место перемещение материала заготовки вдоль ее продольной оси. Причина его возникновения в том, что при сдвиге происходит изменение формы и увеличение длины заготовки за счет «наклона» ее торцов. Если такую заготовку вновь подвергнуть РКУП, то велика вероятность образования так называемых "зажимов", являющихся браковочным признаком (рис. 1.5).

Для возвращения заготовке исходной формы, что требуется при многократном РКУП, надо, или отрезать косые участки, или извлеченную из матрицы заготовку подвергнуть осадке по торцам. Это, или снижает коэффициент использования материала, или увеличивает трудоемкость обработки материала заготовки. Заготовки после ИПД требуют дополнительной механической обработки, стойкость оснастки для реализации процесса не известна, но вероятнее всего не велика.

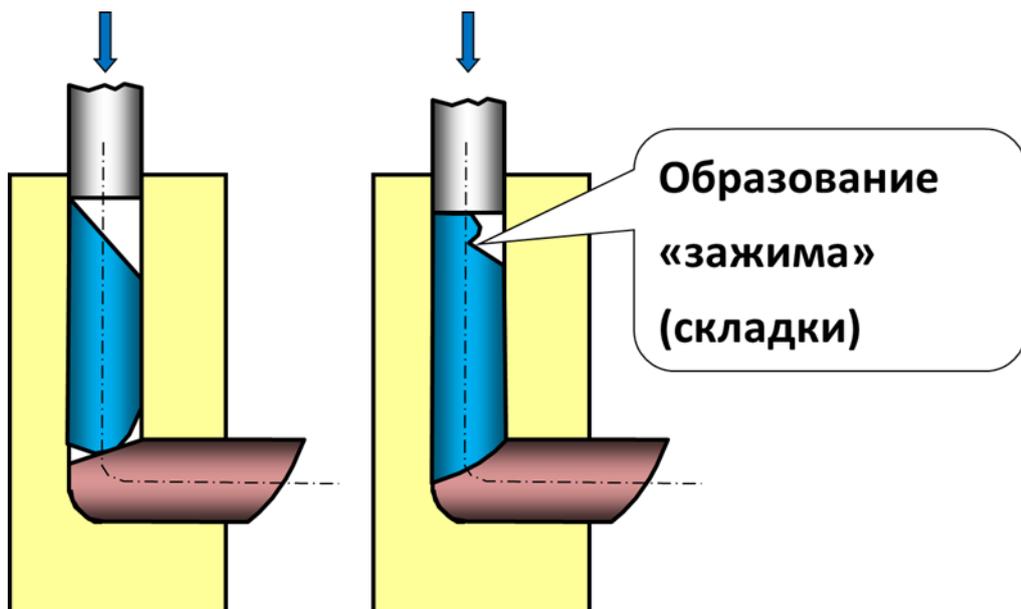


Рисунок 1.5 - Дефекты при РКУ прессовании

1.3.3 Всесторонняя изотермическая ковка

Достаточно распространенным методом пластической деформации является метод всесторонней изотермической ковки. Данный способ позволяет получить массивные заготовки с ультрамелкозернистой структурой. Такой подход был впервые предложен Салищевым Г.А. [36, 37]. Данный метод заключается в многократной осадке заготовки на плоских бойках с поворотом заготовки на 90° относительно оси приложения нагрузки при скорости деформации $10^{-3} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и последовательном снижении температуры в интервале $(0.2-0.5) T_{пл}$ К. (рис. 1.6).

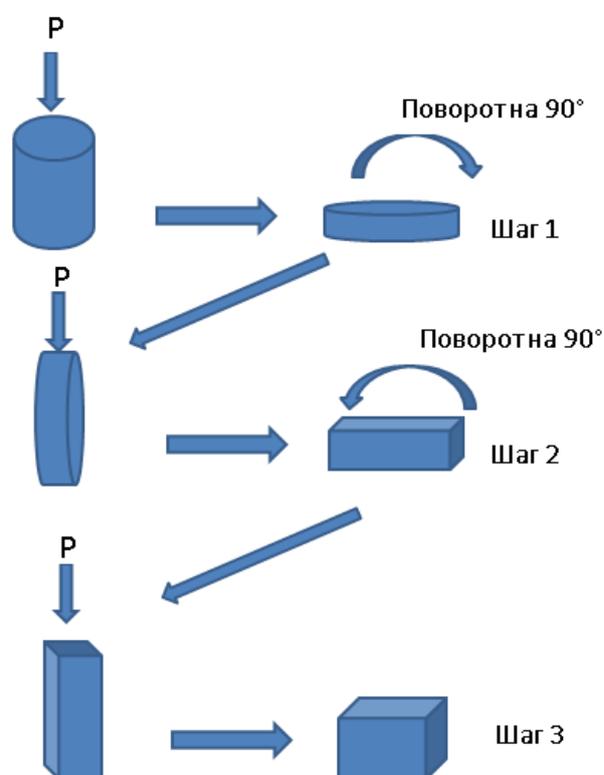


Рисунок 1.6 - Схема трех циклов осадки со сменой оси деформации

Достоинство этой схемы заключается, во-первых, в простоте реализации (нет необходимости изготовления специального инструмента для деформирования), во-вторых, в возможности равномерно прорабатывать все стороны заготовки. Недостатком метода является ограничение степени деформации, вносимой в

материал за одну операцию осадки, связанное с необходимостью сохранения начальной формы объемной заготовки.

1.3.4 Винтовая экструзия

Метод винтовой экструзии (ВЭ), предложенный Бейгельзимером Я.Е. и др., отличается от известных методов напряженно- деформированным состоянием в образце, а также технологическими возможностями применения (рис. 1.7). ВЭ позволяет аккумулировать большие деформации в металлах, заметно измельчать их микроструктуру. Винтовая экструзия состоит в том, что призматическую заготовку пропускают через винтовую матрицу. Канал винтовой матрицы состоит из трех участков: заходного, винтового и калибрующего. Характеристикой винтового участка является угол наклона винтовой линии к оси экструзии. Основным недостатком данного метода является появление сильной нежелательной анизотропии особенно в чистом титане.

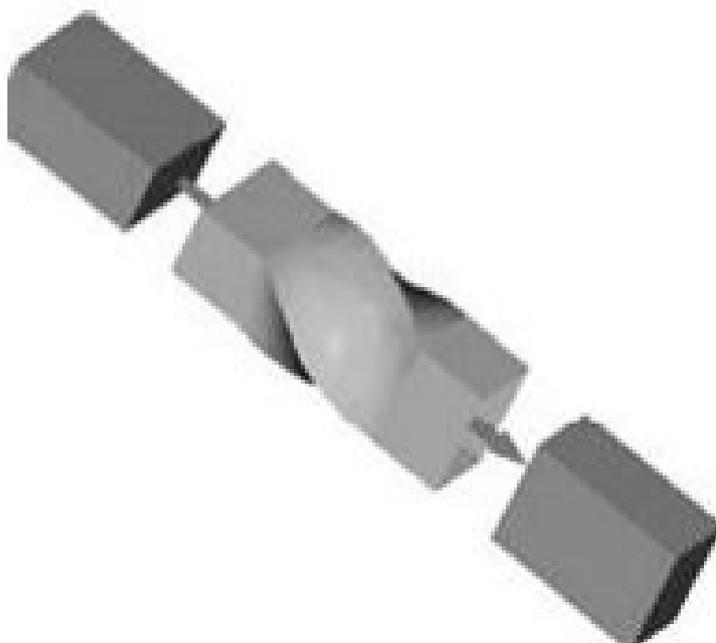


Рисунок 1.7 - Схема прохождения заготовки через винтовую матрицу

1.4 Использование выдавливания для изготовления штамповок

лопаток ГТД

В работах авторов А.П. Петрова, Л.А. Никольского, А.И. Колпашникова и др. рассмотрены способы получения лопаток ГТД с применением, в качестве предварительного фасонирующего перехода, выдавливания [38, 39, 41, 42]. Сущность процесса выдавливания состоит в вытеснении металла исходной заготовки в полость и (или) отверстие ручья штампа [40]. При реализации этого процесса возможно, как перераспределить металла для формирования в дальнейшем замка и пера лопатки, так и получить максимально приближенную по форме и размерам к окончательной детали заготовку под дальнейшую штамповку [41, 42]. Основным преимуществом способа выдавливания является возможность получения поковок с высокой размерной точностью и производительностью. Наряду с размерной точностью и чистотой поверхности при процессе выдавливания обеспечивается: экономия времени изготовления вследствие малого числа операций, высокого КИМ, возможность роботизации процесса, получение размерной точности деталей из цветных металлов и сплавов, получение направленности структуры без перерезания волокон, что дает возможность подвергать такие детали более высоким эксплуатационным нагрузкам [43].

Основными деформационными и температурными характеристиками технологической схемы выдавливания являются: скорость выполнения операции, форма инструмента, коэффициент вытяжки, температура. При рациональном определении всех этих факторов после выдавливания на заготовках отсутствуют дефекты в виде пресс - утяжины в теле заготовки [44 - 46].

В литературных источниках различают прямое, обратное, комбинированное, радиальное и боковое выдавливание. Выбор способа выдавливания определяется, прежде всего, формой поковки, которая может иметь вид головки и стержня постоянного и переменного сечений, а также какую часть поковки в каком штампе

располагать (внизу, вверху, в матрице, в пуансоне) На рисунке 7 представлены две наиболее распространенные схемы выдавливания и действующие силы применительно к третьей стационарной стадии процесса выдавливания.

Прямое выдавливание - это метод обработки металлов давлением (рис. 1.8 а) с прямым истечением профиля сплошного сечения через отверстие в матрице в направлении движения пуансона. Пресс-штемпель через пресс-шайбу передаёт давление на заготовку, находящуюся в контейнере. При этом металл заготовки выдавливается в отверстие матрицы, закрепленной в матрицедержателе, и образует профиль. Скорость истечения профиля во столько раз превышает скорость движения пресс-штемпеля (скорость прессования), во сколько раз площадь сечения полости контейнера больше площади отверстия в матрице. Отношение указанных площадей называется коэффициентом вытяжки.

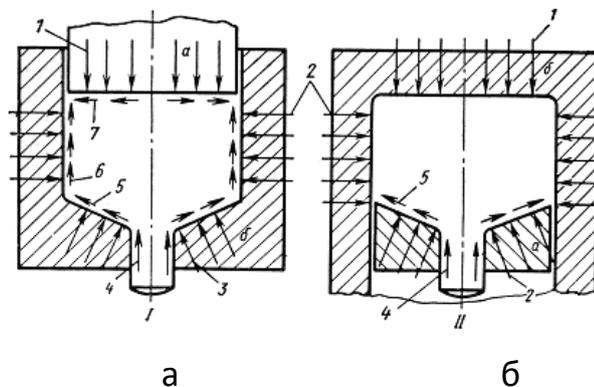


Рисунок 1.8 - Схемы и действующие силы на третьей стадии прямого (а) и обратного (б) выдавливания [48]

Обратное выдавливание (прессование) - это технологическая операция штамповки (рис. 1.8 б) с обратным истечением. Силовое воздействие на заготовку осуществляется через контейнер, получающий движение в направлении, указанном стрелкой, через укороченный пресс-штемпель — пробку, запирающую контейнер.

С другой стороны контейнер запирается удлинённым матрицедержателем, в котором закреплена матрица. При перемещении контейнера вместе с ним перемещается заготовка, и металл выдавливается в канал матрицы, образуя профиль [47].

Силы трения, действующие при прямом и обратном выдавливании неодинаковы. Основное их отличие - силы трения о стенки инструмента, как видно из рисунка 1.8 зависят от того, какая часть инструмента подвижна, и какая часть неподвижна [48].

В частном случае перемещаться могут и обе части инструмента. В зависимости от подвижности той или иной части инструмента изменяется только наименование сил 1 и 3, одни из них являются внешними силами, а другие их реакциями. Силы 2 на боковых поверхностях являются реактивными от давления металла на стенки матрицы.

Характер течения металла на разных стадиях процесса различен. Первый период включает осадку заготовки до соприкосновения бочкообразованной заготовки с боковыми стенками приемника и заполнение металлом всего объема контейнера. Второй период соответствует начальной стадии выдавливания в которой рабочее усилие возрастает. В третий период происходит установившееся истечение металла. В четвертом периоде удельное усилие выдавливания возрастает снова поскольку заготовка подстывает. В третьем периоде прямого выдавливания материал заготовки осуществляет перемещение относительно всех стенок полости. Поэтому (рис. 1.8 а) кроме сил трения 4 на доньшке контейнера и 5 в рабочем пояске матрицы возникают силы трения 6 на боковых стенках полости и 7 на торцовой части пуансона. Силы трения 7 направлены от оси пуансона к периферии, что приводит к образованию пресс-утяжины (воронкообразной полости под торцом пуансона), что является браком [49].

Установлено, что при длине заготовки, превышающей её диаметр, характер течения металла и вид очага деформации полностью зависят от контактного трения, перепада температуры и смазки. Таким образом изменяя тепловой режим

выдавливания и условия трения металла о стенки контейнера и матрицы, можно изменять характер его течения, а также влиять на равномерность механических свойств изделия. [50-52].

1.5 Методика получения ультрамелкозернистой структуры в заготовках

Одной из задач, которые необходимо решить в ходе выполняемой работы является получение ультрамелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6 для снижения сопротивления пластическому деформированию при изотермической штамповке лопаток ГТД. Рассмотренные выше методы ИПД, позволяющие получить ультра- и субмикроструктурную структуру подходят для наноструктурирования заготовок постоянного сечения, которые для дальнейшего применения в изготовлении лопаток необходимо подвергнуть механической обработке с целью удаления поверхностных дефектов, полученных в процессе многократного повторения деформирующих операций. Это довольно трудоемкая операция со съемом слоя металла, что отрицательно влияет на коэффициент использования металла (КИМ) при изготовлении штамповок. А при последующих нагревах для набора замковой части и объемной штамповки лопатки существует вероятность получения исходной структуры в титановом сплаве.

Вместе с тем известно, что измельчения структуры можно добиться и альтернативным способом за счет термомеханического воздействия на заготовку путем реализации процесса динамической рекристаллизации. Для исключения выше указанных недостатков в настоящей работе предлагается использовать изотермическое выдавливание с большим коэффициентом вытяжки при режимах, обеспечивающих протекание процесса динамической рекристаллизации, которая в свою очередь совместно с большими степенями деформации позволит достичь измельчения структуры заготовки. Если заданный коэффициент вытяжки гарантировано стабильно обеспечивается геометрией штампа для выдавливания, то

значения остальных параметров (температуры, скорости деформирования) и обеспечение их стабильности требуют дополнительного исследования и изучения.

1.5.1 Применение изотермического выдавливания для формирования УМЗ структуры

Как известно, одним из условий получения мелкозернистой структуры является достижение больших пластических деформаций [53 - 55]. Наиболее благоприятным способом получения высокой степени деформации в малопластичном материале, таком как ВТ6, является прессование. В пользу этого можно указать схему напряженного состояния неравномерного всестороннего сжатия, обеспечивающую достижение наибольших предельных деформаций за счет отсутствия растягивающих напряжений, а также отметить возможность получения практически любого поперечного сечения, высокое качество поверхности, точность.

Однако при больших степенях деформации имеет место значительный деформационный разогрев заготовки [56]. Эта зависимость следует из закона сохранения энергии при пластической деформации (2)

$$\Delta\theta = \eta \frac{T*\Lambda}{c*\rho} \quad (2)$$

где η –доля тепла, остающегося в теле;

T - интенсивность касательных напряжений;

Λ -степень деформации сдвига;

c - удельная теплоемкость;

ρ –плотность материала

Во время выполнения деформирования заготовки в штампах, разогретых до 150-300 °С, что характерно для механических и гидравлических прессов, при

контакте детали с поверхностью инструмента, поверхностный слой материала подстывает. Это приводит к увеличению сопротивления деформированию и росту усилия необходимого для деформирования. При подстывании заготовки изменяется характер течения металла и происходит образование жестких зон в углах инструмента. [57].

Для уменьшения подстывания материала штамповку производят с высокими скоростями перемещения инструмента. Это в свою очередь приводит к увеличению сопротивления деформированию из-за невозможности полного протекания разупрочняющих процессов. Также при деформировании с высокой скоростью интенсивно имеет место деформационный разогрев. Этот процесс происходит неравномерно по сечению заготовки и достигает своих максимальных значений в областях с наибольшей деформацией, в следствие чего течение металла по всему объему детали неравномерно. В результате этого структура окончательной детали будет также неравномерной. С другой стороны, разогрев штампа за счет теплопередачи от заготовки снижает его стойкость [58].

Наилучшие условия достигаются при нагреве инструмента до температуры деформации. В этом случае охлаждение нагретой заготовки в процессе деформирования исключается, и условия деформации можно считать близким к изотермическим.

Изотермическая штамповка – это процесс горячего или полугорячего деформирования заготовок деталей в штамповом инструменте, температура которого находится в пределах рекомендуемого температурного интервала штамповки материала. Этот процесс выполняется при относительно невысоких скоростях деформирования, как правило, не превышающих 5 мм/с. Изотермическая штамповка позволяет получать заготовки деталей сложной конфигурации из труднодеформируемых материалов за один переход с большими степенями деформации, используя технологическое оборудование меньшего усилия, чем при применении обычных методов горячей объемной штамповки. Нагрев инструмента до температуры горячей штамповки позволяет материалу не

остывать и полностью заполнять труднодоступные полости штампа. Термин «изотермическая штамповка» относится к условиям выполнения технологической операции пластического деформирования, а не к состоянию деформируемого материала в время выполнения этой операции [59, 60].

Делая вывод из всего выше сказанного можно заключить, что для достижения высоких степеней деформации в жаропрочном титановом сплаве ВТ6 наиболее рационально использовать метод изотермического выдавливания.

1.5.2 Условия протекания процесса динамической рекристаллизации

Рекристаллизация – процесс образования и роста одних кристаллических зёрен поликристалла за счёт других. Изменения, происходящие в металле, зависят от температуры, степени деформации, химического состава сплава, начального размера зерен. Среди отечественных ученых первые исследования процесса рекристаллизации в металлах проводили Бочвар А. А., Савицкий Е. М., Горелик С.С., а первые зависимости, описывающие поведение материалов при рекристаллизации, были выведены Меллом, Берком и Тернболом и другими авторами.

В работе [61] различают несколько видов рекристаллизации:

- 1) первичная рекристаллизация. Сопровождается образованием новых, равноосных зёрен (рис. 1.9 поз.3) взамен текстуры деформации (рис. 1.9 поз.1).
- 2) собирательная рекристаллизация. Происходит после завершения первичной рекристаллизации при последующем нагреве и обеспечивает рост одних кристаллизационных зёрен за счет других (рис. 1.9 поз.4).
- 3) вторичная рекристаллизация. Характеризуется процессом роста новых зародышей.

Авторами Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. предложена классификация рекристаллизации по типу прикладываемых нагрузок [62]:

- 1) статическая рекристаллизация. Предварительная пластическая

деформация и последующие температурные воздействия без активных деформационных нагрузок.

2) динамическая рекристаллизация. В процессе горячей пластической деформации одновременное воздействие внешних нагрузок и температуры.

3) постдинамическая рекристаллизация. Быстрый рост центров рекристаллизации после проведенной горячей деформации.

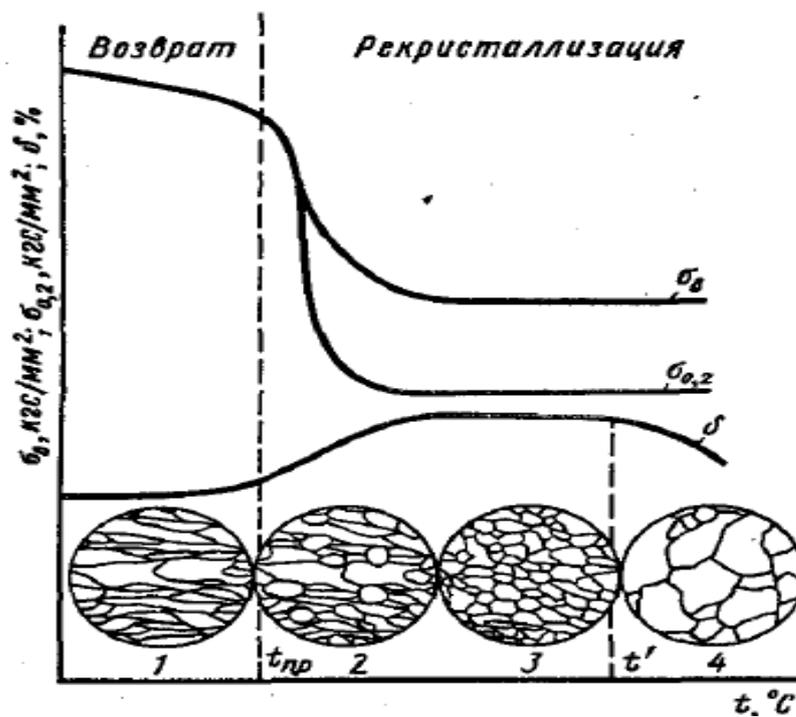


Рисунок 1.9 - Влияние нагрева на механические свойства и структуру металла, упрочненного деформацией [61]

Многие авторы делают вывод, что для начала протекания процесса рекристаллизации необходимо выполнение ряда условий для образования и дальнейшего роста зародышей центров рекристаллизации. В основном этими факторами являются [61 - 64]:

1) величина накопленной пластической деформации. Для каждого материала есть своё значение деформации, при котором начинается рекристаллизация;

2) температура деформации. Рекристаллизации протекает тем быстрее, чем выше температура;

3) степень чистоты материала. Более чистые материалы склонны к рекристаллизации при меньших температурах, что обуславливается стремлением примесных атомов при повышенных температурах сегрегировать на внутренних границах кристаллитов, приводящим к затруднению миграции границ;

4) начальная величина зёрен. Рекристаллизация легче протекает в мелкозернистых материалах, так как межкристаллитные границы, которых в таких металлах несравнимо больше чем в крупнозернистых, являются местами зародышей новых зерен;

5) ориентировка соседних кристаллов. Подвижность границ зависит от их вида (простые, специальные), а также от угла разориентировки (малоугловые, большеугловые).

1.5.3 Механизмы процесса рекристаллизации

Нагрев является причиной протекания таких процессов как возврат, полигонизация и рекристаллизация, целью которых является вернуть металлу или сплаву физические свойства присущие им до деформации [61]. Большинство титановых сплавов невозможно подвергать большим пластическим деформациям без нагрева до высоких температур [65]. Использование указанных высокотемпературных процессов совместно с формоизменением позволяет получать в металлах требуемые свойства и структуру [66]. В процессе термомеханической обработки металлов и сплавов мезо- и микроструктура материала существенно эволюционирует. Значительно изменяется средний размер зерен, морфология, взаиморасположение, ориентация и тип границ, меняется также дислокационная субструктура [61, 62 - 64]. В многофазных материалах существенным фактором в процессе рекристаллизации является взаимодействие разнородных фаз [67–69].

Формирование новых зерен в процессе пластической деформации определяют, как динамическую рекристаллизацию [61, 64, 70, 71]. Форма рекристаллизованных зерен является преимущественно равноосной [72]. Для начала этого процесса необходима критическая деформация. Критическая степень деформации увеличивается с возрастанием скорости и понижением температуры деформации. Увеличение исходного размера зерна повышает этот параметр. В общем случае кинетика динамической рекристаллизации зависит от температурно-скоростных условий деформации и величины исходного зерна конкретного материала. При рекристаллизации происходит резкое уменьшение плотности дислокаций, в результате чего материал разупрочняется – понижается предел текучести. Появляется текстура рекристаллизации – новые зерна имеют преимущественную ориентировку, обусловленную не только внешней нагрузкой, но и условиями проведения термической обработки, а также предшествующей или текущей деформацией [73-76]. Динамическая рекристаллизация может протекать по двум значительно отличающимся механизмам: прерывистая динамическая рекристаллизация и непрерывная динамическая рекристаллизация. Прерывистая рекристаллизация реализуется путем зарождения новых зерен в областях существенных искажений решеток (границы фаз, зерен, двойников, полосы сдвига) и их последующего роста. Этот механизм, протекающий при горячей деформации материалов с пониженной энергией дефектов упаковки (ЭДУ), когда процесс динамического возврата существенно затруднен, описан в работах зарубежных авторов Humphreys F.J., Hardwick D., Luton M.I., Jonas J.J.. Основным фактором реализации процесса является накопленная в процессе деформации внутренняя энергия в виде разности плотности дислокаций в соседних зернах [77, 78]. В процессе пластической деформации в новых зернах происходит увеличение плотности дислокаций, поэтому движущая сила роста границы, наоборот, падает и рекристаллизация прекращается. Другим фактором, замедляющим процесс роста, является столкновение растущих зерен при миграции границ [77].

В материалах с высокой энергией дефекта упаковки, при которой возможна

реализация возврата, происходит непрерывная динамическая рекристаллизация. Указанная рекристаллизация может осуществляться многими способами [77]. Как разновидность непрерывной динамической рекристаллизации выделяют так называемую геометрическую динамическую рекристаллизацию, которая заключается в следующем. В процессе пластической деформации в кристаллах происходит динамический возврат, в результате чего в зернах появляются субзерна, а граница зерен становится «зубчатой» и «волнистой», увеличивая разориентацию между зернами. Далее при больших степенях деформации размер субзерен становится равным размеру исходного зерна, и формируется мелкозернистая структура, где размер зерна равен размеру бывшего субзерна

В работах Бека с соавторами [79, 80] открыт новый механизм рекристаллизации, который осуществляется за счет миграции границ зерен, которые исходно существуют в поликристалле (англ. straininducedboundarymigration, сокр. SIBM). Этот, ранее не изученный, механизм заключается в «выгибании» исходных границ поликристалла от «центра» кривизны границы – механизм SIBM. Существенным отличием механизма SIBM является то, что для его реализации не требуется образования зародышей.

Авторами McDonald D.T., Humphreys J.F., Bate P.S. в работе [81] отмечено, что при больших степенях деформации рекристаллизация по механизму SIBM не протекает, а границы зерен, полученные в результате пластической деформации «выгибаются».

В работе [82] отмечается, что механизмы рекристаллизации существенно зависят от важной характеристики материала – энергии дефекта упаковки. Кроме того, авторы работы Dehghan H., Abbasi S.M., Momeni A., Taheri A.K обращают особое внимание на то, что механизмы динамической рекристаллизации существенно зависят от скорости внешнего нагружения. При низких скоростях деформирования (10^{-3} – 10^{-2} с⁻¹) рекристаллизация проходит за счет непрерывной динамической рекристаллизации, которая следует за активно протекающим динамическим возвратом. В этом случае на кривых деформирования (рис. 1.10) не

образуется ярко выраженный пик.

При более высоких скоростях нагружения рекристаллизация проходит по механизму SIBM. В этом случае на кривой деформирования отчетливо виден спад напряжений, который связывают с образованием мелкозернистой структуры по механизму SIBM и последующим динамическим возвратом в исходных зернах.

В работе [83] авторами отмечается существенная зависимость механизмов

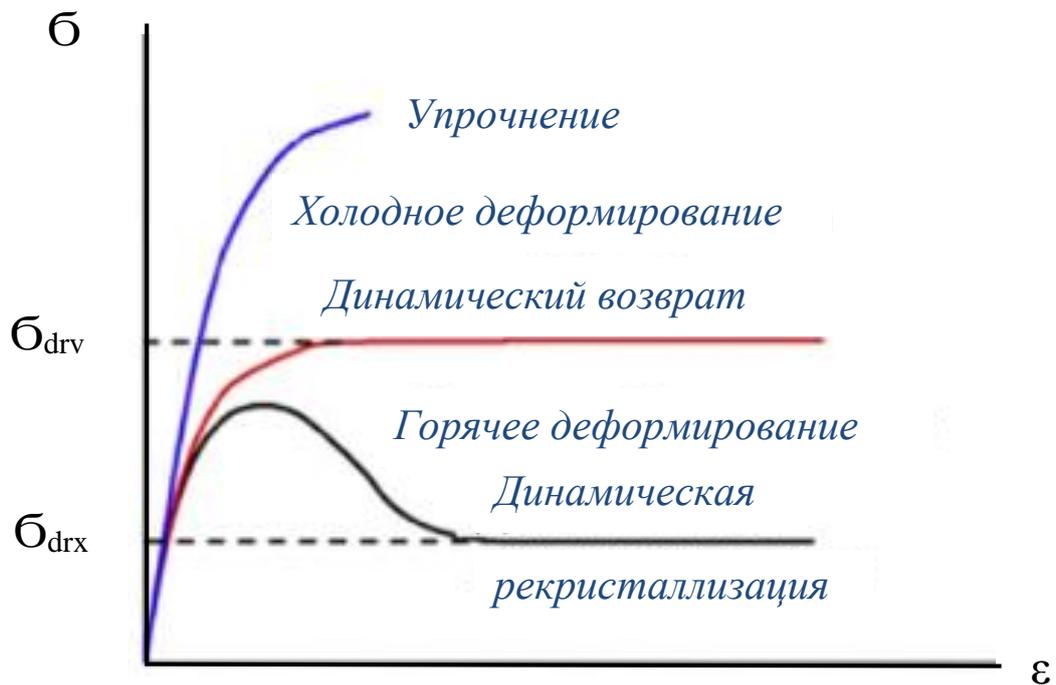


Рисунок 1.10 - Типовая « σ - ϵ » диаграмма нагружения для металлов при различных температурах и процессах высокотемпературного деформирования:

σ_{drv} – характерные напряжения динамического возврата, σ_{drx} – характерные напряжения динамической рекристаллизации

динамической рекристаллизации от температуры и способа пластического деформирования. Экспериментально показано, что формирование зародышей новых зерен происходит миграцией границ старых зерен при обширном формировании полос скольжения. Локализация пластической деформации на микроуровне приводит к формированию выступов на границах исходных зерен. Движущиеся решеточные дислокации захватываются малоугловыми границами

выступов, далее конвертируя их в большеугловые границы. Такой процесс контролируется самодиффузией, что подтверждается тем, что при уменьшении температуры резко падает размер, рекристаллизованных по данному механизму, зерен.

Титановый сплав ВТ6, рассматриваемый в данной работе имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку в α - фазе при температурах до 882,5 °С и объемно-центрированную кубическую в β - фазе при более высоких температурах, следовательно, исследуемый сплав обладает высокой ЭДУ и в нем может протекать непрерывная динамическая рекристаллизация (CDRX). Для активации этого процесса необходимо определить оптимальные температурно-скоростные режимы деформирования.

1.6 Выводы по главе. Постановка цели и задач исследования

На основании выше изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что самыми массовыми деталями ГТД (как авиационного, так и наземного применения), имеющей сложную геометрию, являются лопатки компрессора. Лопатки компрессора, исходя из условий их работы, изготавливают из жаропрочных, жаростойких, высоколегированных сплавов. Наибольшую трудность в обработке представляют собой титановые сплавы. В настоящее время имеет место высокая трудоемкость изготовления и низкий коэффициент использования металла при производстве лопаток компрессора. Поэтому перспективным является направление оптимизации заготовок лопаток с целью увеличения КИМ и снижения трудоемкости их механической обработки. Способом достижения данных целей является освоение и внедрение в производство современных методов пластической деформации, таких как изотермическая штамповка, штамповка в условиях сверхпластичности и штамповка лопаток под безразмерную обработку профиля пера.

2. Установлено, что при внедрении в производство точной изотермической штамповки существует проблема низкой стойкости ковочных штампов. Это связано со спецификой процесса формообразования, который происходит при высоких температурах. Причиной ускоренного износа ковочных штампов являются необратимые деформации рабочей части гравюры, так называемое «проседание», из-за высоких контактных напряжений, возникающих на её поверхности в процессе штамповки. После чего вставки нуждаются в восстановлении требуемых размеров и в доводке. Причиной «проседания» гравюры инструмента является высокотемпературная ползучесть штампового материала при циклическом нагружении сжатием. При этом наибольшие напряжения возникают в районе S_{max} пера лопатки. Решением данной проблемы может быть уменьшение нагрузки на штамп за счет увеличения пластичности штампуемого материала. Согласно зависимости Холла-Петча сопротивление деформации металла напрямую зависит от размера его зерен.

3. Установлено, что существует множество способов получения ультрамелкозернистой структуры в металлах такие как: РКУ прессование, всесторонняя изотермическая ковка, деформация кручением, винтовая экструзия. Данные методы имеют множество недостатков, которые затрудняют внедрение их в серийное производство.

4. Установлено, что эффективным способом фасонирования заготовок под дальнейшую штамповку является выдавливание, которое позволяет существенно сократить количество переходов по сравнению, например, с высадкой, кроме того позволяет получать более точные заготовки.

5. Установлено, что получение УМЗ структуры в металлических заготовках возможно за счет оптимизации температурно - скоростных режимов при пластическом деформировании, обеспечивающих протекание процесса динамической рекристаллизации. Динамическая рекристаллизация может проходить по различным схемам и поэтому важной задачей является определение тех режимов, при которых будет происходить одновременно и фасонирование

заготовки под дальнейшую штамповку и получение ультрамелкозернистой структуры.

Таким образом, целью работы является повышение размерной точности штамповок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 и стойкости штампового инструмента за счет совершенствования технологического процесса штамповки.

Для реализации этой цели необходимо решить следующие научно-технические задачи.

1. Исследовать влияние технологических режимов процесса деформирования на формирование мелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6.
2. Исследовать влияние структуры титанового сплава на сопротивление деформации при температуре деформации.
3. Разработать технологический процесс изготовления заготовок лопаток ГТД из титанового сплава под безразмерную обработку профиля пера.
4. Оценить стойкость штампового инструмента при использовании усовершенствованного технологического процесса.
5. Апробировать установленные закономерности при производстве заготовок лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов производственных условиях.

ГЛАВА 2 Материалы и методы исследования

2.1 Методика исследования процесса прямого изотермического выдавливания с применением программного комплекса QForm 3D

Разработка технологических процессов обработки металлов давлением сопряжена с необходимостью определения расчетным путем усилия, работы и мощности деформации. Также, для расчета прочности и износостойкости кузнечного инструмента нужно знать контактные (на поверхностях деформируемый металл - инструмент) нормальные и касательные напряжения. Необходимо также определять достигаемые степени деформации за одну операцию или переход и суммарную деформацию, накопленную за весь цикл обработки металлов давлением с тем, чтобы не произошло разрушение заготовок при деформировании [84]. Как отмечает Унксов Е.П. в книге [85], первоначально основной задачей, решаемой теорией обработки металлов давлением, было отыскание способов достаточно простого определения усилий, требуемых для выполнения основных операций процессов обработки давлением. Стремление получать решения максимально простые, но в то же время обладающие приемлемой для практики точностью, привело к разработке нескольких методов:

- Метод основанный на совместном решении приближённых уравнений равновесия и пластичности;
- Метод линий скольжения или характеристик;
- Метод анализа операций, основанный на равенстве работ внешних и внутренних сил, на возможных перемещениях с использованием 22 вариационных принципов для отыскания кинематических полей и усилий деформирования, удовлетворяющих заданным условиям нагружения;
- Метод конечных элементов [85].

В настоящее время компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением (ОМД) методом конечных элементов (МКЭ) доказало свою эффективность [86]. Сущность МКЭ заключается в следующем: применительно к плоской задаче система уравнений равновесия, условия пластичности и граничных условий на поверхности деформируемого объекта заменяется эквивалентным ей выражением принципа возможных перемещений для приращения напряженного состояния. Деформируемая область металла разбивается на конечные элементы. Точность метода тем выше, чем на большее количество элементов разбита область деформирования. Таким образом, могут быть вычислены напряжения и деформации в каждой точке деформируемого объекта.

Кроме того, существует необходимость прогнозировать изменение температуры по сечению заготовки вследствие деформационного разогрева. В данном случае, пожалуй, единственным способом количественно оценить происходящее за время процесса изменение температурного поля в очаге пластической деформации является компьютерное моделирование.

Для исследования напряженно-деформированного состояния и величины деформационного разогрева заготовки при прямом изотермическом выдавливании используем программный комплекс Q Form 3D. Данный комплекс позволяет производить расчет холодной, теплой и горячей объемной штамповки. Количество инструментов может быть задано до 20 с произвольным направлением движения. Высокая точность расчета течения металла. Предсказывается возникновение различных штамповочных дефектов, таких как не заполнение гравюры, зажимы и прострелы и утяжины. Характер течения металла может быть оценен по рассчитываемым Лагранжевым линиям в заготовке. Геометрия инструмента и заготовки в процессе расчета течения металла аппроксимируется квадратичными поверхностными конечными элементами. Сетка внутри заготовки и инструментов создается на основе линейных тетраэдров. Для 3D расчёта исходные геометрические данные импортируются в QShape — трёхмерный графический модуль QForm, из CAD систем пользователя в формате STEP/IGES. Полностью

автоматическое создание первоначальной адаптированной конечно-элементной сетки. В процессе расчета сетка перестраивается автоматически без вмешательства пользователя. Процесс пошагового расчета производится с полной автоматической настройкой шага и приращения. Заготовка рассматривается как жестко-пластическое тело, деформируемое в неизотермических условиях. Инструмент рассчитывается как упруго-пластическое тело в изотермических условиях. Сопротивление деформации материала заготовки зависит от деформации, температуры и скорости деформации. Другие свойства материала, такие как плотность, теплопроводность, теплоемкость, модуль Юнга, предел текучести, зависят от температуры. В Базе Данных QForm содержатся более 1000 марок сталей, а также другие сплавы на основе цветных металлов. Деформация заготовки может быть посчитана на механическом, эксцентриковом или кривошипном прессах, молотах, как шаботных, так и бесшаботных, винтовых и гидравлических прессах. Параметры процесса (время, конечное положение инструментов, температура и т. д.) задаются с помощью интуитивно-понятного помощника задания исходных данных, обеспечивающего полноту данных и предохраняющего от ошибок [87].

Для задания геометрии модели инструмента и заготовки возможно использование так называемых булевых операций непосредственно в программном комплексе QForm 3D и создание двух/трехмерных моделей в специальных автоматизированных программах для инженерного проектирования. Использование специальных автоматизированных программ позволяет создавать более сложные модели, так как они оснащены специальными инструментами, обеспечивающими создание практически любых конфигураций модели. Для создания моделей заготовки и оснастки, использовалась система автоматизированного проектирования NX (Unigraphics). Создание моделей осуществлялось с учетом геометрического подобия с масштабным фактором =1. После построения модели импортировались в программный комплекс QForm 3D.

Одним из основных параметров, характеризующих точность расчета, является

конечно-элементная сетка. Общее количество конечных элементов выбрано равным 30000, что позволяет производить расчет с достаточной точностью (рис. 2.1). После построения сетки необходимо задать материал заготовки и инструмента. Механическое поведение деформируемого тела при деформировании описано моделью пластического поведения. Материал оснастки и заготовки задается выбором из базы данных программы. Для оснастки использован жаропрочный сплав ЖС6У, для заготовки выбран титановый сплав ВТ6. Моделирование осуществлялось при изотермических условиях (температура окружающей среды принимается равной температуре инструмента и заготовки =800 °С).



Рисунок 2.1 - Вид заготовки, разбитой на конечно элементную сетку

Следует отметить, что процесс изотермического деформирования характеризуется применением специальных стеклосмазок с целью уменьшения контактного трения, предотвращения схватывания материалов заготовки и

инструмента, а также для защиты поверхности заготовки от образования дефектного слоя [88]. Исходя из выше указанных особенностей, коэффициент трения был задан равным 0,2.

Далее задается инструмент, который будет осуществлять деформирование и для него задаются скорость и направление движения. Таким инструментом будет являться пуансон, скорость перемещения которого вдоль оси z будет постоянна. Остальные составляющие инструмента будут не подвижны.

После задания всех параметров процесса устанавливается количество шагов расчета с соотношением шага ко времени или перемещению, после чего модель задается на расчет.

2.2 Разработка способа получения мелкозернистой структуры в заготовках

Как было указано в главе 1, способом получения мелкозернистой структуры в заготовке под изотермическую штамповку лопатки под безразмерную обработку профиля пера предложено изотермическое выдавливание с большим коэффициентом вытяжки при режимах, обеспечивающих протекание процесса динамической рекристаллизации, которая в свою очередь совместно с большими степенями деформации позволит достичь измельчения структуры. Как видно из анализа, проведенного выше, на формирование структуры при выдавливании будут оказывать влияние: температура, скорость деформации и степень деформации.

Для определения условий протекания процесса динамической рекристаллизации при изотермическом прямом выдавливании двухфазного титанового сплава типа ВТ6 необходимо проведение экспериментов. Для того, чтобы реализовать рациональное количество опытов с различными исходными данными нужно определить число и условия проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. С этой целью необходимо:

- стремиться минимизировать общее число опытов;
- одновременно варьировать всеми переменными, определяющими процесс, по специальным правилам;
- использовать математический аппарат, формализующий многие действия;
- выбрать четкую стратегию, позволяющую принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов.

Методы планирования эксперимента подробно рассмотрены в работах Адлера Ю.П., Красовского Г.И., Барабашука В.И.. Использование данных методов при проведении исследований позволяет минимизировать число необходимых испытаний, установить рациональный порядок и условия проведения исследований в зависимости от их вида и требуемой точности результатов.

Планирование эксперимента включает ряд этапов:

- 1) установление цели эксперимента и его вида.
- 2) уточнение условий проведения эксперимента (возможность применения имеющегося оборудования, финансовые и людские ресурсы).
- 3) выбор вида испытаний (нормальные, ускоренные, в лаборатории, на стенде и т.п.)
- 4) выявление и выбор входных и выходных данных на основе сбора и анализа исходной информации. Входные параметры могут быть регистрируемыми и управляемыми, и случайными. Наряду с ними на состояние исследуемого объекта могут оказывать влияние нерегистрируемые и не управляемые параметры, которые вносят систематическую или случайную погрешность в результаты измерений.
- 5) установление потребной точности результатов измерений. Выбирается вид образцов или исследуемых объектов, учитывая степень их соответствия реальному изделию по форме, устройству, размерам и т.п. Точность экспериментальных данных также существенно зависит от объема (числа) испытаний – чем испытаний больше, тем (при тех же условиях) выше достоверность результатов.
- б) составление плана и проведение эксперимента – количество и порядок испытаний, способ сбора, хранения и документирования данных. В зависимости от

выбранной последовательности действий при экспериментальном поиске оптимального соотношения параметров объекта или какого-то процесса может потребоваться больше или меньше опытов. Эти экспериментальные задачи подобны математическим задачам численного поиска оптимальных решений. Наиболее хорошо разработаны методы одномерного поиска (однофакторные однокритериальные задачи), такие как метод Фибоначчи, метод золотого сечения.

7) статистическая обработка результатов эксперимента, построение математической модели поведения исследуемых характеристик.

Обработка результатов включает:

- Определение доверительного интервала среднего значения и дисперсии (или среднего квадратичного отклонения) величин выходных параметров (экспериментальных данных) для заданной статистической надежности;
- Проверка на отсутствие ошибочных значений (выбросов), с целью исключения сомнительных результатов из дальнейшего анализа;
- Проверка соответствия опытных данных ранее априорно введенному закону распределения. В зависимости от этого подтверждаются выбранный план эксперимента и методы обработки результатов, уточняется выбор математической модели;
- Объяснение полученных результатов и формулирование рекомендаций по их использованию, уточнению методики проведения эксперимента [89].

Эксперимент относится:

1. По способу формирования относится – к искусственному;
2. По целям исследования – к поисковым;
3. По организации проведения – к лабораторным;
4. По структуре изучаемых объектов и явлений – к сложным;
5. По характеру внешних воздействий на объект – к вещественным;
6. По характеру взаимодействия средства экспериментального исследования с объектом исследования – к модельному;
7. По типу моделей, исследуемых в эксперименте – к материальным;

8. По контролируемым величинам – к активным;
9. По числу варьируемых факторов – к многофакторным;
10. По характеру изучаемых объектов или явлений – к технологическим.

Интересующее свойство (y_1, y_2) объекта зависит от нескольких независимых переменных (x_1, x_2, \dots, x_n) и мы хотим выяснить характер этой зависимости – $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, о которой мы имеем лишь общее представление. Величина y – называется «отклик», а сама зависимость $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – «функция отклика».

Интервал варьирования факторов рассчитывается по формуле (3):

$$x_i = (\dot{y}_i - \dot{y}_{i0}) / J_i, \quad (3)$$

где

x_i – кодированное значение фактора;

\dot{y}_i – натуральное значение фактора;

\dot{y}_{i0} – натуральное значение основного уровня;

J_i – интервал варьирования;

i – номер фактора.

При полном факторном эксперименте варьирование факторов происходит на двух уровнях. В этом случае если число факторов известно можно найти число уровней факторов по формуле (4) [90]:

$$N = 2^k, \quad (4)$$

где

N – число опытов;

k – число факторов;

2 – число уровней.

$$N = 2^3 = 8.$$

На основании анализа литературных источников варьируемыми параметрами

определены: степень деформации (коэффициент вытяжки - λ), средняя скорость деформации (V) и температура изотермического выдавливания ($T_{\text{деф}}$, °C). Результатом эксперимента является уравнение регрессии $d = f(\lambda; V; T_{\text{деф}})$, где функция отклика d - размер зерна.

Таблица 2.1 - Матрица планирования полного факторного эксперимента 2^3

№ опыта	x_1	x_2	x_3	y
1	+	-	-	y_1
2	+	+	-	y_2
3	+	-	+	y_3
4	+	+	+	y_4
5	-	-	-	y_5
6	-	+	-	y_6
7	-	-	+	y_7
8	-	+	+	y_8

Знак (+) говорит о том, что во время опыта значение фактора устанавливают на верхнем уровне, а знак (-) показывает, что значение фактора устанавливают на нижнем уровне.

То, что записано в данной матрице в алгебраической форме можно изобразить геометрически. Найдем в области определения факторов точку, соответствующую основному уровню, и проведем через нее новые оси координат, параллельные осям натуральных значений факторов. Далее, выберем масштабы по новым осям так, чтобы интервал варьирования для каждого фактора равнялся единице. Тогда условия проведения опытов будут соответствовать вершинам квадрата, центром которого является основной уровень, а каждая сторона параллельна одной из осей

координат и равна двум интервалам. Номера вершин квадратов соответствуют номерам опытов в матрице планирования (рис. 2.2):

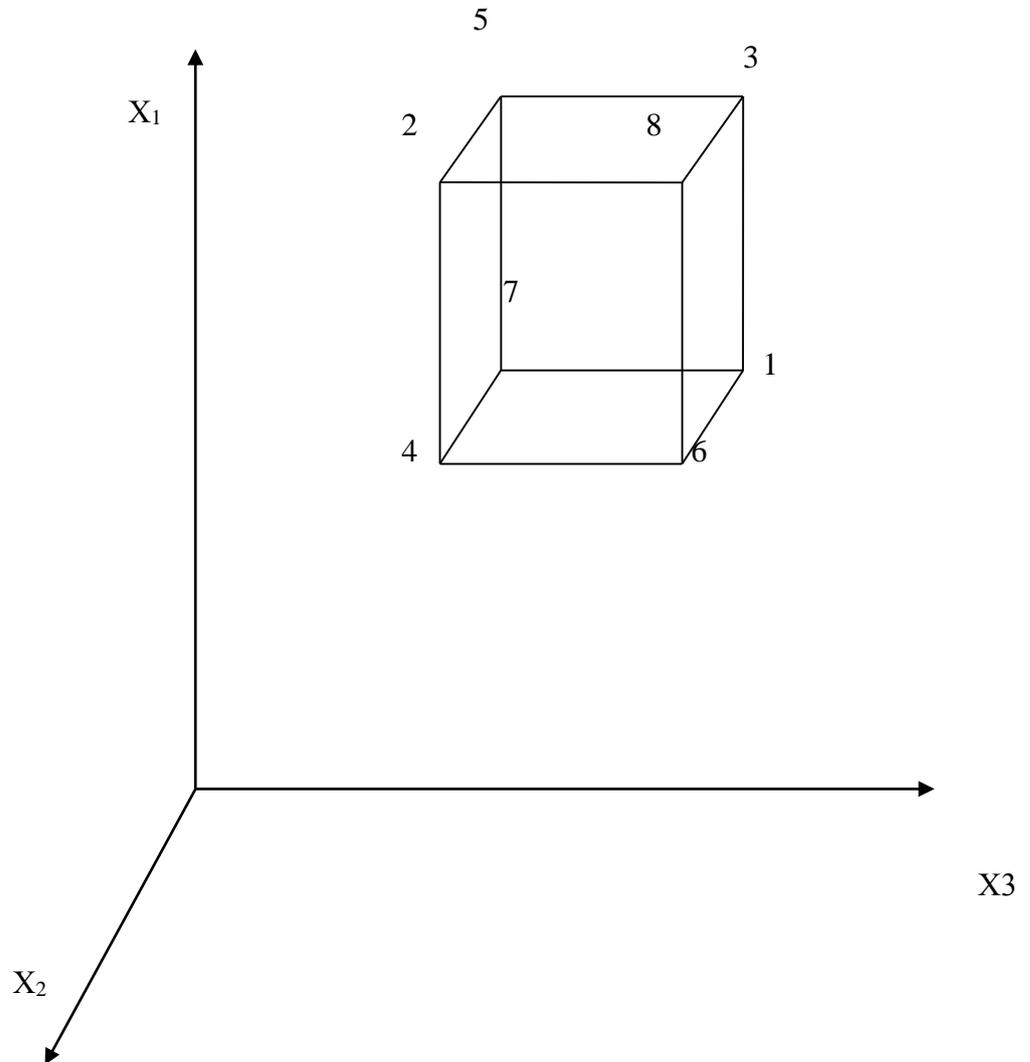


Рисунок 2.2 – Геометрическое изображение полного факторного эксперимента 2^3

Матрицу можно упростить, применив буквенные обозначения.

Примем: $x_1 - a$; $x_2 - b$; $x_3 - c$; y – значение исследуемой величины при проведении эксперимента, опыт со всеми факторами на нижних уровнях обозначается (1), получим матрицу, представленную в таблице 2.2

Таблица 2.2 - Упрощенный вид матрицы планирования эксперимента

№ опыта	x ₁	x ₂	x ₃	Буквенные обозначения строк	y
1	+	-	-	a	y ₁
2	+	+	-	ab	y ₂
3	+	-	+	ac	y ₃
4	+	+	+	abc	y ₄
5	-	-	-	(1)	y ₅
6	-	+	-	b	y ₆
7	-	-	+	ac	y ₇
8	-	+	+	bc	y ₈

Для движения к точке оптимума нам нужна линейная модель (5):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (5)$$

где

$$b_0 = ((+1)y_1 + (+1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4 + (+1)y_5 + (+1)y_6 + (+1)y_7 + (+1)y_8) / 8;$$

$$b_1 = ((-1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4 + (-1)y_5 + (-1)y_6 + (+1)y_7 + (+1)y_8) / 8;$$

$$b_2 = ((-1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4 + (-1)y_5 + (+1)y_6 + (-1)y_7 + (+1)y_8) / 8;$$

$$b_3 = ((+1)y_1 + (-1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4 + (-1)y_5 + (+1)y_6 + (+1)y_7 + (-1)y_8) / 8.$$

Однако линейная модель может не соответствовать требованиям точности при описании модели реального процесса. Один из часто встречающихся видов нелинейности связан с тем, что эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор. Имеет место эффект взаимодействия двух факторов. В этом случае составляется уравнение регрессии. Для полного

факторного эксперимента 2^3 матрица планирования с учетом эффекта взаимодействия представляется следующим образом:

Таблица 2.3 - Матрица планирования с учетом эффекта взаимодействия

№ Опыта	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	-	-	+	-	-	+	y_1
2	+	+	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	y_4
5	-	-	-	+	+	+	-	y_5
6	-	+	-	-	+	-	-	y_6
7	-	-	+	-	-	+	-	y_7
8	-	+	+	+	-	-	-	y_8

Полное число всех возможных эффектов, включая b_0 , линейные эффекты и взаимодействия всех порядков, равно числу опытов полного факторного эксперимента. Эффекты взаимодействия характеризуют взаимосвязь факторов в процессе, т.е. влияние i -го фактора на связь l -го фактора с параметром оптимизации. Чтобы найти число возможных взаимодействий некоторого порядка, можно воспользоваться формулой (6) числа сочетаний:

$$C_k^m = k! / (m!(k-m)!), \quad (6)$$

где

k – число факторов;

m – число элементов во взаимодействии.

Тогда количество двойных и тройных эффектов взаимодействия соответственно равно:

$$C^2_3=3!/(2!(3-2))!=3;$$

$$C^3_3=3!/(3!(3-3))!=1$$

Теперь модель выглядит следующим образом:

$$y=b_0+b_1x_1+ b_2x_2+ b_3x_3+b_{12}x_1x_2+ b_{13}x_1x_3+ b_{23}x_2x_3+ b_{123}x_1x_2x_3, \quad (7)$$

где

$$b_{12}=(+1)y_1+(-1)y_2+(-1)y_3+(+1)y_4+(+1)y_5+(-1)y_6+(-1)y_7+(+1)y_8)/8;$$

$$b_{13}=((-1)y_1+(-1)y_2+(+1)y_3+(+1)y_4+(+1)y_5+(+1)y_6+(-1)y_7+(-1)y_8)/8;$$

$$b_{23}=((-1)y_1+(+1)y_2+(-1)y_3+(+1)y_4+(+1)y_5+(-1)y_6+(+1)y_7+(-1)y_8)/8;$$

$$b_{123}=(+1)y_1+(+1)y_2+(+1)y_3+(+1)y_4+(-1)y_5+(-1)y_6+(-1)y_7+(-1)y_8)/8.$$

2.3 Методы исследования структуры образцов

Методы структурного исследования материалов позволяют изучить структуру материала, а также изучить влияние температуры нагрева, скорости деформирования и коэффициента вытяжки на её формирование. При микроскопическом анализе структура исследуется под оптическим микроскопом с большим увеличением. В ходе микроанализа изучаются расположение и размеры зёрен, отдельные составляющие структуры металла, выявляются наличие и характер посторонних включений, мелких дефектов и т.п. Перед проведением микроанализа подготавливаются специальные микрошлифы-образцы, вырезанные из детали. Их поверхность полируется до зеркального блеска и протравливается специальными реактивами. Образцы для оценки микроструктуры вырезались из стержня выдавленной заготовки в поперечном направлении. Для исследования заготовок, полученных изотермическим выдавливанием, использовали метод оптической металлографии.

2.3.1 Методика подготовки микрошлифов для выявления границ зерен

Металлографический анализ проводили с использованием оптического микроскопа Nikon EPIPHOT 200 при увеличении $\times 100 \dots \times 1000$.

Металлографические шлифы изготавливали с использованием комплекса оборудования для пробоподготовки ф.STRUERS. Образцы вырезали на отрезном станке Discotom-6 и запрессовывали в фенольную смолу. Для запрессовки использовали автоматический пресс CitoPress –20. Запрессовку проводили при температуре 180 °С и давлении 250 Бар. Шлифование и полирование проводили на автоматическом полировальном станке TegraPol.

После полирования шлифы промывали под струей воды и очищали в ультразвуковой мойке Metason. Остатки влаги удаляли при помощи фильтровальной бумаги.

Для выявления микроструктуры исследуемых образцов использовали метод химического травления поверхности реактивом след. состава: азотная кислота 20 см³, плавиковая кислота 10 см³, вода 70 см³.

2.3.2 Методика выявления и определения величины зерна

Существует разные подходы к определению формы и размеров зерен в поликристаллах [91-94]. Так в работе [95] предложены пространственные модели: кубический октаэдр и тетракайэдрон Р.Вильямса. Не существует единого метода для оценки размера зерна. Поэтому необходимо выбирать метод в зависимости от поставленных задач. Существует несколько методов [96]:

- Метод подсчета зерен (планиметрический метод)
- Метод секущих
- Метод, основанный на построении гистограмм распределения размеров зерен
- Метод сравнения с эталонными шкалами

- Фактографический метод

Для определения величины зерна в исследуемых образцах был применен метод измерения длин хорд по ГОСТ 5639—82. Метод основан на замере линейных размеров отрезков — хорд, отсекаемых в зернах прямыми линиями, и применяется для определения величины зерна в разнотельной структуре.

Замер длин хорд проводят: непосредственно под микроскопом при помощи окуляра с линейкой (метод подвижного шлифа) по одной или нескольким линиям в произвольном направлении на шлифе; на микрофотографии. Замер проводят не менее чем в пяти наиболее типичных полях зрения, при этом в каждом поле зрения проводят не менее трех прямых в произвольном направлении. Общее количество измерений зависит от однородности величины зерна, требуемой точности и достоверности результатов. Так, например, при принятой достоверности 90 % и ошибке 10 % общее количество пересеченных зерен должно быть не менее 250, при достоверности 90 % и ошибке 5 % — не менее 1000.

Значения длин хорд относят к определенной размерной группе. Рекомендуется величину линейных размеров в группах представлять в виде геометрического ряда с коэффициентом 1,45. В этом случае размерные группы соответствуют размерам зерен — номерам (G) по среднему условному диаметру. Подсчитывают количество длин хорд каждого размера по всем линиям (рис. 2.3). Определяют относительную долю зерен в процентах с определенной длиной хорды по формуле (8):

$$\frac{l \cdot n}{\sum l_i \cdot n_i} \cdot 100\% \quad (8)$$

где l — длина хорды, мм;

n — количество зерен с длиной хорды l ;

$\sum l_i \cdot n_i$ — общая длина хорд, мм.

$$\sum l_i \cdot n_i = l_1 \cdot n_1 + l_2 \cdot n_2 + l_3 \cdot n_3 \dots l_n \cdot n_n \quad (9)$$

В соответствии с законами математической статистики могут быть также подсчитаны следующие параметры: средний условный диаметр (средний размер хорды \bar{l}), среднеквадратическое отклонение от среднего (S), коэффициент вариации (δ) и др. При этом средний условный диаметр не является характеристикой разнотельной структуры.

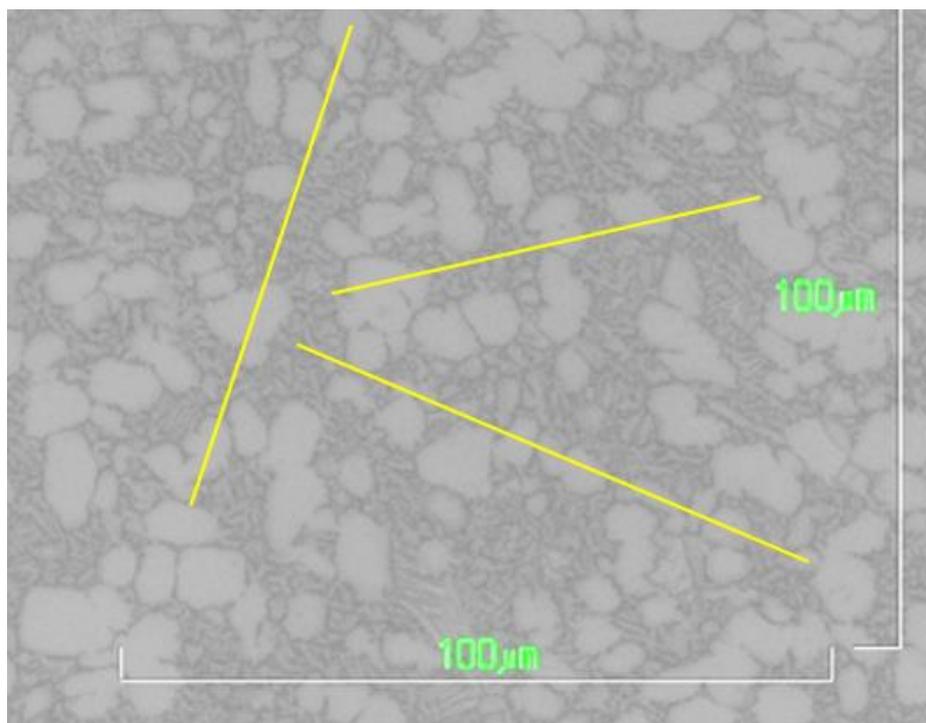


Рисунок 2.3 – схема определения размера зерна по методу длин хорд

2.4 Методика построения кривых упрочнения титанового сплава ВТ6

Стандарт [97], регламентирующий испытания металлов и сплавов и направленный на получение данных об их механических свойствах в своей структуре, содержит следующие основные части: требования к образцам для испытаний; требования к используемому оборудованию, режимам испытаний, измерительной аппаратуре; требования к фиксации и форме представления, а также к обработке получаемых результатов. Данные разделы вполне удовлетворяют

требованиям поставленных задач по изучению механических свойств заготовок, полученных методом изотермического выдавливания.

Испытания на сжатие проводились на универсальной испытательной динамической машине «LABTEST 6.125H.50», представленной на рисунке 2.4.

Испытательная машина предназначена для использования в лабораториях предприятий и исследовательских лабораториях. Она позволяет проводить испытания материалов на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдирающие, отрывающие, проникающие и трущие испытания со статическим и динамическим приложением нагрузки на образцы и целые изделия.

Процессор и монитор, входящие в комплект установки существенно повышают ее возможности, как в смысле управления, так и обработки, сохранения и представления наглядных результатов испытаний. В машине используется программное обеспечение под названием Test&Motion, которое представляет собой современное программное обеспечение с 32-битной технологией для работы под управлением операционных систем Microsoft Windows 95/98/NT/2000/XP. Данное программное обеспечение было разработано для контроля при помощи компьютера следующих основных задач: записей данных и проверку устройств для испытания материалов; испытания материалов в соответствии с обычными нормами или стандартами (DIN, EN, ...); для оценки проводимых испытаний. Чаще всего испытания материалов производятся согласно нормам или стандартам, которые нужно выбрать заранее. При их выборе задается следующее: стандарт выполнения испытаний; алгоритм контроля прибора во время испытания; результаты, которые должны быть получены в ходе испытания. В процессе испытания можно записать до 14-и измеренных значений.

Эти 14 измеренных значений представляют собой 6 стандартных значений: время испытания; положение траверсы; нагрузка; удлинение; относительная деформация при растяжении; напряжение. И до 8-и величин по выбору пользователя. В некоторых случаях несколько стандартных величин можно отключить, если они не предусмотрены выбранной нормой. Также существуют

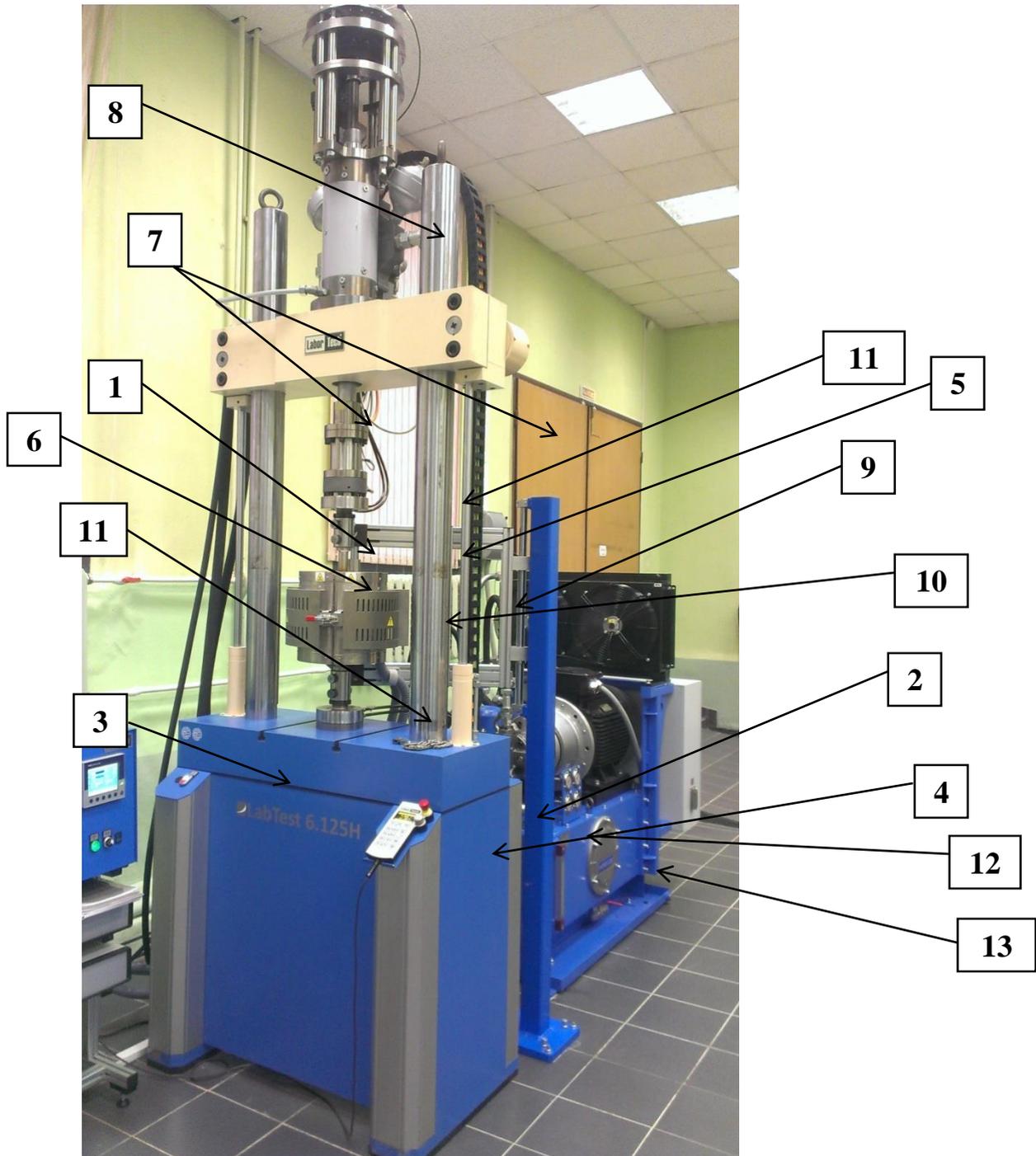


Рисунок 2.4 - Универсальная испытательная динамическая машина «LABTEST 6.125H.50»:

1 – испытательная силовая рама; 2 – главный выключатель; 3 – панель управления; 4 – устройство дистанционного управления RMC7; 5 – испытательное устройство; 6 – датчик силы; 7 – датчик крутящего момента; 8 – цилиндр осевого кручения; 9 – высокотемпературная печь и пульт управления; 10 – контрольно-измерительная аппаратура; 11 – охлаждающее устройство; 12 – тренога печи; 13 – гидроагрегат.

пользовательские значения двух типов. Это фиксированные программируемые значения (производитель создал конфигурацию программного обеспечения таким образом, что норма вычисления значения является фиксированной и не может быть изменена во время работы программы) и произвольно задаваемые значения, когда пользователь может задать величину в процессе работы программы. В обоих случаях можно запрограммировать практически любые зависимости.

Программное обеспечение Test&Motion работает с тремя разными типами документов: исходные значения; измеренные значения; результаты испытания. На рисунке 2.5 показано окно задания параметров программы Test&Motion исходные значения определяют все типы настроек испытания (ход процесса и расчет результатов).

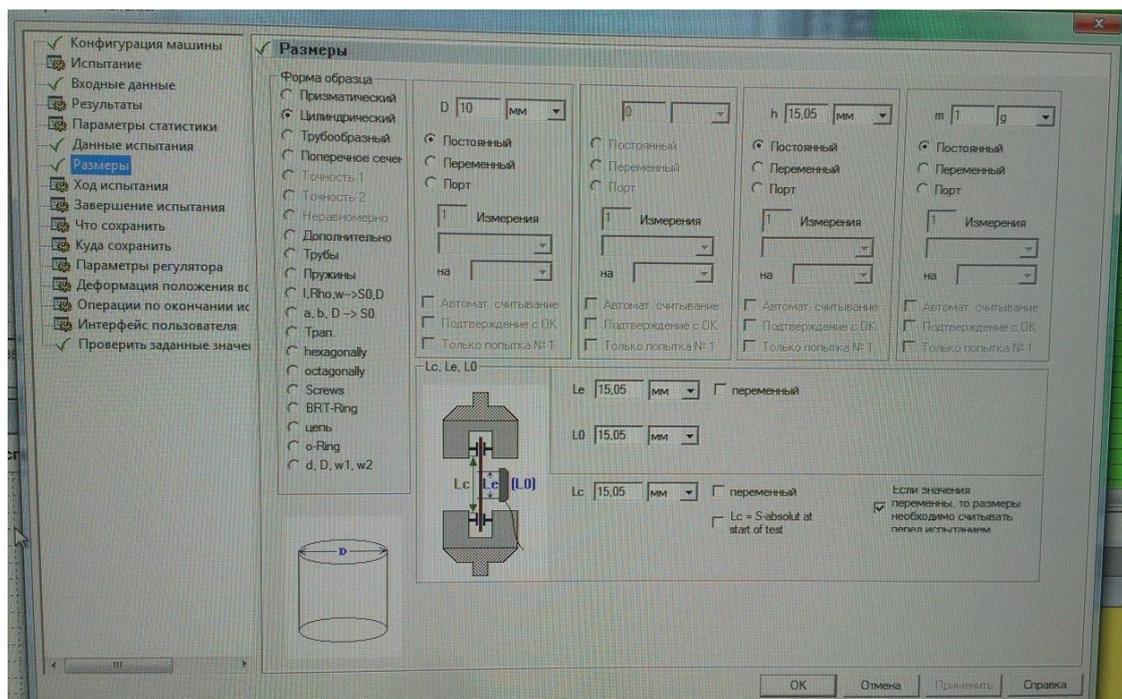


Рисунок 2.5 - Окно задания параметров программы Test&Motion

Измеренные значения содержат исходные значения с измерениями, записанными в ходе испытания. Ход процесса отображается в окнах документа с измеренными значениями и отображением измеренных значений. Результаты испытания содержат исходные значения и результаты серии испытаний. Можно рассчитать статистику по результатам. Результаты и статистика отображаются в

соответствующем окне документа. Данные документа можно сохранить в файл (на жестком диске или внешнем диске) и вызвать позже. Все файлы, созданные в Test&Motion, содержат примечание с указанием нормы, согласно которой проведено испытание. Если попытаться загрузить файл с другой нормой, программа запросит, нужно ли перейти на другую норму испытания.

Правила проведения испытания образцов на сжатие, обработки диаграммы записывающего устройства, а также форма представления полученных результатов регламентируются стандартом [97] при обычной нормальной температуре. При этом стандарт проведения испытаний на сжатие при повышенных температурах как таковой отсутствует, т. к. стандарт "Метод испытания на осадку" [98] хотя и распространяется на область повышенных и пониженных температур. Тем не менее, он служит только для определения способности металла выдерживать заданную относительную степень деформации, а также для выявления поверхностных дефектов.

Испытательная машина оснащена высокотемпературной нагревательной печью, которая позволяет производить испытание на сжатие при температурах до 1300_{-10}^{+10} °С в основном тех же самых механических характеристик, что и при испытании на растяжение: напряжение течения (напряжение, превышающее предел текучести, определяемое отношением нагрузки к действительной для данного момента испытаний площади поперечного сечения образца при равномерном деформировании) – σ_s ; модуль упругости при сжатии – E^C ; предел пропорциональности при сжатии – σ_{III}^C ; предел упругости при сжатии – $\sigma_{0,05}^C$; предел текучести (физический) при сжатии; – σ_T^C ; условный предел текучести при сжатии – $\sigma_{0,2}^C$; предел прочности при сжатии – σ_B^C ; показатель деформационного упрочнения – n.

В стандарте [97] в области применения указано, что стандарт устанавливает методику испытания образцов на сжатие для построения кривой упрочнения,

определения математической зависимости между напряжением течения σ_s и степенью деформации ε_ℓ , и оценки параметров степенного уравнения (10):

$$\sigma_s = \sigma_{s1} \varepsilon_\lambda^n, \quad (10)$$

где

$$\varepsilon_\lambda = \ln \frac{h_K}{h_0}; \quad (11)$$

σ_{s1} – напряжение течения определяемое графически при $\varepsilon_\ell^n = 1$;

n – показатель деформационного упрочнения.

Допускается использование величины относительной деформации, определяемой по формуле (10):

$$\delta = \frac{h_0 - h_K}{h_0}; \quad (12)$$

Кривую упрочнения рекомендуется строить в следующих координатах: ордината – напряжение течения σ_s ; абсцисса – логарифмическая деформация ε_ℓ или в двойных логарифмических координатах, $\lg \sigma_s - \lg \sigma_\ell$.

Также в стандарте имеют место и другие рекомендации в соответствии с которыми напряжение течения σ_s рассчитывают по формуле (13) [38]:

$$\sigma_s = \frac{P}{F_K}, \quad (13)$$

где

P – осевая сжимающая нагрузка;

F_K – конечная площадь поперечного сечения цилиндрического образца после испытания до заданной деформации или при разрушении.

ГЛАВА 3 Исследование процесса изотермического выдавливания титанового сплава ВТ6

3.1 Разработка плана эксперимента и обоснование варьируемых параметров

Для определения влияния технологических режимов процесса изотермического выдавливания на формирование мелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6 необходимо провести компьютерное моделирование и физические эксперименты. Как было сказано в главе 2 необходимо провести полный факторный эксперимент, определяющий влияние режимов штамповки на формирование зерна и его размера.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения математической модели процесса [99]. При этом важно учитывать следующее: стремление к минимизации числа опытов; одновременное варьирование всех переменных, определяющих процесс; выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов. Перед проведением планирования активного эксперимента необходимо собрать дополнительную информацию об варьируемых параметрах, для получения которой используются навыки и знания, которые получены ранее в предыдущих исследованиях или описаны в литературе.

Из анализа литературных источников, проведенного в главе 1 выделены для дальнейшего исследования следующие факторы: коэффициент вытяжки при выдавливании (λ), скорость деформирования (V), которая равна скорости перемещения инструмента и температура деформации ($T_{\text{деф}}$).

Так исходя из соотношений площадей поперечных сечений замковой части лопатки и её пера задаем интервал изменения коэффициента вытяжки (λ) при выдавливании от 1,96 до 7,84.

Скорость деформирования лимитируется возможностями имеющегося в нашем распоряжении оборудования и исходя из его характеристик (таб. 3.1) и рассматриваемый интервал будет изменяться от 0,1 до 0,3 мм/с.

Таблица 3.1 – Технические характеристики прессы для изотермической штамповки мод. SH 630x1200 фирмы Schuler

№ п/п	Наименование параметра	Величина	Ед. изм.
1	Номинальное усилие прессы	6300	МПа
2	Максимальный ход траверсы	800	мм
3	Скорость траверсы		
	- Холостой ход	30	мм/с
	- Рабочий ход	0,05-0,5	мм/с
	- Обратный ход	30	мм/с
4	Расстояние между колоннами в свету	1250x1120	мм
5	Габариты прессы	2580x2180x6900	мм
6	Высота прессы над уровнем пола	6000	мм
7	Масса прессы	50000	кг

Согласно [100] (таб. 3.2) температура начала рекристаллизации сплава ВТ6 составляет 850 °С. Исходя из этих данных задаем интервал температур для

исследований от 800 °С до 930 °С.

Таблица 3.2 – Режимы термообработки титанового сплава ВТ6 [100]

Марка	Температура A_c , °С	Температура рекристаллизации, °С		Температура отжига, °С	
		начало	окончание	листы	штамповки
ВТ6	980-1010	850	950	750- 800	750-800

Таким образом план эксперимента будет иметь вид таблицы 3.3.

Таблица 3.3 - План полного факторного эксперимента

№ Опыта	λ	V , мм/с	$T_{деф}$, °С
1	7,84	0,1	800
2	7,84	0,3	800
3	7,84	0,1	930
4	7,84	0,3	930
5	1,96	0,1	800
6	1,96	0,3	800
7	1,96	0,1	930
8	1,96	0,3	930

3.2 Моделирование прямого изотермического выдавливания

Важным фактором, влияющим на характер течения металла, является напряженно-деформированное состояние, присущее выбранной механической

схеме деформации. К процессам, позволяющим не только осуществлять формоизменение заготовок, но и улучшать структуру относится всестороннее неравномерное сжатие материала, которое характерно для выдавливания. Для оценки возможности протекания динамической рекристаллизации при изотермическом выдавливании с целью уменьшения количества проводимых физических экспериментов выполняем компьютерное моделирование.

Исследование объемного напряженного состояния проводилось путем моделирования процесса прямого изотермического выдавливания в программном комплексе QForm 3D. В качестве модельного материала взят рассматриваемый в рамках работы титановый жаропрочный сплав ВТ6. Предварительно в программе NX были построены электронные геометрические модели (ЭГМ) (рис. 3.1) заготовки и инструмента, а затем импортированы в программную среду QForm 3D. Для оценки влияния коэффициента вытяжки было построено две модели матрицы штампа для выдавливания, которые различались диаметром рабочего отверстия матрицы 10 мм и 20 мм соответственно.

Также были заданы коэффициент трения заготовки по инструменту с учетом применения стеклоэмали (0,2), реологические параметры материала ВТ6 при ковочных температурах и температура нагрева исходной заготовки (рис. 3.2), параметры гидравлического пресса (скорость деформирования - 0,3 мм/с и 0,1 мм/с, вид привода, номинальное усилие – 6,3 МН), материал и температура нагрева инструмента (800 °С и 930 °С) (рис. 3.3) и условия остановки процесса штамповки, температура окружающей среды, время переноса заготовки от печи к штампу и настройки расчёта (рис. 3.4). После задания всех исходных данных и граничных условий произведен расчет.

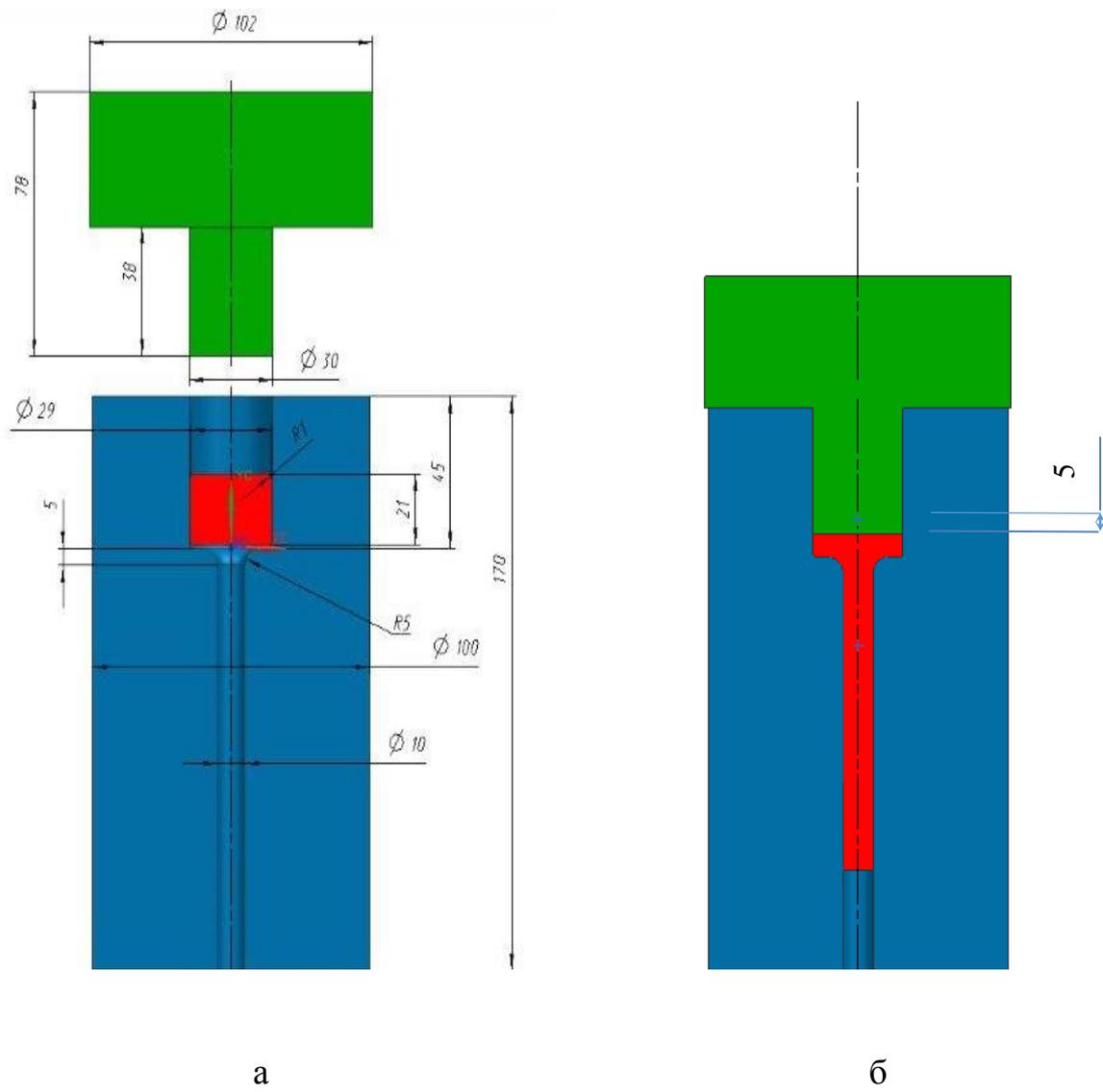


Рисунок 3.1 - Расчетная схема для исследований:
 а) начало процесса выдавливания, б) конец процесса выдавливания

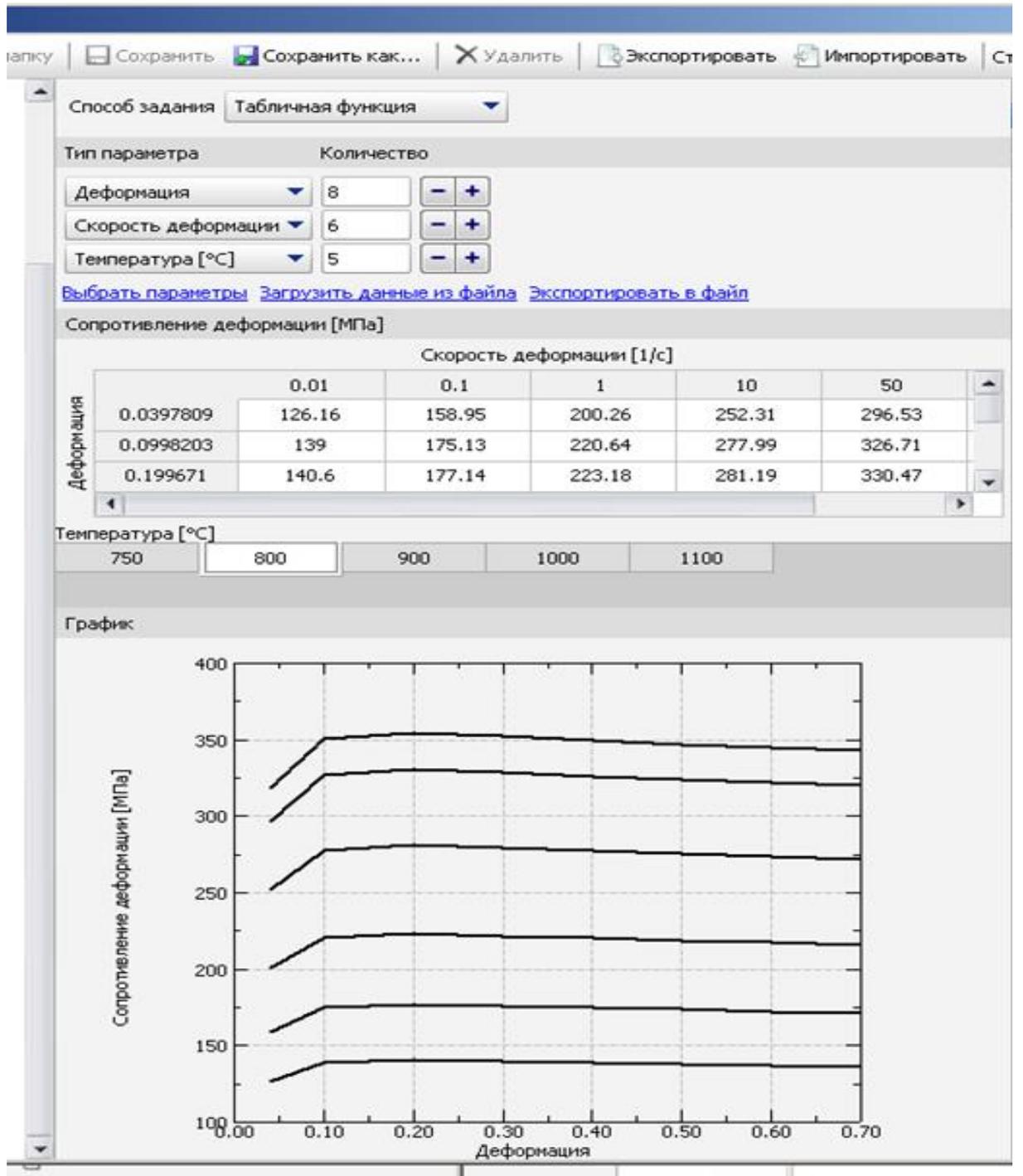


Рисунок 3.2 - Реологические параметры сплава ВТ6 при ковочных температурах.

The screenshot displays a software interface for configuring a hydraulic press. The interface is divided into several sections:

- File Tree (Left):** Shows a hierarchical structure of files and folders. The selected folder is "630тс -0.1" under "База данных".
- Configuration Panel (Center):**
 - Тип привода:** Гидравлический (Hydraulic).
 - Направление дв:** 0.
 - Номинальная ск:** 0.3.
 - Максимальное ус:** 6.3 MN.
 - Тип привода:** Индивидуальный (Individual), Аккумуляторный (Accumulator).
 - Отношение номинального усилия к максимальному:** 1.
- Graph (Right):**
 - График:** A plot of Speed [mm/s] versus Force [MN]. The y-axis ranges from 0.18 to 0.40, and the x-axis ranges from 0.0 to 7.0. A horizontal line is drawn at a speed of 0.3 mm/s.
 - Комментарий:** A text area for notes.
- Parameters Panel (Top Right):**
 - Закон трения:** Лёванко (Lévanco).
 - Фактор трения:** Постоянная величина (Constant value), 0.1.
 - Коэффициент Лёванко:** 1.25.
 - Коэффициент теплопередачи:** 18000 Вт/м²К.
 - Коэффициент паузы:** 0.05.

Рисунок 3.3 - Параметры гидравлического пресса, смазки

Параметры расчета

- Система
 - Ручное позиционирование
 - Минимальное число записей
- Заготовка
 - Сохранение объема
 - Козф. преобразования работы деф-ции в тепло 0.95
 - Козф. преобразования работы трения в тепло 0.95
 - Минимальный процент свободной поверхности [%] 1
 - Вращательное движение
 - Расчет с двумя сетками
 - Макс. кол-во шагов между разбиениями 20
 - Многошаговый сдвиг
- Метод интегрирования
 - Явный
 - Неявный
- Шаг расчета
 - Макс. приращение деформации 0.1
 - Макс. приращение времени [с] 0.5
 - Постоянный шаг по времени (деформация) [с]
 - Постоянный шаг по времени (тепловой) [с]
- Итерации
 - Норма скоростей 0.03
 - Норма напряжений 0.3
 - Макс. число итераций 100
 - Продолжать расчет при отсутствии сходимости
- Адаптация сетки в заготовке
 - Множитель адаптации 1
 - Минимальная адаптация 1
 - Предельная адаптация 15
 - Козф. разгонки 1.5
 - Адаптация по скорости
 - Адаптация по деформации
 - Адаптация по температуре
 - Минимальный размер элемента [мм]
 - Максимальный размер элемента [мм]
 - Минимальное число слоев элементов 1
 - Минимальная толщина материала [мм]
- Учитывать массовые характеристики
 - Вес
 - Инерция
- Закалка/отпуск
 - Записывать промежуточные результаты
- Терм

Свойства сетки

Свойства	Body	SurNodes	VolNodes	AllNodes	SurElems	VolElems
Заготовка 1	970	540	1510	1936	6133	
Инструмент 1	2225	1408	3713	4446	15648	
Инструмент 2	9733	11556	21289	19466	101817	
Total	12928	13504	26512	25848	123598	

Рисунок 3.4 - Параметры расчёта процесса выдавливания

Напряженно-деформированное состояние, формирующееся в заготовке при реализации процесса прямого изотермического выдавливания, представлено на рисунках 3.5, 3.6, 3.7. Моделирование подтвердило, что при прямом изотермическом выдавливании преобладают сжимающие напряжения, что предотвращает образование трещин на поверхности заготовки.

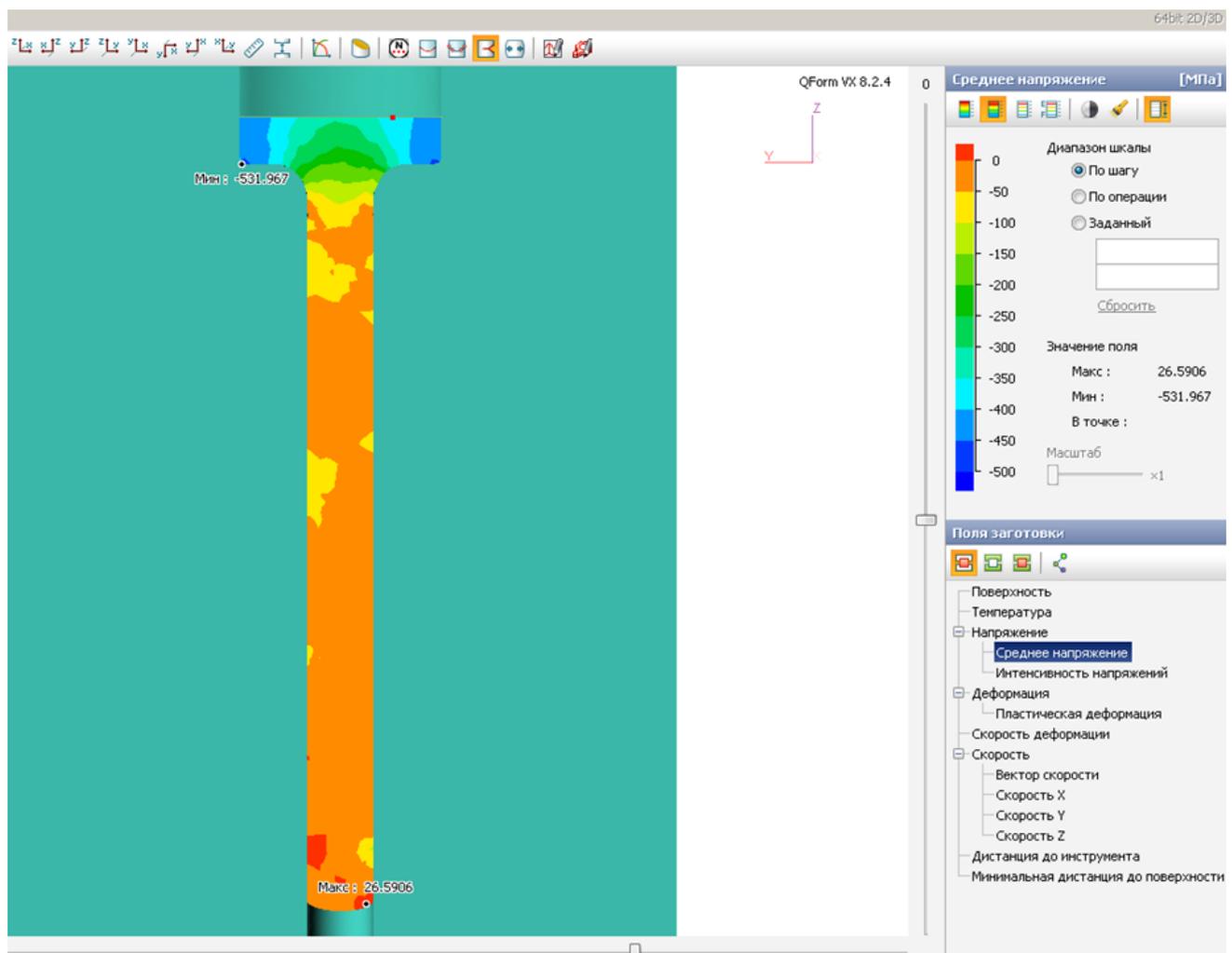


Рисунок 3.5 - Распределение средних напряжений в заготовке в конце выдавливания (МПа)

Наибольшие сжимающие напряжения порядка 986,6 МПа распространяются в области углов приемника матрицы и объясняются наличием застойных зон в начальной стадии процесса выдавливания. В зоне рабочего отверстия матрицы

сжимающие напряжения остаются достаточно высокими (650 МПа), что способствует формированию измельченной структуры. Это обусловлено увеличением скопления дислокаций по мере увеличения коэффициента вытяжки, что приводит к росту концентрации точечных дефектов и дефектов упаковки всё это в совокупности со сдвиговыми деформациями приводит к измельчению зерна.

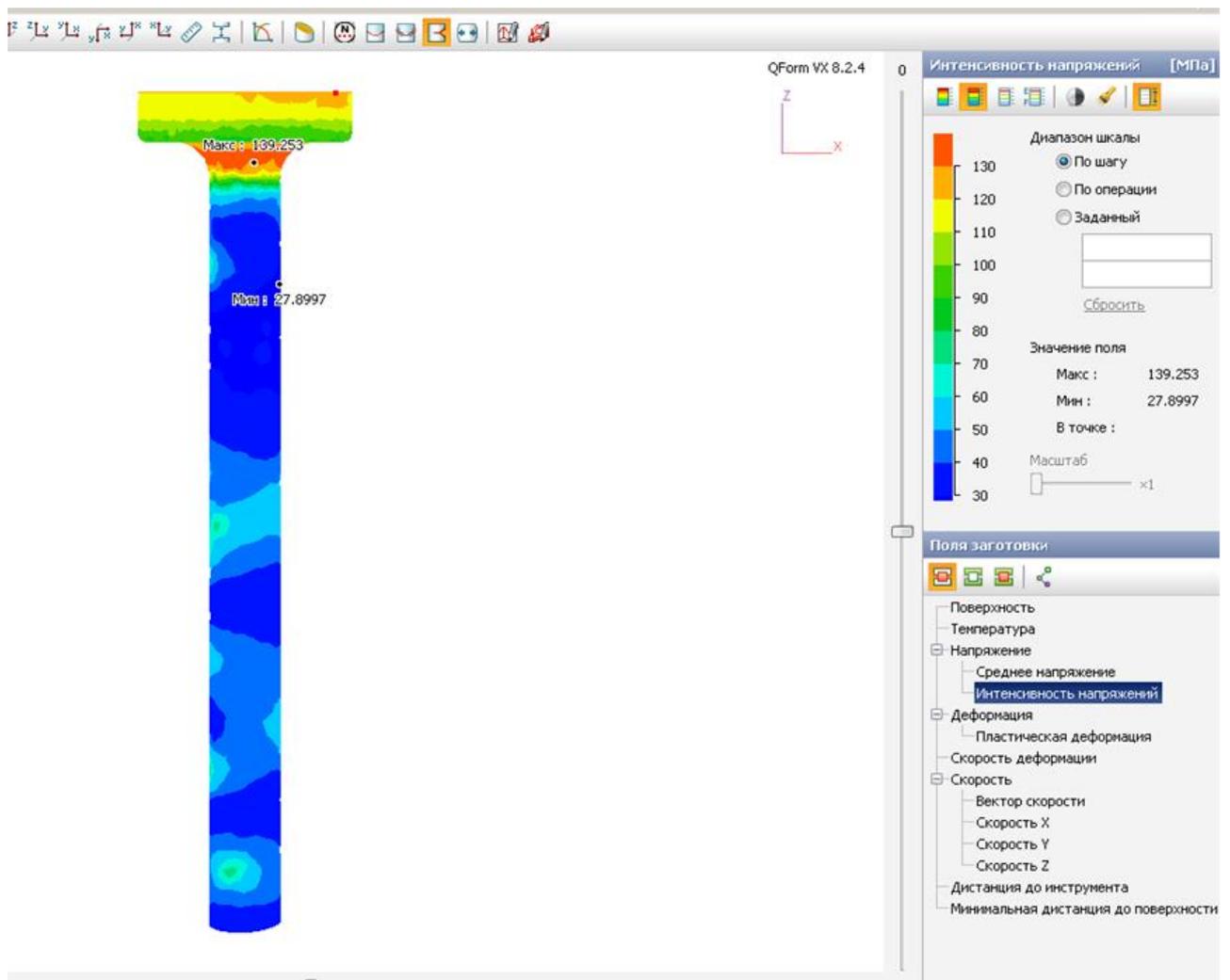


Рисунок 3.6 - Распределение интенсивности напряжений заготовки в конце выдавливания (МПа)

Интенсивность напряжений локализуется в зоне рабочего отверстия матрицы и равномерно распределяется по сечению заготовки. Значения интенсивности

напряжений в очаге пластической деформации составляет 130-139,5 МПа. При выходе заготовки из очага пластической деформации интенсивность напряжений постепенно убывает до 28 МПа, наличие деформации за пределами очага деформации объясняется трением заготовки о стенки канала матрицы. Интенсивность деформации также равномерно распределяется по сечению заготовки.

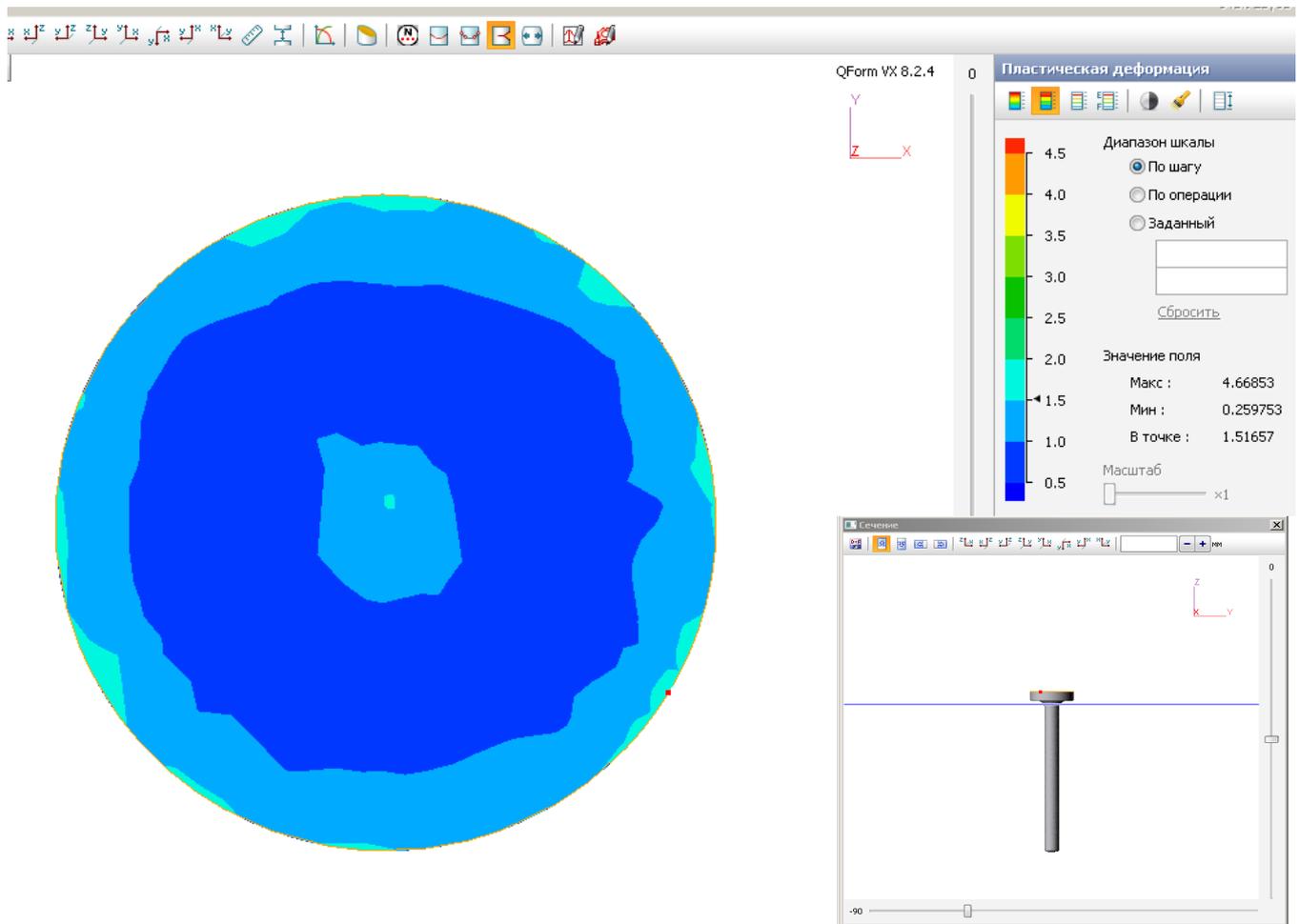


Рисунок 3.7 - Распределение пластической деформации в очаге деформации

Экспериментальные методы определения температурного поля заготовки не позволяют произвести замер изменения температуры в очаге деформации при реализации процесса изотермического выдавливания. С целью определения

изменения температурного поля в заготовке из-за деформационного разогрева было выполнено также компьютерное моделирование в QForm 3D. Перепад температуры по объему заготовки при протекании процесса изотермического выдавливания составляет 50 градусов (рис. 3.8), что способствует, в совокупности с равномерным деформационным полем, получению однородной по своей форме структуры. Наибольшей величины температура достигает при прохождении металла через радиус деформирующего пояска матрицы и равна в этот момент 849 °С. Данная температура позволяет создать условия для протекания процесса динамической рекристаллизации.

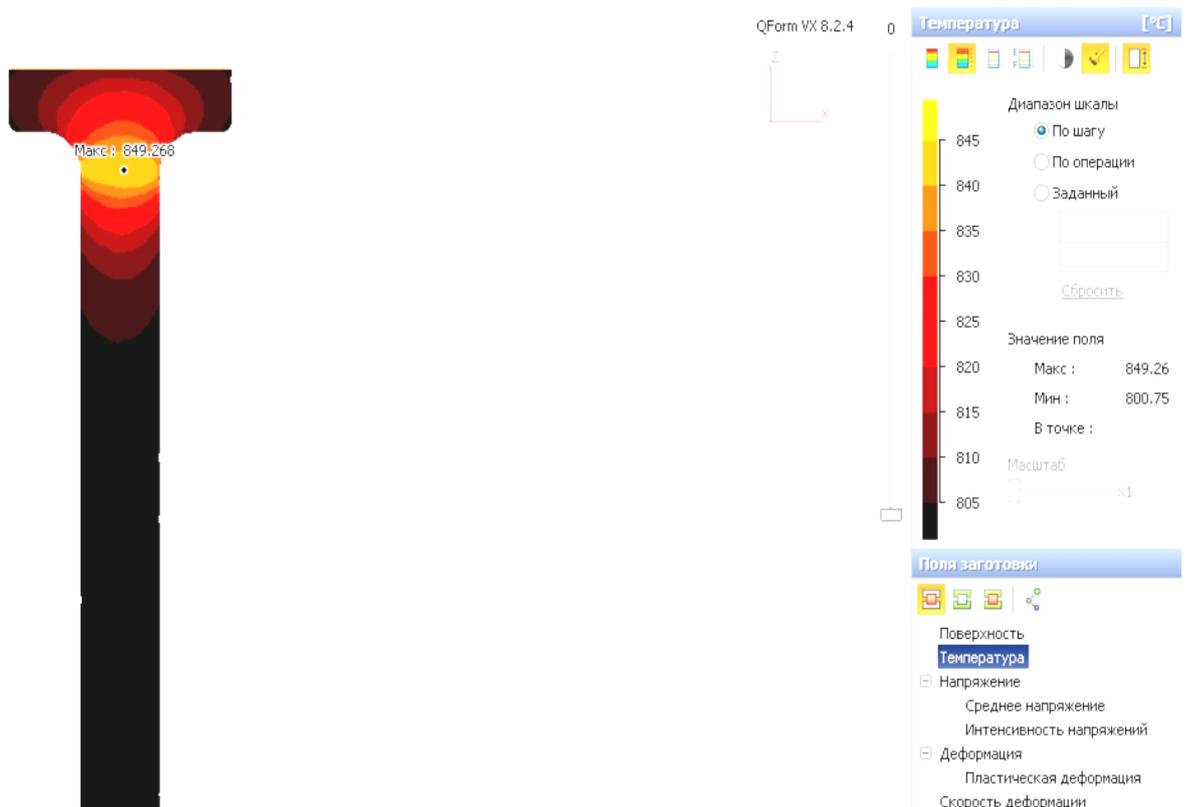


Рисунок 3.8 - Распределение температурных полей заготовки

Исследование скорости деформации (рис. 3.9) позволяет сделать вывод о равномерном скоростном поле как по всему объему заготовки, так и по очагу

деформации. Наибольшего значения скорость деформации достигает также, как и все остальные параметры в зоне рабочего отверстия матрицы, её значение равно $1,168 \text{ с}^{-1}$.

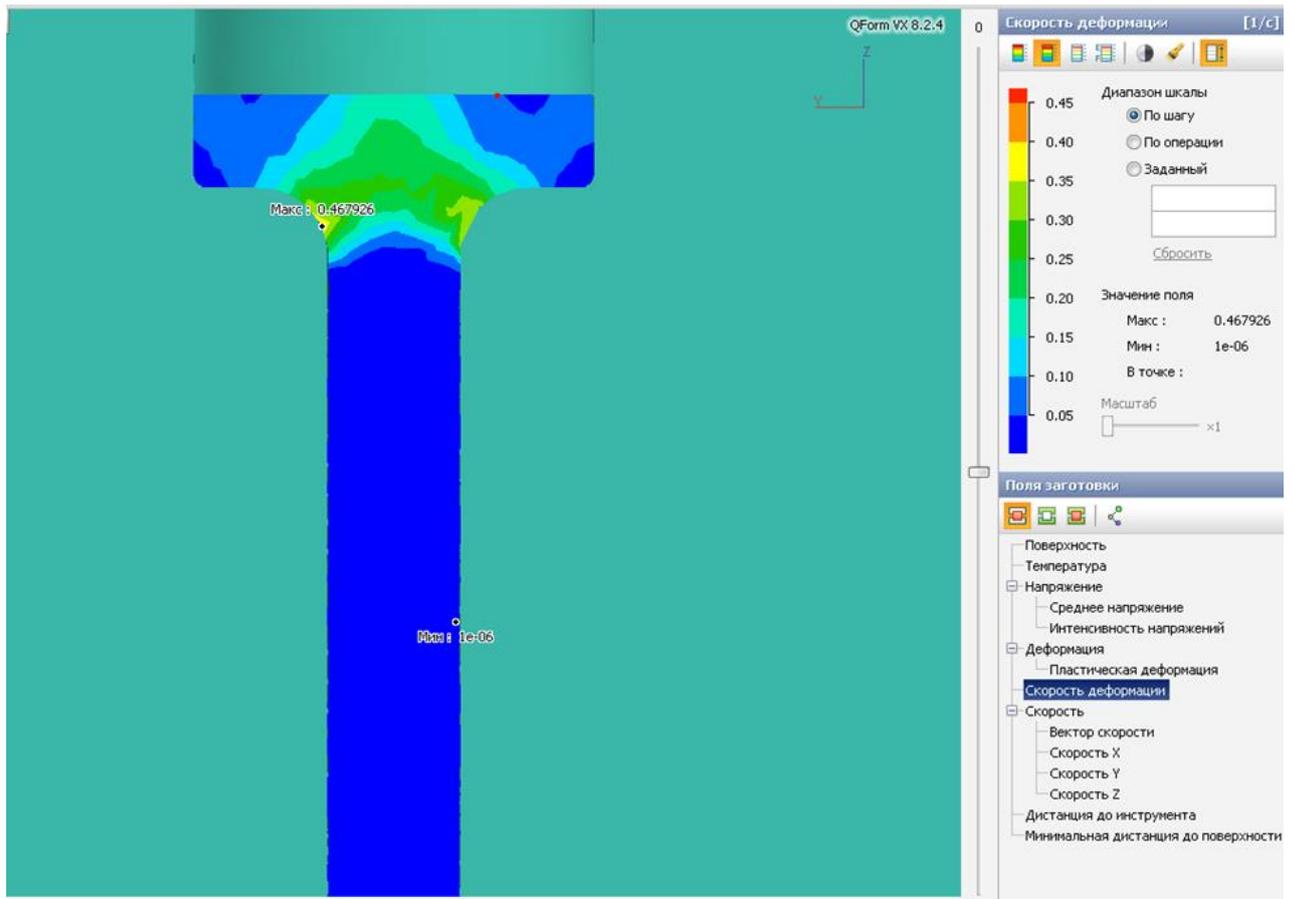


Рисунок 3.9 - Распределение скорости деформации заготовки в конце выдавливания (1/с)

Таким образом было выполнено компьютерное моделирование процесса изотермического выдавливания при скоростях 0,1 мм/с и 0,3 мм/с, коэффициентах вытяжки 7,84 и 1,96, температурах 800 °С и 930 °С. Результаты моделирования приведены в таблице 3.4.

По результатам компьютерного моделирования можно сделать вывод о том, что

наиболее благоприятными условиями процесса изотермического выдавливания для измельчения структуры будут: $V=0,3\text{мм/с}$, $\lambda=7,84$, $T_{\text{деф}}=800^\circ\text{C}$.

Таблица. 3.4 - Результаты компьютерного моделирования

Параметры процесса	Максимальная температура деформационного разогрева, $T_{\text{д.р. макс}}, ^\circ\text{C}$	Максимальная скорость деформации, $\bar{\epsilon}_{\text{мах}}, \text{c}^{-1}$	Средние напряжения (в очаге пластической деформации), $\sigma_{\text{ср}}, \text{МПа}$
$V(\bar{\epsilon})=0,1\text{мм/с}(0,043\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=7,84(0,87)$ $T_{\text{деф}}=800^\circ\text{C}$	829 $^\circ\text{C}$	0,794	-705,26
$V(\bar{\epsilon})=0,3\text{мм/с}(0,13\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=7,84(0,87)$ $T_{\text{деф}}=800^\circ\text{C}$	850 $^\circ\text{C}$	1,168	-986,6
$V(\bar{\epsilon})=0,1\text{мм/с}(0,043\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=7,84(0,87)$ $T_{\text{деф}}=930^\circ\text{C}$	930 $^\circ\text{C}$	0,34	-684,47
$V(\bar{\epsilon})=0,3\text{мм/с}(0,13\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=7,84(0,87)$ $T_{\text{деф}}=930^\circ\text{C}$	930 $^\circ\text{C}$	0,671	-561
$V(\bar{\epsilon})=0,1\text{мм/с}(0,0245\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=1,96(0,49)$ $T_{\text{деф}}=800^\circ\text{C}$	805 $^\circ\text{C}$	0,366	-428,3
$V(\bar{\epsilon})=0,3\text{мм/с}(0,073\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=1,96(0,49)$ $T_{\text{деф}}=800^\circ$	811 $^\circ\text{C}$	1,099	-478,79
$V(\bar{\epsilon})=0,1\text{мм/с}(0,0245\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=1,96(0,49)$ $T_{\text{деф}}=930^\circ$	930 $^\circ\text{C}$	0,371	-386,29
$V(\bar{\epsilon})=0,3\text{мм/с}(0,073\text{c}^{-1})$ $\lambda(\epsilon)=1,96(0,49)$ $T_{\text{деф}}=930^\circ$	930 $^\circ\text{C}$	1,133	-435,3

3.3 Исследование влияния параметров процесса изотермического выдавливания на величину образования осевой утяжины в заготовке

Одним из видов дефектов процесса выдавливания является образование осевой утяжины в пресс-остатке. Поскольку при изготовлении лопаток пресс-остаток является частью заготовки, из которой в дальнейшем формируется замок детали, то важно прогнозировать возможность образования утяжины для корректировки режимов процесса выдавливания, либо назначения припуска для удаления неизбежного дефекта. Для исследования влияния коэффициента вытяжки на образование утяжины при различных скоростях движения инструмента имеем следующую расчетную схему, показанную на рисунке 3.10.

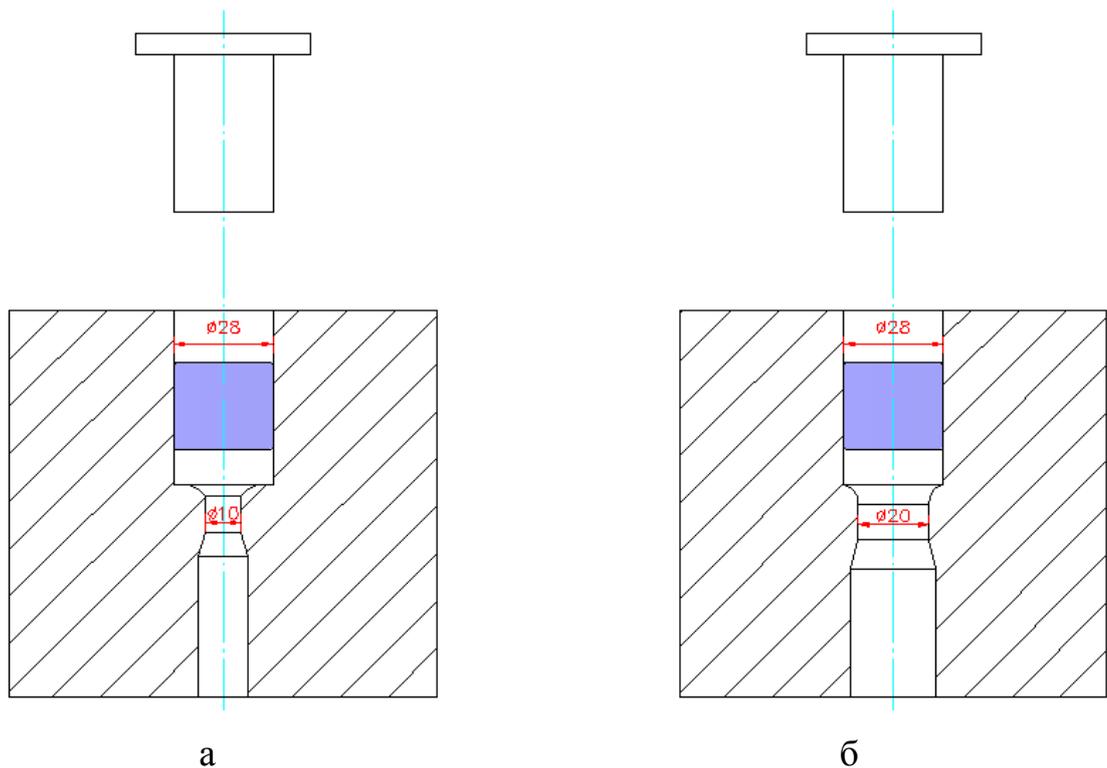


Рисунок 3.10 - Расчетные схемы:

а) коэффициент вытяжки $\lambda = 7,84$; б) коэффициент вытяжки $\lambda = 1,96$

Сначала проектируем в программе UNIGRAPHICS NX, согласно рисунку 3.10 оснастку для расчета и исходную заготовку для выдавливания (рис. 3.11).

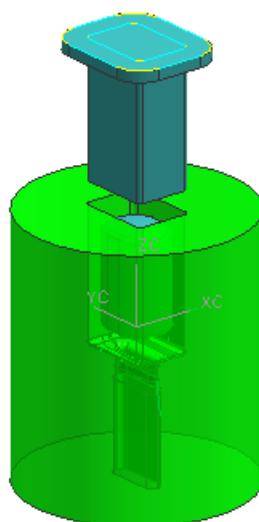


Рисунок 3.11 - Спроектированная оснастка в программе UNIGRAPHICS NX

Далее в приложении QShape наносим сетку метода конечных элементов (рис. 3.12). Данный файл является исходным для расчета в программе QForm 2D/3D.

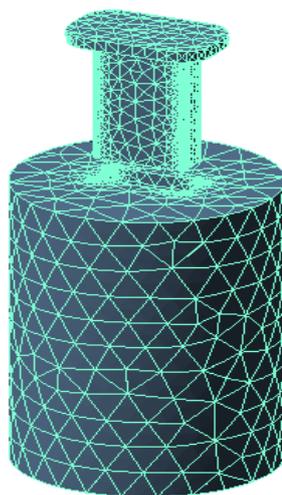


Рисунок 3.12 - Построение сетки по методу конечных элементов для пуансона и матрицы в приложении QShape

Затем согласно исходным данным, которые необходимо задать в программе QForm 2D/3D, вводим следующие данные для расчета:

Исходные данные для ввода программу QForm 2D/3D являются:

1. Вид процесса: деформирование на гидравлическом прессе.

2. Параметры охлаждения заготовки в инструменте и на воздухе: 1 с.
3. Выбор параметров оборудования: усилие деформирования 630 МН.
4. Конечное расстояние между рабочими инструментами (пуансоном и матрицей): задаем равное 0 мм, чтобы пуансон соприкоснулся с матрицей, при этом получим пресс-остаток 5 мм.
5. Марка штампуемого материала и температура нагретой заготовки: для всех экспериментов штампуемый материал – ВТ6.
6. Температура нагрева заготовки: 800 °С и 930 °С.
7. Температура рабочих инструментов (пуансона и матрицы): 800 °С и 930 °С.
8. Смазка для рабочих инструментов: исследование проводим для - для стеклоэмали, которая позволяет осуществлять процесс с коэффициентом трения $\mu=0,2$;
9. Скорость перемещения рабочего инструмента 0,1 мм/с и 0,3 мм/с
10. Коэффициент вытяжки 1,97 и 7,84.

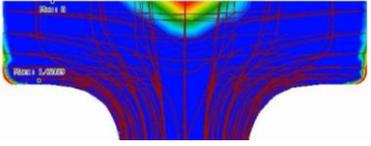
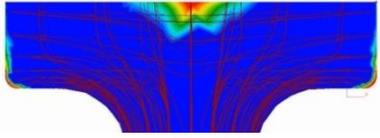
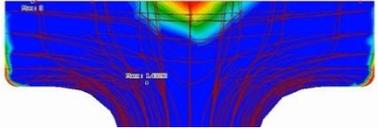
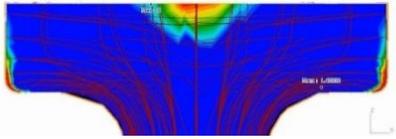
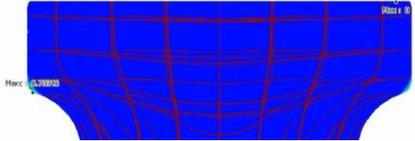
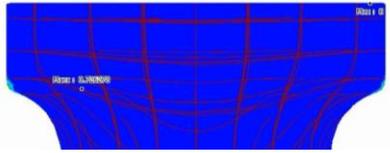
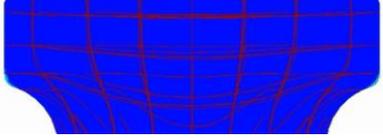
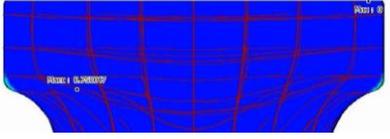
Варьируя исходными данными получим 8 моделей для проведения расчетов (таб. 3.5).

Определение вероятности возникновения утяжины выполняли при помощи моделирования поля Гардфилд.

Поле Гардфилд рассчитывается на основании растягивающих деформаций в направлении нормали к поверхности деформируемой заготовки и является поверхностным слоем. Предполагается, что в месте накопления таких растягивающих деформаций возникают дефекты типа «утяжина».

По данным таблицы 3.5 видно, что во всех рассмотренных диапазонах изменения температуры и скорости деформирования при коэффициенте вытяжки $\lambda=1,96$ образование осевой утяжины не прогнозируется, а при коэффициенте вытяжки $\lambda=7,84$ возможно образование утяжины максимальной глубиной 0,73 мм. Данным дефектом можно пренебречь, т.к. при последующей изотермической штамповке лопатки это участок при такой глубине залегания неизбежно будет вытеснен в облой, который далее обрезается.

Таблица 3.5 - Результаты исследований

№	Параметры процесса	Величина образовавшейся утяжины, мм	Графическое отображение утяжины
1	$V = 0,1 \text{ мм/с}$ $\lambda = 7,84$ $T_{\text{деф}} = 800^\circ\text{C}$	0,63	
2	$V = 0,3 \text{ мм/с}$ $\lambda = 7,84$ $T_{\text{деф}} = 800^\circ\text{C}$	0,69	
3	$V = 0,1 \text{ мм/с}$ $\lambda = 7,84$ $T_{\text{деф}} = 930^\circ\text{C}$	0,73	
4	$V = 0,3 \text{ мм/с}$ $\lambda = 7,84$ $T_{\text{деф}} = 930^\circ\text{C}$	0,5	
5	$V = 0,1 \text{ мм/с}$ $\lambda = 1,96$ $T_{\text{деф}} = 800^\circ\text{C}$	Не прогнозируется	
6	$V = 0,3 \text{ мм/с}$ $\lambda = 1,96$ $T_{\text{деф}} = 800^\circ$	Не прогнозируется	
7	$V = 0,1 \text{ мм/с}$ $\lambda = 1,96$ $T_{\text{деф}} = 930^\circ$	Не прогнозируется	
8	$V = 0,3 \text{ мм/с}$ $\lambda = 1,96$ $T_{\text{деф}} = 930^\circ$	Не прогнозируется	

3.4 Экспериментальное исследование процесса изотермического выдавливания

Для проведения эксперимента был спроектирован и изготовлен штамп для изотермического выдавливания из жаропрочного сплава ЖС6У (рис. 3.13), состоящий из сменных разъемных матриц, обеспечивающих разные коэффициенты вытяжки, устанавливаемых в обойму и пуансона. Общий вид штампа представлен на рисунке 3.13.

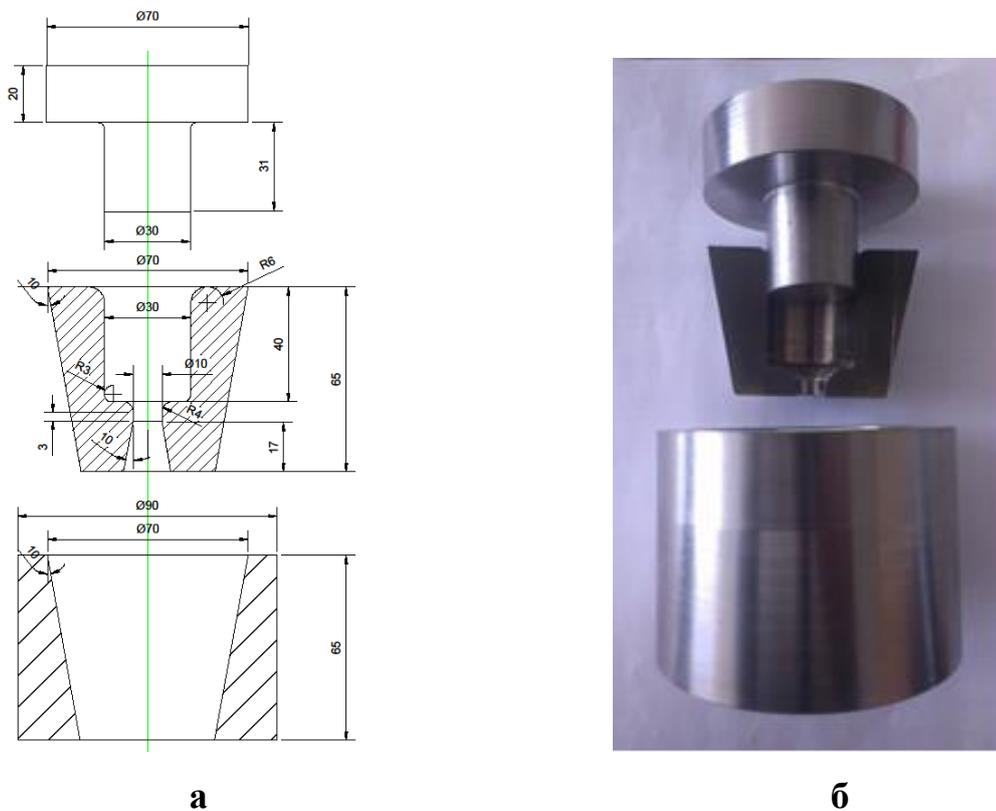


Рисунок 3.13 - Экспериментальный штамп для изотермического выдавливания:

а) эскиз; б) общий вид

Изотермическое выдавливание выполняли на специализированном прессе фирмы Шулер (рис. 3.14) согласно плану эксперимента.

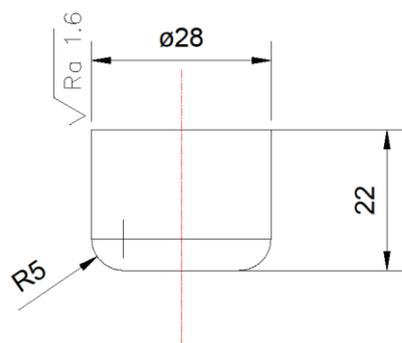
Пресс оснащен программными регуляторами скорости рабочего хода, обеспечивающими заданный скоростной режим деформирования и

изотермической установкой, поддерживающей заданный температурный режим деформирования и температуру штампа. Изотермическая установка включает в себя: нагревательную камеру, интегрированную в рабочее пространство прессы и оснащенную средствами автоматического регулирования температуры в заданном интервале; деформирующий блок из жаропрочного материала, предназначенный для установки сменного деформирующего инструмента (штампов).

Заготовки под изотермическое выдавливание из титанового сплава ВТ6, Ø30 были предварительно отрезаны на абразивно-отрезном станке, затем удалили заусенец и шлифовали на бесцентрово шлифовальном станке до Ø28 с целью получения шероховатости Ra 1,6, далее на одном из торцов на токарном станке были сделаны фаски радиусом 5 мм (рис. 3.15).



Рисунок 3.14 - Пресс для изотермической штамповки



а



б

Рисунок 3.15 - Вид заготовки под изотермическое выдавливание:

а) эскиз; б) общий вид

На следующем этапе подготовки заготовки были подвергнуты пескоструйной очистке электрокорундом 14А, F30 ГОСТ 28818-90 и промывке в горячей воде. Для обеспечения условий благоприятного истечения металла через рабочую часть матрицы, а также с целью защиты поверхности заготовок от образования дефектного слоя при нагревании было произведено нанесение защитно-смазывающего покрытия на основе стеклоэмали ЭВТ 24. После сушки на воздухе заготовки нагревались в электрической карусельной печи модели ELRH 12 фирмы Electrotherm до температур деформации и выдержкой в течении 20 минут. Затем нагретые заготовки перемещали в экспериментальный штамп для выдавливания, расположенный в установке изотермического деформирования и разогретый до температур нагрева заготовок, время переноса заготовок составляло 6-10 секунд, потом заготовки выдерживались в камере установки 5 минут для выравнивания температур штампа и заготовки. Деформирование происходило в автоматическом режиме с заданной скоростью за один ход прессы. После чего штамп вместе с продеформированной заготовкой извлекался из установки и после остывания разбирался для извлечения детали (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 - Вид выдавленной заготовки

Далее из стержневой части выдавленных заготовок были вырезаны образцы (рис. 3.17 и 3.18) для проведения исследований микроструктуры и пластических свойств.

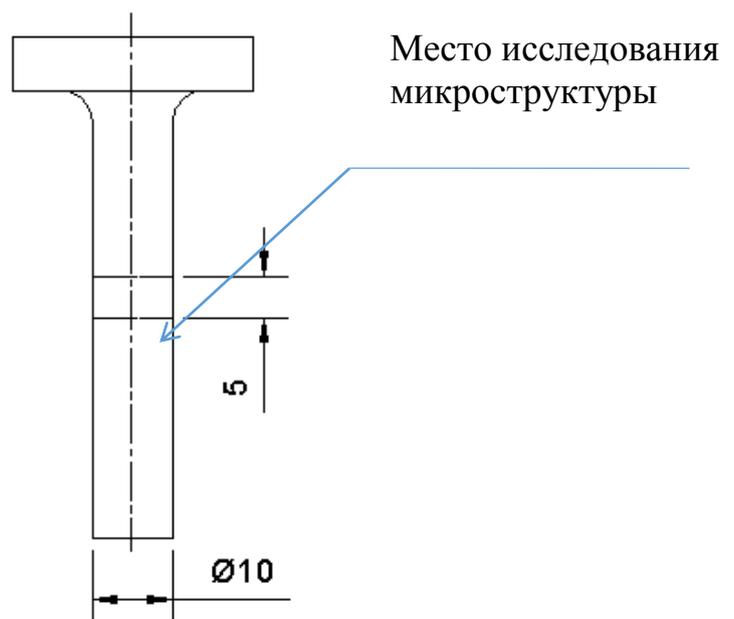


Рисунок 3.17 - Схема вырезки образца для исследования микроструктуры

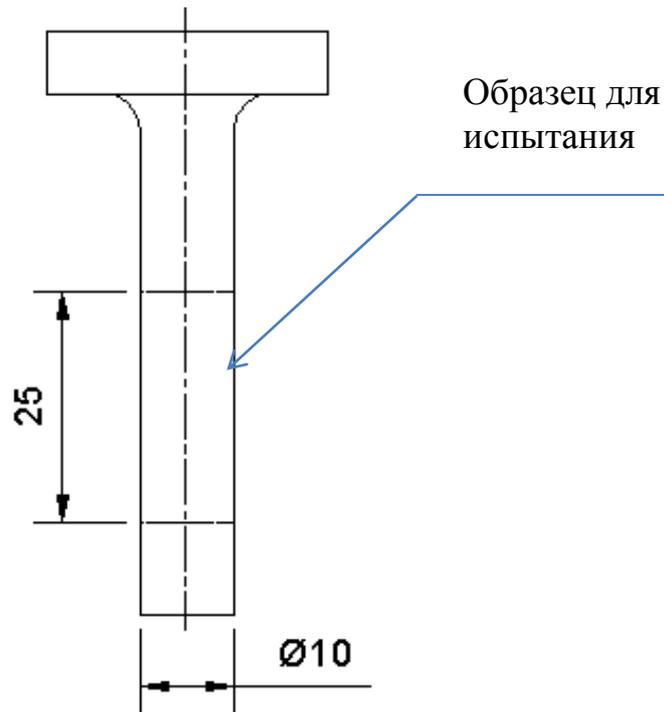


Рисунок 3.18 - Схема вырезки образца для испытания на сжатие

3.5 Анализ микроструктуры образцов

Образцы были разделены на 2 части. На одних частях проводилось сравнительное исследование микроструктуры без термической обработки, на вторых была выполнена термическая обработка при температуре $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержке 3 часа в воздушной среде.

Поверхность всех образцов однородная без сегрегации, расслоений и трещин удовлетворительная для сплава ВТ6.

Микроструктура образцов проверялась в поперечном направлении. Как ранее отмечено в главе 2 контроль проводился на микроскопе Nikon EPIPHOT 200 при увеличении $\times 200$, $\times 500$, $\times 1000$ после травления (как отмечено в главе 2). Образцы имеют равноосную мелкозернистую $\alpha+\beta$ структуру, структура исходного материала более крупная, фото микроструктур представлено на рисунках 3.19, 3.20 и 3.21. Микроструктура образцов соответствует типу 2 шкалы №2 ОСТ 1 90002-86.

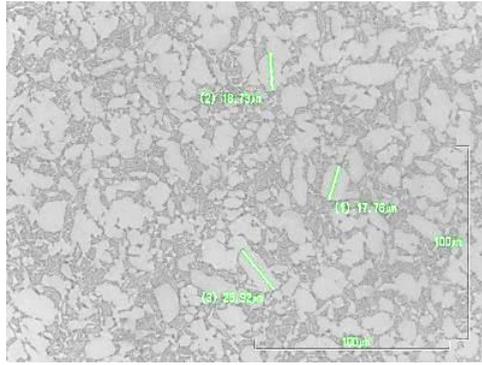
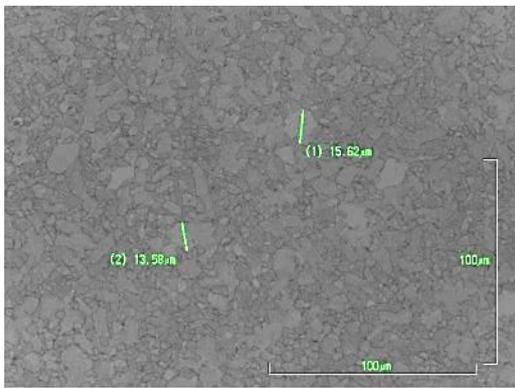
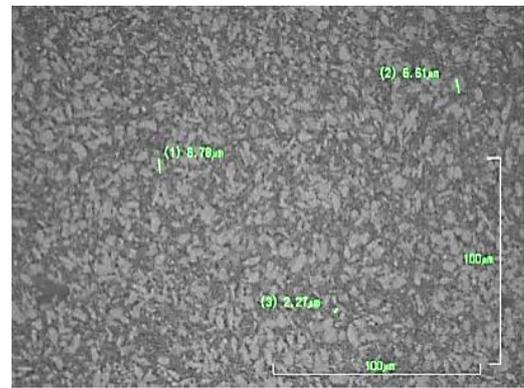


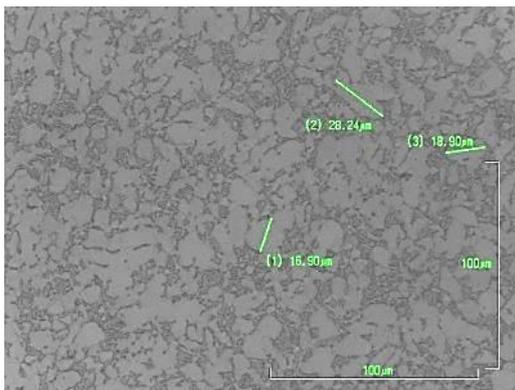
Рисунок 3.19 - Структура прутка из сплава ВТ6 в исходном состоянии, увеличение 500



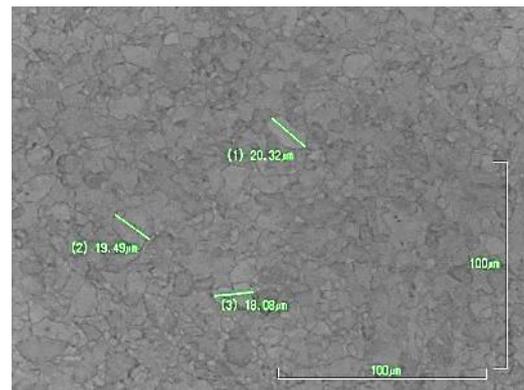
а



б



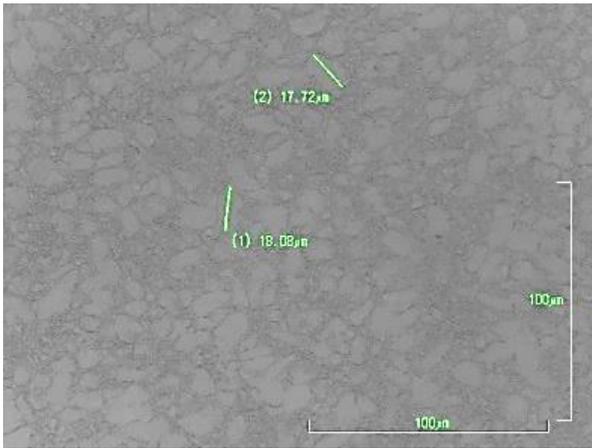
в



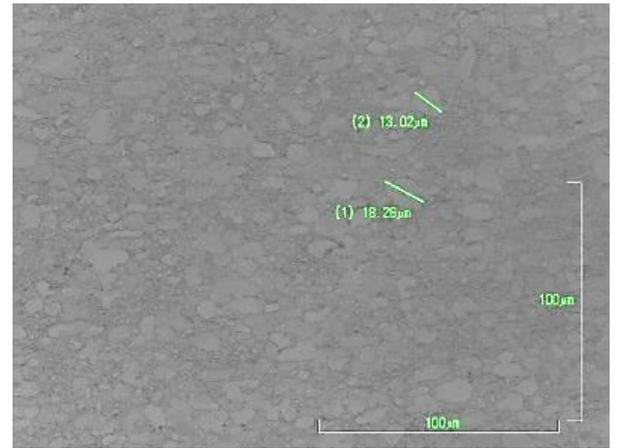
г

Рисунок 3.20 - Структура образцов из сплава ВТ6 после изотермического выдавливания при различных температурах (Т) и скорости выдавливания (V), коэффициенте вытяжки $\lambda=7,84$ при выдавливании, увеличение 500:

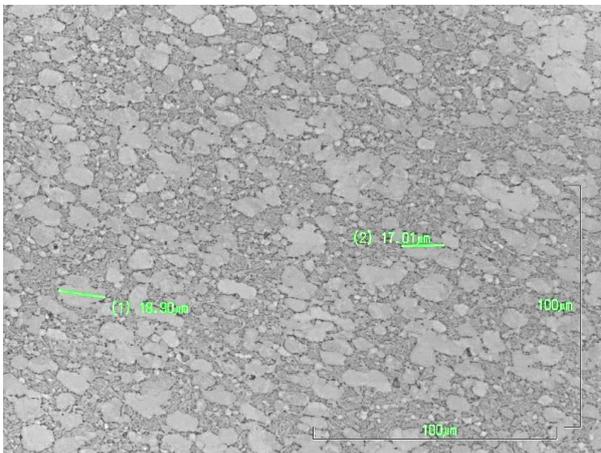
а) $T=800^{\circ}\text{C}$, $V=0,1\text{мм/с}$; б) $T=800^{\circ}\text{C}$, $V=0,3\text{мм/с}$; в) $T=930^{\circ}\text{C}$, $V=0,1\text{мм/с}$; г) $T=930^{\circ}\text{C}$, $V=0,3\text{мм/с}$



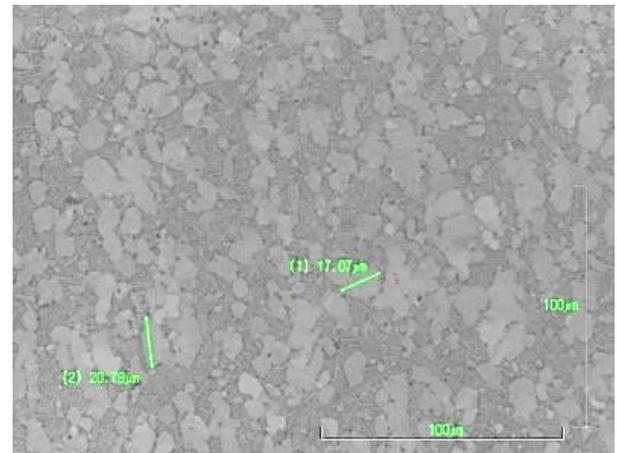
а



б



в



г

Рисунок 3.21 - Структура образцов из сплава ВТ6 после изотермического выдавливания при различных температурах (T) и скорости выдавливания (V), коэффициенте вытяжки $\lambda=1,97$ при выдавливании, увеличение 500:

а) $T=800^{\circ}\text{C}$, $V=0,1\text{мм/с}$; б) $T=800^{\circ}\text{C}$, $V=0,3\text{мм/с}$; в) $T=930^{\circ}\text{C}$, $V=0,1\text{мм/с}$;

г) $T=930^{\circ}\text{C}$, $V=0,3\text{мм/с}$

Контроль микрошлифов, вырезанных в поперечном направлении образцов в центральной части после термообработки, изменений в структуре не выявил. Микроструктура для сравнения с исходным материалом приведена на рисунке 3.22.

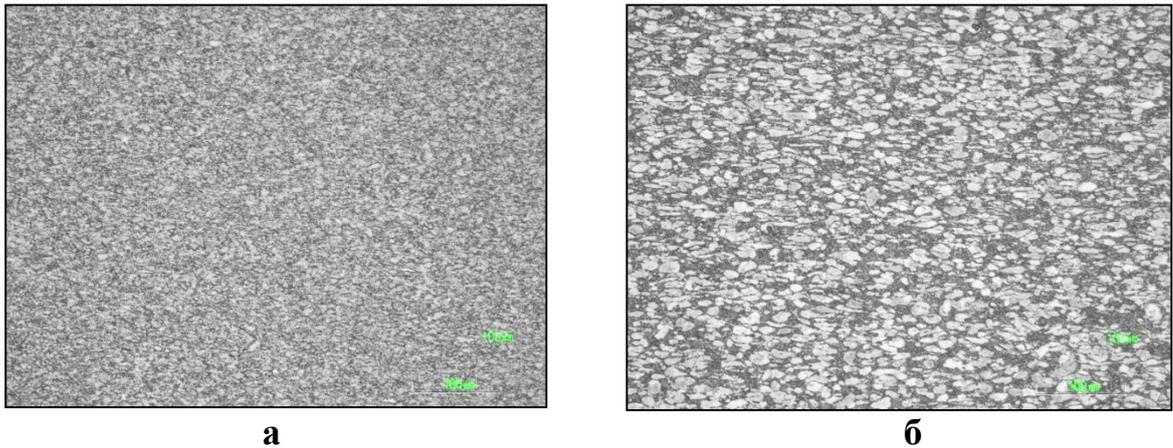


Рисунок 3.22 - Микроструктура образцов после термообработки (в поперечном направлении) увеличение 200:

а) образец после изотермического выдавливания ($T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V=0,3\text{ мм/с}$), б) исходный материал

3.6 Исследование напряжения течения при изотермическом деформировании заготовок, имеющих мелкозернистую структуру

Из заготовок, полученных изотермическим выдавливанием, были изготовлены цилиндрические образцы с длиной базы 15 мм и диаметром 10 мм, соответствующие требованиям типа III образцов по ГОСТ 25.503-97(рис. 3.23).

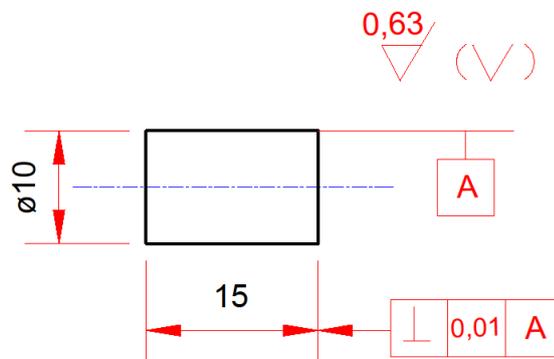


Рисунок 3.23 - Экспериментальные образцы I типа

Затем были проведены испытания на сжатие на испытательной машине LabTest 6.125Н при температуре штамповки лопаток ($T_{исп}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$) и скорости перемещения захватов 0,1 мм/мин.

Результаты испытаний при регистрации установкой имеют вид графика, представленного на рисунке 3.24. Также машина предоставляет массив значений усилий, развиваемых при осадке образца в зависимости от его высоты в заданный интервал времени в формате таблицы Excel (таб. 3.6).

Таблица 3.6 – Фрагмент таблицы в формате Excel, формируемой испытательной машиной.

Сек	мм	Н	Мм	Н/мм ²	сек	Нм
0,00	-0,01	612,75	0,00	9,63	0,00	0,10
0,00	-0,03	581,25	0,00	9,14	0,00	0,10
0,00	0,00	609,15	0,01	9,58	0,00	0,10
0,00	-0,01	668,40	0,00	10,51	0,00	0,11
0,01	0,00	695,55	0,01	10,93	0,00	0,11
0,01	0,01	722,55	0,02	11,36	0,00	0,11
0,01	0,00	817,80	0,01	12,86	0,00	0,11
0,01	0,00	792,90	0,01	12,46	0,00	0,11
0,01	-0,01	702,00	0,01	11,03	0,00	0,00
0,01	0,02	705,00	0,03	11,08	0,00	0,00
0,01	0,00	678,60	0,02	10,67	0,00	0,00

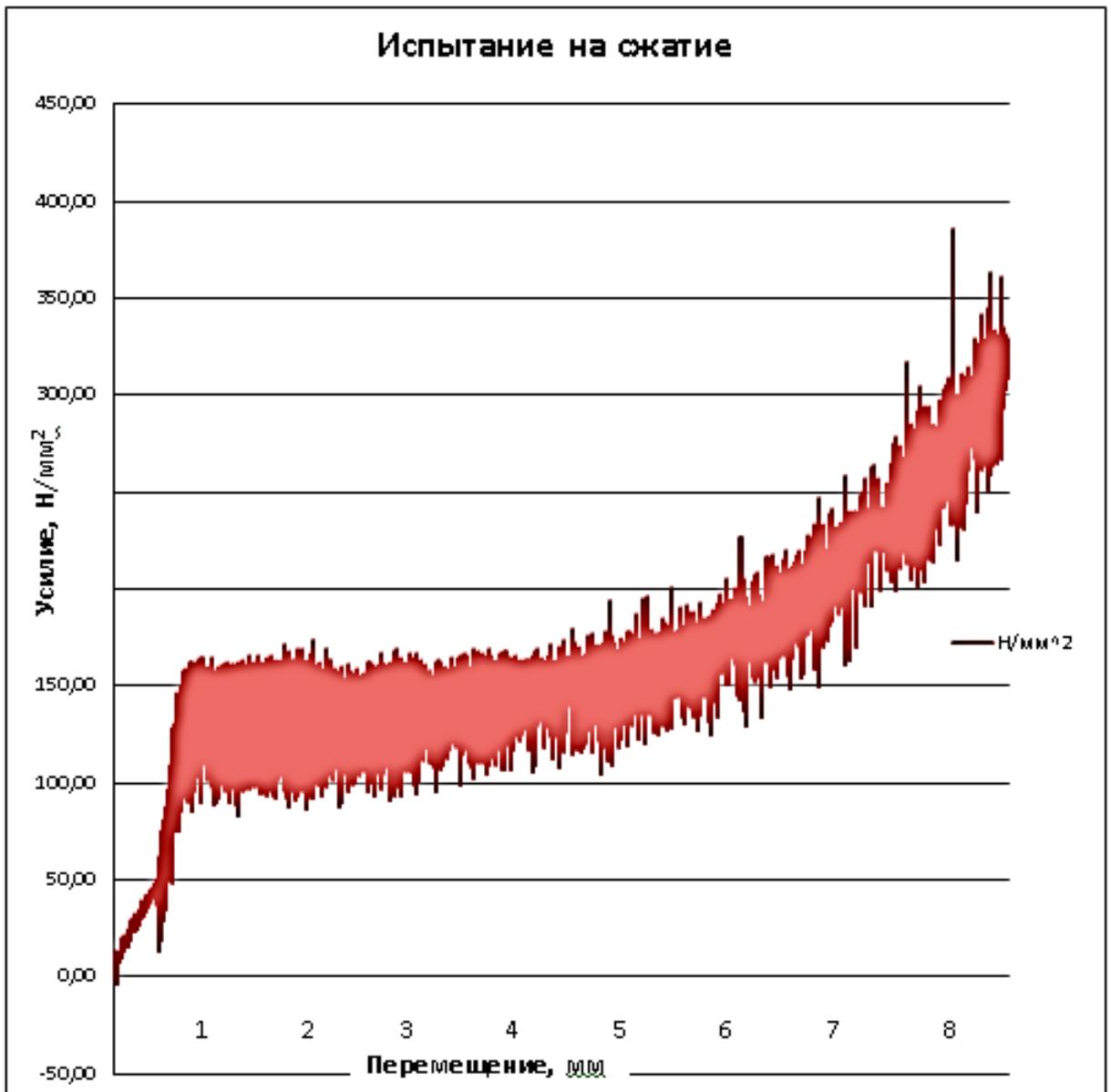


Рисунок 3.24 - Вид графика зависимости развиваемого усилия от перемещения захватов, формируемого испытательной машиной LabTest 6.125Н

Для обработки полученных результатов с целью построения кривых упрочнения по полученным при испытаниях значениям затраченного усилия были рассчитаны напряжения, соответствующие деформации (таб. 3.7)

Напряжение рассчитывается по формуле 14 как отношение развитого усилия (P_i) к площади поперечного сечения (F_i) в данный момент времени:

$$\sigma_s = \frac{P_i}{F_i}, \quad (14)$$

Таблица 3.7 – Расчётные значения напряжения, соответствующие деформациям

Изменение высоты, Δh_i , мм	Приложенное усилие, P_i , Н	Полученная высота при осадке, h_i , мм	Площадь поперечного сечения, F_i , мм ²	Напряжение, σ_i , МПа	Деформация, ε
0,5	8 000	14,5	65,78	121,62	0,03
1	8 000	14	68,13	117,43	0,07
2	8 000	13	73,37	109,04	0,13
3	8 000	123	79,48	100,65	0,2
4	9 000	11	86,71	103,8	0,27
5	9 800	10	95,38	102,75	0,33
6	11 000	9	105,98	103,8	0,4
7	13 000	8	119,22	109,4	0,47
8	16 000	7	136,25	117,43	0,53

Аналогичные преобразования выполнены по результатам всех проведенных испытаний. По полученным данным были построены кривые упрочнения, которые представлены на рисунке 3.25.

Проанализировав полученные данные можно сделать вывод о том, что наиболее подходящим для формирования мелкозернистой структуры в титановом

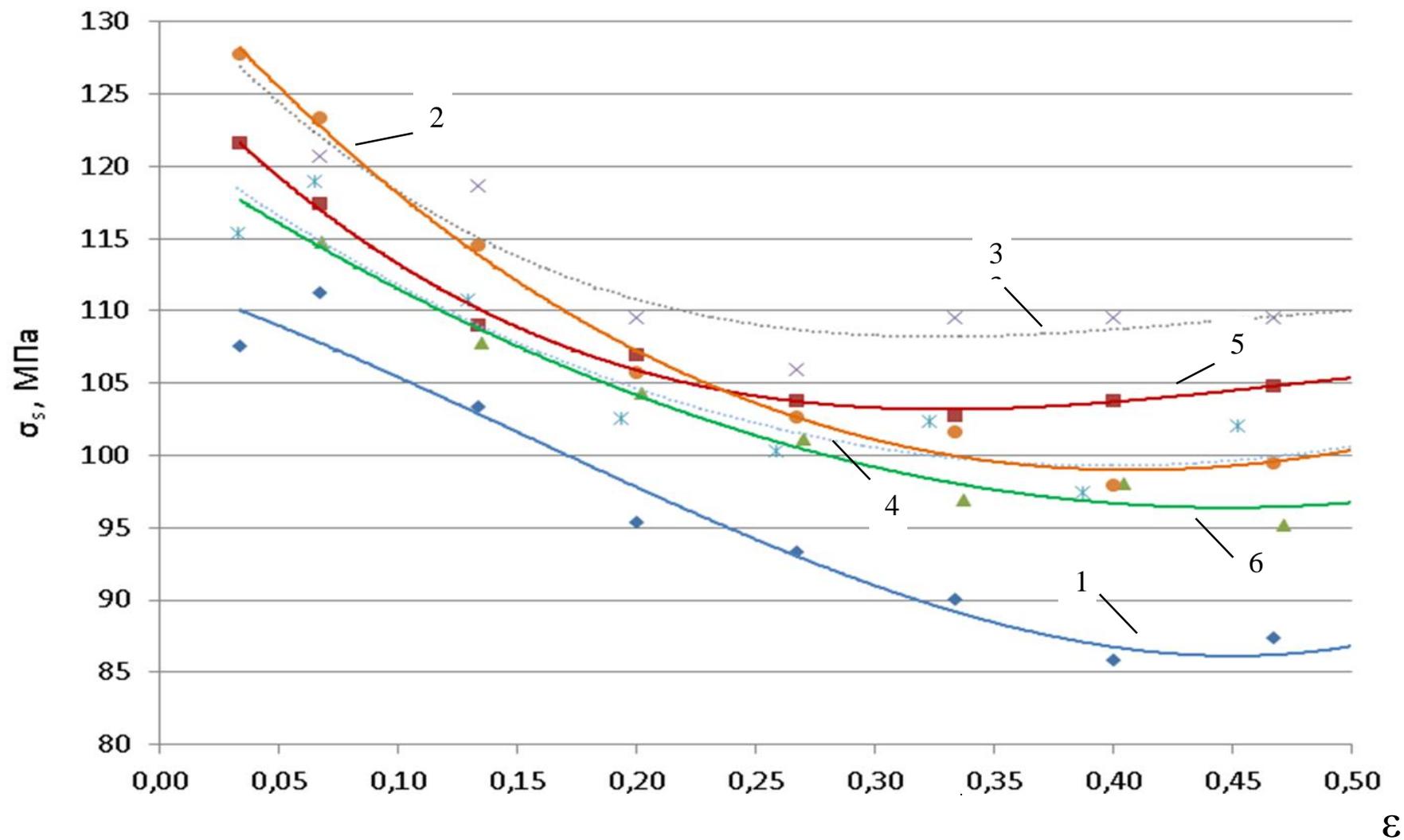


Рисунок 3.25 - Кривые упрочнения титанового сплава ВТ6 после изотермического выдавливания по режимам:

- 1) $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=7,84$, $V=0,3\text{ мм/с}$, 2) $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1,96$, $V=0,3\text{ мм/с}$, 3) $T=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1,96$, $V=0,3\text{ мм/с}$, 4) $T=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1,96$, $V=0,1\text{ мм/с}$,
- 5) $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=7,84$, $V=0,1\text{ мм/с}$, 6) $T=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=7,84$, $V=0,1\text{ мм/с}$

сплаве ВТ6 при изотермическом выдавливании является режим, при котором температура нагрева заготовки и штампового инструмента равна 800 °С, скорость передвижения инструмента равна 0,3 мм/с, а коэффициент вытяжки составляет 7,84. Образец, полученный по данным режимам, имеет меньшее сопротивление деформированию по сравнению с образцом, полученным по серийной технологии на 42%.

3.7 Разработка математической модели влияния технологических параметров процесса на формирование зерна при динамической рекристаллизации

Для возможности графического отображения зависимостей, полученных в результате проведения экспериментов, и возможного прогнозирования структуры, в зависимости от изменения условий протекания процесса изотермического выдавливания необходимо разработать математическую модель.

Для построения математической модели, определения размера зерна расчетным путем, необходимо решить уравнение регрессии [90]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3; \quad (15)$$

$$F = \sum(\bar{y} - y)^2 \rightarrow 0; \quad (16)$$

Для определения коэффициентов уравнения 2.5 используем метод наименьших квадратов, для этого находим частные производные функции 2.6 и составляем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial b_0} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-1) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_1} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-x_1) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_2} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-x_2) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_3} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-x_3) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_4} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-x_1 x_2) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_5} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-x_1 x_3) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_6} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-x_2 x_3) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_7} = \sum 2(\bar{y}_i - y)(-x_1 x_2 x_3) = 0; \end{array} \right. \quad (17)$$

После дифференцирования получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum (y) = \sum \bar{y}_i; \\ \sum (yx_1) = \sum \bar{y}_i x_1; \\ \sum (yx_2) = \sum \bar{y}_i x_2; \\ \sum (yx_3) = \sum \bar{y}_i x_3; \\ \sum (yx_1 x_2) = \sum \bar{y}_i x_1 x_2; \\ \sum (yx_1 x_3) = \sum \bar{y}_i x_1 x_3; \\ \sum (yx_2 x_3) = \sum \bar{y}_i x_2 x_3; \\ \sum (yx_1 x_2 x_3) = \sum \bar{y}_i x_1 x_2 x_3; \end{array} \right. \quad (18)$$

После преобразования получаем систему уравнений линейную относительно коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_7 .

$$\left\{ \begin{array}{l}
\sum b_0 + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 + b_3 \sum x_3 + b_4 \sum x_1 x_2 + b_5 \sum x_1 x_3 + b_6 \sum x_2 x_3 + \\
\quad + b_7 \sum x_1 x_2 x_3 = \sum \bar{y}_i; \\
b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3 + b_4 \sum x_1^2 x_2 + b_5 \sum x_1^2 x_3 + \\
\quad + b_6 \sum x_1 x_2 x_3 + b_7 \sum x_1^2 x_2 x_3 = \sum \bar{y}_i x_1; \\
b_0 \sum x_2 + b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3 + b_4 \sum x_1 x_2^2 + b_5 \sum x_1 x_2 x_3 + \\
\quad + b_6 \sum x_2^2 x_3 + b_7 \sum x_1 x_2^2 x_3 = \sum \bar{y}_i x_2; \\
b_0 \sum x_3 + b_1 \sum x_1 x_3 + b_2 \sum x_2 x_3 + b_3 \sum x_3^2 + b_4 \sum x_1 x_2 x_3 + b_5 \sum x_1 x_3^2 + \\
\quad + b_6 \sum x_2 x_3^2 + b_7 \sum x_1 x_2 x_3^2 = \sum \bar{y}_i x_3; \\
b_0 \sum x_1 x_2 + b_1 \sum x_1^2 x_2 + b_2 \sum x_1 x_2^2 + b_3 \sum x_1 x_2 x_3 + b_4 \sum x_1^2 x_2^2 + \\
\quad + b_5 \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_6 \sum x_1 x_2^2 x_3 + b_7 \sum x_1^2 x_2^2 x_3 = \sum \bar{y}_i x_1 x_2; \\
b_0 \sum x_1 x_3 + b_1 \sum x_2^2 x_3 + b_2 \sum x_1 x_2 x_3 + b_3 \sum x_1 x_3^2 + b_4 \sum x_1^2 x_2 x_3 + \\
\quad + b_5 \sum x_1^2 x_3^2 + b_6 \sum x_1 x_2 x_3^2 + b_7 \sum x_1^2 x_2 x_3^2 = \sum \bar{y}_i x_1 x_3; \\
b_0 \sum x_2 x_3 + b_1 \sum x_1 x_2 x_3 + b_2 \sum x_2^2 x_3 + b_3 \sum x_2 x_3^2 + b_4 \sum x_1 x_2^2 x_3 + \\
\quad + b_5 \sum x_1 x_2 x_3^2 + b_6 \sum x_2^2 x_3^2 + b_7 \sum x_1 x_2^2 x_3^2 = \sum \bar{y}_i x_2 x_3; \\
b_0 \sum x_1 x_2 x_3 + b_1 \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_2 \sum x_1 x_2^2 x_3 + b_3 \sum x_1 x_2 x_3^2 + b_4 \sum x_1^2 x_2^2 x_3 + \\
\quad + b_5 \sum x_1^2 x_2 x_3^2 + b_6 \sum x_1 x_2^2 x_3^2 + b_7 \sum x_1^2 x_2^2 x_3^2 = \sum \bar{y}_i x_1 x_2 x_3;
\end{array} \right. \quad (19)$$

Таблица 3.8 - Результаты проведения эксперимента

Обозначение	Факторы			Результаты опытов			Среднее результат ов
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y
1	2	3	4	5	6	7	8
эксперимент 1	+	-	-	13,58	15,62	13,9	14,36

Окончание табл. 3.8

эксперимент 2	+	+	-	8,78	6,81	6,3	7,29
эксперимент 3	+	-	+	18,9	16,9	18,2	18
эксперимент 4	+	+	+	19,49	20,32	18,08	19,29
эксперимент 5	-	-	-	17,72	18,08	17,5	17,76
эксперимент 6	-	+	-	18,26	19,4	19,8	19,15
эксперимент 7	-	-	+	18,79	17,01	19,2	18,33
эксперимент 8	-	+	+	20,79	17,07	19,3	19,05

Из полученных уравнений составляем матрицу:

1	39,2	$1,6 \cdot 10^{-3}$	6920	$7,84 \cdot 10^{-3}$	33908	$1,384 \cdot 10^{-3}$	6,7816	$140,5 \cdot 10^{-6}$
39,2	261,2288	$7,84 \cdot 10^{-3}$	33908	$52,2457 \cdot 10^{-3}$	176790,432	$6,7816 \cdot 10^{-3}$	$45194,5 \cdot 10^{-3}$	$670,633 \cdot 10^{-6}$
$1,6 \cdot 10^{-3}$	$7,84 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$1,384 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$	$6,7816 \cdot 10^{-6}$	$337,4 \cdot 10^{-6}$	$1695,4 \cdot 10^{-6}$	$27,436 \cdot 10^{-18}$
6920	33908	$1,384 \cdot 10^{-3}$	6019600	$6,7816 \cdot 10^{-3}$	29444840	1203,920	$5899 \cdot 10^{-105}$	$122470 \cdot 10^{-6}$
$7,84 \cdot 10^{-3}$	$52,2457 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$	$6,7816 \cdot 10^{-3}$	$13,06 \cdot 10^{-6}$	$45194,5 \cdot 10^{-3}$	$1695 \cdot 10^{-6}$	$11298,1 \cdot 10^{-6}$	$129,55 \cdot 10^{-18}$
33908	$337,4 \cdot 10^{-6}$	$6,781 \cdot 10^{-3}$	29444840	$45194,5 \cdot 10^{-3}$	196561610,5	$5899 \cdot 10^{-105}$	$393123,221 \cdot 10^{-6}$	$0,586585272$
$1,384 \cdot 10^{-3}$	$6,7816 \cdot 10^{-3}$	$337,4 \cdot 10^{-6}$	1203,920	$3226,18 \cdot 10^{-6}$	5899,208	$300980 \cdot 10^{-6}$	1,474802	$23928 \cdot 10^{-18}$
$6,7816 \cdot 10^{-3}$	$45194,5 \cdot 10^{-3}$	$1695,4 \cdot 10^{-6}$	$5899 \cdot 10^{-105}$	$11298,1 \cdot 10^{-6}$	39312,322	1,474802	$83910 \cdot 10^{-103}$	$113447 \cdot 10^{-18}$

В результате решения системы уравнений методом Крамера получим [10]:

$$b_0 = 8.254 \cdot 10^{-6}; b_1 = 1.653 \cdot 10^{-6}; b_2 = 0.134; b_3 = 1.067 \cdot 10^{-8}; b_4 = -0.054; b_5 = 1.891 \cdot 10^{-9};$$

$$b_6 = -1.415 \cdot 10^{-4}; b_7 = 5.907 \cdot 10^{-5}.$$

После подстановки полученных коэффициентов получим уравнение регрессии (20):

$$y = 8.254 * 10^{-6} + 1.653 * 10^{-6}x_1 + 0.134x_2 + 1.067 * 10^{-8}x_3 - 0.054x_1x_2 - 1.891 * 10^{-9}x_1x_3 - 1.415 * 10^{-4}x_2x_3 + 5.907 * 10^{-5}x_1x_2x_3 \quad (20)$$

По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор X_2 - скорость деформирования, так как он имеет больший по абсолютной величине коэффициент.

3.8 Анализ полученных результатов

Регрессионный анализ, как правило, проводится для ограниченной по объёму совокупности. Поэтому показатели регрессии – параметры уравнения регрессии, коэффициент детерминации могут быть искажены действием случайных факторов. Чтобы проверить, на сколько эти показатели характерны для всей генеральной совокупности, не являются ли они результатом стечения случайных обстоятельств, необходимо проверить адекватность построенной статистической модели.

Находим дисперсию воспроизводимости по формуле 20:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \right) = \frac{1}{n} \sum_j S_j^2, \quad (21)$$

где n – число экспериментов;

m – число опытов в каждом эксперименте;

y_{ji} – средний размер зерна i -того опыта в j -том эксперименте;

\bar{y}_j – среднее выборочное значение среднего размера зерна для j -го эксперимента

здесь внутренние суммы S_j^2 являются выборочными дисперсиями результатов опытов для j -го эксперимента ($j=1, \dots, n$). Для удобства оформляем расчеты в виде таблицы 3.9.

Таблица 3.9 – Расчет выборочных дисперсий

j	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}_j	$(y_{j1} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_j)^2$	S_j^2
1	2			3	4	5	6	7
1	13,58	15,62	13,9	14,36	0,6084	1,5876	0,2116	1,2038
2	8,78	6,81	6,3	7,29	2,2201	0,2304	0,9604	1,7055
3	18,9	16,9	18,2	18	0,81	1,21	0,2	1,11
4	19,49	20,32	18,08	19,29	0,4225	1,061	1,464	1,474
5	17,72	18,08	17,5	17,76	0,002	0,102	0,068	0,0858
6	18,26	19,4	19,8	19,15	0,792	0,063	0,4225	0,783
7	18,79	17,01	19,2	18,33	0,212	1,742	0,757	1,355
8	20,79	17,07	19,3	19,05	3,028	3,92	0,0625	3,505

Суммируя элементы последнего столбца таблицы 3.9, получаем:

$$\sum_{j=1}^8 S_j^2 = 11,222$$

Отсюда получаем дисперсию воспроизводимости:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 S_j^2 = \frac{11,222}{8} \approx 1,403$$

Определяем среднеквадратическое отклонение коэффициентов

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{n * m}} \approx \sqrt{\frac{1,403}{8 * 3}} \approx 0,24178 \approx 0,24$$

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы

$$n*(m-1) = 8*2 = 16$$

при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{\text{кр}} = 2,12$. Следовательно,

$$t_{\text{кр}} * S_{\text{коэф}} = 2,12 * 0,24 * 10^{-6} = 0,5088 * 10^{-6} \approx 0,51 * 10^{-6}$$

Сравнивая полученное значение $t_{\text{кр}} * S_{\text{коэф}} \approx 0,51 * 10^{-6}$ с коэффициентами уравнения регрессии, видим, что все коэффициенты по абсолютной величине больше $0,51 * 10^{-6}$. Следовательно, все коэффициенты значимы.

Для практического использования уравнения регрессии большое значение имеет его адекватность, т.е. соответствие фактическим данным. При анализе адекватности уравнения регрессии (модели) исследуемого процесса, возможны следующие варианты:

1. Построенная модель на основе F-критерия Фишера в целом адекватна, и все коэффициенты регрессии значимы. Такая модель может быть использована для принятия решений и осуществления прогнозов.

2. Модель по F-критерию Фишера адекватна, но часть коэффициентов не значима. Модель пригодна для принятия некоторых решений, но не для прогнозов.

3. Модель по F-критерию адекватна, но все коэффициенты регрессии не значимы. Модель полностью считается неадекватной. На ее основе не принимаются решения и не осуществляются прогнозы.

Выполним проверку на адекватность полученного уравнения регрессии с помощью критерия Фишера: если $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$, то уравнение адекватно.

Расчетное значение критерия Фишера определяется по формуле:

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\{y\}}^2},$$

где

$S_{\{y\}}$ – дисперсия воспроизводимости

$S_{\text{ост}}$ – остаточная дисперсия

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2,$$

где

n-число экспериментов;

m- число опытов в каждом эксперименте;

r- число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

\tilde{y}_j -значение реднего размера зерна, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j-го эксперимента;

\bar{y}_j - средне выборочное значение размера зерна для j-го эксперимента.

Определяем

$$F = \frac{2,02}{2,26} = 0,89$$

Для 5% уровня значимости ($t = 0,05$) и $f_1=2$, $f_2=16$, $F_{таб} = 3,63$

$F < F_{таб}$, т.е. уравнение регрессии адекватно.

По полученному уравнению регрессии строим графики зависимости размера зерна от коэффициента вытяжки, температуры и скорости деформирования (рис. 3.26 – 3.31).

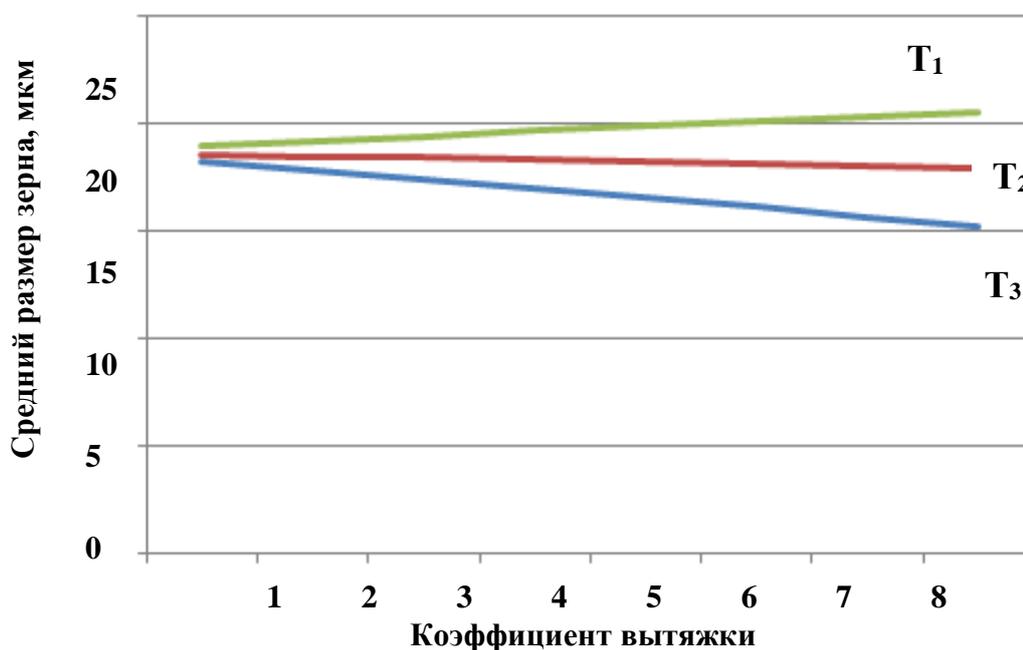


Рисунок 3.26 – Зависимость размера зерна от коэффициента вытяжки при: скорости деформирования 0,1 мм/с и температуре $T_1 = 930$ °C; $T_2 = 865$ °C; $T_3 = 800$ °C

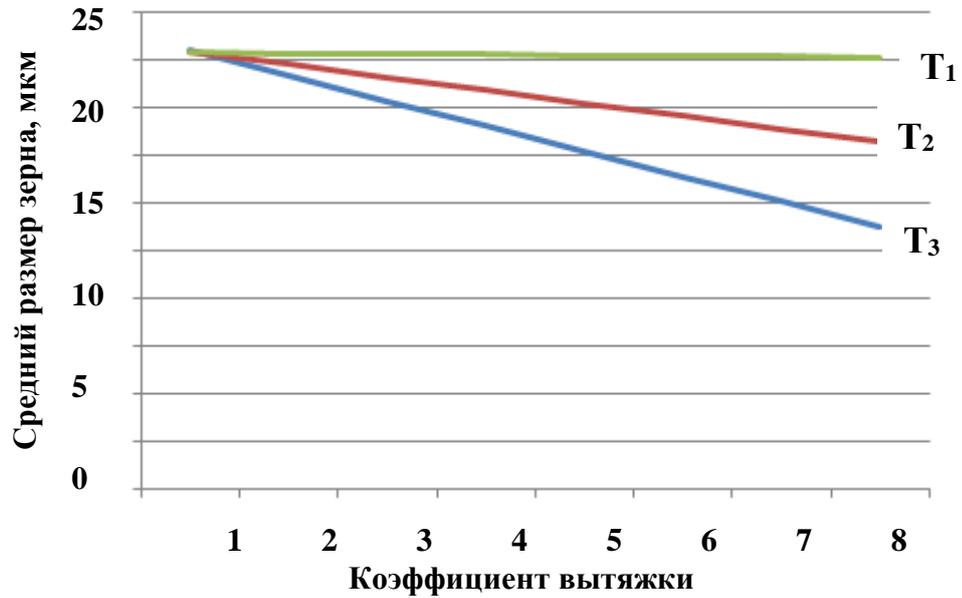


Рисунок 3.27 – Зависимость размера зерна от коэффициента вытяжки при: скорости деформирования 0,3 мм/с и температуре $T_1=930\text{ °C}$; $T_2=865\text{ °C}$; $T_3=800\text{ °C}$

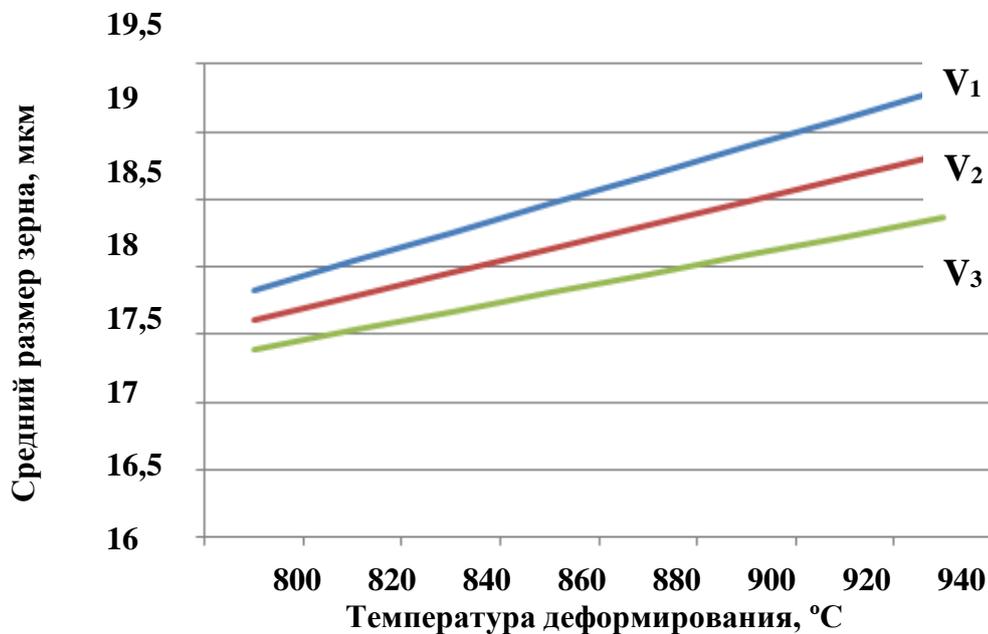


Рисунок 3.28 – Зависимость размера зерна от температуры деформирования при: коэффициенте вытяжки $\lambda=1,96$ и скорости деформирования: $V_1=0,1\text{ мм/с}$; $V_2=0,2\text{ мм/с}$; $V_3=0,3\text{ мм/с}$

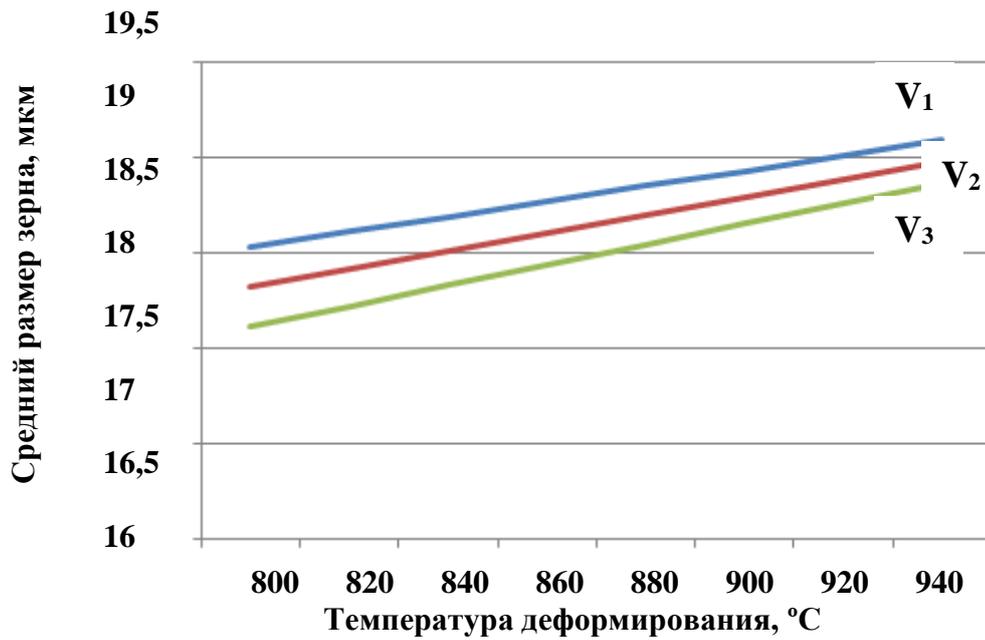


Рисунок 3.29 – Зависимость размера зерна от температуры деформирования при: коэффициенте вытяжки $\lambda = 7,84$ и скорости деформирования: $V_1 = 0,1$ мм/с; $V_2 = 0,2$ мм/с; $V_3 = 0,3$ мм/с

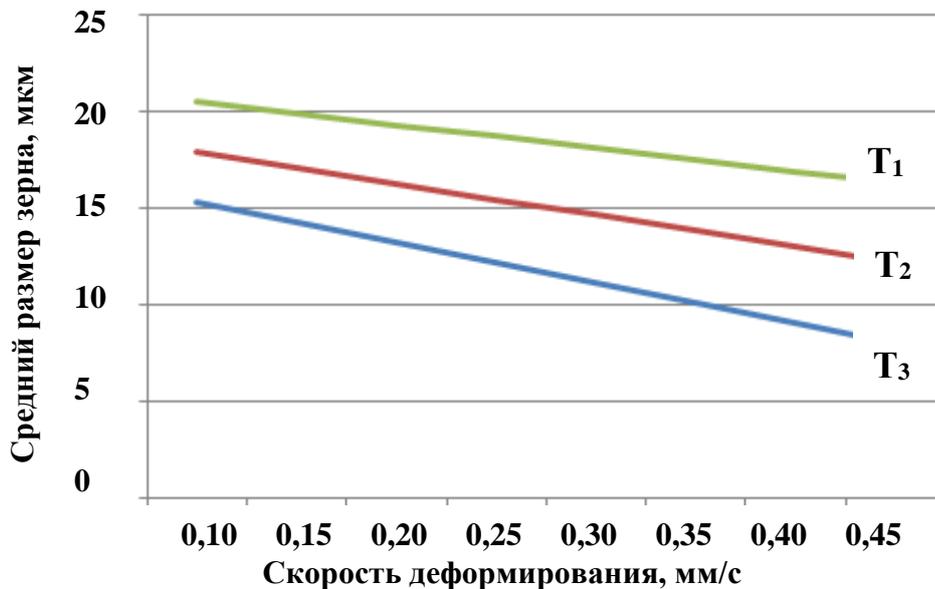


Рисунок 3.30 – Зависимость размера зерна от скорости деформирования при: коэффициенте вытяжки $\lambda = 1,96$ и температуре $T_1 = 930$ °С; $T_2 = 865$ °С; $T_3 = 800$ °С

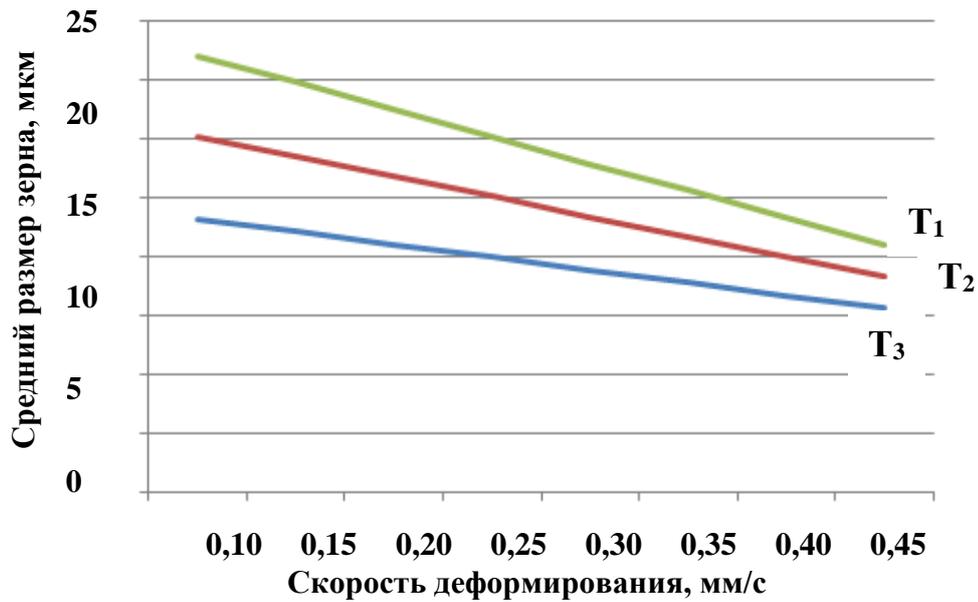


Рисунок 3.31 – Зависимость размера зерна от скорости деформирования при: коэффициенте вытяжки $\lambda = 7,84$ и температуре $T_1 = 930$ °C; $T_2 = 865$ °C; $T_3 = 800$ °C

Размер зерна наиболее сильно зависит от коэффициента вытяжки и скорости деформирования. Минимальное значение размера зерна получается при коэффициенте вытяжки 7,84, температуре 800 °C, и скорости деформирования 0,3 мм/с, при этом средний размер зерна составляет 7,29 мкм. Полученные графические зависимости позволяют сделать вывод, что для дальнейшего уменьшения размера зерна необходимо увеличить коэффициент вытяжки.

Таким образом, разработана модель, позволяющая оценить влияние технологических факторов на средний размер зерна.

3.9 Выводы по главе

По результатам проведенного моделирования в QForm 3D и разработки математической модели зависимости размеров зерна от температурно-скоростных условий протекания процесса изотермического выдавливания можно делать следующие выводы.

1. По результатам проведенного исследования объемного напряженного состояния путем моделирования процесса прямого изотермического выдавливания в программном комплексе QForm 3D определено, что при данном виде предварительного формообразования создаются условия, способствующие измельчению структуры. Так же при изотермическом выдавливании не закладывается критических внутренних и поверхностных дефектов, например, в виде трещин и утяжин.

2. В ходе экспериментальных исследований определено, что условиями формирования ультрамелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6 при изотермическом выдавливании являются: коэффициент вытяжки $\lambda=7,84$; скорость деформирования $V=0,3$ мм/с; температура протекания процесса $T=800$ °С.

3. Разработана математическая модель для прогнозирования размеров зерна в титановом сплаве ВТ6 в интервале температур 800-930 °С. Адекватность разработанной математической модели составляет 98% относительно полученных экспериментальных данных.

4. По результатам испытаний на сжатие на испытательной машине LabTest 6.125Н установлено, что образец, полученный методом изотермического выдавливания при коэффициенте вытяжки $\lambda=7,84$; скорости деформирования $V=0,3$ мм/с; температуре протекания процесса $T=800$ °С имеет сопротивление деформации на 42% меньше образцов, изготовленных по стандартной технологии. Эти данные подтверждают предположение о возможности увеличения стойкости ковочных штампов при изотермической штамповке.

ГЛАВА 4 Разработка технологии штамповки детали типа «лопатка ГТД» из титанового сплава, обеспечивающей заданную размерную точность получения деталей

В современных экономических условиях одним из критериев успешности производства является себестоимость продукции, позволяющая конкурировать не только на внутреннем рынке, а и на мировом уровне. Важными составляющими стоимости изготовления лопаток компрессора ГТД является металлоемкость и общая трудоемкость процесса. Величина этих факторов во многом определяется сквозной технологией изготовления лопаток. При этом величина КИМ и трудоемкость обработки в механическом цехе напрямую зависят от вида заготовки, получаемой в заготовительном цехе. В настоящее время, в связи с усложнением геометрической формы лопаток компрессора, многие производители для упрощения технологии штамповки изготавливают заготовки со значительными допусками под механическую обработку. Из выше перечисленного следует, что в настоящее время важной задачей является разработка современных прогрессивных способов получения заготовок лопаток. Таким направлением является штамповка лопаток под безразмерную обработку профиля пера.

4.1 Анализ существующих технологических процессов штамповки лопаток

Как правило, технологические процессы изготовления точных заготовок лопаток на большинстве российских и зарубежных предприятий по изготовлению газотурбинных двигателей состоят из несколько деформирующих операций. Предварительное фасонирование замковых частей, многопереходная штамповка с обрезкой облоя и последующая правка неизбежно приводят к большим потерями металла в облой и при зачистке дефектов. Кроме того, такие заготовки имеют не

высокий коэффициент использования металла по причине наличия припуска под дальнейшую механическую обработку по всей поверхности.

Общепризнано [3], что наиболее эффективными альтернативными технологиями штамповки поковок лопаток являются:

- изотермическая штамповка;
- штамповка на винтовых прессах;
- штамповка на высокоскоростных молотах.

Поскольку штамповка титановых сплавов на винтовых прессах и высокоскоростных молотах может приводить к дефектам структурной неоднородности в виде белых полос (рис. 4.1), что недопустимо для лопаток авиационных ГТД, то в дальнейшем в работе будет рассматриваться процесс изотермической штамповки.

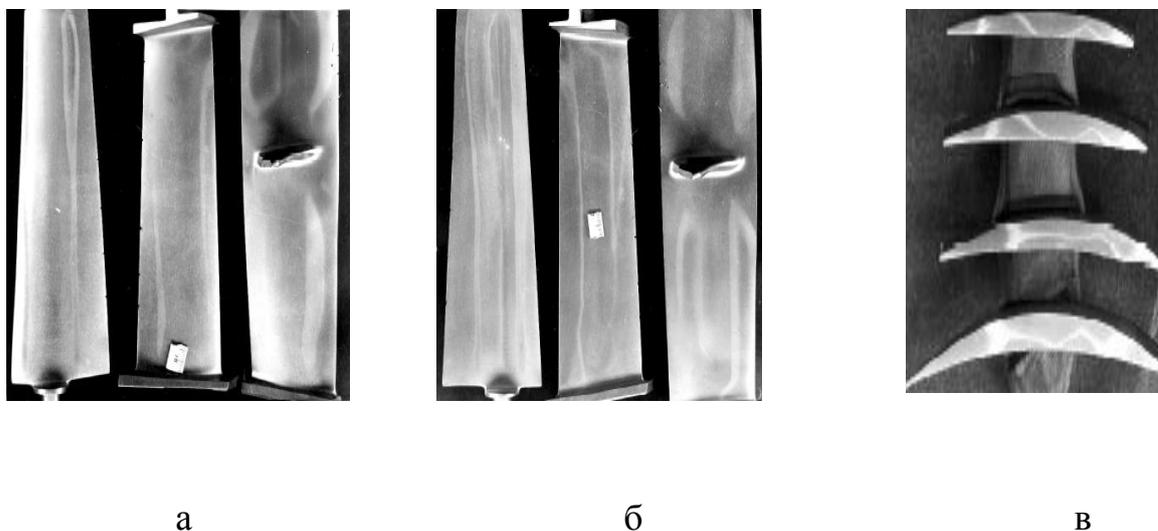


Рисунок 4.1 - Внешний вид полосчатости на профиле пера лопаток, изготовленных из материала ВТЗ-1:

а) со стороны спинки; б) со стороны корыта; в) в поперечном направлении

В настоящее время в ПАО «ОДК-Сатурн» реализуемый технологический процесс изотермической штамповки лопаток компрессора с припуском под механическую обработку профиля пера $1,5_{-0,5}^{+0,5}$ (рис. 4.2) из титанового сплава ВТ6 (таб. 4.1 и 4.2)

Таблица 4.1 – Химический состав титанового сплава ВТ6 в %

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
до 0,3	до 0,1	до 0,15	3,5- 5,3	до 0,05	86,485- 91,2	5,3- 6,8	до 0,3	до 0,2	до 0,015	прочих 0,3

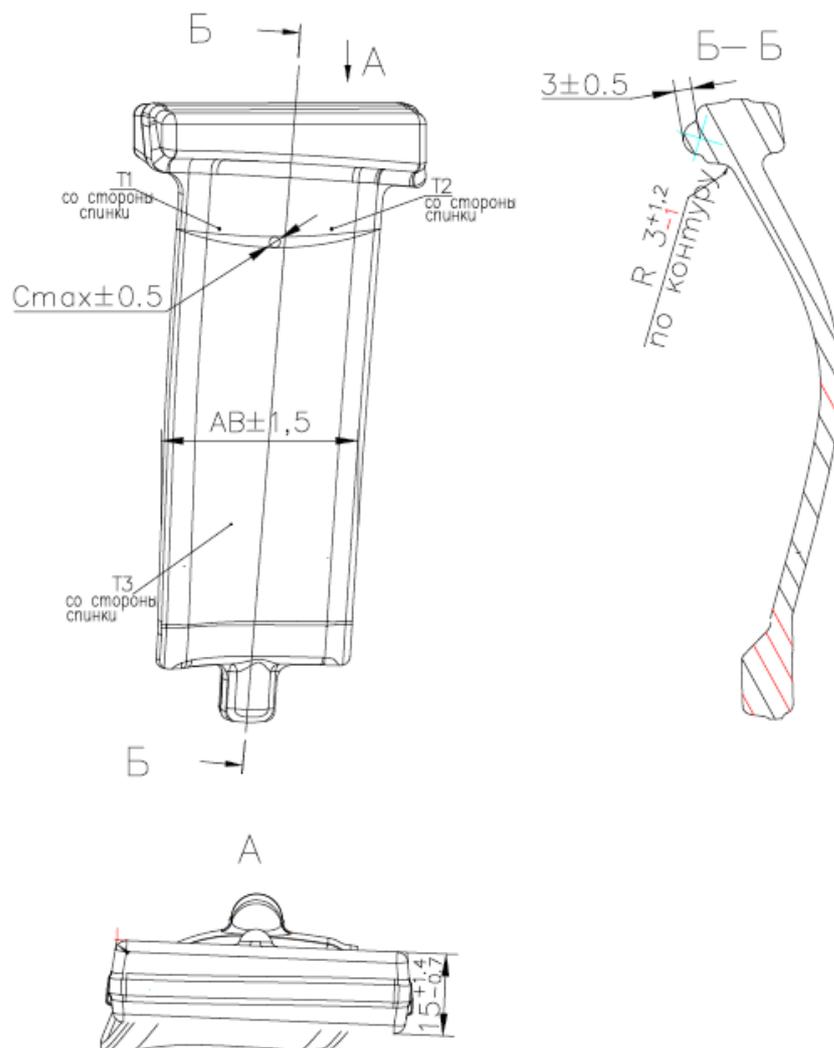


Рисунок 4.2 - Эскиз штамповки лопатки компрессора ГТД

Таблица 4.2 - Механические свойства сплава ВТ6 при повышенных температурах

Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	Ψ , %	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	Ψ , %
20	90	100	30	450	42	55	38
250	60	70	36				
350	45	65	39				

состоит из следующих деформирующих операций (рис. 4.3, 4.4):

- 1-я высадка (набор металла под технологическую бобышку);
- 2-я высадка (набор замковой части за три перехода);
- штамповка объемная, изотермическая;
- обрезка облоя с отдельного нагрева;
- калибровка изотермическая;

Недостатками таких заготовок является низкий коэффициент использования металла и большая трудоемкость последующей механической обработки, включающей ручную полировку профиля пера.

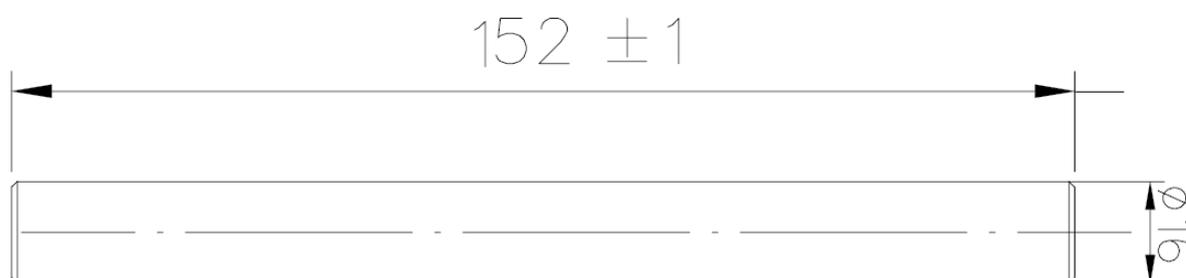


Рисунок 4.3 – Эскиз исходной заготовки

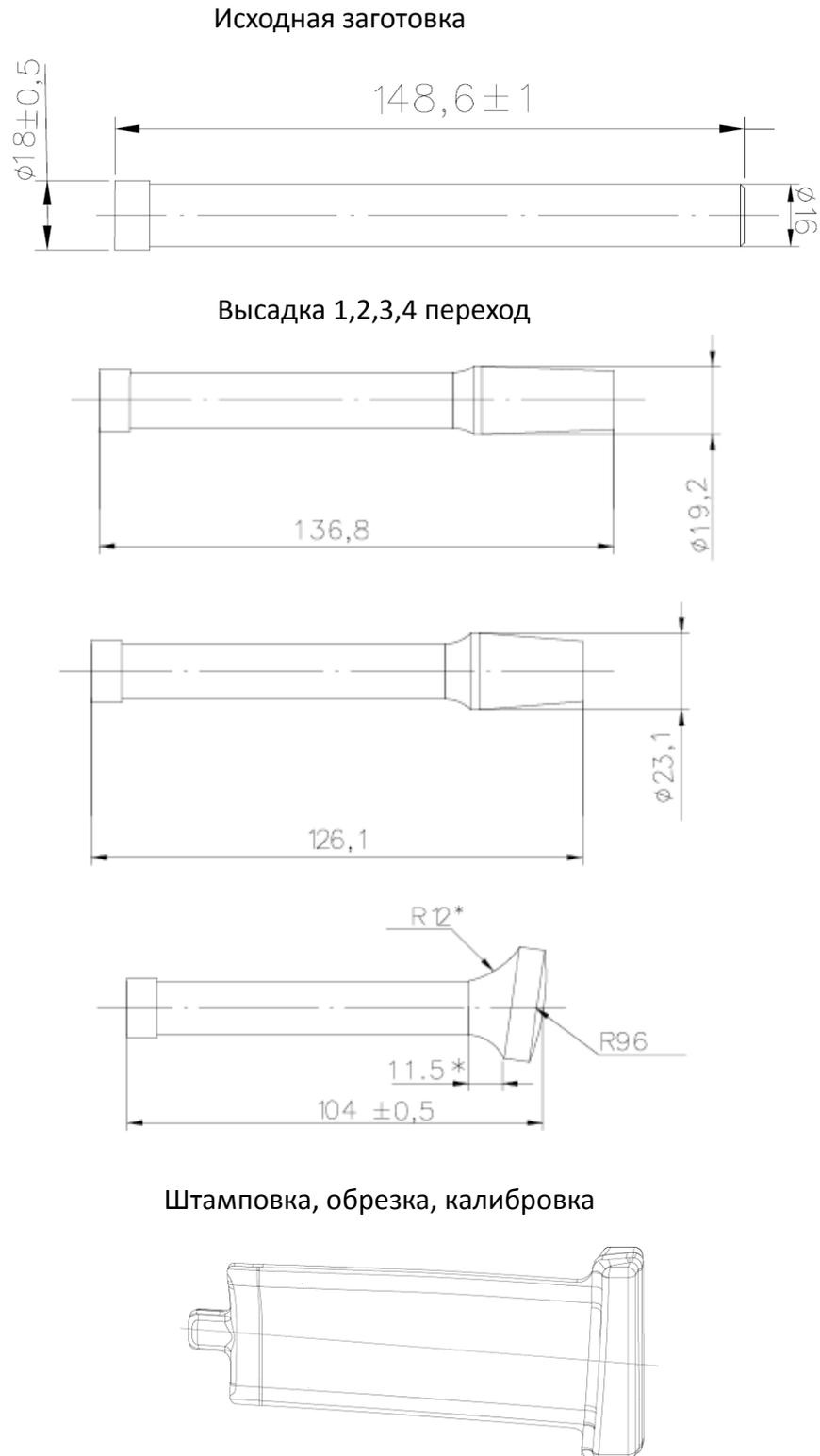


Рисунок 4.4 - Технологические переходы получения заготовок штамповкой по существующему технологическому процессу

Попытки перехода от заготовок с припуском на бесприпусковые только за счет уменьшения объема штампуемого металла, без изменения технологии предварительного фасонирования заканчиваются неудачей ввиду ряда объективных причин. Анализируя данный технологический процесс более подробно с точки зрения ОМД можно отметить нетехнологичность такого способа набора замковой части из-за несоблюдения условия устойчивости стержня при высадке (длина высаживаемой части должна быть не более 3-х диаметров заготовки [101]). Плюс к этому добавляются погрешности изготовления штамповой оснастки, которая состоит из нескольких элементов: блок крепления штамповых вставок, устанавливаемый в ГКМ, и сами штамповые вставки. Всё это усложняет процесс настройки прессового оборудования и требует от исполнителя высокой квалификации. Также большое влияние оказывает и техническое состояние горизонтально-ковочной машины, которое должно быть идеальным для получения подобных заготовок. Ещё одним недостатком данного способа получения заготовок можно считать обрезку в штампе на провал, после которой появляется необходимость калибровать детали для возврата утраченной после коробления геометрии.

Таким образом, существующий технологический процесс получения поковок штампованных лопаток компрессора из титановых сплавов не подходит для получения заготовок лопаток под дальнейшую безразмерную обработку профиля пера, так как имеет ряд существенных недостатков, усложняющих внедрение данной технологии и обеспечение повторяемости процесса при серийном использовании.

4.2 Разработка технологического процесса изготовления лопаток ГТД из титановых сплавов с применением изотермического выдавливания

Учитывая все ранее перечисленные недостатки существующей технологии получения заготовок лопаток с малым припуском можно наметить следующие

направления при разработке перспективного технологического процесса штамповки лопаток:

- сокращение количества фасонирующих переходов при наборе замковой части;
- повышение стойкости деформирующего инструмента на операции объемная изотермическая штамповка;
- предотвращение коробления деталей при выполнении операции обрезка облоя.

Основываясь на данных, полученных в главе 3, можно сделать вывод о целесообразности перехода от 6-ти переходов с 3-мя нагревами высадки и горячего вальцевания в качестве подготовительных операций на одно переходное изотермическое выдавливание. Таким образом, при изотермическом выдавливании будет формироваться ультрамелкозернистая структура, позволяющая снизить температуру нагрева штампов и заготовок на операции объемная изотермическая штамповка, что позволит снизить нагрузку на штамп и соответственно увеличить количество деталей, снимаемых со штампа до его доработки и восстановления без изменения материала штампа.

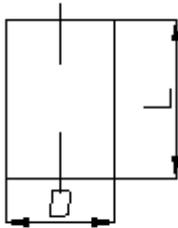
Предлагаемый технологический процесс штамповки заготовок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 (рис. 4.6) состоит из следующих операций (рис. 4.5):

- резка мерных заготовок;
- изотермическое выдавливание [102];
- объемная изотермическая штамповка [103];
- обрезка в штампе с прижимом;
- термообработка;
- термофиксация (по необходимости).

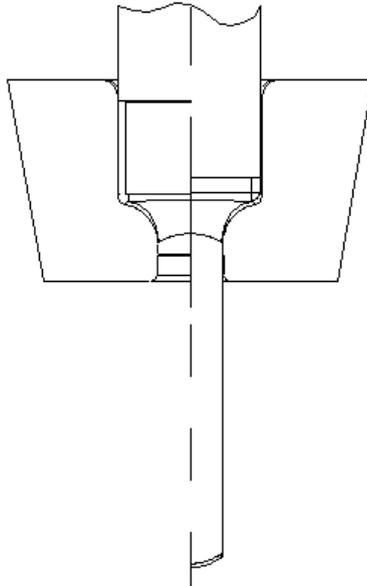
Сущность процесса изотермического выдавливания поясняется эскизом (рис. 4.7). Способ осуществляется следующим образом. Заготовку 1, выполненную из

титанового сплава ВТ6, помещают в матрицу 2. Затем выдавливают ее через рабочее отверстие 3 матрицы 2 рабочим пуансоном 4.

Исходная
заготовка



Изотермическое выдавливание



Штамповка, обрезка, калибровка,
термофиксация

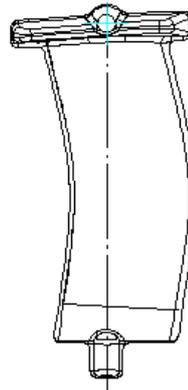


Рисунок 4.5 - Технологические переходы получения заготовок штамповкой по предлагаемому технологическому процессу

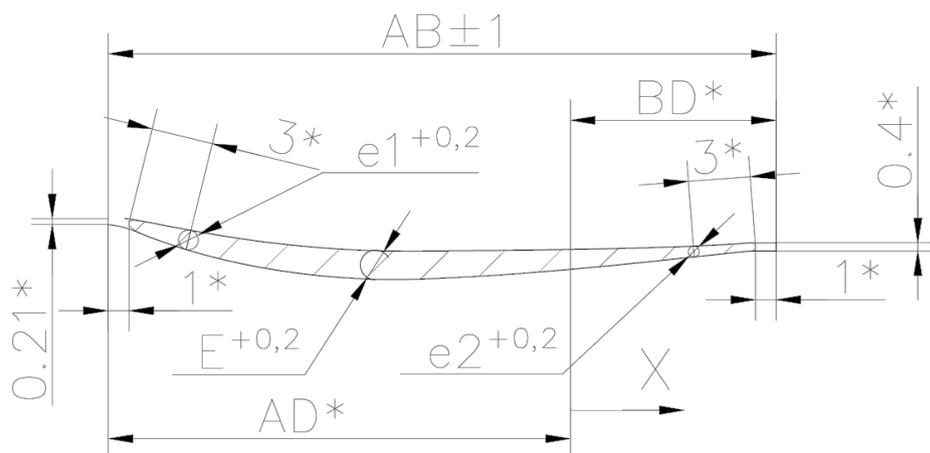


Рисунок 4.6 - Схема построения профиля пера лопатки

Одновременно с началом выдавливания заготовки 1 на нее наносят смазку 5. Смазку осуществляют при помощи вспомогательных пуансонов 6, радиально расположенных относительно рабочего пуансона 4. Вспомогательные пуансоны 6 входят в полости 7, выдавливая смазку 5 через каналы 8 в очаг пластической деформации одновременно с началом выдавливания заготовки 1. Причем давление смазки 5 должно быть не ниже предела текучести матери-

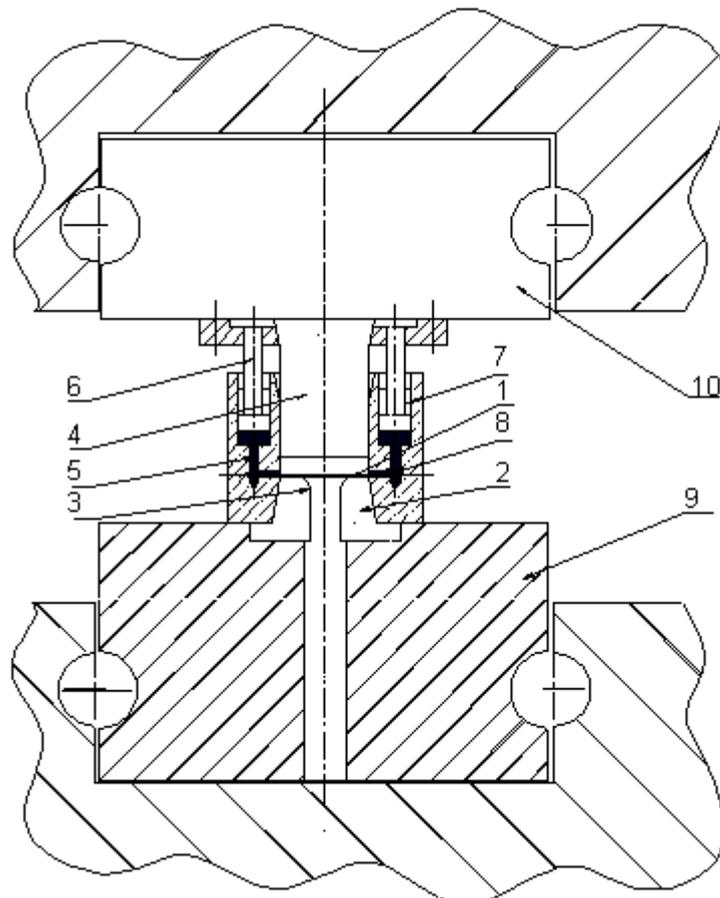


Рисунок 4.7 - Общий вид устройства для осуществления изотермического выдавливания титановых заготовок: 1- заготовка; 2- матрица; 3- рабочее отверстие матрицы; 4- рабочий пуансон; 5- смазка; 6- вспомогательные пуансоны 7- полости для смазки; 8- каналы для подачи смазки; 9- контейнер; 10- верхняя плита штампа ала заготовки 1. Вспомогательные пуансоны 6 расположены радиально от рабочего пуансона 4, и выдавливают смазку 5 через полости 7. Полости 7 соединены с каналами 8 для подвода смазки 5 в очаг пластической деформации. Каналы 8 для

подвода смазки 5 в очаг пластической деформации выполнены под углом 1-90° относительно оси выдавливания.

Устройство работает следующим образом. При включении траверсы прессы (не показана) верхняя плита 10 с установленными на ней рабочим пуансоном 4 и вспомогательными пуансонами 6 движется вниз. При этом рабочий пуансон 4 начинает выдавливать заготовку 1, установленную в матрице 2 через очко 3. Вспомогательные пуансоны 6 входят в полости 7. Одновременно с началом выдавливания заготовки 1 вспомогательные пуансоны 6 начинают выдавливать смазку 5 из полостей 7 через каналы 8 в очаг пластической деформации. После окончания выдавливания заготовку из матрицы удаляют с помощью выталкивателя. Таким образом, осуществляется непрерывная смазка заготовки в процессе выдавливания, обеспечивая при этом отсутствие участков сухого трения в очке матрицы, и повышение качества получаемой выдавленной заготовки за счет устранения задиров и налипания заготовки на матрицу.

Заготовки, полученные указанным способом, как было сказано выше, формируются за один переход (рис. 4.8).

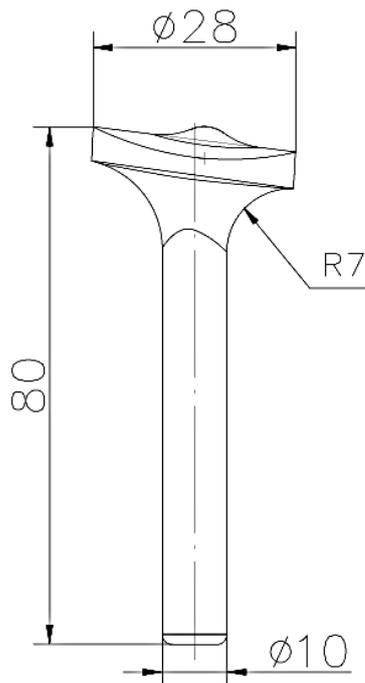


Рисунок 4.8 - Эскиз заготовки, полученной изотермическим выдавливанием

4.3 Перспективы совершенствования устройства установки для изотермического выдавливания

Устройство для изотермического выдавливания титановых сплавов, предложенное в диссертационной работе, позволяет получать заготовки круглого или овального сечения (рис. 4.9). Это связано с ограниченными возможностями по изготовлению штампового инструмента. В дальнейшем при внедрении данного метода в серийное производство возможно усовершенствовать конструкцию оснастки путем максимального приближения геометрии рабочего отверстия матрицы к окончательному профилю штамповки лопатки (рис. 4.10).

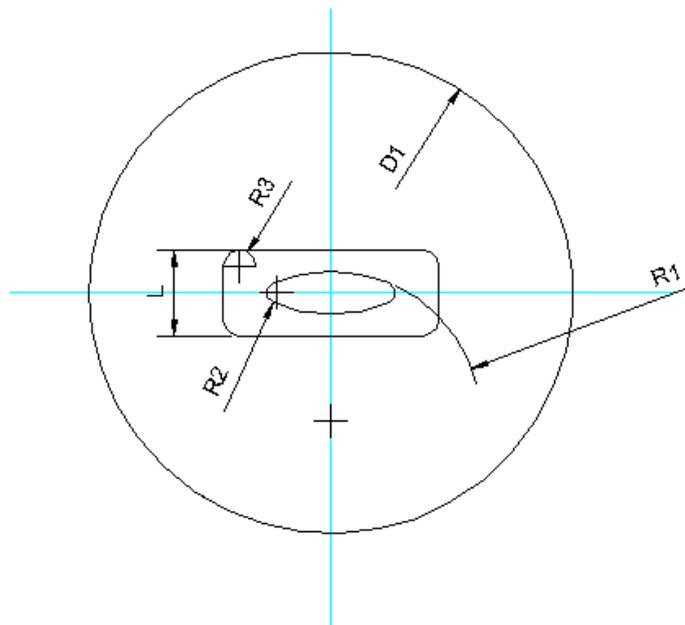


Рисунок 4.9 - Схема построения рабочего отверстия матрицы штампа для выдавливания

Таким образом, возможно повысить стойкость ковочного штампа за счет снижения удельных усилий на гравюре инструмента и улучшения условий истечения металла вследствие обеспечения стабильности слоя защитно-смазочного покрытия и из-за уменьшения пути перемещения материала относительно ручья штампа.

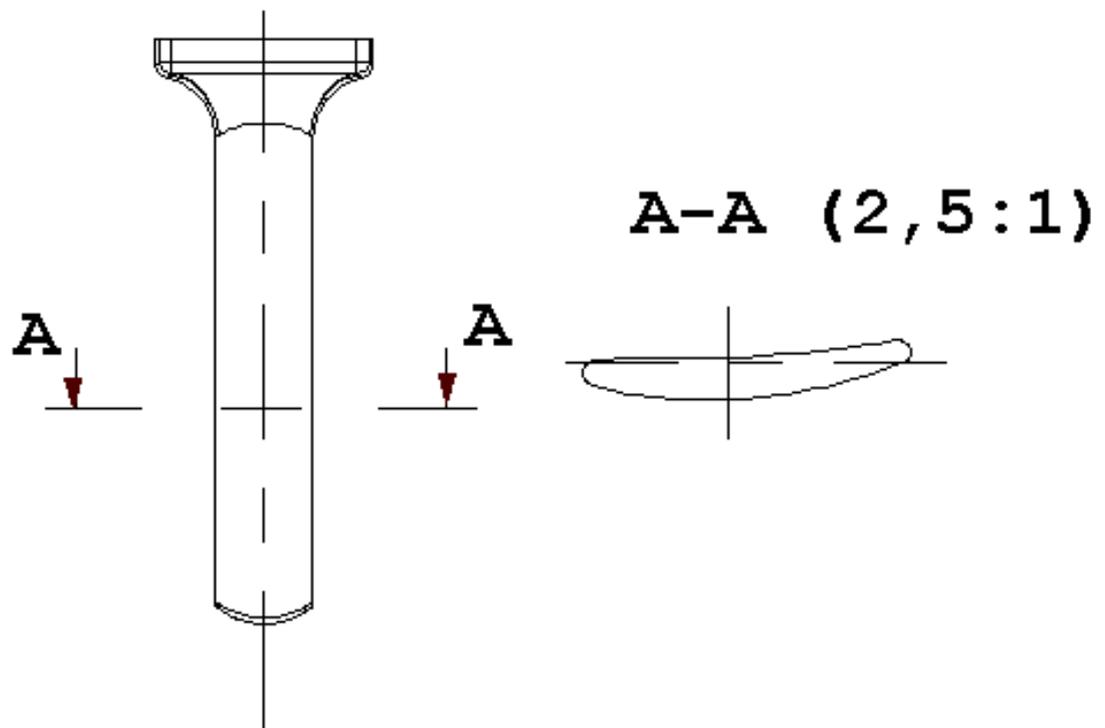


Рисунок 4.10 - Вид выдавленной заготовки с сечением максимально приближенным к окончательному профилю заготовки лопатки

ГЛАВА 5 Оценка стойкости штампа для выдавливания

Практическое применение процесса высокотемпературного изотермического деформирования металлов с помощью инструмента, нагреваемого до температуры 800-900 °С, предъявляет к штамповым материалам требование способности работать в условиях длительного нагрева при высоких температурах и нагрузках.

В связи с этим можно указать на следующие основные условия эксплуатации штампового инструмента [104]:

1. Высокий разогрев вследствие длительного контакта с заготовкой, когда поверхностные слои рабочих частей штампов разогреваются до 800–900 °С.
2. Циклическое температурно-силовое воздействие. В теле штампа возникает сложно - напряженное состояние в результате наложения термических напряжений и напряжений, вызванных сопротивлением деформируемого материала.
3. Высокое давление на инструмент. Кроме того, циклический температурно-силовой режим работы инструмента вызывает изменение свойств участков гравюры, прилегающих к рабочим поверхностям.

Основные повреждения гравюры штампов, работающих при горячей штамповке, можно классифицировать следующим образом:

1. Износ участков гравюры, приводящий к изменению размеров штамповой полости вследствие удаления с ее поверхности слоя металла. Выделяют следующие виды износа: абразивный, адгезионный, окислительный [105-108]
2. Пластическая деформация (смятие) элементов гравюры, приводящая к изменению ее размеров и формы, которая во многом определяется разупрочнением приконтактных участков материала штампов.
3. Возникновение трещин термомеханического характера, приводящее к образованию сетки разгара, объясняющееся значительным градиентом температур по сечению инструмента [109]
4. Возникновение усталостных трещин в результате воздействия циклических механических нагрузок.

Условия эксплуатации штампа в изотермических условиях от традиционных методов штамповки отличаются рядом особенностей [110]:

1) штамповка производится в изотермических условиях при рабочих температурах 950 °С;

2) процесс деформирования происходит при пониженных скоростях 0,05–0,1 м/с, что обуславливает длительное время контакта заготовки с инструментом (до 2 мин за один цикл штамповки);

3) удельная нагрузка при штамповке составляет не более 400 МПа.

Эти особенности вызывают и особый характер взаимодействия контактных поверхностей. В зоне стыка трущихся пар (триад) имеет место пластический или вязко - пластический контакт. Причем длительный, от одной до нескольких минут, контакт между штампом и заготовкой, при действии высоких изотермических температур и давлений, резко активизирует процессы ползучести, адгезии и окисления, что в совокупности приводит к следующим преобладающим видам интенсивного износа инструмента: адгезионно-механическому износу и пластической деформации гравюры [109, 111].

В настоящее время на российских авиационных предприятиях при изотермической штамповке лопаток компрессора газотурбинных двигателей из титановых сплавов при температурах выше 900 °С в качестве штампового материала используют литейные жаропрочные сплавы ЖС6, ЖС6У, ЖС6К.

Авторами работы [88] основным показателем работоспособности штампового материала при изотермической штамповке предложено считать отношение предела текучести материала штампа к пределу текучести деформируемого материала при температуре деформации. В соответствии с предложенной методикой были проведены испытания образцов, выполненных из сплава ВТ6, изготовленного по ОСТ 1 90006 и методом изотермического выдавливания. В качестве штампового материала рассматривали сплав ЖС6У.

На первом этапе были проведены испытания по определению напряжения течения титанового сплава ВТ6 при температурах: 650 °С, 700 °С, 750 °С, 800 °С (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Внешний вид образцов после испытания: а образцы из ВТ6 после выдавливания; б образцы из ВТ6 по ОСТ

По результатам испытаний были построены диаграммы зависимости напряжения течения от температуры (рис. 5.2)

Из графика на рисунке 5.2 видно, что титановый сплав с измельченным зерном более пластичный и при температуре 650 °С его пластичность выше в более чем два раза, а при повышении температуры испытаний эта разница уменьшается.

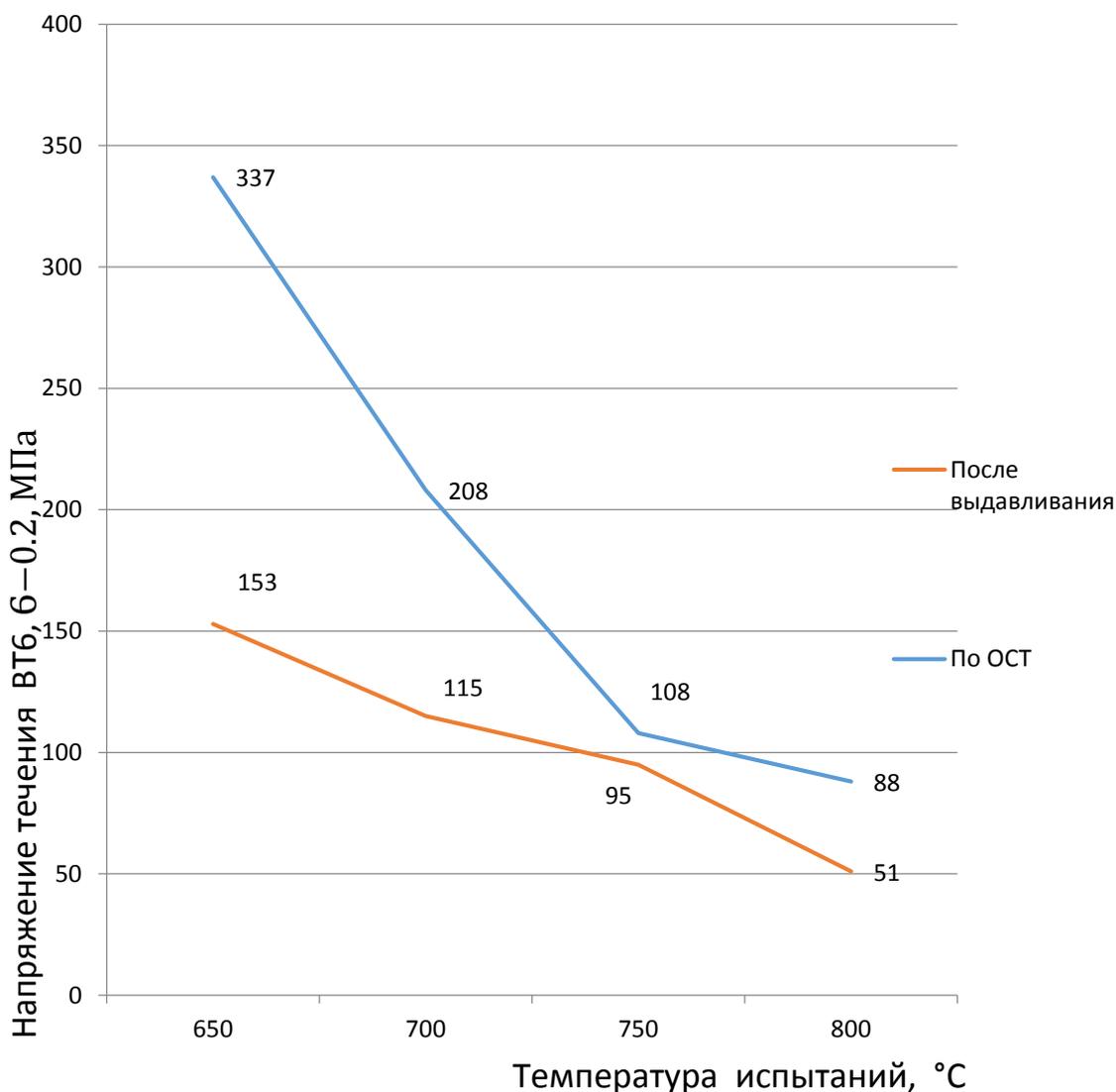


Рисунок 5.2 - График изменения напряжения течения титанового сплава ВТ6 от температуры (по усредненным значениям)

Аналогичные испытания были проведены для штампового материала ЖС6У по результатам, которых также была построена диаграмма (рис. 5.3).

По результатам проведенных исследований был определен коэффициент запаса по текучести штампового материала относительно деформируемого материала при

температурах обработки. Графическое отображение зависимости приведено на рисунке 5.4.

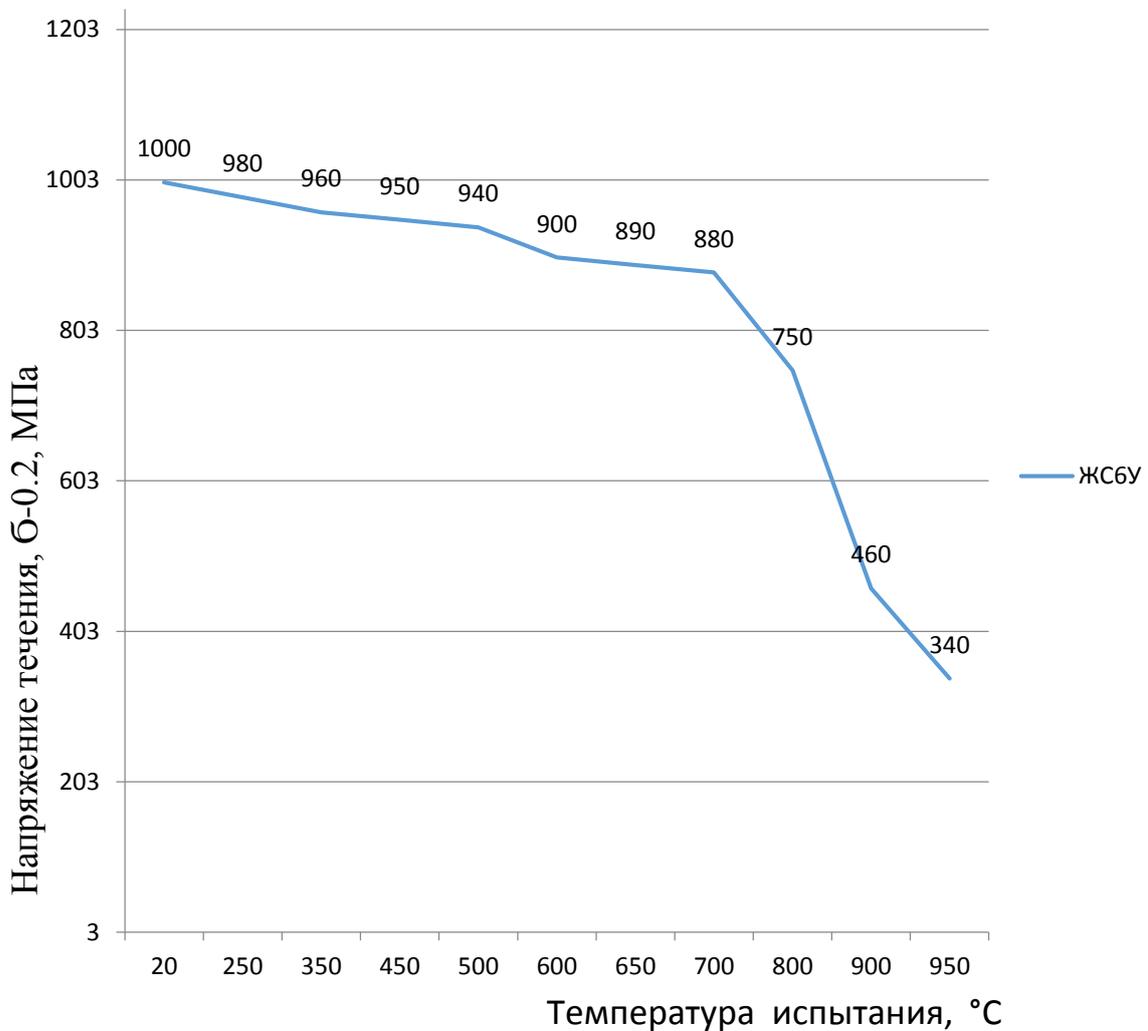


Рисунок 5.3 - График изменения напряжения течения штампового материала ЖС6У

По графику на рисунке 5.4 хорошо видно повышение коэффициента запаса по текучести с ростом температуры большим у титанового сплава с УМЗ. На основании полученных данных можно сделать вывод о целесообразности

применения изотермического выдавливания в условиях протекания процесса динамической рекристаллизации как способа измельчения структуры заготовки с целью повышения ресурса ковочной оснастки.

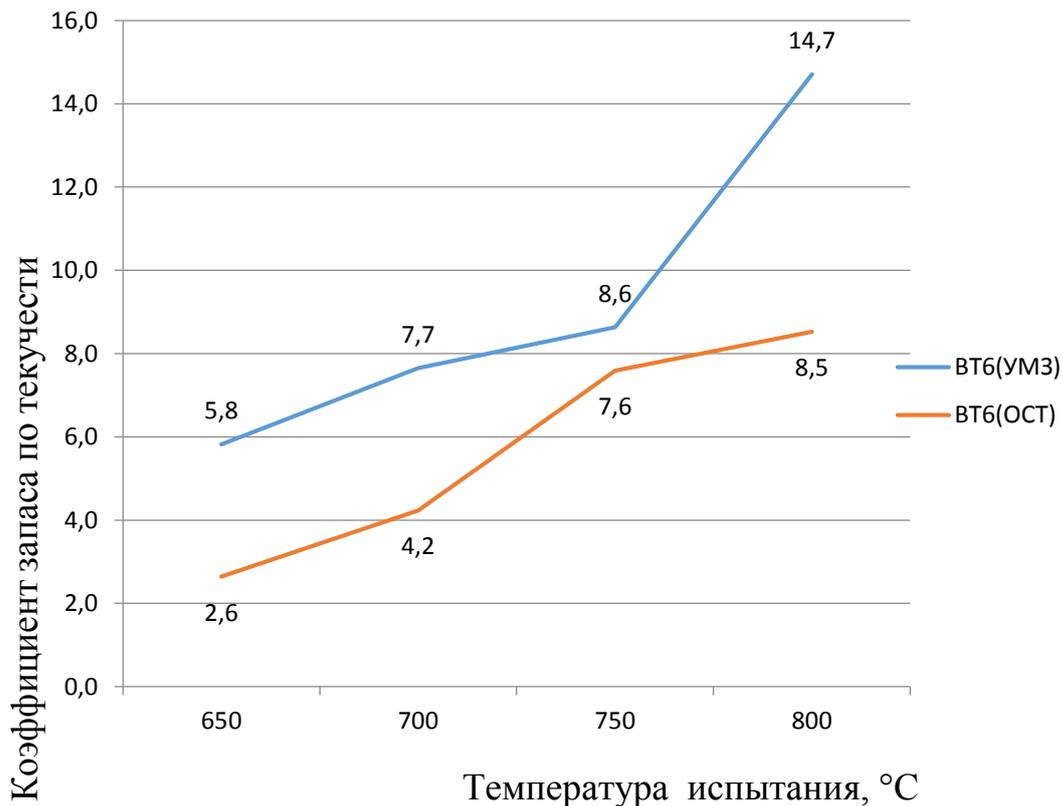


Рисунок 5.4 - График изменения коэффициента запаса по пределу текучести ЖС6У от ВТ6 в зависимости от температуры

Известно [88], что износ штампа при изотермической штамповке носит характер продавливания, возрастающего по мере эксплуатации штампа, т. е. материал штампа работает в режиме ползучести [112, 113]. Удельное усилие при заданной схеме деформации определяется сопротивлением материала заготовки деформированию и возрастает с увеличением скорости деформации. Таким образом, с увеличением скорости деформирования, с одной стороны, возрастает нагрузка на штамп (удельное усилие), что уменьшает число циклов нагружения до

достижения предельной допустимой пластической деформации штампа, с другой – уменьшается время пребывания штампа под нагрузкой в течение каждого цикла нагружения, что должно увеличивать число циклов до достижения предельной допустимой пластической деформации штампа, т. е. до выхода его из строя. В такой ситуации не исключена возможность существования некоторой оптимальной скорости, соответствующей максимальному числу циклов нагружения, т.е. максимальной стойкости штампа.

В работе [114] предлагается методика расчета стойкости деформирующего инструмента через определение оптимальной скорости деформирования, учитывающая ползучесть материала штампа. В качестве исходных данных используется семейство кривых ползучести штампового материала (схематически показаны на рисунке 5.5) при постоянной температуре, равной температуре изотермической деформации, для различных значений напряжения ($\sigma_6 > \sigma_5 > \sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$) и скоростная зависимость сопротивления материала заготовки деформированию при той же температуре:

$$\sigma_i = \sigma_{i0} \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i0}} \right)^m, \quad (22)$$

где в общем случае значения m и σ_{i0} могут зависеть от скорости.

За критерий стойкости штампа принимали его максимальную деформацию $[\varepsilon]$, допускаемую требованиями, предъявляемыми к точности штампованных поковок. В расчетах принимали, что штамп сохраняет работоспособность в пределах второй (установившейся) стадии ползучести, т. е. он не должен доводиться до интенсивного износа.

Из семейства кривых ползучести (рис. 5.5) можно получить зависимости предельного времени $\tau_{пр}$, за которое достигается деформация $[\varepsilon]$, от напряжения σ , показанные на рисунке 5.6 ($[\varepsilon]_3 > [\varepsilon]_2 > [\varepsilon]_1$). Зависимости $\tau_{пр} = \tau_{пр}(\sigma)$ в пределах

второй стадии ползучести могут быть с удовлетворительной точностью аппроксимированы формулой (23) [114]:

$$\tau = a / \sigma^k, \quad (23)$$

где a и k – параметры, зависящие от материала штампа, постоянные для данной температуры и для выбранной величины $[\varepsilon]$.

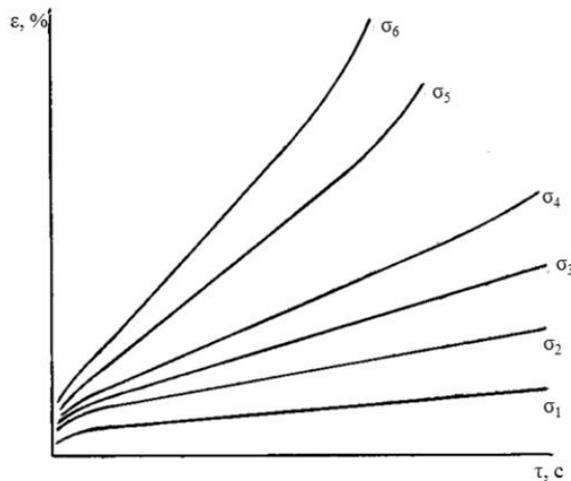


Рисунок 5.5 - Кривые ползучести для материала штампа [114]

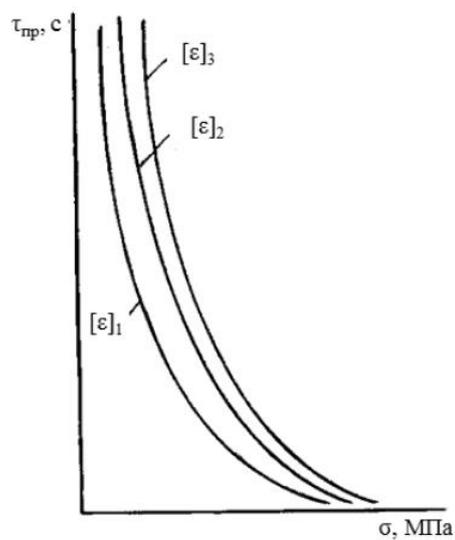


Рисунок 5.6 - Зависимость времени предельной деформации штампа от напряжения [114]

В расчетах принимали, что условие линейного суммирования повреждений справедливо не только до разрушения, но и до достижения деформации $[\varepsilon]$, а поскольку в общем случае напряжение σ в течение цикла может меняться, то

$$\int_0^{\tau_{\text{пр}}} \frac{d\tau}{\tau_{\text{пр}}(\sigma)} = 1, \quad (24)$$

где $\tau_{\text{пр}}$ - время, за которое достигается деформация штампа $[\varepsilon]$ при заданном законе изменения σ .

При штамповке имеют место многократно повторяющиеся циклы нагружения и разгрузки штампа. В этом случае условие линейного суммирования повреждений принимает вид формулы (30) [114]:

$$\bar{n} \int_0^{\tau_{\text{ц}}} \frac{d\tau}{\tau_{\text{пр}}(\sigma)} = 1, \quad (25)$$

где \bar{n} – число циклов до деформации $[\varepsilon]$, т.е. стойкость штампа (количество отштампованных поковок), $\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{пр}}/\bar{n}$ – время одного цикла штамповки, с.

Стойкость штампов можно рассчитать для любых случаев нагружения, при которых давление на штамп определено как функция времени. Для установления общих закономерностей рассмотрим осадку цилиндрической заготовки вдоль оси с постоянной скоростью деформирования. Деформацией штампа во время возрастания нагрузки до начала пластической деформации заготовки и во время разгрузки пренебрегаем. Давление на штамп (удельное усилие осадки) составляет

$$q = \sigma_{i0} \left(\frac{V}{\varepsilon_{i0} H} \right)^m \left(1 + \frac{\mu D}{3H} \right), \quad (26)$$

где V - скорость деформирования, м/с; μ – коэффициент трения; $D = D_0 \sqrt{H_0/H}$ и $H = H_0 - V\tau$ – диаметр и высота исходной заготовки, м; τ – время (текущее) с начала цикла, с; σ_{i0} – напряжение течения материала заготовки (в Мпа) при скорости деформации $\varepsilon_{i0} = 1 \text{ с}^{-1}$.

Выражая размеры заготовки как функцию времени, получим формулу (27) [77]:

$$q = \sigma_{i0} \left[\frac{V}{\varepsilon_{i0}(H_0 - V_\tau)} \right]^m \left(1 + \frac{\mu}{3} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 - V_\tau} \frac{D_0}{H_0 - V_\tau}} \right), \quad (27)$$

Считая, что давление на штамп является мерой напряжений, создаваемых в нем при штамповке, получим выражение для [77]

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{a}{q^k} = \frac{a}{\sigma_{i0}^k \left[\frac{V}{\varepsilon_{i0}(H_0 - V_\tau)} \right]^{mk} \left[1 + \frac{\mu}{3} \frac{H_0^{0,5} D_0}{(H_0 - V_\tau)^{1,5}} \right]^k} \quad (28)$$

После подстановки выражения (28) в условие суммирования повреждений (25) находим выражение для стойкости штампа [77]

$$\bar{n} = \frac{a \varepsilon_{i0}^{mk}}{\sigma_{i0}^k V^{mk} \int_0^{\tau_{\text{ц}}} \left[1 + \frac{\mu}{3} \frac{H_0^{0,5} D_0}{(H_0 - V_\tau)^{1,5}} \right]^k \frac{d\tau}{(H_0 - V_\tau)^{mk}}}, \quad (29)$$

которое значительно упрощается, если пренебречь влиянием трения, т. е. принять $\mu=0$, то получим [114]

$$\bar{n} = \frac{a V^{1-mk} (mk-1) \varepsilon_{i0}^{mk}}{\sigma_{i0}^k (H_k^{1-mk} - H_0^{1-mk})}, \quad (30)$$

где H_k – высота заготовки в конце цикла, м.

Для стационарных процессов изотермического деформирования, когда нагрузку на штамп в течение цикла можно считать постоянной (например, для выдавливания), стойкость штампа находим из выражения [114]

$$\bar{n} = \frac{a}{\sigma_i^k \tau_{\text{ц}}} = \frac{a V^{1-mk}}{\sigma_{i0}^k A^k \Delta H}, \quad (31)$$

где ΔH – ход пуансона, м; A – коэффициент, зависящий от условий деформирования (геометрической формы заготовок и инструмента, наличия трения), $(\text{м/с})^{-mk}$.

Рассчитаем стойкость штампов, изготовленных из сплава ЖС6У, для изотермического выдавливания заготовок из сплава ВТ6 при температуре 800°C.

Экспериментальная зависимость напряжения течения сплава ВТ6 от температуры приведена на рисунке 5.2. Значения коэффициентов, a и k для штампового материала получены с учетом масштабного фактора, т. е. снижения прочностных показателей литого штампа при увеличении его габаритов [115] приведены в таблице 5.1. Время продолжения процесса выдавливания определили путем моделирования процесса в программном комплексе QForm 3D.

Таблица 5.1 - Значения коэффициентов, a и k для штампового материала получены с учетом масштабного фактора [114]

Штамповый материал		
$\tau_{пр} = \frac{a}{\sigma^k}$		
Интервал напряжений, МПа	$a, (\text{МПа})^k \cdot \text{с}$	k
230÷100	$4,86 \cdot 10^{33}$	14,5
100÷48	$1,66 \cdot 10^8$	1,69
48÷3	$2,196 \cdot 10^{19}$	8,4

Подставив значения в формулу (31) получим

$$\bar{n} = \frac{a}{\sigma_i^k \tau_{ц}} = \frac{1,66 \times 10^8}{88^{1,69} \times 59,8} = 1436$$

Также рассчитаем стойкость ковочного штампа на операции штамповка объемная для случаев деформации заготовки после изотермического выдавливания (а) и при серийных условиях (б):

$$\text{а) } \bar{n} = \frac{a}{\sigma_i^k \tau_{ц}} = \frac{1,66 \times 10^8}{51^{1,69} \times 65} = 3322$$

$$\text{б) } \bar{n} = \frac{a}{\sigma_i^k \tau_{ц}} = \frac{1,66 \times 10^8}{88^{1,69} \times 65} = 1321$$

По выполненным выше расчетам можно сделать вывод о том, что при изотермической штамповке заготовок, имеющих ультрамелкозернистую структуру, расчетная стойкость ковочных штампов в 2,5 раза выше чем при штамповке по серийной технологии.

Снижение температуры процесса при выполнении операции изотермической штамповки за счет формирования регламентированной структуры в заготовках позволяет использовать в качестве штамповых менее жаропрочные материалы (таб. 5.2) по сравнению с традиционной технологией.

Таблица 5.2 – Механические свойства жаропрочных сплавов при температуре штамповки

Марка материала	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	Ψ , %	Коэффициент запаса
ЖС6У*	800	873	961	4	17
ЭП99**		750	900	16	14,7
ЭП109**		800	1100	20	15,6
ЭП693**		600	800	35	11,7
ЭИ698**		600	670	30	11,7

*- экспериментальные данные, ** данные [116]

Эти материалы в свою очередь имеют меньшую стоимость и хорошо поддаются обработке давлением и резанием. Выше перечисленные особенности позволяют сделать вывод о возможности значительного удешевления стоимости изготовления и ремонта штампов для изотермической штамповки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-технической квалификационной работой, изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для машиностроительной отрасли и авиадвигателестроения в частности и являющиеся частью предложенного технологического процесса изготовления высокоточных заготовок лопаток ГТД из титанового сплава под безразмерную обработку профиля пера, обеспечивающий высокую стойкость дорогостоящей штамповой оснастки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи и сделаны выводы:

1. Методами экспериментальных исследований и математического моделирования исследовано влияние технологических режимов процесса изотермического выдавливания на формирование мелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6. Определены взаимосвязи влияющих факторов и разработана математическая модель процесса изотермического выдавливания титановой заготовки, позволяющая исследовать процесс изотермического выдавливания с целью получения ультрамелкозернистой структуры в титановом сплаве в ходе протекания процесса динамической рекристаллизации.

2. В результате экспериментальных исследований установлено влияние размера зерна титанового сплава на сопротивление деформации при температурах деформации: напряжение течения при штамповке заготовок, полученных изотермическим выдавливанием в условиях, обеспечивающих протекание динамической рекристаллизации, на 42% ниже по сравнению с образцом, полученным по серийной технологии.

3. На основании проведенных исследований разработан опытный технологический процесс изготовления штамповок лопаток ГТД из титанового сплава ВТ6 с припуском под безразмерную обработку профиля пера, включающий в себя прямое изотермическое выдавливание титановой заготовки, имеющей

геометрию максимально приближенную к окончательной детали, в условиях, обеспечивающих протекание динамической рекристаллизации, изотермическую штамповку при пониженной температуре, обеспечивающей повышенную стойкость ковочного инструмента, обрезку в штампе с прижимом, термообработку и термофиксацию, выполняемую при необходимости по результатам замеров геометрии профиля пера. Получен патент РФ на способ изготовления штамповок лопаток из титановых сплавов.

4. Выполнен анализ стойкости ковочного инструмента при штамповке заготовок, имеющих ультрамелкозернистую структуру в сравнении с аналогичной штамповкой по серийной технологии. Установлено, что в случае штамповки заготовок с ультрамелкозернистой структурой стойкость штампа повысится в 2,5 раза по сравнению с серийной технологией.

5. Полученные результаты апробированы и используются на ПАО «ОДК-Сатурн» при разработке технологических процессов изготовления заготовок лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов методом объемной изотермической штамповки.

6. Результаты исследований диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение» и магистров, обучающихся по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» на кафедре «Мехатронные системы и процессы формообразования» им. С.С. Силина в РГАТУ им. П.А. Соловьева.

Список литературы

1. Л.Б. Уваров Проектирование технологических процессов производства лопаток компрессора авиадвигателей: учебное пособие. Ярославль: ЯПИ, 1987. 80 с.
2. В.Э. Галиев, Д.З. Фаткуллина Перспективный технологический процесс изготовления прецизионных компрессорных лопаток. Вестник УГАТУ, Уфа, 2014, с-97-105.
3. В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин Производство газотурбинных двигателей/ Под ред. Крымова. М.: Машиностроение/ Машиностроение-Полет, 2002. 376 с., ил.
4. В.Б. Мамаев Технология производства лопаток ГТД. Учебное пособие РГАТА, 2004 г., 58с.
5. В.П. Зрюмов, Г.П. Листвин, О.П. Евменов, В.Л. Родионов Условия стабильности качества штампованных заготовок из титановых сплавов //Кузнечно-штамповочное производство, 1987. №11, с.29-31.
6. В.Э. Лейпи Дефекты в виде полос и трещин в штамповках из сплава ВТ9 // Технология легких сплавов. 1972. №8. С. 50-53.
7. Ковка и штамповка Справочник в 4-х томах. Под ред. Семенова Е.И. М.: Машиностроение, 1985. - Том.2 Горячая штамповка, 592 с, ил.
8. М.В. Сторожев, Е.А. Попов Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977. - 423 с.: ил.
9. А.Д. Томленов Теория пластического деформирования металлов. М.: «Металлургия», 1972. - 408 с.
10. ОСТ1 90126-85 Сплавы жаропрочные литейные вакуумной выплавки.
11. А.Г. Илларионов Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
12. В.Б. Мамаев, М.Л. Первов, В.А. Кочетков Выбор и назначение технологических параметров изотермической штамповки заготовок лопаток ГТД с учетом

- размерной стойкости деформирующего инструмента // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. 2013. №3(26). С. 50-58.
13. Ю.С. Карабасов Новые материалы. - М.: МИСИС, 2002 – 736 с.
 14. В.А. Мазунов Современные проблемы естествознания на стыках наук : В 2 т. / АН Респ. Баскортостан и др.- Уфа, 1998. – 351 с.
 15. В.М. Анищук, В.Е. Борисенко, С.А. Жданок, Н.К. Толочко, В.М. Федосюк Наноматериалы и Нанотехнологии. – Мн.: БГУ, 2008. – 375 с.
 16. Г.А. Малыгин Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов// Физика твердого тела, 2007, том49, вып.6 с.961-982.
 17. О.А. Кайбышев Границы зерен и свойства металлов / О.А. Кайбышев, Р.З. Валиев - М.: Металлургия, 1987. -214
 18. М.А. Штремель Прочность сплавов. Дефекты решетки/М.А. Штремель. М: Металлургия, 1982.- 278с.
 19. Новиков И.И. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки // И.И. Новиков, К.М. Розин. М.: Металлургия, 1990. – 336с.
 20. А.Н. Беляков Динамическая и статическая рекристаллизация в металлических материалах, подвергнутых большим пластическим деформациям [Текст]: дис. ... док. физ. – мат. наук: 01.04.07/ А.Н. Беляков - Москва, 2013 – 265 с.
 21. С.И. Губкин., «Пластическая деформация металлов» Том II, М: Металлургиздат 1961.
 22. Valiev, R.Z. Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation / R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // Prog. Mater. Sci.-2000.-Vol. 45.-P. 103-189.
 23. Morris, D.C. Strength and Ductility of Nanocrystalline Materials: What Do We Really Understand / D.C. Morris // Science of Metastable and Nanocrystalline Alloys. Roskilde : Denmark, 2001. - P. 89-104.
 24. Valiev. R. Nanomaterial Advantage / R. Valiev // Nature. 2002. - Vol. 419. -P. 887-889.

25. Musin. F. High Strain Rate Superplasticity in A Commercial Al-Mg-Sc Alloy / F. Musin, R. Kaiby-shev, Y. Motohashi, G. Itoh // Scripta Mater. -2004.-Vol. 50.-P. 511-516.
26. Stolyarov. V.V. Enhanced Low-Temperature Impact Toughness of Nanostructured Ti / V.V. Stolyarov, R.Z. Valiev, Y.T. Zhu // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. Art. No. 041905.
27. Holl E.O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results// Proc. Phys. Soc. B. – 1951. – V.64. – P. 747-753
28. Petch N.J. The cleavage strength of polycrystals // J. Iron Steel. – 1953. – V. 174. - P. 25-28/
29. О.Н. Игнатова, А.В. Кальманов, А.Н. Малышев и др. О существовании закона Холла- Петча в металлах // Физическая мезомеханика 2013. №16. С. 89-93.
30. И.П. Семенова, В.В. Полякова, Р.Р. Валиев, Г.И. Рааб, Н.Ф. Измайлова Микроструктура и свойства лопаток компрессора ГТД, полученных объемной штамповкой из ультрамелкозернистого сплава ВТ6//Физика и техника высоких давлений 2011, том 21, № 4.
31. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
32. Р.З. Валиев, И.В. Александров Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 271 с.
33. С.В. Добаткин Наноматериалы. Объемные металлические нано-субмикроструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией: Учеб. Пособие.- М.: МИСиС, 2007- 36 с.
34. П.У. Бриджмен Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Иностранная литература, 1955. 444 с.
35. В.В. Столяров Деформационные методы измельчения структуры Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, М.: Вестник научно-технического развития №4, 2013.

36. Г.А. Салищев Формирование субмикроструктурной структуры в титане при пластической деформации и ее влияние на механические свойства / Г. А. Салищев, О. Р. Валиахметов, Р. М. Галлеев // *Металлы*, – 1996. – № 4. – с. 86-91.
37. S.V. Zherebtsov, G.A. Salishchev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov, S.Yu. Mironov, S.L. Semiatin, Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti-6Al-4V billet by warm severe deformation processing. *Scripta Materialia*, 51, 2004, p.1147-1151.
38. А.П. Петров, П.А. Масловский, В.Д. Ширяев, Ю.В. Николаев, Г.И. Нарсков // *Кузнечно – штамповочное производство*, 1984. №12, С. 12-14.
39. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов/ Л.А. Никольский, С.З. Фиглин, В.В. Бойцов и др. М.: Машиностроение, 1975. 285 с.
40. ГОСТ18970-84 Обработка металлов давлением. Операцияковки и штамповки. Термины и определения.
41. А.С. Скобелева Способ изготовления штамповки переменного сечения методом изотермического выдавливания [Текст] / А.С. Скобелева// *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева*. - 2010. - №3(18). – С. 116-121.
42. А.И. Колпашников, В.А. Вялов, А.А. Федоров, А.П. Петров. Горячее гидропрессование металлических материалов – Москва: Машиностроение, 1977. - 271 с.: ил.
43. С.И.Ключников., «Повышение точности поковок», Машгиз 1959.
44. В.В. Жолобов: Прессование металлов [Текст]. / В. В. Жолобов, Г. И. Зверев-М.: *Металлургия*, 1971.-456 с.
45. Джонсон В. Механика процесса, выдавливания металла Текст. / В. Джонсон, Х. Кудо М.: *Металлургия*, 1965. -174 с.
46. А.Г. Овчинников Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. -М.: Машиностроение, 1983. - 200 с.. ил.
47. Л. В. Прозоров Прессование стали и тугоплавких сплавов. Текст. / Л. В. Прозоров М.: Машиностроение, 1969 - 243 с.

48. Я.М. Охрименко Технология кузнечно-штамповочного производства М.: Машиностроение, 1966. - 548 с.
49. И.П. Перлин Теория прессования металлов Текст. / И. П. Перлин, Л.Х. Райтбарг.-М.: Metallurgy, 1975.-447 с.
50. В.Р. Каргин К 218 Основы технологических процессов ОМД: раздел прессование: учеб. пособие / В.Р. Каргин, Б.В. Каргин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 104 с.: ил.
51. М.Я. Дзугутов Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Metallurgy, 1977. 420 с.
52. Ю.Н. Логинов Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: учеб. пособие - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 156 с.
53. Р.Р. Мулюков Развитие принципов получения и исследование объемных наноструктурных материалов с ИПСМ РАН //Российские нанотехнологии. 2007. Т.2 №7-8. С.38-53.
54. Р.М. Галеев Субмикроструктурный лист из титанового сплава ВТ6 для низкотемпературной сверхпластической формовки // Металлы. 2005. №6. С. 19-24.
55. Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб Механизмы и модель измельчения зерен в металлах по средством интенсивной низкотемпературной деформации // Вопросы материаловедения. 2007. №4. С. 198-205.
56. Н.М. Золотухин Нагрев и охлаждение металла - Москва: Машиностроение, 1973. - 192 с.: черт.; 21см.
57. С.А. Морозов, А.С. Морозов Разработка прогрессивной технологии изготовления деталей нефтяных насосов Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова / Вестник ПНИПУ, 2015. Т. 17, №2.
58. В.С. Нестеров, Н.А. Кривов, В.Е. Кропинов Опыт штамповки деталей из алюминиевых и магниевых сплавов в изотермических условиях// Кузнечно-штамповочное производство.- 1977.- №5.- С.26-27.

59. В.В. Воронков Выбор геометрии инструмента для изотермической штамповки поковок с отрезками и рёбрами в закрытых штампах[Текст]: дис. .. канд. техн. наук: 05.02.09/ В.В. Воронков - Москва, 2014 – 189 с.
60. П.А. Петров Изотермическая штамповка алюминиевых и магниевых сплавов: моделирование технологических процессов. В кн.: Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ», 2010, Книга 6, С. 107 - 113.
61. Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. — 2-е изд., перераб. и доп. —М.: Машиностроение, 1980. — 493 с.
62. С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капуткина Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. М.: МИСиС, 2005- 432 с.
63. Фридель Ж. Дислокации. - М.: Мир, 1967. – 643 с.
64. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
65. Modelling for the dynamic recrystallization evolution of Ti–6Al–4V alloy in two-phase temperature range and a wide strain rate range / G.Z. Quan, G.-C. Luo, J.T. Liang, D.S. Wu, A. Mao, Q. Liu // Computational Materials Science. – 2015. – Vol. 97. – P. 136–147.
66. И.Л. Исупова, П.В. Трусов Математическое моделирование фазовых превращений в сталях при термомеханической нагрузке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – №. 3. – С. 127–157.
67. Li H., Wu C., Yang H. Crystal plasticity modeling of the dynamic recrystallization of two-phase titanium alloys during isothermal processing // International Journal of Plasticity. – 2013. – Vol. 51. – P. 271–291.
68. Characteristics of hot compression behavior of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy with an equated microstructure / L.J. Huang, L. Geng, A.B. Li, X.P. Cui, H.Z. Li, G.S. Wang // Mater. Sci. Eng. A. – 2009. – No. 505. – P. 136–143.

69. Vo P., Jahazi M., Yue S. Recrystallization during thermomechanical processing of IMI834 // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2008. – Vol. 39. – No. 12. – P. 2965–2980.
70. П.В. Трусов, Швейкин А.И., Янц А.Ю. О разложении движения, независимых от выбора системы отсчета производных и определяющих соотношениях при больших градиентах перемещений: взгляд с позиций многоуровневого моделирования // *Физическая мезомеханика*. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 49–65.
71. Multilevel models of inelastic deformation of materials and their application for description of internal structure evolution / P.V. Trusov, A.I. Shveykin, E.S. Nechaeva, P.S. Volegov // *Physical mesomechanics*. – 2012. – Vol. 15. – No. 3–4. – P. 155–175.
72. Ю.М. Лахтин *Металловедение и термическая обработка металлов*. – М.: *Металлургия*, 1983. – 359 с.
73. Zhang M., Zhang J., McDowell D.L. Microstructure-based crystal plasticity modeling of cyclic deformation of Ti–6Al–4V // *International Journal of Plasticity*. – 2007. – Vol. 23. – P. 1328–1348.
74. И.Л. Исупова, П.В. Трусов Обзор математических моделей для описания фазовых превращений в сталях // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2013. – № 3. – С. 158–192.
75. Ankem S., Margolin H. The role of elastic interaction stresses on the onset of plastic flow for oriented two ductile phase structures // *Met. Trans. A*. – 1980. – Vol. 11. – P. 963–972.
76. Burgers W.G. *Rekristallisation, verformter Zustand und Erholung*. – Becker & Erler, 1941. – P. 538.
77. Humphreys F.J., Hatherly M. *Recrystallization and related annealing phenomena*. Elsevier, 2004. – P. 605.
78. Fatemi-Varzaneh S.M., Zarei-Hanzaki A., Vaghar R. Discontinuous dynamic recrystallization during accumulative back extrusion of a magnesium alloy // *Journal*

- of ultrafine grained and nanostructured materials. – 2013. – Vol. 46. – No. 1. – P. 25–29.
79. Beck P. A., Sperry P.R. Strain induced grain boundary migration in high purity aluminum // *Journal of Applied Physics*. – 1950. – Vol. 21. – No. 2. – P. 150 – 152.
80. Beck P. A., Sperry P. R., Hu H. The orientation dependence of the rate of grain boundary migration // *Journal of Applied Physics*. – 1950. – Vol. 21. – No. 5. – P. 420–425.
81. McDonald D.T., Humphreys J.F., Bate P.S. Nucleation and texture development during dynamic recrystallization of copper // *Trans Tech Publications*. – 2005. – Vol. 495. – P. 1195–1200.
82. Dehghan H., Abbasi S.M., Momeni A., Taheri A.K. On the constitutive modeling and microstructural evolution of hot compressed A286 iron-base superalloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2013. – Vol. 564. – P. 13–19.
83. Galiyev A., Kaibyshev R., Gottstein G. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60 // *Acta materialia*. – 2001. – Vol. 49. – No. 7. – P. 1199–1207.
84. Е.П. Унксов Выбор метода расчета технологических процессов при обработке металлов давлением// *Кузнечно-штамповочное производство* - 1982. - №8. - С. 24-26.
85. Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова Теория пластических деформаций металлов. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с., ил.
86. Д.В. Константинов, А.Г. Корчунов Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением// *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. 2015. №1
87. QForm 2D/3D // Википедия. [2017—2017]. Дата обновления: 28.06.2017. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=86240907> (дата обращения: 28.06.2017).
88. С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю. Г. Калпин, Ю.И. Каплин Изотермическое деформирование металлов// М., Машиностроение, 1978г., 239 с.

89. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. – Минск: изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
90. Ю.П. Адлер., Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий, издание второе переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976.
91. М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский Структура и механические свойства металлов. М.: «Металлургия», 1970, 471 с.
92. А.Г. Спектор Дисперсионный анализ сферических частиц в непрозрачных структурах// Заводская лаборатория. 1950, т.16, №2 с.173-177.
93. К.С. Чернявский. Стереология в металловедении. - М.: «Металлургия», 1977, 250 с.
94. М.Н. Бодянюк, Е.Я. Лезинская, В.П. Касичев. Метод оценки разнородности однофазных сплавов // Известия АН БССР. Серия физ.-техн.-наук. 1974, №2, с. 22-27.
95. С.А. Салтыков Стереометрическая металлография. М.: Metallurgy, 1976.271 стр.
96. Van Der Voort G.F. Metallografy: PrinciplesandPractice, ASMInternational, 1999. (P/437).
97. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. Взамен ГОСТ 25.503 – 80; введ. 1999–07–01. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 1997. – 27 с.
98. ГОСТ 8817-82 (СТ СЭВ 2839-81). Металлы. Метод испытаний на осадку. М.: Изд-во стандартов, 1982. – 3 с.
99. ГОСТ 24026-80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1980. – 18 с.
100. А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.: ил.

101. З.И. Юсипов, Ю.И. Каплин Обработка металлов давлением и конструкции штампов. 2-е изд., перераб. И доп.- М.: Машиностроение, 1981- 272 с.: ил.
102. Пат 2637451 Российская Федерация, МПК51 В21J3/00 В21J13/02 В21С23/32 В21С25/00 Способ выдавливания малопластичных материалов и устройство для его осуществления/ Первов М.Л., Скобелева А.С., Головкин С.А. заявитель патентообладатель ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».- №2016129120; заявл. 15.07.2016; опубл. 14.12.2017, Бюл. №34.
103. Пат 2614294 Российская Федерация, МПК51 С22F1/18 В21J1/00 В21J5/06 F01D5/28 Способ изготовления штамповок лопаток из титановых сплавов/ Первов М.Л., Скобелева А.С., Головкин С.А. заявитель патентообладатель ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева». - №2016112814; заявл. 04.04.2016; опубл. 24.03.2017, Бюл. №9.
104. Ю.А. Позняк Штамповые стали / Ю.А. Позняк, Ю.М. Скрынченко, С.И. Тишаев. –М.: Металлургия. – 1980.
105. Исследование стойкости штампов для горячей штамповки // Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства: Экспрессинформ. –1980. – № 5, реф. 21. – С. 1–8; № 6, реф. 23. – С. 1–31.
106. Л.Н. Миронов Модельное исследование абразивного износа ковочных штампов / Л.Н. Миронов // Кузнечно-штамповочное производство. –1975.– № 6. – С. 16–18.
107. Свойства и износостойкость штамповых сталей // Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства: Экспресс-информ. – 1980.- № 18, реф. 76. – С. 18–26.
108. Toshio, M. Defects of steels for metal molds and their prevention steels for hot-pressing dies and forging dies / M. Toshio // Special Steel. – 1976. –Vol. 25, no. 8. – P. 22–35.

109. Е.И. Бельский Стойкость кузнечных штампов / Е.И. Бельский. – Минск: Наука и техника. – 1975.
110. О.А. Кайбышев Пластичность и сверхпластичность металлов / О.А. Кайбышев. – М.: Metallurgiya. – 1975.
111. Heinemeyer, D. Praxisorientierte Typologie für Gesenkschaden. Grundlage für die Erfassung und Verbesserung der Standmenge von Gesenken / D. Heinemeyer, J. König // Industrie-Anzeiger. – 1976. – Bd. 98, Nr. 77. – S. 1369–1373.
112. Luton M.J., Sellars C.M. Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation // Acta Metallurgica. 1969. Vol. 17. No. 8. P. 1033–1043.
113. Е.Н. Каблов Жаропрочные конструкционные материалы // Литейное производство. 2005. №7. С. 2–7.
114. И.А. Изаков, Д.В. Капитоненко, М.В. Бубнов, А.Р. Баженов. Исследование параметров технологических процессов изотермического деформирования // Новости материаловедения. Наука и техника. №5. 2016. С. 36 - 41.
115. Ю.В. Смирнова, В.В. Бойцов, И.А. Изаков, М.Б. Грубер О влиянии масштабного фактора на свойства литого жаропрочного штампового материала // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. №10. С. 23–24.
116. С.Б. Масленков Жаропрочные стали и сплавы // Справочное издание, М: Metallurgiya 1983. 192 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А (обязательное)

АКТЫ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ
 Главный инженер ПАО «ОДК-Сатурн»
 Ильин И.В.
 « 07 » 11 2019г.



АКТ

Внедрения в производство результатов диссертационной работы
 Головкина Сергея Алексеевича «ПОВЫШЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ
 ШТАМПОВОК ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД ИЗ ТИТАНОВОГО
 СПЛАВА ВТ6 И СТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ЗА СЧЕТ
 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
 ШТАМПОВКИ»

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Головкина С.А. на ПАО «ОДК-Сатурн» используются отделом главного кузнеца и в кузнечно-прессовом корпусе №2 при разработке технологических процессов изготовления заготовок лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов методом объемной изотермической штамповки.

Начальник кузнечно-прессового корпуса 2

А.Н. Кукушкин

Главный кузнец –
 Начальник ОГКузн

Н.В. Рассудов




МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБРНАУКИ РОССИИ)

Утверждаю
Проректор по УВР

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный
технический университет
имени П. А. Соловьева»
(РГАТУ имени П. А. Соловьева)



д.т.н., проф. А.А. Шатульский

« » 2019 г.

Пушкина ул., д. 53, Рыбинск,
Ярославская обл., 152934.
Тел. (4855) 28-04-70. Факс (4855) 21-39-64.
E-mail: root@rsatu.ru

№ _____

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы С.А. Головкина «Повышение размерной точности штамповок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 и стойкости штампового инструмента за счет совершенствования технологического процесса штамповки» в учебном процессе по кафедре «Мехатронные системы и процессы формообразования» имени С.С. Силина

Комиссия в составе зав. кафедрой, д.т.н., профессора Волкова Д.И., д.т.н., профессора кафедры Первова М.Л., к.т.н., доцента кафедры Васильевой А.В. составила настоящий акт в том, что полученные в процессе работы над диссертацией зависимости для определения оптимальных режимов изотермического выдавливания заготовок из титанового сплава ВТ6 и их последующей изотермической штамповки, используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение» и магистров, обучающихся по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Зав. кафедрой МСиПФ
им. С.С. Силина, д.т.н., профессор

Волков Д.И.

Д.т.н., профессор кафедры МСиПФ
им. С.С. Силина

Первов М.Л.

К.т.н., доцент кафедры МСиПФ
им. С.С. Силина

Васильева А.В.

Система менеджмента качества РГАТУ имени П.А. Соловьева сертифицирована
на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001:2008



Приложение Б (обязательное)

ПАТЕНТЫ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 142904

**ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ШТАМП ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ДИСКОВ С ЛОПАТКАМИ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева", РГТУ имени П.А. Соловьева (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014104603

Приоритет полезной модели **10 февраля 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **05 июня 2014 г.**

Срок действия патента истекает **10 февраля 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.И. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2637451

**СПОСОБ ВЫДАВЛИВАНИЯ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева" (RU)*

Авторы: *Первов Михаил Леонидович (RU), Скобелева Анна Сергеевна (RU), Головкин Сергей Алексеевич (RU)*

Заявка № 2016129120

Приоритет изобретения 15 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 декабря 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 15 июля 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2614294

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШТАМПОВОК ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева" (RU)*

Авторы: *Первов Михаил Леонидович (RU), Скобелева Анна Сергеевна (RU), Головкин Сергей Алексеевич (RU)*

Заявка № 2016112814

Приоритет изобретения 04 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 марта 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 04 апреля 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев