

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи



СМИРНОВ Максим Олегович

**Исследование процесса штамповки крупногабаритных заготовок
турбинных лопаток**

Направление подготовки

22.06.01 Технологии материалов

Код и наименование

Направленность

22.06.01_04 Обработка металлов давлением

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:

Смирнов Максим Олегович

Научный руководитель:

профессор, д.т.н., Золотов Александр

Максимович

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре Института машиностроения, материалов и транспорта, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: Семенча Александр Вячеславович, к.х.н., директор ВШ «Физики и технологий материалов», доцент

Научный руководитель: Золотов Александр Максимович, д.т.н., профессор

Рецензент: Лукьянов Алексей Александрович, к.т.н. АО «Ступинская металлургическая компания», Заместитель главного металлурга – начальник отдела

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из самых ответственных и высоконагруженных элементов паровой турбины является рабочая турбинная лопатка последней ступени ЦНД. К материалу данных лопаток предъявляются особые требования по надежности. Лопатки больших габаритов для паровых турбин изготавливаются мировыми производителями из коррозионностойких сталей мартенситного класса, мартенситно-старееющих сталей, а также титановых сплавов.

Одними из приоритетных направлений развития энергетики в настоящий момент являются:

1. Освоение изготовления мощных тихоходных паровых турбин (со скоростью вращения ротора 1500 оборотов в минуту), которые используются в энергоблоках АЭС мощностью 1200-1255 МВт;
2. Освоение быстроходных паровых турбин (со скоростью вращения ротора 3000 оборотов в минуту) для энергоблоков нового поколения на ССКП. Температура эксплуатации 600-620 °С, давление 30-35 МПа.
3. Создание инновационного проекта – быстроходной паровой турбины мощностью 1200 МВт для АЭС с умеренно холодной охлаждающей водой.

Тихоходные турбины отличаются большими габаритами всех узлов турбоустановки, в частности и рабочей лопатки ЦНД. В качестве материала для рабочей лопатки тихоходной турбины К-1200-6,8/25 выбрана жаропрочная сталь 15X11МФ-Ш. Длина рабочей части готовой лопатки составляет 1760 мм, длина поковки – 2,1 м, а масса исходной заготовки составляет более 450 кг, что ставит серьезную металлургическую задачу, включающую в себя разработку технологии изготовления с проведением ряда подготовительных и сопутствующих исследований, а также аттестационных испытаний металла. Ранее лопатки подобных габаритов не изготавливались в России.

До 2017 г. из стали 15X11МФ-Ш изготавливались в условиях ПАО «Силловые машины» турбинные лопатки с длиной рабочей части 960 мм (исходная заготовка 1,3 м, вес 50 кг), однако габариты исходной заготовки для новой лопатки имеют длину 2,1 м и вес более 450 кг.

В отечественном турбиностроении сплав ВТ6 используется для изготовления рабочих лопаток последних ступеней ЦНД с длиной рабочей части 1200 мм мощных быстроходных паровых турбин для АЭС п/т К-1000-60/3000 с 2000 г. и п/т К-1200-60/3000 с 2012 г.

Заготовки лопаток из титановых сплавов изготавливались заводом турбинных лопаток (ныне входит в ПАО «Силовые машины») до кризиса 90-х годов, после чего компетенции по изготовлению были утрачены. В настоящее время лопатки из титанового сплава ВТ6 с длиной рабочей части 1200 мм закупаются предприятием на сторонних предприятиях.

В настоящей работе рассматривается исследование процесса штамповки турбинной лопатки из сплава ВТ6 с длиной рабочей части 1200 мм применительно к мощностям ПАО «Силовые машины».

Освоение энергоблоков на ССКП и блоков с умеренно холодной охлаждающей водой ставит не менее сложную задачу разработки технологии изготовления турбинной лопатки из двухфазного титанового сплава ВТ6 с длиной рабочей части 1400 мм. Поэтому, полученная научно-техническая база по исследованию штамповки лопаток с длиной рабочей части 1200 мм может быть использована в качестве основы для создания лопатки 1400 мм для перспективных турбин.

Таким образом, в настоящее время ПАО «Силовые машины» не обладает компетенциями по изготовлению лопаток с длиной рабочей части 1760 мм из стали и лопаток с длиной рабочей части 1200 мм и 1400 мм из титанового сплава.

Основную группу имеющегося оборудования составляют: РКМ, ГКМ 2000 тс, шаботный штамповочный молот с массой падающих частей 25 т, нагревательная печь с тарельчатым подом МЗ.

Типовой цикл изготовления крупногабаритных рабочих лопаток паровых турбин ТЭС и АЭС – круг (сортовой прокат или кованный пруток) → ковка на РКМ → высадка хвостовой части на ГКМ → штамповка на паровоздушном молоте с массой падающих частей 25 т → термическая обработка штампованных заготовок → механическая обработка → нанесение защитного покрытия, либо приварка стеллитовых пластин на входные кромки.

Увеличение габаритов рабочих лопаток паровых турбин приводит не только к возрастанию действующих нагрузок на готовое изделие, но и усложняет технологию, которая бы обеспечивала высокий комплекс свойств. Необходима оптимизация структурно-механического состояния металла в объеме крупногабаритных штампованных

заготовок лопаток для удовлетворения высоким требованиям к прочностным свойствам, усталостным характеристикам и характеристикам сопротивления хрупкому разрушению.

При изготовлении данных лопаток, на имеющемся в условиях ПАО «Силловые машины» оборудовании, а именно молот 25 т, требуется учитывать экстремальные габариты поковок. Деформация штампованных заготовок турбинных лопаток за один переход может быть минимальна в силу большой площади проекции заготовки. В случае заготовки лопатки 2,1 м требуется оценить принципиальную возможность изготовления лопатки на молоте 25 т, для чего необходимо определить кинематические и энергетические параметры молота 25 т, которые нужны для корректного математического моделирования процесса штамповки.

Таким образом возникает задача определения основного параметра – КПД удара молота с целью проведения максимально точного математического моделирования процесса штамповки. Не менее важной задачей является оценка при помощи физических экспериментов структурного состояния применяемого материала при различных термомодеформационных режимах обработки давлением.

Цель и задачи исследования

Цель работы заключается в исследовании технологий изготовления двух типов крупногабаритных рабочих лопаток паровых турбин для атомных электростанций, а именно рабочей лопатки с длиной рабочей части 1760 мм из стали 15X11МФ-Ш и рабочей лопатки с длиной рабочей части 1200 мм из титанового сплава ВТ6 с учетом характеристик конкретного оборудования, имеющегося на производстве.

В соответствии с указанной целью в работе были поставлены следующие *задачи*:

- исследование реологических характеристик и физико-механических свойств стали 15X11МФ-Ш и титанового сплава ВТ6;
- исследование структуры стали 15X11МФ-Ш и титанового сплава ВТ6 в зависимости от термомодеформационных параметров обработки;
- определение кинематических и энергетических параметров молота 25 т с использованием математического моделирования;
- математическое моделирование процессов штамповки лопатки с длиной рабочей части 1760 мм из стали 15X11МФ-Ш и лопатки с длиной рабочей части 1200 мм из титанового сплава ВТ6;
- разработка технологии изготовления лопаток из стали 15X11МФ-Ш и проведение штамповки опытной партии заготовок;

- исследование свойств лопаток, изготовленных из различных типов исходных заготовок (кованый и катаный прутки). Формирование технических требований на исходные заготовки;

- исследование процесса коробления заготовок лопаток с длиной рабочей части 1200 мм из титанового сплава ВТ6 при помощи математического моделирования.

Научная новизна

1. Разработана методика определения КПД удара паровоздушного штамповочного молота с массой падающих частей 25 тонн. Получена зависимость КПД удара молота, которая использована при математическом моделировании процессов штамповки крупногабаритных поковок на данном оборудовании.

2. Разработана методика исследования процесса коробления штампованных заготовок турбинных лопаток. Выявлено, что при проектировании заготовки лопатки с припуском на механическую обработку 5 мм и допустимой недоштамповкой $\pm 6/-2$ мм суммарные перемещения в верхней части пера лопатки составляют 14,8 мм. Также наблюдается изменение положения угла разворота на $0^{\circ}0'27''$. Следовательно, при помощи изменения технологии штамповки имеется возможность уменьшить припуск.

3. Анализ влияния температурной зависимости модуля упругости титанового сплава ВТ6 на величину коробления

4. Исследовано влияние скорости нагружения, степени и температуры деформации, а также режима термической обработки на формирование микроструктуры титанового сплава ВТ6 с исходной бимодальной структурой. Установлено, что скорость деформации не оказывает сильного влияния на микроструктуру сплава ВТ6.

Теоретическая и практическая значимость

1. Выполнен научно-обоснованный выбор режимов штамповки заготовок из стали 15Х11МФ-Ш и титанового сплава ВТ6. Разработано Дополнение 23 к ОСТ 1 90002-86;

2. Проведена настройка математической модели имеющегося оборудования – молота с массой падающих частей 25 тонн, позволяющая проектировать технологические процессы штамповки крупногабаритных поковок;

3. Разработаны технические требования на кованые прутки – ТТ 630-393, сортовой прокат – ТТ 630-390 и штампованные заготовки лопаток – ТТ 630-391. Разработана и внедрена технология штамповки крупногабаритной турбинной лопатки из стали 15Х11МФ-Ш. Проведена опытная штамповка в количестве 30 шт., в настоящее время изготовлено более 300 шт. заготовок лопаток;

4. Определен КПД удара молота, применимый при изготовлении крупногабаритных деталей на молоте 25 т.

5. Разработана методика математического моделирования процесса коробления штампованных заготовок турбинных лопаток. За счет решения задачи коробления определена возможность уменьшения припуска на механическую обработку лопаток турбин из сплава ВТ6.

6. Физические эксперименты по осадке цилиндрических образцов из сплава ВТ6 показали вязкотекучесть стеклоэмали ЭВТ24. Таким образом, ЭВТ24 не целесообразно использовать в качестве смазки при штамповке. Данную стеклоэмаль хорошо применять в качестве защиты от окисления при термической обработке.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

- VI-я Конференция молодых специалистов ОАО «Силовые машины» (12-13 ноября 2015, Санкт-Петербург, ПАО «Силовые машины»);

- VII-я Конференция молодых специалистов ПАО «Силовые машины» (24-25 ноября 2016, Санкт-Петербург, ПАО «Силовые машины»);

- Международный форум «Инженерные системы – 2017» (11-12 апреля 2017, Москва, Инжиниринговая компания ТЕСИС);

- VI научно-техническая конференция операторов первой научной роты Военно-Морского Флота «Перспективные направления развития науки Военно-Морского Флота» (22 июня 2017, Санкт-Петербург, ВУНЦ ВМФ Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова);

- XII Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'17) (3-7 июля 2017, Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, РАН);

- 16-я Научно-техническая конференция «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» (16 ноября 2017, Москва, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», Металл Экспо);

- X Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (ФППК-2018) памяти академика Г.В. Курдюмова (29 октября – 2 ноября 2018, Черноголовка, ИФТТ РАН)

- 26-й Международный Конгресс по металлосведению и термической обработке IFHTSE, посвященный 180-летию со дня рождения Д.К. Чернова (17 – 19 сентября 2019, Москва, IFHTSE, РОМиТ, ЦНИИЧермет)

- Двенадцатая Научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (20 – 22 ноября 2019, Санкт-Петербург, БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова)

Автор имеет следующие *награды и благодарности*:

Победа в номинации «Лучшая перспективная разработка» конференции молодых специалистов ОАО «Силовые машины» – Санкт-Петербург, 24 ноября 2015г. – «Моделирование процесса горячей штамповки заготовок турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6 для последних ступеней НД паровых турбин АЭС».

Лауреат премии «Молодые ученые» Международной промышленной выставки «МЕТАЛЛ-ЭКСПО'2016» – Москва, 4 ноября 2016г. – за работу «Исследование процесса штамповки крупногабаритных заготовок из титанового $\alpha+\beta$ сплава с использованием физического и математического моделирования».

Победитель Конференции молодых специалистов ПАО «Силовые машины» – Санкт-Петербург, 8 декабря 2016г. – «Исследование технологического процесса штамповки заготовок турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6».

Лауреат премии «Молодые ученые» Международной промышленной выставки «МЕТАЛЛ-ЭКСПО'2017» – Москва, 2 ноября 2017г. – за работу «Разработка и внедрение технологии изготовления крупногабаритных штампованных заготовок турбинных лопаток из жаропрочной высоколегированной стали».

Благодарственное письмо ВУНЦ ВМФ "Военно-морская академия". Начальник института, академик РАН, капитан 1-го ранга Якушенко Е.И. 2018г.

Благодарственное письмо Ассоциация "Молодежная площадка профессиональных металлургов". Председатель правления Власов А.А. 2018г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, 5 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ и входящих в базу Scopus.

Представление научного доклада: основные положения

1. Разработка технологического процесса штамповки крупногабаритных турбинных лопаток с использованием методов физического и математического моделирования;

2. Методика определения КПД удара молота и исследования процесса коробления штампованных заготовок;
3. Результаты исследования процесса структурообразования титанового сплава ВТ6 в зависимости от температурно-деформационных режимов обработки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе определена необходимость проведения работы, описаны объекты исследования – турбинная лопатка из жаропрочной стали 15X11МФ-Ш и турбинная лопатка из двухфазного титанового сплава ВТ6. Описаны условия эксплуатации деталей и требования, предъявляемые к материалу лопаток.

Проанализированы основные вопросы, связанные с проектированием и исследованием технологических процессов штамповки турбинных лопаток из стали и титанового сплава. Изложена концепция проектирования процесса штамповки, определены основные задачи, которые требуют решения при исследовании штамповки. Рассмотрен вопрос использования КПД удара молота при штамповке. Проведен анализ научно-технической литературы по зависимости модуля упругости от температуры и по формированию микроструктуры сплава ВТ6 в зависимости от режимов обработки.

Проведенный анализ показал, что для полных и достоверных исследований процесса штамповки турбинных лопаток требуется определение КПД удара молота, и проведение исследований влияния термомеханических режимов обработки на микроструктуру лопаток из стали 15X11МФ-Ш и титанового сплава ВТ6.

Во второй главе описаны методы исследования, используемые при определении механических свойств и структурных характеристик. Приведены характеристики исходного металла, используемого для исследований. Описаны применяемые методики физического моделирования и программные продукты математического моделирования.

В третьей главе выполнено моделирование процесса штамповки заготовки турбинной лопатки с длиной поковки 1300 мм. Данная лопатка также выполнена из стали 15X11МФ-Ш, имеет большие габариты и продолжительный опыт изготовления на производстве, по этой причине она использована для калибровки математической модели. Определены коэффициенты теплопередачи в окружающую среду и в инструмент, получены значения показателя трения и КПД удара молота. Откалиброванные данные использованы при моделировании процесса штамповки крупногабаритной штампованной заготовки турбинной лопатки с длиной поковки 2100 мм.

Определен режим термической обработки и получены данные микроструктуры стали 15X11МФ-Ш в зависимости от термомеханических режимов обработки.

Исследованы свойства штампованных заготовок турбинных лопаток из стали 15X11МФ-Ш, изготовленных из кованных прутков и сортового проката. Приведена статистика по механическим свойствам.

Определен КПД удара штамповочного молота 25 т при помощи математического моделирования на основании отработанного процесса штамповки.

Четвертая глава посвящена исследованию процессов штамповки и коробления заготовок турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6. Выполнено математическое моделирование процесса штамповки турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6. Проведены исследования влияния модуля упругости на величину коробления. Выполнено математическое моделирование процесса коробления заготовок лопаток.

Исследована микроструктура титанового сплава ВТ6 в зависимости от термомеханических режимов обработки.

Объекты и методы исследования

Химический состав образцов для проведения исследований стальной лопатки соответствует ГОСТ 5632-2014 титановой лопатки ОСТ 1 90013-81.

Материалом исследования служили:

- кованные заготовки Ø295 и Ø210 мм из стали 15X11МФ-Ш (электрошлаковый переплав);
- сортовой прокат Ø210 мм из стали 15X11МФ-Ш (электрошлаковый переплав);
- кованные заготовки Ø210 мм из титанового сплава ВТ6 (гарнисажная плавка + вакуумно-дуговая плавка);
- 3D-модели деформирующего инструмента и заготовок;
- штампованные заготовки лопаток 1760 мм из стали 15X11МФ-Ш и лопаток 1200 мм из сплава ВТ6.

Химический анализ металла выполняли на стандартных образцах размером 35x35x25 мм. Анализ проводили фотоэлектрическим спектральным методом на оптическом эмиссионном спектрометре ARL-31000 по ГОСТ 18895-97. Также использовали спектрометр BELEC модификации Vario Lab.

Для определения углерода и серы дополнительно использован прибор CS-800. Для определения азота и кислорода использован анализатор tc-436.

Для исследования зависимостей сопротивления деформации использовалась установка Gleeble-3800, модуль Hydrawedge. Контроль термического режима осуществлялся для любых испытаний на данном комплексе и проводился с помощью

хромель-алюмелевой (для 15X11МФ-Ш) или Pt+13%Rh/Pt (для ВТ6) термопары, припаяваемой к середине образца.

Для проведения испытаний использовались цилиндрические образцы $\varnothing 10 \times 15$. Нагрев образца осуществлялся путем прямого пропускания электрического тока, а охлаждение – за счет теплоотвода в водоохлаждаемые бойки. Для предотвращения окисления образцов все термомеханические испытания проводились в вакууме. Между бойками и образцом подкладывались прокладки из графитовой (в случае титана добавлялась молибденовая фольга) с использованием графитовой смазки для равномерной электропроводности и предотвращения сварки между исследуемым образцом и бойками.

Данные по ходу нагрузки, полученные при сжатии, были преобразованы в кривые истинной пластической деформации и напряжения с использованием стандартного метода. Обработка всех данных, полученных на установке *Gleeble-3800* проводилась в научном пакете для анализа и обработки данных Origin, который обладает широким спектром возможностей, как в построении графиков, так и в их обработке. Результаты испытаний представлены в виде таблиц и графиков в формате “.orj”.

Для испытаний материала на сжатие при различных термомеханических режимах обработки с целью последующего изучения микроструктуры использовался модуль Hydrowedge (для осадки с последующей термической обработкой) и модуль Rocket Jaw (случай осадки с последующей мгновенной закалкой).

Температуры испытания и степени деформации образцов при испытаниях на сжатие выбирали исходя из условия перекрытия возможных диапазонов изменения термомеханических параметров процесса штамповки турбинных лопаток на прессе и штамповочном молоте.

Изотермическое состояние поддерживалось в пределах колебаний ± 2 °С. Адиабатическое повышение температуры (значительное при $\dot{\epsilon} \geq 1$ с⁻¹ и $T \leq 900$ °С) регистрировали с использованием переходного осциллографа, прикрепленного к термопаре.

Построение дилатометрических кривых проводилось также с использованием модуля Rocket Jaw. Для измерения поперечного размера образца использовался измерительный прибор CGauge

Термическая обработка деформированных образцов проводилась в лабораторной печи. Образцы из титанового сплава ВТ6 предварительно эмалировались. В качестве защитного покрытия была выбрана стеклоэмаль ЭВТ 24. Подготовка поверхности

образцов перед нанесением покрытия включает в себя: пескоструйную обработку образцов электрокорундом, обезжиривание поверхности.

Определение твердости при лабораторных исследованиях выполнялось методом Бринелля по ГОСТ 9012-59 на твердомерах типа ТБ 5004 с диаметром шарика 10 мм. С целью исключения влияния обезуглероживания на поверхности проб, прошедших термическую обработку, фрезерованием снимался слой металла не менее 3 мм, контролируемая поверхность зачищалась до чистоты Ra не более 2,5 мкм. Выполнялось не менее трёх замеров твёрдости и определялось среднее значение твёрдости (НВ). Твердость катаных, кованных и штампованных заготовок, имеющих большие габариты, измерялась переносным твердомером типа «скоба» ТПС-1, способным измерять изделия до Ø 220 мм.

Микротвердость металла и его структурных составляющих измерялась микротвердомером ПМТ-3М методом восстановленного отпечатка при нагрузке 50 г в соответствии с ГОСТ 9450-76 и микротвердомером.

Испытания на растяжение проводились по ГОСТ 1497-84 на пятикратных образцах с диаметром расчётной части 10 мм. При недостатке металла изготавливались укороченные пятикратные образцы, а также образцы меньшего диаметра, но не менее 5 мм. Использовалась универсальная испытательная машина Zwick.

Испытания на ударную вязкость (КСU и КСV) проводились по ГОСТ 9454-78 на образцах с острым надрезом (тип 11) на маятниковом копре ИО 5003-0,3-11.

Испытания и изготовление образцов для определения предела ограниченной выносливости (σ_{-1}), малоциклового усталости на образцах с надрезом (размеры образцов – тип V, Д=10 мм, радиус надреза 0,25 мм) выполнялись по ГОСТ 25.502.

Для проведения металлографического анализа из образцов были изготовлены микрошлифы. Сначала образцы были запрессованы в термопластик на установке для запрессовки Oral 460 производства фирмы АТМ, затем подвергнуты шлифовке и полировке на установке Saphir с использованием абразивных кругов и алмазных суспензий. Подготовка шлифов проводилась с учетом особенностей $\alpha+\beta$ титановых сплавов и температуры обработки образца. Анализ проводился в центре поперечного сечения деформированных образцов, чтобы охарактеризовать область только с чистым напряжением сжатия (рис. 1).

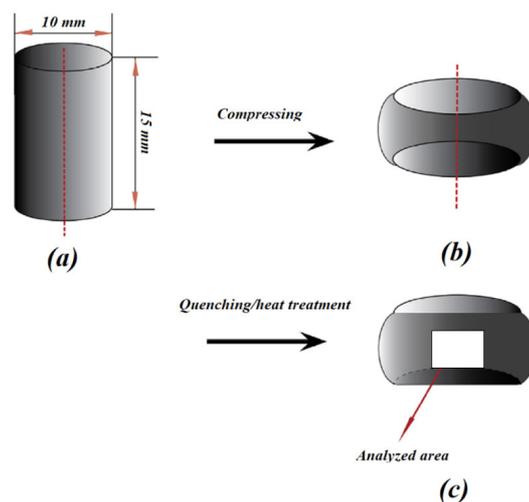


Рис. 1. Схема испытания и металлографического анализа образцов.

При подготовке образцов из 15X11МФ-Ш и ВТ6 для проведения металлографического исследования выбран метод электроэрозионной резки.

Для выявления микроструктуры шлифов их подвергали химическому травлению в 5% спиртовом растворе плавиковой (HF) кислоты. Металлографический анализ микроструктуры образцов проводили с использованием методов оптической микроскопии на световом оптическом микроскопе Leica DMI 5000 в диапазоне увеличений от 50 до 500 крат.

Измерение размеров зёрен осуществлялось с применением системы анализа изображений Thixomet Pro.

3D-модели инструментов и заготовок для математического моделирования построены на основе разработанных чертежей поковок и штампов. Геометрические модели построены в системе автоматизированного проектирования *Unigraphics NX* с учетом всех технологических особенностей и рассчитанных параметров: замков штампов, облойных канавок, штамповочных уклонов и т.д.

Для математического моделирования процессов штамповки и коробления использовался программный комплекс *Deform-3D*. Данный программный продукт является одним из лидеров среди систем компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением. *Deform-3D* позволяет принимать во внимание большое количество факторов, влияющих на процесс штамповки. По этой причине сложность его применения заключается в необходимости тщательной подготовки исходных данных, коэффициентов, определяющих параметры процесса и характеристик материала для расчета. Система позволяет задать параметры практически любого оборудования для пластической деформации, в частности рассматриваемого молота 25 т. *Deform-3D*

обладает широкими возможностями для обработки результатов и оценки протекания процесса штамповки.

Паровоздушный молот изготовлен НКМЗ (Новокраматорский машиностроительный завод) и установлен в 1967 году на ПО ЗТЛ (завод турбинных лопаток, ныне входит в ПАО «Силовые машины»). Энергия удара молота 630 кДж, масса падающих частей 25 т, наибольший ход бабы 1,6 м, давление воздуха перед впуском в цилиндр, 7-9 ата, максимальные габариты штампов 2,3х1,1 м. Исходя из указанных основных технических данных молота можно сделать вывод о предельных возможностях молота 25 т для штамповки крупногабаритной лопатки размером 2100 мм.

Результаты и их обсуждение

Исследование процесса штамповки заготовки турбинной лопатки из титанового стали 15X11МФ-Ш

Исходя из данных реального процесса штамповки турбинной лопатки с длиной поковки 1300 мм из стали 15X11МФ-Ш определены значения КПД удара молота, коэффициента теплопередачи в окружающую среду (C_{cp}), а также коэффициента теплопередачи в инструмент при штамповке ($C_{и}$).

Коэффициенты определяли путем верификации построенной компьютерной модели так, чтобы обеспечить максимальное совпадение контролируемых параметров при моделировании с реальными. Для определения C_{cp} в условиях производства замеряли пирометром температуру заготовки при транспортировке от печи до молота, а также в процессе штамповки. Кроме этого, были выполнены замеры температур непосредственно в процессе штамповки.

Полученный коэффициент $C_{cp}=130 \text{ Вт/К*м}^2$ применим только для случая транспортировки при наличии печной окалины, которая уменьшает теплоотдачу в окружающую среду. По результатам измерения температуры заготовки непосредственно при штамповке было установлено, что для пауз между ударами следует использовать $C_{cp}=520 \text{ Вт/К*м}^2$ Увеличение данного коэффициента обусловлено как менее интенсивным окалинообразованием в паузах между ударами, так и дополнительным охлаждением от вентилятора, установленного перед молотом.

$C_{и}$ принимали в расчетах на основании ранее выполненных работ, а также согласно литературным данным. При расчетах предварительной штамповки коэффициент теплопередачи составлял $C_{и}=20000 \text{ Вт/К*м}^2$, при расчетах для окончательной штамповки, когда происходит значительный рост контактных напряжений, коэффициент теплопередачи составлял $C_{и}=30000 \text{ Вт/К*м}^2$.

Коэффициент полезного действия удара молота также был откалиброван по существующему процессу штамповки турбинной лопатки с длиной поковки 1300 мм.

Согласно производственным данным, количество ударов, выполненных по команде оператора, – шесть. Средняя пауза между ударами – 2 с. Энергию удара молота приняли равной 730 кДж. Учитывали номинальную массу падающих частей и дополнительную массу штампов. Первый удар молота служит для сбива окалины, не полную энергию удара учитывали за счет уменьшения энергии. КПД ударов молота при штамповке турбинной лопатки: при первом ударе – 0,95; при втором – четвертом ударах – 0,6; при пятом – шестом ударах – 0,5. В результате верификации математической модели процесса на основании фактических данных, на границе между заготовкой и инструментом приняли показатель трения $\psi=0,7$.

На рисунке 2 представлены результаты сравнения картины распределения температур и полученной формы заготовки при моделировании и на окончательном этапе штамповки. Проведены замеры величины недоштамповки и полученные значения показали хорошую сходимость полученных данных.

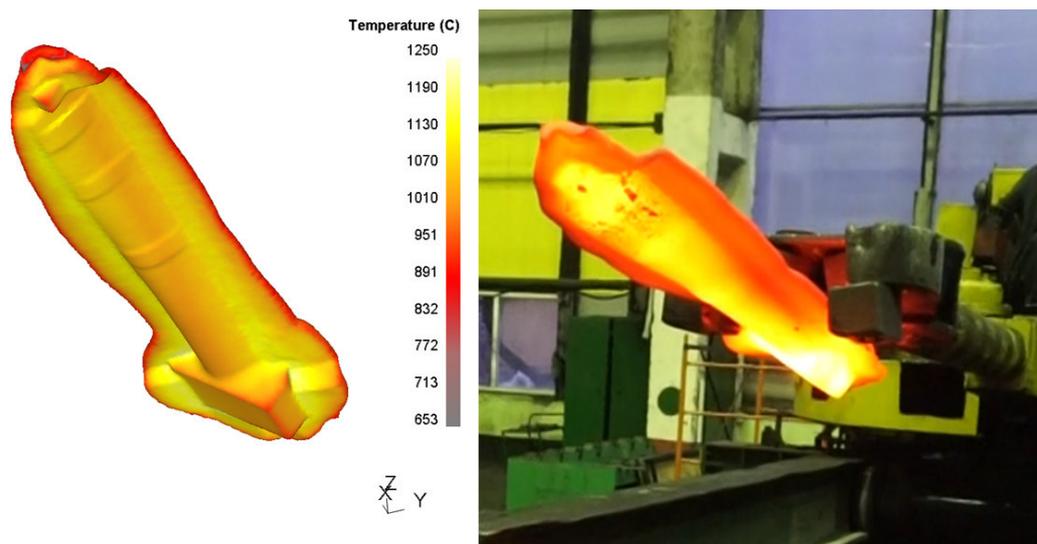


Рис. 2. Результаты сравнения формообразования и полей температур при моделировании и реальном процессе

Полученные данные использованы для моделирования процесса штамповки крупногабаритной заготовки турбинной лопатки из стали 15X11МФ-Ш с длиной поковки 2100 мм.

Заготовка данной турбинной лопатки имеет угол разворота перовой части более 90° и значительную саблевидность поперечных сечений, прилегающих к замковой части. Штамповка крупногабаритной лопатки проходит в предварительном и окончательном штампах. Конструкция предварительного штампа подразумевает собой предварительное формообразование замковой части для удобства укладки поковки в окончательный штамп.

Критерием остановки задачи штамповки является полное смыкание штампов или падение температуры поверхности до 920 – 930 °С. Температура нагрева заготовки в печи – 1180 °С. Поверхность штампов имеет температуру 500 °С, как при установившемся процессе штамповки на молоте. Время транспортировки заготовки от печи до молота при помощи шаржир-машины принято равным 40 секундам. Первый удар молота с малым усилием служит для сбива печной окалины. Значения коэффициентов и параметров, которые использованы при моделировании предварительной стадии штамповки крупногабаритной лопатки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры, используемые при моделировании предварительной стадии штамповки лопатки

Номер удара	Энергия удара, кДж	КПД при ударе	Время паузы м/у ударами, с	$C_{ср}$, Вт/К*м ²	$C_{и}$, Вт/К*м ²
1	290	0,95	10*	520	20000
2	730	0,65	3	520	20000
3	730	0,65	3	520	20000
4	730	0,65	3	520	20000
5	730	0,65	3	520	20000
6	730	0,65	3	520	20000
7	730	0,6	3	520	20000
8	730	0,6	3	520	20000
9	730	0,55	3	520	20000
10	730	0,55	3	520	20000
11	730	0,55	3	520	20000
12	730	0,5	3	520	20000
13	730	0,5	3	520	20000

* Время позиционирования заготовки в штампе после транспортировки от печи.

Результаты моделирования показали, что предварительную штамповку можно осуществить с одного нагрева, полное смыкание штампов происходит после 13-го удара (рис. 3).

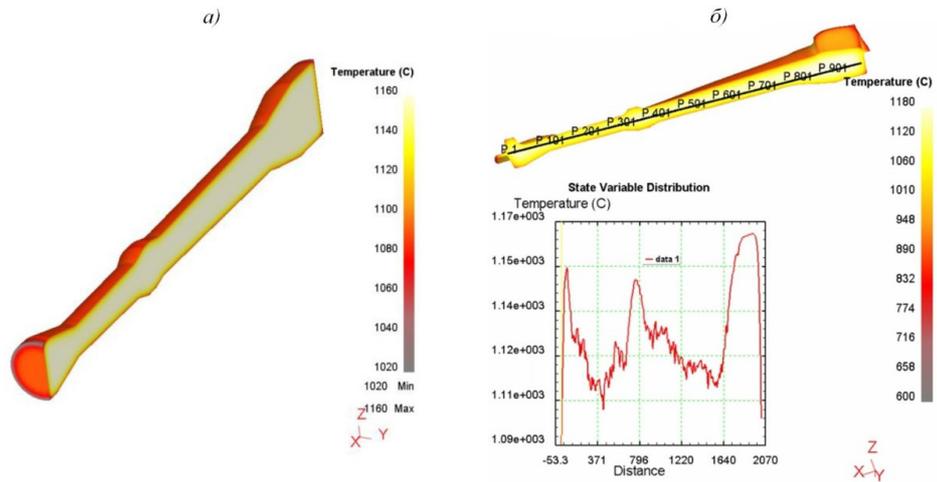


Рис. 3. Результаты расчета температурных полей для стадии транспортировки заготовки от печи к молоту (а) и после 13-го удара предварительной штамповки по оси лопатки (б)

По данному алгоритму проведено моделирование следующих стадий процесса.

Результаты моделирования показали, что штамповка в окончательном штампе должна проходить за четыре нагрева. Поля температур после каждого этапа представлены на рисунке 4.

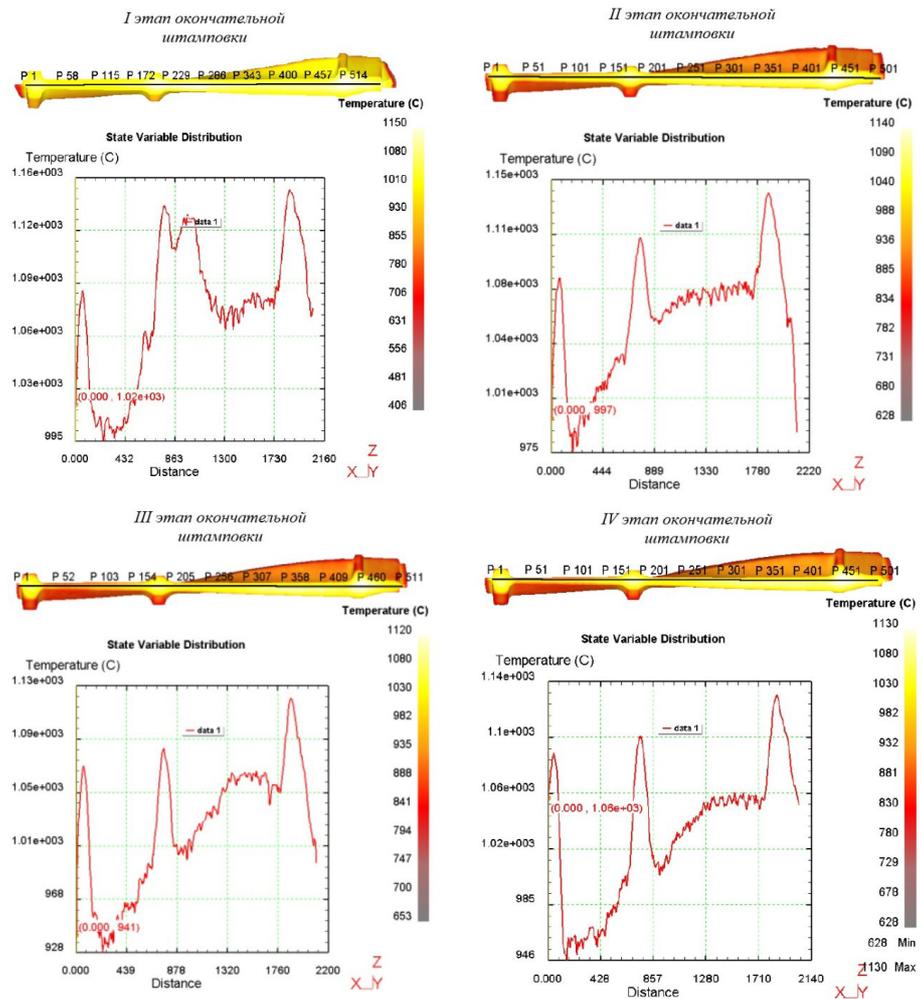


Рис. 4. Поля распределения температур после последних ударов на этапах окончательной штамповки

Недоштамповка: I окончательный этап штамповки – 12 ударов (зазор 25,8 мм); II окончательная штамповка – 11 ударов (зазор – 12,89 мм); III окончательная штамповка – 9 ударов (зазор – 6,31 мм); IV окончательная штамповка – 10 ударов (зазор – 0,67 мм).

Также выполнен анализ характера распределения вертикальных напряжений σ_z на финальных этапах рассчитанных стадий штамповки. Проанализировано распределение деформаций по основным сечениям штампованной заготовки по результатам каждого перехода.

Исходя из анализа деформации на последнем переходе можно сказать, что ее величина позволяет проработать структуру лопатки даже при минимальном КПД удара молота. При этом характерные зоны затрудненной деформации присутствуют, но не в большом объеме. Большие деформации расположены в зонах интенсивного течения металла. Эти зоны находятся вне тела лопатки и будут обрезаны при последующем удалении облоя на гидравлическом прессе и механической обработке. Получения однородной деформации по всему сечению заготовки являлось важной задачей, т.к. она может оказывать влияние на механические свойства конечной заготовки.

При помощи математического моделирования выявлено, что энергии удара молота с массой падающих частей 25 т достаточно для деформирования заготовки с большой площадью проекции. Определено необходимое количество ударов молота и нагревов во время штамповки. Проанализировано напряженно-деформированное состояние штампованной заготовки. Сконструированные штампы и геометрия исходной заготовки обеспечивают реализацию технологического процесса. Разработана технология штамповки крупногабаритной заготовки турбинной лопатки.

Одним из основных условий, предъявляемым к крупногабаритным штампованным заготовкам турбинных лопаток, является стабильность механических характеристик по всему сечению, которая определяется однородностью структуры. Однако в силу большого количества переходов и, как следствие, нагревов, необходимых для окончательного формообразования крупногабаритной штампованной заготовки, а также минимизации обжатий на окончательном этапе, существует вероятность образования зон затрудненной пластической деформации при окончательной штамповке (5-15%).

По этой причине решено провести испытания на сжатие при различных термомодеформационных параметрах процесса с последующим микроструктурным анализом, что позволит количественно и качественно оценить характер структуры после предыстории получения полуфабриката. Режим термической обработки образцов – закалка 1020 °C отпуск при 680 °C в течение 2 часов.

Микроструктура металла деформированных образцов после проведенной термообработки (закалки) представляет собой мартенсит, характер зерен – равноосный (рис. 5).

Размер зерна при всех термомеханических параметрах деформации – однородный, с преобладанием зерен 5 балла, на отдельных режимах отмечается присутствие зерен 4 балла.



Рис. 5. Типичная микроструктура штампованной заготовки в зоне профиля пера

Параметры деформации (температура и степень деформации) и микроструктуры металла (балл зерна, средний размер зерна) деформированных образцов приведены в табл. 2. Для сравнения в таблице приведены параметры микроструктуры металла деформированных образцов без последующей термообработки.

Таблица 2

Параметры структуры после испытаний

№ п/п	Обозначение образцов, прошедших термообработку после деформации	Температура, °С / степень деформации	Балл зерна (шкала ГОСТ 5639)		Средний размер зерна (ГОСТ 5639), мкм	
			после т/о 1020°С, 2 часа, охлаждение в воде	без т/о	после т/о 1020°С, 2 часа, охлаждение в воде	без т/о
1	1-1	930/0,05	5	5	62	62
2	2-2	930/0,1	5-4	5-4	62-88	62-88
3	3-3	930/0,2	5-4	5-4	62-88	62-88
4	4-4	930/0,6	5-4	5-4	62-88	62-88
5	5-5	980/0,05	5	5	62	62

6	6-6	980/0,1	5	5	62	62
7	7-7	980/0,2	5-4	5	62-88	62
8	8-8	980/0,6	5	5-4	62	62-88
9	9-9	1030/0,05	5-4	5-4	62-88	62-88
10	10-10	1030/0,1	5	5	62	62
11	11-11	1030/0,2	4	4	88	88
12	12-12	1030/0,6	4-5	4-5	88-62	88-62
13	13-13	1080/0,05	4-5	5-4	88-62	62-88
14	14-14	1080/0,1	5	5	62	62
15	15-15	1080/0,2	5-4	5-4	62-88	62-88
16	16-16	1080/0,6	5	-	62	-
17	17-17	1130/0,05	5	5-4	62	62-88
18	18-18	1130/0,1	5	5-4	62	62-88
19	19-19	1130/0,2	5	5	62	62
20	20-20	1130/0,6	5	5	62	62
21	21-21	1180/0,05	5	5	62	62
22	22-22	1180/0,1	5	5	62	62
23	23-23	1180/0,2	5-6	5	62-44	62
24	24-24	1180/0,6	5	5	62	62

В результате полученные результаты испытаний стали 15X11МФ-Ш использованы для прогнозирования структуры штампованных заготовок турбинных лопаток.

Можно сказать, что степень деформации не оказывает сильного влияния на основные параметры структуры готового изделия.

Принято считать, что качество ковальной заготовки, как правило, выше качества сортового проката, однако, работ по исследованию и сравнению свойств различных заготовок под штамповку и лопаток, изготовленных из них, не обнаружено. По этой

причине одной из важных задач при разработке новой технологии штамповки является выбор типа исходной заготовки, от решения которой напрямую зависят не только эксплуатационные характеристики, но и себестоимость готовой лопатки.

Выполнено исследование влияние способа получения исходного металла заготовок (сортовой прокат и кованные прутки) на свойства штамповок турбинных лопаток из стали 15X11МФ-Ш.

Кованный пруток: слиток ЭШП 550x580 мм → прокатка на стане 1150 в блюм 440x440 мм → ковка на прессе на диаметр 320 мм → ковка на прессе на диаметры 320 и 240 мм → механическая обработка на диаметры 295 и 210 мм.

Сортовой прокат: слиток ЭШП 550x550 мм → прокатка на стане 1150 в блюм 390x350 мм → прокат на крупносортом заготовочном стане 1000\850\630 в круг 240 мм → механическая обработка на диаметр 210 мм. Перед штамповкой сортовой прокат проходил операции ковки на РКМ и высадки замковой части на ГКМ для получения заготовки с диаметрами 295 и 210 мм в условиях предприятия.

Закуплены кованные прутки и сортовой прокат, после чего проведена опытная штамповка партии заготовок лопаток на молоте 25 т по разработанной технологии (рис. 6).



Рис. 6. Штампованная заготовка турбинной лопатки из стали 15X11МФ-Ш

Проведены испытания механических свойств исходных заготовок на продольных образцах после полной термической обработки, из которых следует, что исходная заготовка в кованом состоянии имеет более высокие прочностные свойства.

Свойства заготовок лопаток, штампованных из сортового проката и кованого прутка, сведены в табл. 3. Значения для кованого прутка представлены в числителе, для сортового проката в знаменателе. Отбор образцов проведен по схеме на рисунке 7.

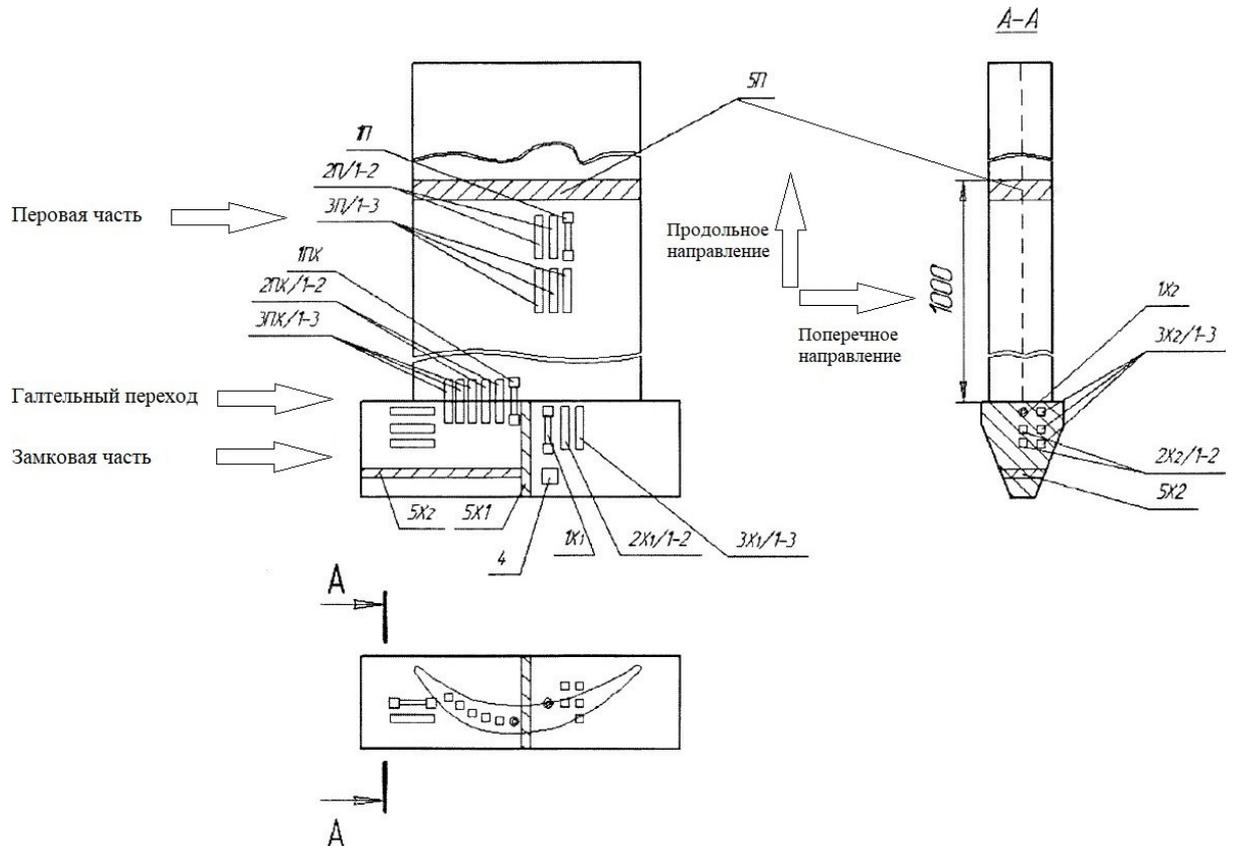


Рис. 7. Схема вырезки образцов для проведения исследований: 1П, 1ПХ, 1Х1, 1Х2 – образцы на растяжение; 2П/1-2, 2ПХ/1-2, 2Х1/1-2, 2Х2/1-2 – образцы для определения ударной вязкости КСУ; 3П/1-3, 3ПХ/1-3, 3Х1/1-3, 3Х2/1-3 – образцы для определения работы удара КВ; 4 – темплет площадью 320 мм² для микрошлифа; 5П, 5Х1, 5Х2 – темплеты для микрошлифа. Индексы П и Х обозначают перовую и замковую часть лопатки

Таблица 3

Результаты механических испытаний штампованных заготовок с минимальным (min) и максимальным (max) значением твердости на поверхности

Направление и место вырезки образца	Твердость заготовки	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, σ_p , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, Ψ , %	Работа удара, КВ, Дж	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²	% вязкой составляющей	Твердость на ударных образцах, НВ
Продольное, перовая	max	759	879	19	59	29,28,31	68,53	29,32	269
		765	885	18	56	24,24,22	58,55	20,23	269

часть	min	$\frac{718}{746}$	$\frac{836}{872}$	$\frac{17}{18}$	$\frac{61}{59}$	$\frac{40,42,42}{32,30,28}$	$\frac{88,78}{65,58}$	$\frac{36,34}{32,36}$	$\frac{255}{269}$
	max	$\frac{731}{745}$	$\frac{869}{888}$	$\frac{18}{18}$	$\frac{59}{57}$	$\frac{26,31,30}{27,24,28}$	$\frac{59,65}{73,65}$	$\frac{26,22}{42,35}$	$\frac{269}{269}$
Продольное, галтельный переход	min	$\frac{723}{743}$	$\frac{846}{878}$	$\frac{17}{18}$	$\frac{60}{60}$	$\frac{32,30,37}{24,25,28}$	$\frac{73,63}{65,65}$	$\frac{25,22}{32,36}$	$\frac{255}{269}$
	max	$\frac{743}{747}$	$\frac{865}{881}$	$\frac{17}{18}$	$\frac{59}{59}$	$\frac{29,28,28}{30,22,24}$	$\frac{60,60}{60,68}$	$\frac{26,25}{30,35}$	$\frac{269}{269}$
Продольное, замковая часть	min	$\frac{724}{745}$	$\frac{844}{876}$	$\frac{19}{18}$	$\frac{61}{60}$	$\frac{34,34,32}{32,22,32}$	$\frac{68,75}{68,68}$	$\frac{29,31}{49,49}$	$\frac{255}{269}$
	max	$\frac{748}{754}$	$\frac{872}{875}$	$\frac{21}{17}$	$\frac{59}{57}$	$\frac{28,31,25}{28,30,24}$	$\frac{60,55}{63,63}$	$\frac{25,22}{29,32}$	$\frac{262}{269}$
Поперечное, замковая часть	min	$\frac{727}{740}$	$\frac{851}{871}$	$\frac{18}{19}$	$\frac{61}{60}$	$\frac{30,28,28}{26,26,24}$	$\frac{58,63}{58,58}$	$\frac{27,31}{29,29}$	$\frac{255}{269}$
	max	$\frac{745}{753}$	$\frac{871}{879}$	$\frac{18,8}{17,8}$	$\frac{59}{57,3}$	$\frac{28,7}{25,7}$	$\frac{60}{63,1}$	$\frac{25,9}{30,8}$	$\frac{267,3}{269}$
Средние значения по заготовке	min	$\frac{723}{744}$	$\frac{844}{878}$	$\frac{17,8}{18,3}$	$\frac{60,8}{59,8}$	$\frac{34,1}{27,4}$	$\frac{70,8}{63,1}$	$\frac{29,4}{36,5}$	$\frac{255}{269}$

Полученные свойства удовлетворяют требованиям, предъявляемым к штампованным заготовкам лопаток. При анализе микроструктуры повышенной загрязненности неметаллическими включениями не выявлено, причем параметры включений четырех исследованных штампованных заготовок одинаковые: тип А – тонкие – 0, грубые – 0; тип В – тонкие – 1, грубые – 0; тип С – тонкие – 1, грубые – 0; тип D – тонкие – 1, грубые – 0. Макроструктура на темплетах без видимых дефектов, представляет собой мартенсит. Несмотря на наличие δ -Fe в исходном сортовом прокате в количестве чуть менее 1%, после штамповки его присутствия не было обнаружено, что, вероятно, обусловлено гомогенизацией при неоднократном нагреве под штамповку до $T=1160^{\circ}\text{C}$.

Последующий анализ испытаний, проведенных на специальном технологическом припуске штампованных заготовок, изготовленных из сортового проката в количестве 113 шт., а также разрезка и испытания, согласно схеме (рис. 7), четырех заготовок из различных плавок, подтвердили отсутствие существенных отличий в механических характеристиках лопаток.

При изготовлении крупногабаритных турбинных лопаток из стали 15X11МФ-Ш формируется одинаковая структура и примерно равный уровень механических

характеристик по сечению штампованной заготовки, вне зависимости от способа получения исходного металла (кованый прутки и сортовой прокат).

После получения теоретической возможности штамповки крупногабаритной лопатки на молоте 25 т возникает необходимость получения фактического значения КПД удара молота. При изготовлении опытной партии и штатных комплектов штампованных заготовок на молоте 25 т проведен статистический анализ количества ударов и величины недоштаповки по переходам. Также на отдельных партиях проведены опытные испытания с определением расстояния между штампами перед началом 4 этапа и по его окончанию при помощи установки цилиндрических образцов из свинца 30х40 мм на край штампа.

По причине того, что штамповка в предварительном штампе идет до полного смыкания штампов, КПД удара молота, на данном этапе не рассматривался. Исследования проведены по 4 окончательным этапам штамповки.

Данные, использованные для калибровки представлены в таблице 4.

Таблица 4

Статистика по ударам и величине недоштаповки

	Производственная статистика по количеству ударов	Недоштаповка полученная при теоретическом КПД удара	Производственная статистика по недоштаповке, мм	Фактические замеры недоштаповки, мм
I окончательная штамповка	5	25,8	22 – 28	–
II окончательная штамповка	9	12,89	18 – 21	–
III окончательная штамповка	10	6,31	15 – 17	16,3 – 16,5
IV окончательная штамповка	6	0,67	11 – 13	12,6 – 12,5

Таким образом, зная количество ударов и величину недоштаповки по переходам проведено математическое моделирование, максимально повторяющее производственный процесс штамповки крупногабаритной лопатки.

Недоштамповка: I этап окончательной штамповки – 26,4 мм; II этап окончательной штамповки – 19,7 мм; III этап окончательной штамповки – 16,37 мм; IV этап окончательной штамповки – 12,86 мм. Δl показывает на какую величину происходит деформация заготовки после каждого удара.

Для определения устойчивой деформации был проведен эксперимент с разными значениями КПД (0,45 и 0,55). Из рисунка 8 видно, что на 2 переходе Δl изменяется с каждым ударом не прямолинейно, а начиная с 3 перехода приближается к прямой линии.

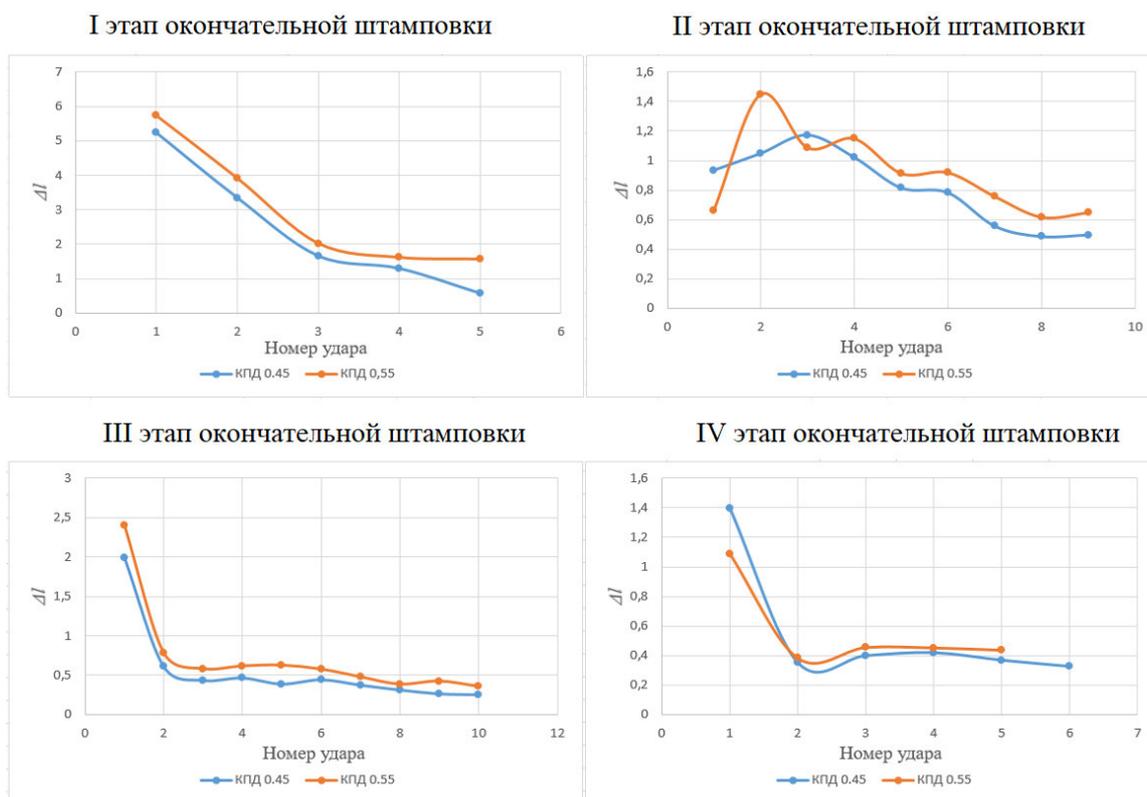


Рис. 8. График изменения хода штампа во время этапов окончательной штамповки при различном КПД

По полученным графическим зависимостям можно сделать вывод о том, что начиная с 3 перехода начинается устойчивый процесс, когда КПД удара молота приходит к своему минимальному значению, которое составляет 0,35.

Исследование процесса штамповки заготовки турбинной лопатки из титанового сплава ВТ6

Для математического моделирования процесса штамповки турбинной лопатки из титанового сплава ВТ6 на молоте 25 т использовано значение энергии удара молота – 630 кДж, т.к. отсутствует избыточная масса штампов. КПД удара молота откалиброван на стальной лопатке и при максимальной площади проекции составляет 0,35.

Для прогнозирования течения металла при штамповке были использованы кривые сопротивления деформации, полученные ранее в ходе испытаний образцов сплава ВТ6 на комплексе Gleeble-3800.

В табл. 5 представлены данные, используемые при математическом моделировании. $C_{ср}$ и $C_{и}$ взяты исходя из анализа научно-технической литературы по моделированию процессовковки и штамповки сплава ВТ6 и его аналогов.

Таблица 5

Параметры штамповки лопатки из сплава ВТ6

Номер удара	Энергия удара, кДж	КПД при ударе	Время паузы м/у ударами, с	$C_{ср}$, Вт/К*м ²	$C_{и}$, Вт/К*м ²
1	250	0,95	5*	500	25000
2	630	0,65	2	500	25000
3	630	0,65	2	500	25000
4	630	0,55	2	500	25000
5	630	0,55	2	500	25000
6	630	0,5	2	500	25000
7	630	0,45	2	500	25000
8	630	0,45	2	500	25000
9	630	0,45	2	500	25000
10	630	0,35	2	500	25000
11	630	0,35	2	500	25000
12	630	0,35	2	500	25000

* Время позиционирования заготовки в штампе после транспортировки от печи.

Характер формирования полей распределения температуры и степени деформации по сечению заготовки имеет типичный для турбинных лопаток характер (рис. 9).

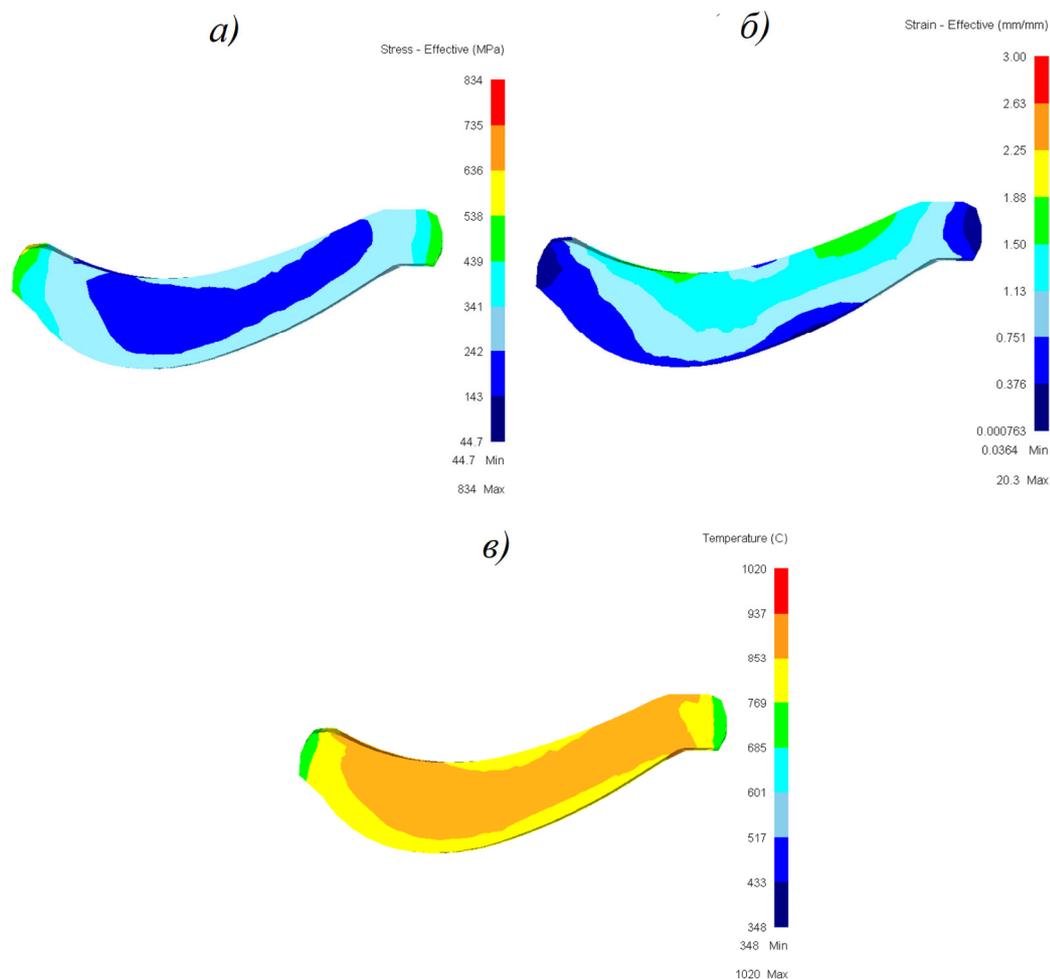


Рис. 9. Поля распределения интенсивности напряжений (а), накопленной интенсивности деформации (б) и температуры (в) в одном из сечений перьевой части заготовки во время шестого удара

Математическое моделирование показало, что штамповку заготовки лопатки из сплава ВТ6 можно осуществлять с одного нагрева за 12 ударов молота 25 т.

Моделирование процесса коробления проводилось в программном комплексе в упругопластической постановке, с условиями закрепления. На узлы, принадлежащие одной из плоскостей тела, наложен запрет на перемещение по трем степеням свободы.

Построение дилатометрических кривых выполнено при следующих условиях:

- скорость нагрева образцов 50 °С/мин;
- нагрев до температуры $T_{\text{пл}}-15$ °С, выдержка 300 с;
- скорости охлаждения: 1, 5, 10 °С/с.

Проведено математическое моделирование процесса коробления штампованных заготовок при 4 различных условиях штамповки (табл. 6).

Таблица 6

Основные параметры технологий штамповки, использованные для моделирования

Обозначение	1	2	3	4
Температура нагрева	938	938	938	938
Пауза после выдачи, сек	20	40	20	40
Пауза после первого удара, сек	5	5	10	10
Пауза при дальнейших ударах, сек	2	2	2	2

Большой перепад температур вдоль всего сечения лопатки вызывает термические деформации, что приводит к изгибу пера лопатки относительно неподвижной замковой части (происходит подъем концевых сечений). Так было выявлено, что коробление начинается спустя при $\tau=56$ с. Затем, по мере охлаждения лопатки перо лопатки занимает крайнее верхнее положение, далее движение происходит вниз. Далее лопатка опускается в нижнее положение, дальнейшие движения направлены вверх-влево (рис. 10).

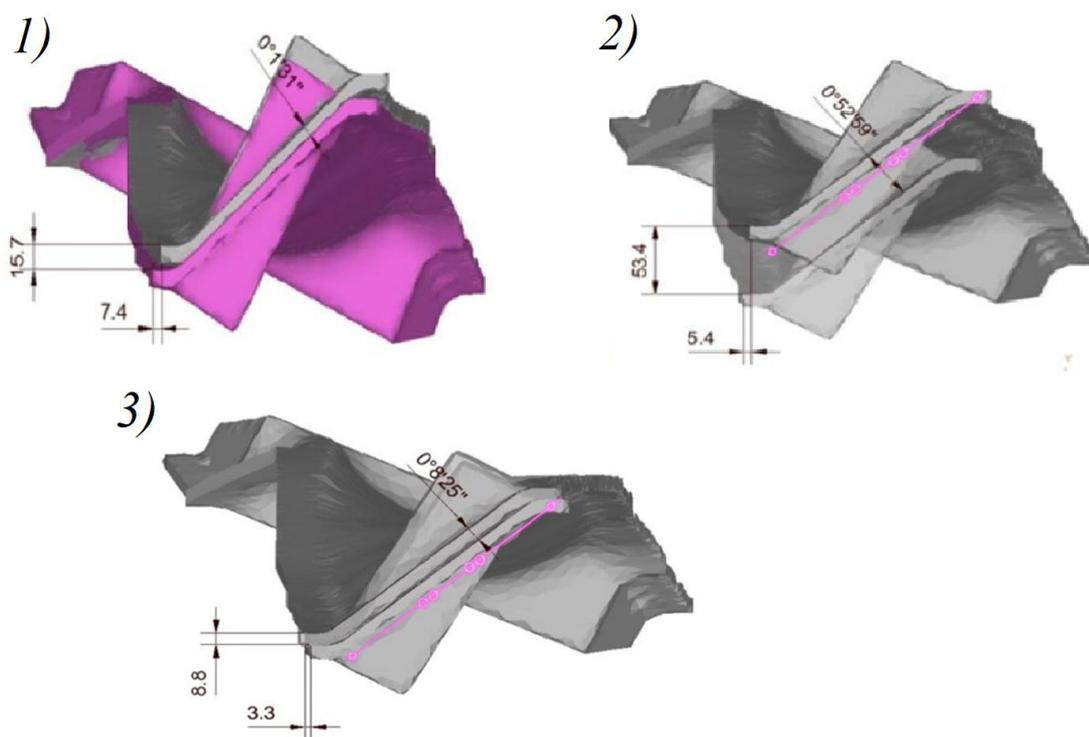


Рис. 10. Движение лопатки из начального положение в конечное

Неравномерное температурное поле приводит к формированию растягивающих напряжений в остывающих поверхностных слоях. Массивная замковая часть заготовки усиливает неравномерность охлаждения перовой части лопатки за счет отдачи тепла в прилегающую область пера заготовки. Наиболее низкую температуру после извлечения из штампа имеют наиболее тонкие сечения перовой части, удаленные от замка. В связи с

достаточно длительным нахождением заготовки в штампах (более 20 с) потери тепла велики, однако явление термической усадки не заметно на фоне пластической деформации заготовки.

При извлечении заготовки из ручья штампа, перо лопатки прогибается вниз. По причине различной толщины областей входной и выходной кромок, помимо продольного изгиба, перо лопатки закручивается. Температура холодных кромок повышается в некоторых случаях более, чем на 100 °С, данный эффект более ярко выражен для поверхностных слоев более массивных сечений заготовки. В процессе постепенного выравнивания температуры по сечению, продольный изгиб пера уменьшается. Максимальный прогиб заготовки находится в самой тонкой кромке лопатки. По причине того, что штамповка лопаток из сплава ВТ6 проходит ниже $T_{пп}$, влияние объемных температурных изменений, вызванных структурным превращением отсутствует.

Далее проведено сравнение между конечными положениями пера титановой лопатки, путем наложения друг на друга конечных результатов (рис. 11).

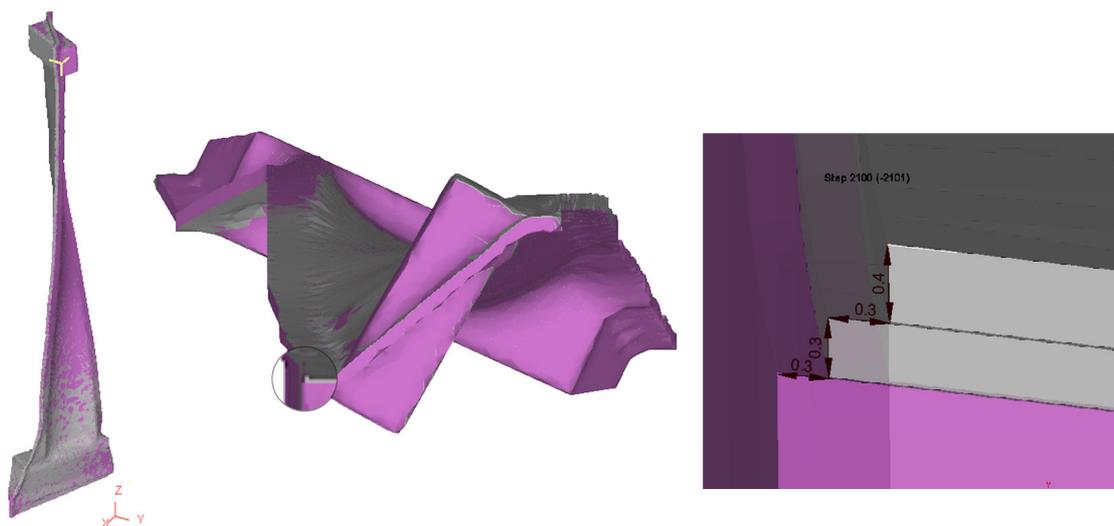


Рис. 11. Наложение конечных результатов измерений

Увеличение вылежки на нижнем штампе оказывает влияние на коробление, так, например, разница между суммарными перемещениями в трех направлениях на конце заготовки составила 1,7 мм.

Уменьшение величины коробления возможно при помощи фиксации заготовки лопатки как со стороны нижнего замка, так и со стороны верхнего замка.

Таким образом, присутствует возможность уменьшения припуска на механическую обработку, что значительно снизит затраты на производство лопаток из сплава ВТ6. Для

этого требуется провести дальнейшие исследования процесса коробления с новыми припусками и новой фиксацией заготовки.

Следующая часть работ посвящена исследованию микроструктуры после различных режимов термомеханической обработки. Исходная заготовка – кованный пруток, величина зерна которого со стороны донной части соответствует 4, 5 баллам 10-ти балльной шкалы макроструктур (инструкция № 1054-76).

Проведено исследование микроструктуры образцов титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии (рис. 12).



Рис. 12. Пример микроструктуры в поперечном сечении исходного прутка

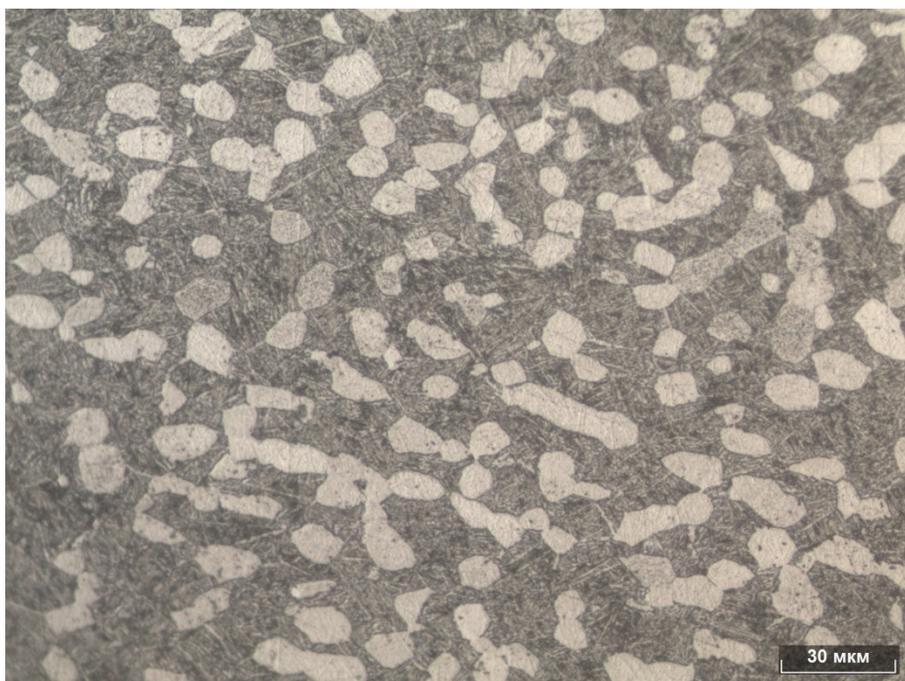
Зёрна мелкие, округлой формы, их средний размер находится в пределах 9 – 15 мкм.

Исследована микроструктура шлифов образцов титанового сплава ВТ6 после тридцати двух различных режимов деформации при:

- температуре: $T_{\text{пл}}-40$, $T_{\text{пл}}-60$, $T_{\text{пл}}-80$, $T_{\text{пл}}-120$ °С;
- скорости деформации: 0,1, 30 с⁻¹;
- степени деформации: 0,05, 0,15, 0,6, 1,0;
- скорости нагрева образцов 50 °С/мин;
- температуре нагрева образцов (имитация нагрева под штамповку): $T_{\text{пл}}-40$ °С, выдержке 300 с;
- скорости охлаждения до температуры испытания 2 °С/с;
- выдержке при температуре испытания, до проведения деформации – 30 с;
- скорости охлаждения образцов после деформации 2 °С/с до комнатной температуры.

Образцы подверглись термомеханической обработке по указанным режимам в двойном экземпляре. После осадки образцы подверглись термической обработке по двум режимам: отжиг и закалка с последующим отжигом.

Микроструктура полученных образцов в основном состоит из равноосных и вытянутых зерен альфа-фазы в трансформированной ($\alpha+\beta$)-матрице. На рисунке 13 представлена микроструктура после режима: 938 °С ($T_{\text{ш}}-40$), степень деформации 0,15, скорость деформации 0,1.



а)



б)

Рис. 13. Микроструктура образца а) – отжиг, б) – закалка с отжигом

Структура образцов практически полностью рекристаллизована и является двухфазной, состоящей из глобулярных и пластинчатых включений α -фазы. Размер зерен 7-14 мкм. Повышение степени деформации не оказывает существенного влияния на степень рекристаллизации. Видно, что повышение степени деформации ускоряет процессы рекристаллизации (рис. 14). Размер рекристаллизованных зерен практически не меняется в большинстве случаев.

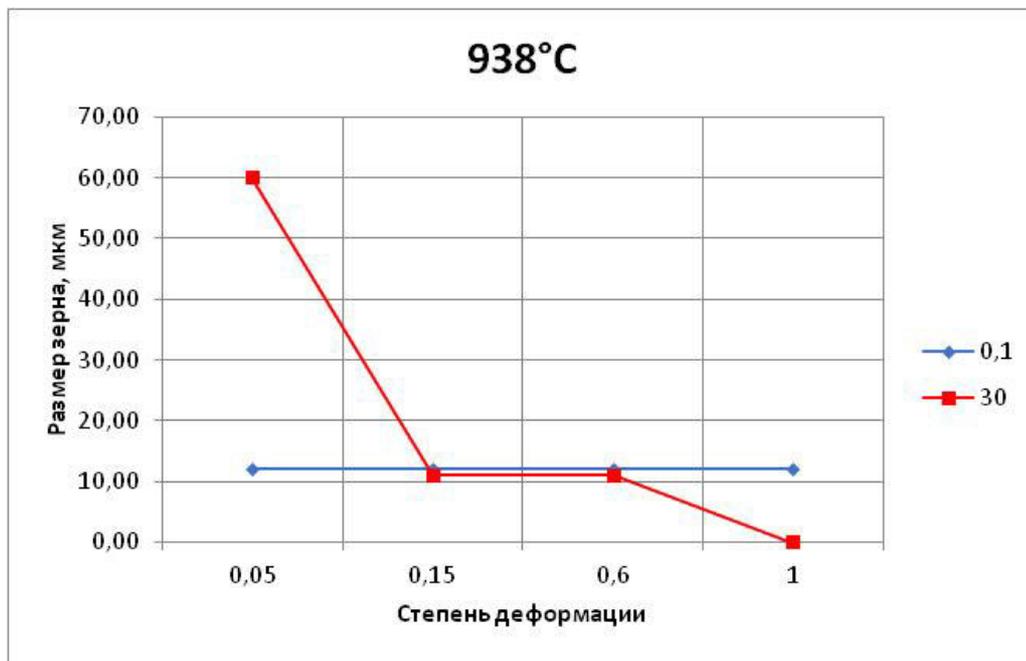


Рис. 14. Пример зависимости размера зерна для температуры 938 °С

По данному алгоритму проведен анализ микроструктуры образцов, испытанных при других температурах.

Превалирующее влияние на процессы рекристаллизации оказывает температура деформации. С понижением температуры испытания от 938°C до 858°C количество рекристаллизованных зёрен, а, соответственно, и степень рекристаллизации, уменьшается. При этом какого-либо значимого влияния скорости деформации не выявлено.

Металлографические исследования на третьем этапе работы позволили установить, что структура всех образцов является ($\alpha+\beta$)-двухфазной, состоящей из смеси глобулярных и пластинчатых зерен. Размер рекристаллизованных зерен во всех образцах составляет 8 – 15 мкм. Не рекристаллизованные зерна вытянутые, размером от 60 до 400 мкм.

В настоящее время идет продолжение исследований образцов из сплава ВТ6.

Заключение

1. Проведено математическое моделирование процесса штамповки крупногабаритной лопатки с длиной поковки 2100 мм из стали 15X11МФ-Ш на молоте 25 т. Подтверждена возможность оборудования по изготовлению заготовки лопатки, разработана технология штамповки крупногабаритной лопатки.

2. Проведены испытания стали 15X11МФ-Ш на сжатие при различных термомеханических параметрах процесса штамповки. При помощи физического моделирования выявлено, что величина пластической деформации не оказывает существенного влияния на параметры микроструктуры. Разработанная технология штамповки выдана в производство.

3. Для обеспечения требуемого металлургического качества исходного материала и штампованных заготовок разработаны и выпущены: технические требования на заготовку, получаемую ковкой, технические требования на горячекатаные прутки и технические требования на штампованные заготовки лопаток из стали 15X11МФ-Ш.

4. Проведена опытная штамповка заготовок лопаток из сортового проката и кованых прутков. Анализ результатов исследования штампованных заготовок, изготовленных из различных полуфабрикатов, свидетельствует о стабильном комплексе механических свойств по сечению и соответствии качества металла техническим требованиям. Осуществлен научно обоснованный выбор типа исходной заготовки – сортовой прокат 15X11МФ-Ш.

5. Проведены производственные замеры количества ударов молота, величины недоштамповки заготовок лопаток на каждом этапе при серийном изготовлении. В результате проведенного исследования получены данные по КПД удара молота 25 т, которые могут быть использованы при проектировании новых процессов штамповки крупногабаритных деталей. Разработана методика определения КПД удара молота.

6. Проведено математическое моделирование штамповки лопатки из титанового сплава ВТ6. Определено количество ударов молота, которое необходимо для деформирования лопатки. Проведенное моделирование показало, что данную лопатку можно изготовить на имеющемся оборудовании – штамповочный молот 25 т за 1 переход.

7. Выполнен анализ процесса коробления турбинной лопатки из титанового сплава ВТ6.

8. Выполнены испытания титанового сплава ВТ6 при различных термомеханических параметрах обработки. В настоящее время можно сделать промежуточный вывод, что преобладающее влияние на процессы рекристаллизации оказывает температура деформации. С понижением температуры испытания от 938°С до

858°С количество рекристаллизованных зёрен, а, соответственно, и степень рекристаллизации, уменьшается. При этом какого-либо значимого влияния скорости деформации не выявлено.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Смирнов М.О., Чижик Т.А., Золотов А.М., Мишин В.В., Шишов И.А. Исследование и определение параметров штамповки турбинной лопатки на паровоздушном молоте. // Сталь. – 2017. – № 12. – С. 50-53.
2. Золотов А.М., Чижик Т.А., Смирнов М.О. Построение диаграмм рекристаллизации третьего рода титанового сплава ВТ6. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. Том 23. № 4. – С. 118–126.
3. Смирнов М.О., Чижик Т.А., Золотов А.М., Мишин В.В., Шишов И.А. Применение математического моделирования для изготовления крупногабаритных штамповок турбинных лопаток из жаропрочной стали // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 29-33.
4. Smirnov M.O. Chizhik T.A. Zolotov A.M. Investigation of the Hammer Forging Process of Large-Sized Turbine Blades of Stainless Steel. // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 822. pp. 150-158. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.150>
5. Smirnov M.O., Zolotov A.M., Chizhik T.A., Raskatov Yu. E. Design of the stamping process of large-sized turbine blades taking into account the technological characteristics of titanium alloys. // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 30. pp 700-706. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.525>
6. Смирнов М.О., Золотов А.М., Чижик Т.А. Исследование свойств крупногабаритных заготовок турбинных лопаток из стали 15X11МФ-Ш в зависимости от способа получения исходного металла // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. Готово к публикации.

Публикации в других изданиях

1. Смирнов М.О. Моделирование процесса горячей штамповки заготовок турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6 для последних ступеней НД паровых турбин АЭС // Сборник тезисов VI-й Конференции молодых специалистов ОАО «Силловые машины»: 12-13 ноября 2015 г. – СПб. – 2015. – с. 38.
2. Смирнов М.О. Исследование технологического процесса штамповки заготовок турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6 // Сборник тезисов VII-й Конференции молодых специалистов ПАО «Силловые машины»: 24-25 ноября 2016 г. – СПб. – 2016. – с. 39.
3. Смирнов М.О., Чижик Т.А., Золотов А.М., Мишин В.В., Шишов И.А. Создание и верификация компьютерной модели процесса штамповки на паровоздушном молоте // Инженерные системы – 2017: Труды Международного форума. – М.:

- Инжиниринговая компания «ТЕСИС», 11-12 апреля 2017 г. – Москва. – 2017. с.209-221.
4. Смирнов М.О. Проектирование технологических процессов штамповки ответственных деталей энергомашиностроения на примере заготовок турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6 // VI научно-техническая конференция операторов первой научной роты Военно-Морского Флота «Перспективные направления развития науки Военно-Морского Флота»: Сборник трудов научно-технической конференции. – СПб.: Типография ВМПИ., 22 июня 2017 года с. 208-214.
 5. Золотов А.М., Смирнов М.О., Чижик Т.А. Концепция проектирования многопереходных процессов штамповки турбинных лопаток // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'17): Труды международной научно-технической конференции. – СПб.: Издательство Политех. Ун-та., 3-7 июля 2017 года с.272-281.
 6. Смирнов М.О., Чижик Т.А., Золотов А.М., Мишин В.В., Шишов И.А. Исследования процесса деформации крупногабаритных штампованных заготовок турбинных лопаток из стали 15X11MФ-Ш // 16-я Научно-техническая конференция «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения»: Неделя металлов в Москве. 13 – 17 ноября 2016. Сборник трудов конференций. – М.: «ВАШ ФОРМАТ», 2018. с.404-410.
 7. Смирнов М.О., Чижик Т.А., Золотов А.М. Исследование микроструктуры титанового сплава ВТ6 после осадки при различных термомеханических параметрах // Сборник тезисов X Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (ФППК-2018) памяти академика Г.В. Курдюмова: 29 октября – 2 ноября 2018 г. – Черногоровка. – 2018. – с. 136.
 8. Золотов А.М., Смирнов М.О., Чижик Т.А. Концепция проектирования процесса молотовой штамповки крупногабаритных лопаток паровых турбин из титановых сплавов. Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТ-2019): Труды международной научной конференции. – СПб.: Издательство Политех. Ун-та., 25-28 июня 2019 года с. 22.
 9. Smirnov M.O., Chizhik T.A., Tsybulina I.N., Zolotov A.M. Investigation of the Steel Structure 15Kh11Mf-Sh Depending in the Thermo-deformation Parameters of Treatment, Investigation of the Characteristics of Large-sized Stamped Blanks of Turbine Blades. 26th IFHTSE Congress 2019, Moscow, 16-19 september 2019, pp. 322-326.

Аспирант



(подпись)

Смирнов М.О.