

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'С.В. Морозов', is written over a light gray grid background.

МОРОЗОВ Сергей Викторович

**ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ РАСКАТКА ЗАГОТОВОК ДИСКОВ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА
BT18У**

Специальность 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2020 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, ст. научн. сотр.
Бурлаков Игорь Андреевич

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,
профессор

Лисунец Николай Леонидович
кандидат технических наук, доцент,
НИТУ «МИСиС», доцент

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»

Защита диссертации состоится «10» декабря 2020 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:
<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss->

Автореферат разослан «20» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

Актуальность работы. Одной из основных задач, на решение которой направлены усилия специалистов, работающих в области авиационного двигателестроения, как у нас в стране, так и за рубежом, является повышение качества и производительности, при существенном сокращении издержек производственных процессов получения деталей газотурбинных двигателей.

Конструкция ротора современных ГТД содержит свыше десятка осесимметричных деталей типа диск, изготавливаемых из жаропрочных сплавов на основе никеля и титана. При производстве дисков ГТД коэффициент использования металла (КИМ) не превышает 5 - 10%. Одной из перспективных технологий изготовления заготовок дисков, позволяющая получать заготовки высокого качества с минимальными потерями металла, является изотермическая раскатка, основанная на методах формообразования локальной деформирующей нагрузкой.

Процесс изотермической раскатки заготовок дисков из титанового сплава BT18Y, применяемого для дисков 5-6 ступени компрессора высокого давления ГТД, недостаточно отработан, что приводит к снижению качества материала и возникновению различных дефектов в заготовках. Таким образом, теоретическое и экспериментальное обоснование выбора режимов изотермической раскатки, с учетом их влияния на механические свойства материала заготовки, является актуальной задачей.

Цель работы: повышение коэффициента использования материала при производстве дисков газотурбинных двигателей из высоколегированного титанового сплава BT18Y за счет повышения уровня механических свойств материала заготовок при изотермической раскатке путем теоретического и экспериментального обоснования выбора режимов и совершенствования оборудования.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи:**

1. Исследовать влияние параметров осадки и изотермической раскатки заготовок дисков ГТД из титанового сплава BT18Y на механические свойства материала.
2. Исследовать влияние технологических режимов на силы, возникающие в процессе деформирования.
3. Разработать математическую модель процесса получения заготовок дисков ГТД из титанового сплава BT18Y для расчета режимов изотермической раскатки.
4. Определить основные направления совершенствования оборудования для изотермической раскатки заготовок дисков.
5. На основе исследований определить и внедрить в технологический процесс изотермической раскатки заготовок дисков ГТД из титанового сплава BT18Y режимы изотермической раскатки, обеспечивающие необходимый уровень механических свойств.

Объект исследования Изотермическая раскатка заготовок дисков ГТД из титанового сплава BT18Y.

Предмет исследования Процесс формообразования заготовок методом ротационной изотермической деформации.

Методы исследования. Экспериментальные исследования проведены на автоматической линии для раскатки дисков АЛРД-800, оснащенной современными датчиками контроля и регистрации технологического процесса раскатки и системой автоматического управления, позволяющей вести раскатку дисков в автоматическом режиме. Определение механических свойств материалов выполнено на испытательных машинах LEMZ-50 и PH 50J.

Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния, возникающего в процессе раскатки, проводились методом конечных элементов. Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами регрессионного анализа.

Автор защищает:

1. Закономерности влияния режимов изотермической раскатки на механические свойства материала заготовок из титанового сплава ВТ18У.
2. Математическую модель процесса получения заготовок дисков газотурбинных двигателей из титанового сплава ВТ18У с применением изотермической раскатки.
3. Основные направления совершенствования автоматической линии для раскатки дисков АЛРД-800.

Научная новизна.

Впервые установлены закономерности влияния на прочностные и пластические свойства материала заготовок из титанового сплава ВТ18У режимов изотермической раскатки (температура деформации, частота вращения заготовки и скорость подачи раскатного инструмента), позволяющие прогнозировать уровень механических свойств.

Практическую значимость имеют следующие результаты:

Определены рациональные режимы изотермической раскатки заготовок из титанового сплава ВТ18У, обеспечивающие требуемый уровень прочностных и пластических свойств материала заготовок для производства дисков компрессора высокого давления ГТД.

Реализация работы:

1. Режимы изотермической раскатки заготовок дисков ГТД из титанового сплава ВТ18У, определенные на основании закономерностей их влияния на механические свойства материала заготовок введены в технологический процесс АО «ОДК» г. Москва.
2. В конструкцию линии АЛРД-800 внедрена конструкция теплозащиты рабочей печи, позволяющая поддерживать стабильную температуру в зоне раскатки в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
3. Внедрен силоизмерительный подшипник оригинальной конструкции, позволяющий повысить стабильность технологического процесса и увеличить надежность оборудования.
4. Внедрена система байонетного крепления раскатных роликов, позволяющая повысить ресурс их работы и снизить трудоемкость замены роликов.
5. Полученные результаты приняты к использованию в учебном процессе Московского Политехнического университета, о чем свидетельствует соответствующий акт.

Апробация работы: Работа доложена и обсуждена на следующих конференциях: Научно-техническая конференция «Современные титановые сплавы и проблемы их развития». Москва. ФГУП ВИАМ. 2008 г., Вторая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России". Москва. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2009 г., Международной научной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения». Москва. ИМАШ РАН. 2013г. Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении», Москва. ФГУП ЦИАМ, 2015г., IV международной научной конференции

«Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», ИМАШ РАН, 2015 г., Международной научно-технической конференции Климовские чтения—2016: перспективные направления развития авиадвигателестроения: Санкт-Петербург, 2016 г.

Публикации: Основное содержание диссертации опубликовано в 24 печатных работах, 7 из которых в рецензируемых изданиях, внесенных в перечень ВАК, 1 патенте РФ, 1 монографии.

Структура и объем работы: Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и общих выводов. Работа изложена на 123 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков, 26 таблиц, библиографический список из 76 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрено состояние вопроса изготовления заготовок дисков ГТД из титановых сплавов.

Одним из перспективных методов получения заготовок дисков является изотермическая раскатка. Принципиальная механическая схема раскатки дисков, посредством наклонных к плоскости раскатки роликов, показана на рисунке 1. При раскатке, нагретая до температуры деформации, заготовка, зажата между пинолями, приводится последними во вращение. Под воздействием двух пар наклонных вращающихся роликов имеющих возможность перемещаться в осевом и радиальном направлениях, а также менять угол наклона по отношению к плоскости раскатки, заготовка деформируется с уменьшением толщины и с увеличением диаметра.

Идея изотермической раскатки была апробирована на стане СРД-800 созданном, усилиями предприятий авиационной промышленности, в первую очередь НИИД, СПО «Прогресс» и СКТБ «Тантал». Исследованию процесса изотермического формообразования сплавов посвящено большое количество трудов, как отечественных, так и зарубежных ученых.

В работах Бурлакова И.А. приведены общие закономерности влияния режимов технологического процесса на механические свойства. Однако при внедрении технологии потребовалось уточнение данных закономерностей.

К заготовкам дисков газотурбинных двигателей предъявляются высокие требования по геометрической точности и механическим свойствам материала. С целью повышения качества получаемых заготовок был проведен анализ причин возникновения дефектов заготовок различного рода.

Наиболее частым дефектом раскатанных заготовок является несоответствие геометрических параметров раскатанной заготовки требуемым, а также, в ряде случаев, наблюдается

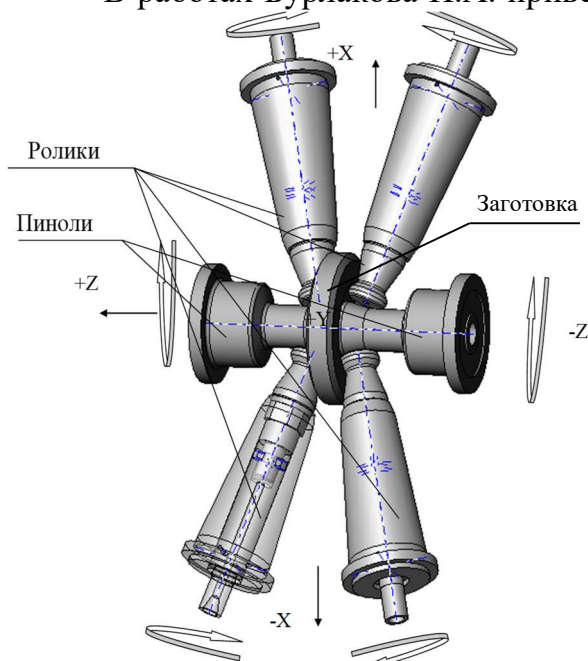


Рисунок 1 – Принципиальная схема раскатки дисков

недостаточный уровень механических свойств материала полученных заготовок.

По результатам анализа сформулирована цель работы и определены задачи, подлежащие решению.

Во второй главе найдены эмпирические зависимости механических свойств раскатанных заготовок из титанового сплава ВТ18У от параметров предварительной осадки и режимов раскатки на основе результатов проведения активного эксперимента, таблица факторного пространства которого приведена в таблице 1.

Варьируемые и выходные параметры эксперимента:

Варьируемые параметры осадки:

T_o – температура осадки, °С.

Варьируемые параметры изотермической раскатки:

T_p – температура раскатки, °С,

ϵ_p – величина деформации в полотно

n – скорость вращения диска об/мин,

$S_{об}$ – подача инструмента, мм/об.

Функции отклика (выходные параметры):

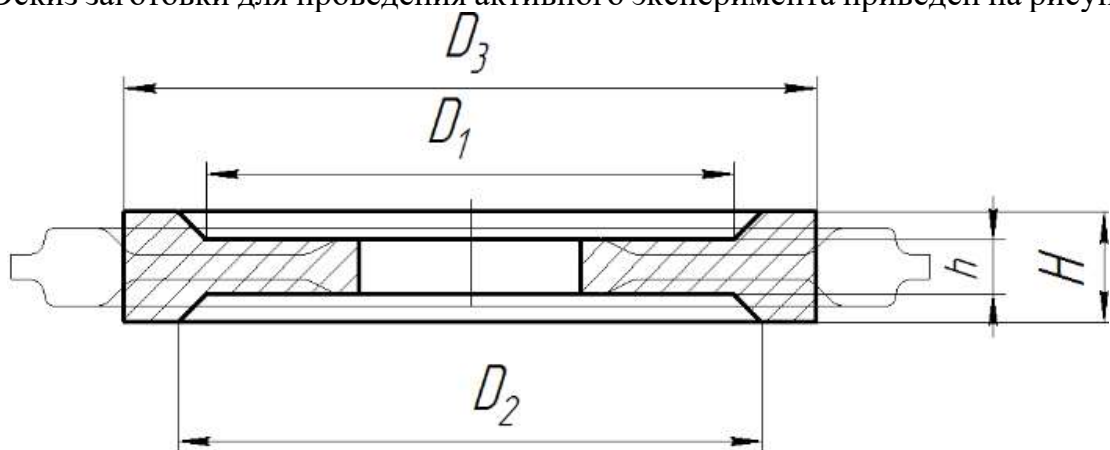
σ_b , – предел прочности, МПа,

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа,

δ , – относительное удлинение, %,

КСУ – ударная вязкость, МДж/м².

Эскиз заготовки для проведения активного эксперимента приведен на рисунке 2.



Величина деформации, ϵ , %	40	60	80
h	23	35	70
H	40	52	94
D_1	232	232	210
D_2	250	250	247
D_3	520	460	344

Рисунок 2 – Эскиз заготовки для активного эксперимента

Уравнение для преобразования закодированных факторов в реальные значения имеет вид:

$$x_i = 1 - \frac{2 * (x_{imax} - X_{ip})}{(x_{imax} - x_{imin})} \quad (1)$$

Где X_{ip} – реальное значение фактора,

x_{imax} и x_{imin} – максимальное и минимальное значение фактора, соответственно «+» и «-» в таблице 1.

Результаты определения механических свойств материала раскатанных дисков (выходные параметры эксперимента) приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Таблица факторного пространства.

№ опыта	Температура осадки (T_o)		Температура раскатки, (T_p)		Степень деформации в полотне (ϵ_p)		Скорость вращения диска (n)		Подача инструмента ($S_{об}$)	
	X_1		X_2		X_3		X_4		X_5	
	Реальное значение, $^{\circ}C$	Кодированное значение	Реальное значение, $^{\circ}C$	Кодированное значение	Реальное значение, %	Кодированное значение	Реальное значение, об/мин	Кодированное значение	Реальное значение, мм/об	Кодированное значение
1	996	+	995	+	80	+	1,0	+	5	+
2	948	-	995	+	80	+	0,2	-	1	-
3	996	+	948	-	80	+	0,2	-	5	+
4	948	-	948	-	80	+	1,0	+	1	-
5	996	+	995	+	40	-	1,0	+	1	-
6	948	-	995	+	40	-	0,2	-	5	+
7	996	+	948	-	40	-	0,2	-	1	-
8	948	-	948	-	40	-	1,0	+	5	+

Таблица 2 – Механические свойства материала раскатанных дисков (средние значения)

№ диска	σ_b , ступица	σ_b , полотно	σ_b , обод	$\sigma_{0,2}$, ступица	$\sigma_{0,2}$, полотно	$\sigma_{0,2}$, обод	δ , ступица	δ , полотно	ψ , ступица	ψ , полотно	КСУ, полотно
	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{y}_4	\bar{y}_5	\bar{y}_6	\bar{y}_7	\bar{y}_8	\bar{y}_9	\bar{y}_{10}	\bar{y}_{11}
1	1005	1109,5	1087,5	867	871	850	7,64	7,3	19,4	20,6	0,361
2	962,5	1063,5	953	851	810	805	10	9,6	18,5	16,9	0,372
3	970	1058,5	950	831	819	814	8	9,3	17,8	17,8	0,378
4	967,5	1073	1016,5	834	820	835	8	6,3	16,6	16,2	0,341
5	980,5	1106	1045	853,5	856,5	855	10,6	8	20,4	20,3	0,272
6	920	1029	951,5	824	817	806,5	11,9	13,7	22,1	19,2	0,298
7	945	1058,5	912,5	818	805	817,5	11,1	10,2	18,6	17,5	0,281
8	924	1036,5	1015	808	827	835	9,6	8,9	20,5	18,3	0,275

Для обработки опытных данных использован метод регрессионного и корреляционного анализа. В качестве функции принята линейная функция вида:

$$\hat{y}_j = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

где $b_0 \dots b_n$ – коэффициенты регрессии

Рассчитанные коэффициенты регрессии приведены в таблице 3

Таблица 3 – Рассчитанные коэффициенты регрессии

	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	y ₉	y ₁₀	y ₁₁
b ₀	959,3	1066,8	991,4	835,8	828,2	827,3	9,61	9,16	19,24	18,35	0,322
b ₁	15,8	16,3	7,4	6,6	9,7	6,9	-0,27	-0,46	-0,19	0,7	0,001
b ₂	7,7	10,12	17,9	13,1	10,4	1,9	0,43	0,49	0,86	0,9	0,004
b ₃	16,9	9,3	10,4	9,9	1,8125	-1,3	-1,20	-1,04	-1,16	-0,48	0,041
b ₄	9,9	14,4	49,6	4,8	15,4375	16,5	-0,65	-1,54	-0,01	0,5	-0,01
b ₅	-4,6	-8,4	9,6	-3,3	5,3125	-0,9	-0,32	0,64	0,71	0,63	0,006

Проверка адекватности осуществлена по критерию Фишера, для этого определена дисперсия адекватности по формуле:

Если значение $F_p < F_T$, для принятого уровня значимости и соответствующих степеней свободы, то модель считается адекватной. Сопоставление значений критерия Фишера для каждого параметра приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Сопоставление значений критерия Фишера

	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	y ₉	y ₁₀	y ₁₁
F _p	0,13	1,07	2,08	0,082	0,03	0,64	0,4	11,47	0,93	0,12	18,29
F _T	199	19,2	19,2	199	199	19,2	19,2	19,2	19,2	199	19,2

Из таблицы можно сделать вывод об адекватности найденных уравнений регрессии.

В третьей главе найдены зависимости сил деформирования, возникающих при изотермической раскатке, от технологических режимов.

Для решения данной задачи был применен метод компьютерного моделирования в программном комплексе QForm VX. Проведенный анализ имеющихся данных по опытным раскаткам позволил разработать расчетную схему с применением ряда допущений, рисунок 3. Пиноль зажимает заготовку силой $P = 0,4$ МН и приводит ее во вращение с частотой n мин⁻¹. Ролик вращается с частотой n_p , и перемещается в радиальном направлении относительно заготовки с подачей S , мм/об.

Частота вращения ролика определяется исходя из требований к равенству линейных скоростей инструмента и заготовки в зоне контакта.

$$n_p = \frac{d_{об} * n}{d_p} \quad (3)$$

Где $d_{об}$ – диаметр обода заготовки, мм.

d_p – диаметр рабочей часть раскатного ролика, мм.

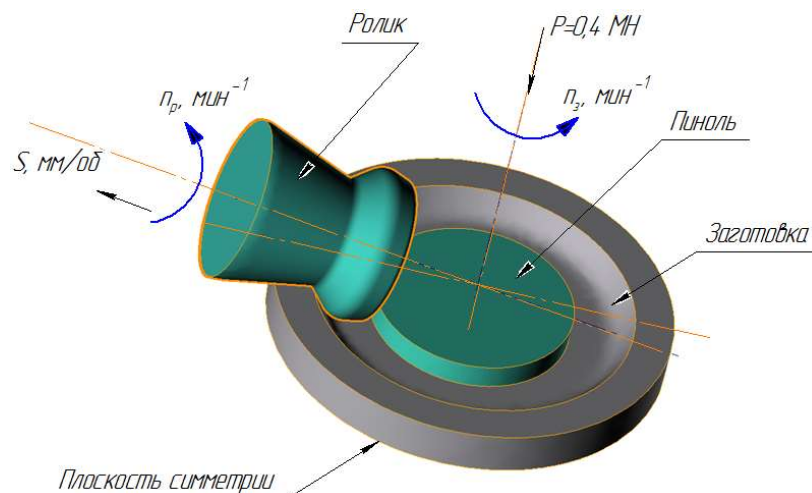
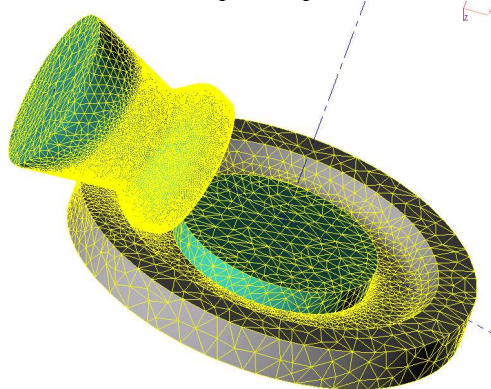


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения сил деформации.

По расчетной схеме подготовлены трехмерные модели заготовки и инструмента и выполнено их разбиение на конечные элементы. Для повышения точности в зоне контакта ролика и заготовки применена адаптация элементов с ограничением максимального размера элемента 2 мм, рисунок 4.



Свойства сетки конечных элементов

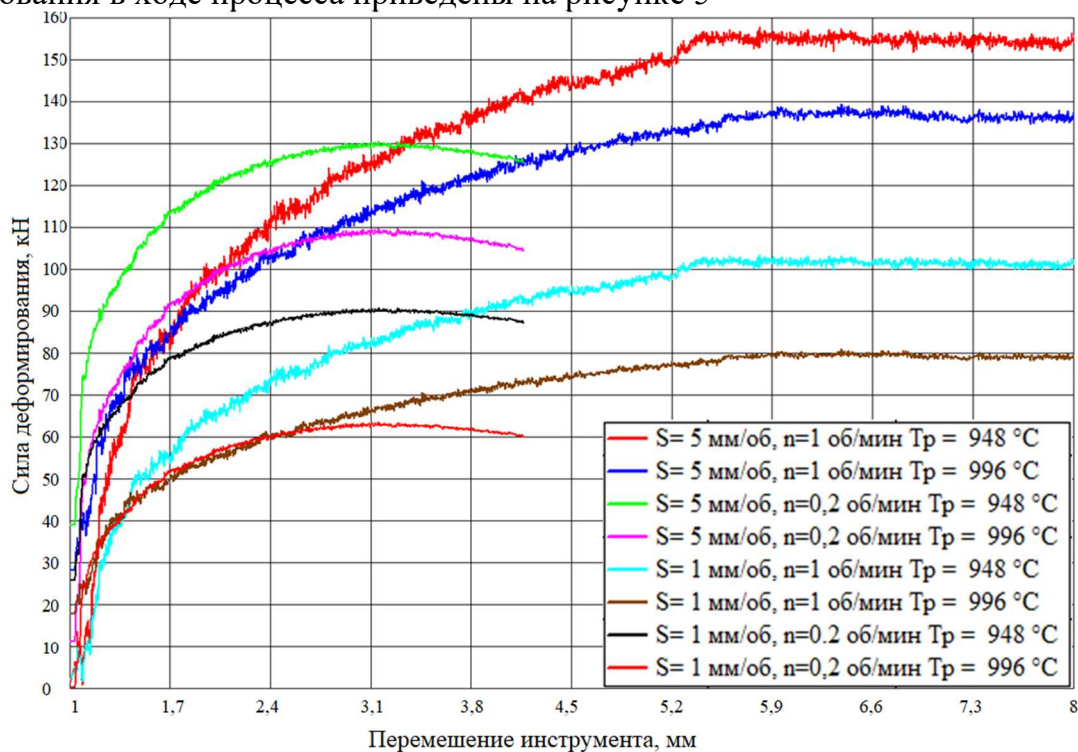
	Поверхностные узлы	Объемные узлы	Поверхностные элементы	Объемные элементы
Заготовка	6899	7226	13786	65912
Пинопль	769	190	1534	3354
Ролик	23616	161039	47228	1069530
Всего	31284	168455	62560	1138796

Рисунок 4 – Конечно-элементная модель заготовки

В качестве исходных данных были использованы крайние значения параметров таблицы факторного пространства.

Параметры модели материала были получены в ходе исследования образцов при различных температурах и разных скоростях деформации. Модель материала принята изотропной

В результате компьютерного моделирования получены зависимости изменения силы деформации при внедрении ролика в обод заготовки при различных температурно-скоростных условиях изотермической раскатки. Изменение силы деформирования в ходе процесса приведены на рисунке 5



	F1max, кН	F2max, кН	F3max, кН	F4max, кН	F5max, кН	F6max, кН	F7max, кН	F8max, кН
Рассчитанные	157,5	139,5	130,5	109,8	103,5	80,9	90,8	63,5
Эксп.	150,5	130,6	124,3	100,9	97,5	75,4	85,5	70,3

Рисунок 5 – Изменение силы деформирования в ходе процесса.

Полученные данные использованы для получения эмпирической зависимости силы деформации от режимов изотермической раскатки, вида:

$$F_{max} = 404,4 - 0,36 * T_p + 33,5 * n + 12,5 * S_{об} \quad (4)$$

Зависимость (4) позволила определить допустимые режимы с ограничением по подаче раскатного инструмента и минимально возможным значением температуры раскатываемой заготовки, таблица 5.

Таблица 5 – Допустимые режимы изотермической раскатки.

	T _p , °C			
	948		996	
	n, об/мин			
	0,2	1	0,2	1
S, мм/об	4,0	1,9	5	3,3
	S, мм/об			
	1	5,0	1	5
n, об/мин	1	–	1	0,35
	n			
	0,2		1	
	S, мм/об			
	1	5,0	1	5
T _p , °C	948	982	948	–

Влияние технологических режимов на максимальную силу деформирования показано на рисунках 6 и 7

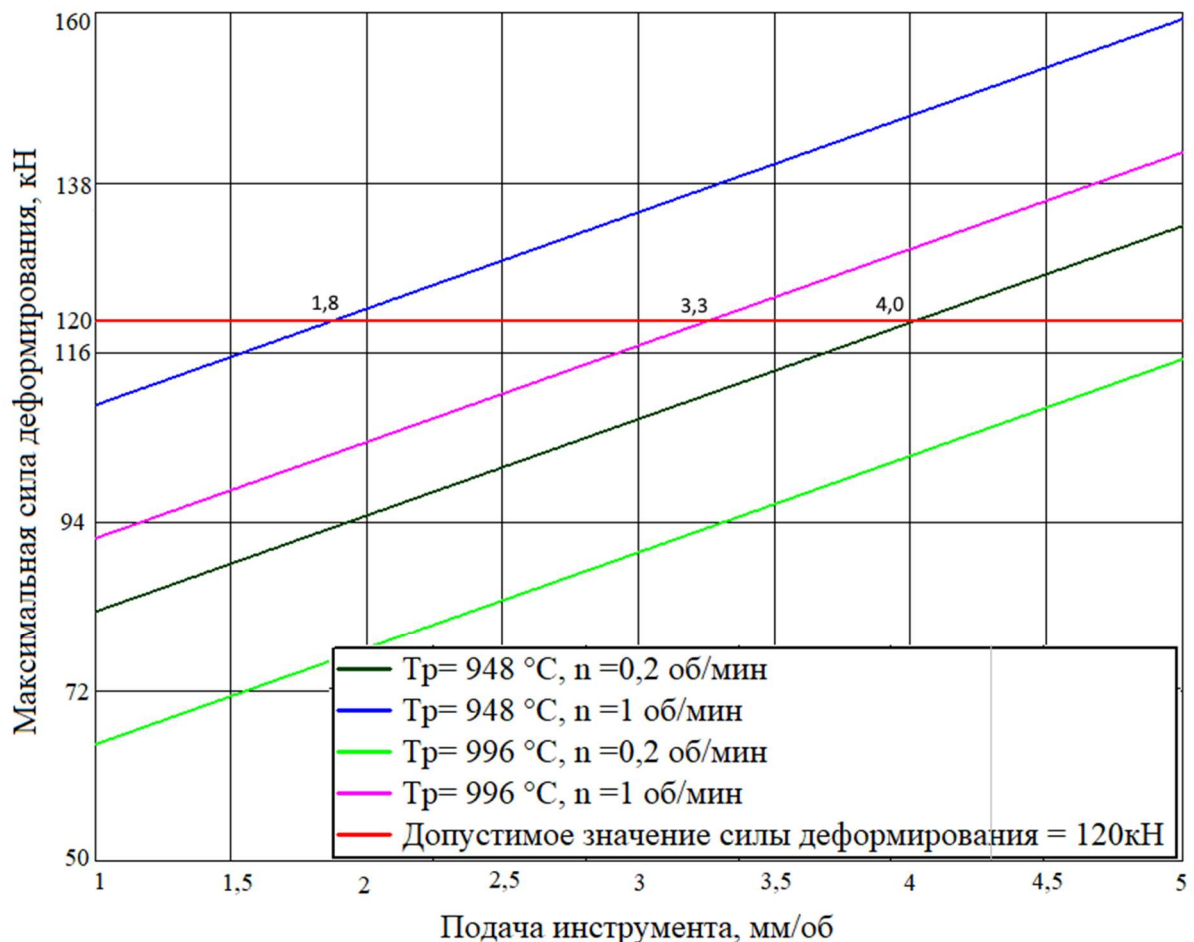


Рисунок 6 – Влияние подачи инструмента на максимальную силу деформирования.

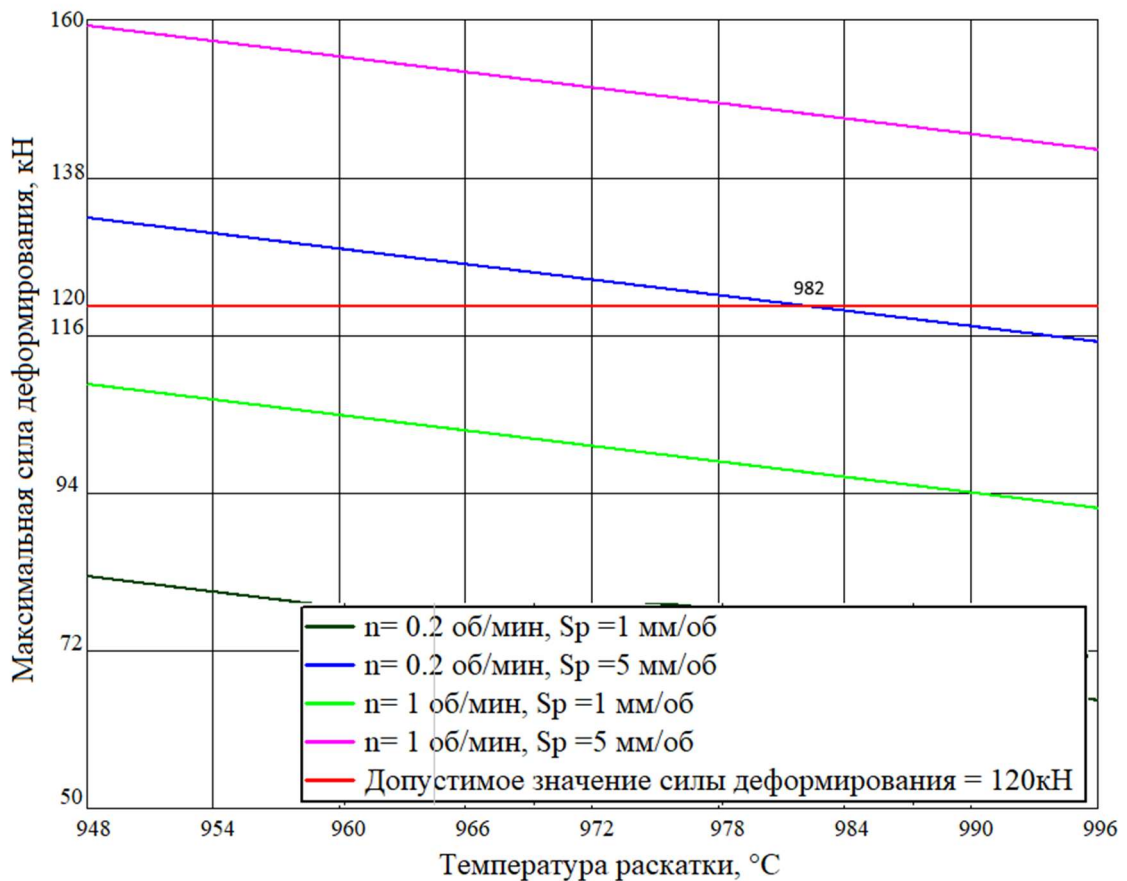


Рисунок 7 – Влияние температуры раскатки на максимальную силу деформирования.

В четвертой главе, используя полученные данные, разработана математическая модель технологии получения заготовок дисков из сплава ВТ18У с применением изотермической раскатки, позволяющая определять рациональные режимы процесса.

Для определения степени влияния режимов изотермической раскатки на механические свойства материала заготовок проведен анализ полученных зависимостей. В связи с тем, что наиболее нагруженным элементом диска является полотно, для анализа были выбраны параметры прочности и пластичности именно этого элемента. Согласно требованиям, ОСТ 1-90197-89 контролируются следующие параметры: предел прочности (σ_1), относительное удлинение (δ_8), относительное сужение (ψ_{10}) и ударная вязкость (σ_{11}). Учитывая уравнение (1) получим:

Для предела прочности:

$$\sigma_b = -51,1 + 0,658 * T_0 + 0,321 * T_p + 0,845 * \varepsilon_p + 24,75 * n - 2,3 * S_{об} \quad (5)$$

Для относительного удлинения:

$$\delta = -13,15 - 7,9 * 10^{-3} * T_0 + 3,6 * 10^{-2} * T_p - 5,8 * 10^{-2} * \varepsilon_p - 3,85 * n + 0,32 * S_{об} \quad (6)$$

Для относительного сужения:

$$\psi = -46,701 + 2,9 * 10^{-2} * T_0 + 3,8 * 10^{-2} * T_p - 2,4 * 10^{-2} * \varepsilon_p + 1,25 * n + 0,32 * S_{об} \quad (7)$$

Для ударной вязкости:

$$KCU = 2,5 * 10^{-3} + 4,2 * 10^{-5} * T_0 + 1,7 * 10^{-4} * T_p + 2,1 * 10^{-3} * \varepsilon_p - 2,5 * 10^{-2} * n + 3,0 * 10^{-3} * S_{об} \quad (8)$$

По найденным зависимостям определены режимы осадки и изотермической раскатки, обеспечивающие предельные значения механических свойств материала заготовок, таблица 6.

Таблица 6 – Режимы осадки и изотермической раскатки, обеспечивающие предельные значения механических свойств материала заготовок.

	Температура осадки (T_0), °C	Температура раскатки, (T_p), °C	Степень деформации в полотно заготовки (ϵ_p)	Частота вращения диска (n), об/мин	Подача инструмента (S), мм/об
$\sigma_{\max} = 1013,8$ МПа	996	996	80	1	1
$\sigma_{\min} = 904$ МПа	948	948	40	0,2	5
$\delta_{\max} = 13,5$ %	948	996	40	0,2	5
$\delta_{\min} = 4,7$ %	996	948	80	1	1
$\psi_{\max} = 21,4$ %	996	996	40	1	5
$\psi_{\min} = 15,0$ %	948	948	80	0,2	1
$KCU_{\max} = 0,388$ МДж/м ²	996	996	80	0,2	5
$KCU_{\max} = 0,263$ МДж/м ²	948	948	40	1	1

Таким образом, задача определения рациональных режимов изотермической раскатки сводится к определению режимов, обеспечивающих наилучшее сочетание прочности и пластичности. Однако при этом необходимо также учитывать силы, возникающие в процессе деформирования.

Целью разработки математической модели процесса получения заготовок дисков из сплава ВТ18У с применением изотермической раскатки является создание системы зависимостей, позволяющей определять параметры технологического процесса для получения ожидаемых механических свойств материала заготовок, учитывая, при этом, необходимость ограничения сил, действующих в процессе раскатки.

В качестве системы исходных уравнений математической модели использованы зависимости, полученные в главе 2 и 3.

$$\left\{ \begin{array}{l} -51,1 + 0,658 * T_0 + 0,321 * T_p + 0,845 * \epsilon_p + 24,75 * n - 2,3 * S_{06} = \sigma_B \\ -13,15 - 7,9 * 10^{-3} * T_0 + 3,6 * 10^{-2} * T_p - 5,8 * 10^{-2} * \epsilon_p - 3,85 * n + 0,32 * S_{06} = \delta \\ -46,701 + 2,9 * 10^{-2} * T_0 + 3,8 * 10^{-2} * T_p - 2,4 * 10^{-2} * \epsilon_p + 1,25 * n + 0,32 * S_{06} = \psi \\ 2,5 * 10^{-3} + 4,2 * 10^{-5} * T_0 + 1,7 * 10^{-4} * T_p + 2,1 * 10^{-3} * \epsilon_p - 2,5 * 10^{-2} * n + 3,0 * 10^{-3} * S_{06} = KCU \\ 404,4 - 0,36 * T_p + 33,5 * n + 12,5 * S_{06} = F_{max} \end{array} \right. \quad (9)$$

Граничные условия были выбраны с учетом требований к механическим свойствам материала заготовок согласно предполагаемому увеличению по сравнению со штампованными заготовками.

Также, с целью повышения надежности раскатной машины, ограничена предельно допустимая сила деформации. Граничные условия приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Граничные условия математической модели

Наименование параметра	Значение
Предел прочности, σ_b	≥ 980 МПа
Относительное удлинение, δ	$\geq 9,5\%$
Относительное удлинение, ψ	$\geq 18\%$
Ударная вязкость, КСЧ	$\geq 0,3$ МДж/м ²
Максимально допустимая сила деформирования, F_{max}	≤ 120 кН
Режимы технологического процесса:	
- частота вращения заготовки, n	0,2...1 мин ⁻¹
- подача, S	1...5 мм/об
- степень деформации, ε	40%...80%
- температура осадки, T_o	948...996 °С
- температура раскатки, T_p	948...996 °С

Данная математическая модель была использована для определения параметров предварительной осадки и раскатки, которые легли в основу нового технологического процесса, таблица 8.

Таблица 8 – Рассчитанные режимы предварительной осадки и раскатки, теоретические механические свойства материала и максимальная сила деформации

$T_p, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_p, \%$	$n, \text{мин}^{-1}$	$S_{об}, \text{мм/об}$
980	996	68	0,5	4,1
Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, МДж/м ²	Сила деформирования, кН
979,4	9,5	19,5	0,35	120,0

Для проверки результатов проведенных теоретических исследований и подтверждения выбранных режимов был разработан опытный технологический процесс изотермической раскатки модельной заготовки диска КВД из титанового сплава ВТ18У. По разработанному технологическому процессу изготовлена модельная заготовка диска и проведены исследования механических свойств материала заготовок, рисунок 8.



Рисунок 8 – Раскатанная заготовка диска из сплава ВТ18У

Проведенные испытания образцов показали, что достигнутый уровень характеристик временного сопротивления разрыву, пластичности, ударной вязкости при комнатной температуре соответствует рассчитанным свойствам и превосходит

соответствующие характеристики штампованных дисков аналогичной конфигурации, таблица 9. При массе готовой детали 12,4 кг. КИМ для раскатанной заготовки 0,41, а для штампованной – 0,14.

Таблица 9 – Сравнение свойств раскатанных и штампованных заготовок

	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²	Вес заготовки, кг
Расчитанные свойства	979,4	9,5	19,5	0,35	
Раскатанная заготовка	985,0	10,0	19,8	0,34	30
Штампованная заготовка	970,0	9,0	18,0	0,30	89
Изменение свойств	+1,5%	+5%	+10%	+13%	

В пятой главе проведен анализ работы существующего оборудования – автоматической линии АЛРД-800. Было установлено, что в связи с недостаточным изучением влияния технологических факторов на узлы линии, оборудование обладает рядом недостатков, существенно влияющих на качество получаемых заготовок и стабильность технологического процесса. Определены основные направления совершенствования оборудования связанные с совершенствованием конструкции узлов линии. Разработаны и реализованы ряд проектов, повышающих стабильность работы и точность поддержания заданных технологических режимов

Была разработана и внедрена конструкция теплозащиты рабочей печи, позволяющая уменьшить тепловые потери и повысить стабильность поддержания заданной температуры до $\pm 5^\circ\text{C}$.

Разработана адаптивная система охлаждения роликов, принцип работы которой заключается в непрерывном измерении температуры воздуха, охлаждающего ролик на выходе и при превышении заданной температуры увеличения расхода воздуха, при помощи регулятора давления.

Для повышения точности регистрации усилий разработана измерительная система на базе тензометрического подшипника, устанавливающегося в переднюю опору ролика. Система управления получает сигнал постоянного тока пропорциональный усилию на инструменте. Сигнал датчика сравнивается с каждым предыдущим значением, обеспечивая в случае превышения заранее заданного предельного значения отключение линии, или снижение скорости подачи раскатных роликов.

Разработана и внедрена новая система крепления раскатных роликов из жаропрочного сплава ЖС6У, исключая резьбовое соединение. В качестве крепежных элементов применены выступы, изготовленные в раскатной головке. При установке ролика выступы входят в пазы на базирующей поверхности, для закрепления осуществляется поворот ролика противоположный направлению его вращения при работе. Такое соединение обеспечивает более надежное крепление по сравнению с резьбовым, а также исключает заклинивание при работе.

Для повышения качества получаемых заготовок был разработан блок позиционирования в системе фиксации заготовки, позволяющий в автоматическом режиме выполнять операцию обжата заготовки и обеспечивающий точность позиционирования заготовки $\pm 0,1$ мм.

Разработана общая схема конструкции нового оборудования для расширения возможностей технологического процесса раскатки дисков, повышения его производительности и универсальности применения к различным сплавам

Основные результаты и выводы по работе.

В работе решена актуальная научно-техническая задача в области авиационного двигателестроения, состоящая в теоретическом и экспериментальном

обосновании выбора режимов изотермической раскатки заготовок дисков ГТД из титанового сплава ВТ18У с учетом их влияния на механические свойства.

1. Установлены закономерности зависимости механических свойств раскатанных заготовок из титанового сплава ВТ18У от технологических режимов, на основании которых определены режимы осадки и изотермической раскатки, обеспечивающие предельные значения прочности и пластичности.

2. Установлено, что на механические свойства материала заготовки основное влияние оказывают кинематические параметры изотермической раскатки (частота вращения заготовки и подача раскатного инструмента) при этом при их увеличении прочностные свойства растут, а пластические снижаются.

3. Варьирование режимов изотермической раскатки позволяет управлять механическими свойствами материала раскатанных дисков. При этом прочностные характеристики могут изменяться до 19%, пластические до 125%, а ударная вязкость до 38% на различных участках диска.

4. Получена зависимость максимальной силы деформирования от температурно-кинематических режимов изотермической раскатки. Установлено, что основное влияние на силу деформирования оказывает подача раскатного инструмента, при её изменении от 1мм/об до 5 мм/об сила деформирования увеличивается в 1,54 раза.

5. Создана математическая модель процесса изотермической раскатки, позволяющая определять технологические режимы, для получения заготовок дисков ГТД из титанового сплава ВТ18У с ожидаемым уровнем механических свойств. Рассчитаны режимы, позволяющие повысить уровень пластических свойств до 10%, а ударную вязкость до 13% без снижения прочности.

6. Определенные режимы внедрены в технологический процесс изотермической раскатки заготовок дисков из титанового сплава ВТ18У, что позволило повысить коэффициент использования материала в 2,8 раза.

7. На линии АЛРД-800 разработаны и внедрены решения, повышающие точность и стабильность технологического процесса:

- теплозащиты рабочей печи, обеспечивающая точность поддержания температуры $\pm 5^{\circ}\text{C}$;

- силоизмерительный подшипник в передней опоре раскатной головки;

- блок позиционирования к системе фиксации заготовки, обеспечивающий точность позиционирования заготовки $\pm 0,1$ мм;

- разработана система байонетного крепления раскатных роликов, позволяющая повысить ресурс их работы и снизить трудоемкость замены роликов.

8. Определены основные направления совершенствования оборудования для изготовления заготовок тяжело нагруженных дисков ГТД изотермической раскаткой, такие как:

- применение гидравлических приводов для перемещения рабочих узлов линии;

- применение специализированной системы измерения сил деформирования;

- применение адаптивной системы охлаждения раскатных роликов;

- создание специализированное программное обеспечение управления технологическим процессом раскатки.

Основное содержание диссертации отражено в 24-х публикациях, основными из которых являются:

1. Патент РФ. № 75164 МПК В21Н1/00 Стан для изготовления осесимметричных деталей. /Морозов В.В., Гейкин В.А., Бурлаков И.А., Морозов С. В. и др.// Опубликовано 27.07.2008. Бюл. №21.
2. Расчет технологических параметров изотермической раскатки дисков газотурбинных двигателей. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Боровских И. А. // Заготовительные производства в машиностроении. М., 2010г. № 2 С. 28-34.
3. Компьютерное моделирование процесса изотермической раскатки с помощью программных комплексов Qform-3D и ANSYS. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Боровских И. А. // Заготовительные производства в машиностроении. М., 2010г. № 4 С. 30-34.
4. Бурлаков И. А., Морозов В. В., Морозов С. В. Автоматическая линия для изотермической раскатки заготовок дисков газотурбинных двигателей// Заготовительные производства в машиностроении, 2012. № 5 С. 26 - 28.
5. Морозов С.В. Силовые параметры при изотермической раскатке на автоматической линии АЛРД-800// Проблемы машиностроения и автоматизации, 2014. №1 С. 165 – 168.
6. Бурлаков И. А., Валитов В.А., Ганеев А.А, Забельян Д.М., Морозов С.В., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З. Моделирование структурообразования в процессе горячей деформации заготовок деталей ГТД из жаропрочного никелевого сплава// Проблемы машиностроения и автоматизации, 2016. №1 С. 94 – 101.
7. Burlakov I.A., Valitov V.A., Ganeev A.A., Zabelyan D.M., Morozov S.V., Sukhorukov R.U., Utyashev F.Z. Modeling the Structure Formation during Hot Deforming the billets of the Parts of Gas-Turbine Engines Made of Heat-Resistant Nickel Alloy// New Technologies in Mechanical Engineering 2016, Vol. 45, No. 5, pp. 469-475
8. Исследования и разработка инновационных технологических процессов и интеллектуальных систем управления для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД)/ Афонин В.Л., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кондратьев И.М., Морозов С.В., Раков Д.Л., Смоленцев А.Н., Сухоруков Р.Ю., Шитов А.М. Москва, 2019. 137 С.
9. Автоматизированное оборудование для формообразования осесимметричных деталей из жаропрочных сплавов методом раскатки в изотермических и сверхпластических условиях/ Гейкин В.А., Бурлаков И.А., Гаврилина Л.В., Македонов А.В., Морозов В.В., Морозов С.В., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З.// Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 2. С. 132-147.

Сергей Викторович Морозов

**Изотермическая раскатка заготовок дисков
газотурбинных двигателей из титанового сплава ВТ18У**

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук