

На правах рукописи



**ЯРОШЕНКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**

**ВОЛОКНА ИЗ КОБАЛЬТОВЫХ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ  
СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭКСТРАКЦИИ ВИСЯЩЕЙ  
КАПЛИ РАСПЛАВА, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В  
ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ**

Научная специальность

2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2024 г.

Работа выполнена на кафедре 1101 «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и в лаборатории № 635 «Специальные металлические материалы и магниты» ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» НИЦ «Курчатовский институт».

Научный руководитель: – доктор технических наук, доцент,  
**Серов Михаил Михайлович**

Официальные оппоненты: – **Задорожный Владислав Юрьевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
научный сотрудник

– **Басков Федор Алексеевич**,  
кандидат технических наук,  
АО «Композит», начальник сектора

Ведущая организация: – АО «Объединенная двигателестроительная  
корпорация»

Защита диссертации состоится «12» декабря 2024г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте [skvortsovasv@mai.ru](mailto:skvortsovasv@mai.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: [https://mai.ru/upload/iblock/204/w9uy1z8deazo0r3kzuax7p6q83476rth/Dissertatsiya\\_YAroshenko.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/204/w9uy1z8deazo0r3kzuax7p6q83476rth/Dissertatsiya_YAroshenko.pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования:

Повышение коэффициента полезного действия (КПД) газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) является актуальной проблемой современного двигателестроения. Одним из основных факторов, влияющих на КПД, являются утечки рабочего газа в зазоры между статорными и роторными деталями, для минимизации которых применяются уплотнительные материалы и покрытия. Одним из вариантов уплотнительных материалов являются щеточные уплотнения (ЩУ), обладающие высокими показателями герметизации по сравнению с серийно применяющимися лабиринтными уплотнениями. Волокна, служащие уплотняющими элементами, обычно изготавливаются, в зависимости от предполагаемой температуры эксплуатации, из нержавеющей стали, никелевых или кобальтовых сплавов. Кобальтовые высоколегированные сплавы обладают повышенной стойкостью к окислению, термической стабильностью при высоких температурах и износостойкостью. За рубежом для этих целей применяется износостойкий сплав Haynes 25.

Применение кобальтовых сплавов в составе ЩУ сдерживается трудностью получения проволоки микронных размеров из-за плохой обрабатываемости сплавов на основе кобальта, что приводит при волочении к значительным издержками и множеству межоперационных переделов. Решить данную проблему позволяет метод вытягивания волокон из расплава, получивший название высокоскоростного затвердевания расплава (ВЗР) и его разновидность – экстракция висящей капли расплава вращающимся теплоприемником (ЭВКР). Использование данного метода позволяет за один переход получить волокно микронных размеров. Поэтому проведение исследований по получению волокон отечественных кобальтовых высоколегированных сплавов методом ЭВКР для применения в составе ЩУ актуально для решения задачи повышения КПД отечественных ГТД и ГТУ.

Основные публикации по материалам, применяющимся в составе ЩУ, основываются на исследованиях свойств щеток из микропроволоки из сплава Haynes 25, при этом его отечественные аналоги применительно к ЩУ мало изучены или не изучены совсем.

Работа выполнена в соответствии со стратегическим направлением развития материалов и технологий, их переработки на период до 2030 года НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ – 9 «Монокристаллические, высокожаропрочные суперсплавы, естественные композиты», комплексная проблема – 9.7 «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы».

### **Цель и задачи**

**Цель** диссертационной работы состояла в научно-методическом обосновании и оценки возможности применения в составе щеточных уплотнений волокон из кобальтовых высоколегированных сплавов полученных методом экстракции висящей капли расплава, определении влияния высоких скоростей охлаждения на структуру и механические свойства волокон.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Обобщить и провести анализ исследований в области разработки материалов щеточных уплотнений, методов получения микроволокон из кобальтовых высоколегированных сплавов системы Co–Cr–W.

2. Провести анализ технологии получения волокон методом экстракции висящей капли расплава и экспериментально подтвердить возможность получения данным методом волокон из кобальтовых высоколегированных сплавов для применения в составе щеточных уплотнений.

3. Определить режимы получения волокон методом экстракции висящей капли расплава, для апробации возможности их применения в составе щеточных уплотнений.

4. Установить влияние высокоскоростного затвердевания расплава при использовании метода экстракции висящей капли расплава на структурные и механические характеристики кобальтовых высоколегированных сплавов.

5. Отработать методики определения эксплуатационных характеристик волокон и оценить возможность применения полученных образцов волокон из кобальтовых высоколегированных сплавов в составе щеточных уплотнений перспективных авиационных ГТД и ГТУ.

### **Научная новизна:**

1. Впервые установлено, что в результате высокоскоростной закалки расплава в трех сплавах системы Co–Cr–W дополнительно легированных Ni, Fe, V, Zr, Ti происходит фиксация аморфного состояния. Соотношение кристаллической и аморфной фаз в системе Co–Cr–W при добавлении Ni и Fe (сплав В3К) составляет 43/57 %, при добавлении V (сплав В4К) – 60/40 %, и введении Zr, Ni и Ti (сплав В5К) – 63/37 %, при этом с увеличением содержания легирующих элементов в сплавах системы Co–Cr–W количество аморфной фазы увеличивается.

2. Установлено, что в трех исследуемых сплавах системы Co–Cr–W при легировании Ni и Fe (сплав В3К) фиксация аморфного состояния приводит к повышению физико-механических характеристик данного сплава ( $HV = 800$ ,  $E = 225$  ГПа,  $\sigma = 1276$  МПа). В сплаве системы Co–Cr–W дополнительно легированного V (сплав В4К) происходит двукратное повышение микротвердости и снижение нормального модуля упругости ( $HV = 1376$ ,  $E = 114$  ГПа,  $\sigma = 1170$  МПа). В сплаве системы Co–Cr–W дополнительно легированного Zr, Ni и Ti (сплав В5К) происходит двукратное повышение предела прочности при растяжении и микротвердости, при относительно небольшом снижении нормального модуля упругости, что связано с большим содержанием аморфной фазы  $\approx 60\%$  ( $HV = 1039$ ,  $E = 195$  ГПа,  $\sigma = 1556$  МПа).

3. Показана возможность замены классических методов ОМД при получении проволок из сплавов системы Co–Cr–W на их получение методом вытягивания из расплава вращающимся теплоприемником, при этом существует достаточно широкие возможности варьирования механических характеристик путем термической обработки.

4. Показана принципиальная возможность применения волокон из двух сплавов системы Co–Cr–W в составе ЩУ, волокон из сплава системы Co–Cr–W дополнительно легированных Ni и Fe при температурах до  $600^\circ\text{C}$ , волокон из сплава системы Co–Cr–W дополнительно легированного Zr, Ni и Ti при температурах до  $700^\circ\text{C}$ .

### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Показана эффективность метода экстракции висящей капли расплава для получения микропроволок из кобальтовых

высоколегированных сплавов по сравнению с методами волочения, главным достоинством метода экстракции висящей капли расплава является отсутствие необходимости множества межоперационных переделов, таких как – ступенчатый отжиг, химической травление, применение разного сортамента фильер и т.д. При применении метода экстракции висящей капли расплава также отсутствует необходимость применения дорогостоящего оборудования, алмазных фильер, происходит сокращение производственных мощностей.

2. Установлены зависимости критерия соотношения высоты и ширины получаемых волокон от режимов проведения процесса экстракции висящей капли расплава на установке ЭВКР-РН для сплава ВЗК, системы Co-Cr-W. По установленным зависимостям отработаны режимы получения волокон требуемой геометрии из сплавов ВЗК, В4К, В5К системы Co-Cr-W, для последующего применения в составе щёточных уплотнений.

3. Доказано наличие аморфной фазы в полученных образцах, приводящей к повышению микротвердости и снижению модуля упругости, разработаны режимы термической обработки полученных образцов для обеспечения кристаллизации аморфной фазы. Показано, что после кристаллизации, происходит повышение нормального модуля упругости и уменьшение микротвердости полученных образцов до уровня литого состояния.

4. Впервые произведена отработка методики определения эксплуатационных характеристик волокон для щеточных уплотнений, в рамках которой, показана перспективность полученных образцов для их применения в составе щеточных уплотнений.

5. Доказана перспективность применения полученных волокон из высоколегированных кобальтовых сплавов системы Co-Cr-W в составе щеточных уплотнений, путем определения эксплуатационных характеристик (жаростойкость, термостойкость, триботехнические характеристики).

6. Введена в эксплуатацию установка экстракции висящей капли расплава с резистивным нагревом – ЭВКР-РН, позволяющая, за счет применения бестигельной плавки, получать волокна практически из любых материалов подвергающихся плавлению. При этом проведение процесса

возможно как в вакууме, так в среде инертных газов, что позволяет получать волокна из химически активных материалов.

### **Методология и методы исследования:**

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых и государственные стандарты Российской Федерации.

Диссертационная работа выполнена с использованием современных методов исследования: металлографического, просвечивающей и растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализом, измерения микротвердости и нормального модуля упругости, проведении испытаний на жаростойкость, термостойкость, оценки триботехнических характеристик.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Корреляции между режимами получения и геометрическими параметрами образцов из высоколегированных кобальтовых сплавов в атмосфере аргона и вакуума.

2. Влияние метода экстракции висящей капли расплава на структуру и механические свойства высоколегированных кобальтовых сплавов.

3. Влияние термической обработки на структуру и механические свойства образцов волокон из высоколегированных кобальтовых сплавов, полученных методом экстракции висящей капли расплава.

4. Влияние метода экстракции висящей капли расплава на эксплуатационные свойства (жаростойкость, термостойкость и трибологические характеристики) трех сплавов системы Co–Cr–W дополнительно легированных Fe, V, Zr, Ni, Ti.

### **Степень достоверности результатов:**

Все результаты получены на поверенном и сертифицированном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Исследования и испытания проводились в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ), достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

### **Апробация результатов:**

Материалы диссертационной работы были доложены на 13 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: XLIII, XLIV, XLV, XLVI, XLVII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г., 2021 г.); Международной конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2019 г., 2020 г.); XVII, XVIII, XIX, XX Международной научно - технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (г. Москва, 2020 г., 2021 г., 2022 г., 2023 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2021 г.); VIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Восьмые Колачёвские чтения» (г. Ступино, 2023 г.).

На совместном заседании НТС НИО «Технологии порошковой металлургии, аддитивного производства, сварки, защитных и специальных высокотемпературных покрытий и материалов» и НИО «Жаропрочные литейные и деформируемые сплавы и стали», НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (г. Москва, сентябрь 2024 г.).

**Публикации.** Результаты проведенных исследований опубликованы в 21 научной работе, из них 2 – в изданиях, входящих в перечень ВАК и 1 – в журналах, включенных в международные системы цитирования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 158 страниц, включая 53 рисунка, 32 таблицы и список литературы из 115 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Состояние вопроса и постановка задачи исследований**

В главе приведена классификация микропроволок применяющихся в качестве контактного элемента щеточных уплотнений (ЩУ), рассмотрены требования, предъявляемые к данным микропроводам. Сделан обзор сплавов, применяющихся в составе ЩУ, показана перспективность кобальтовых высоколегированных сплавов как материала микропроволоки для применения в составе ЩУ. Отражены методы получения микропроволок из труднообрабатываемых материалов, такие как: волочение, метод экстракции расплава, метод Улитовского-Тейлора. Показана



перспективность получения микроволокон методом высокоскоростного затвердевания расплав (ВЗР) и его разновидностью методом экстракции висящей капли расплава (ЭВКР). Показана перспективность метода ЭВКР как замена классических методов получения микроволокон. На основе анализа литературных данных поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований.

## **Глава 2. Объекты и методы исследования**

При проведении исследований использованы кобальтовые сплавы В3К, В4К, В5К. В качестве исходных заготовок для экстракции использовались прутки диаметром 14 мм и длиной от 40 до 200 мм, которые получали методами вакуумной индукционной плавки на установке типа УВНК-9, для обеспечения требуемой чистоты по примесям. Получение волокон проводилось на установке экстракции висящей капли расплава с резистивным нагревом ЭВКР-РН, для оценки влияния среды получения на стабильность процесса получения волокон, процесс проводился в среде вакуума и аргона при давлении до  $1 \cdot 10^4$  Па. Для исследования структурных превращений использовались: металлографический микроскоп отраженного света AXIO Imager A1 фирмы CarlZeiss (Германия), дифрактометр D2 PHASER компании Bruker AXS GmbH (Германия) оснащенный медной мишенью, просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100 компании Jeol (Япония), дифференциальной сканирующий калориметр DSC PT 1600 (Linseis, Германия), микроскоп S-3400N (Hitachi High-Technologies Corporation, Япония), оснащенного приставкой рентгеновского энергодисперсионного анализа NORAN System 7 X-ray Microanalysis System (Thermo Scientific, США). Термообработку проводили в печах СНВЛ и ПЛ-10/16 (Россия). Микротвердость и нормальный модуль упругости образцов сплавов, волокон до и после ТО определяли на системе наноиндентирования TI750 Ubi L фирмы Hysitron (США). Испытание волокон на разрыв проводилось на электромеханической испытательной машине фирмы INSTRON (компания IEC, США) модели 5982.

## **Глава 3. Отработка режимов получения волокон из кобальтовых высоколегированных сплавов методом ЭВКР**

В главе показана возможность применения метода ЭВКР для получения волокон из кобальтовых высоколегированных сплавов,

отработаны режимы получения волокон на примере сплава ВЗК (система Co-Cr-W легированная Ni и Fe). Выявлены зависимости между режимами получения и геометрическими параметрами получаемых волокон, оценено влияние среды получения и режимов на стабильность геометрических размеров получаемых волокон. При исследовании влияния режимов получения варьировались такие параметры как скорость подачи заготовки в зону плавления, скорость вращения диска теплоприемника, среды получения и давление газа в рабочей камере, полученные данные приведены в таблице 1. Путем статистической обработки результатов, приведенных в таблице 1, при получении волокон из сплава ВЗК методом ЭВКР в вакууме выявлены зависимости влияния скорости вращения теплоприемника и скорости подачи заготовки на среднюю толщину волокна и отношения средней толщины волокон к их ширине от скорости подачи и скорости вращения теплоприемника, полученные зависимости представлены на рисунке 1.

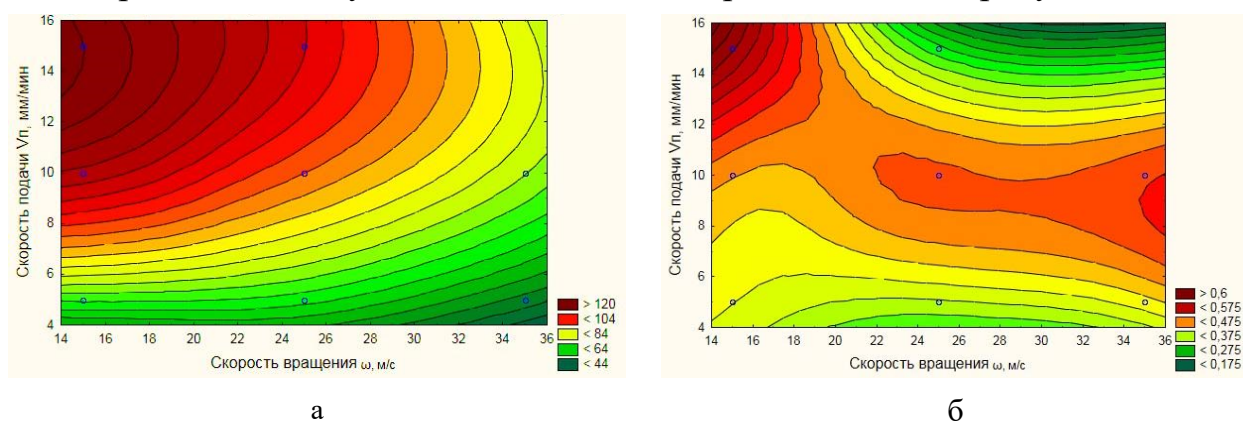


Рис. 1 Выявленные зависимости при получении волокон методом ЭВКР в вакууме: а - влияние скорости вращения теплоприемника и скорости подачи на среднюю толщину волокна при получении волокон методом ЭВКР в вакууме; б - зависимость отношения средней толщины волокон к их ширине от скорости подачи и скорости вращения теплоприемника при получении волокон методом ЭВКР в вакууме

Выявленные зависимости и полученные данные показали что: - основным фактором, влияющим на толщину волокна, является скорость подачи заготовки в зону плавления, при этом для применения в составе ЩУ волокна должны иметь диаметр от 50 до 120 мкм; - оптимальная скорость подачи прутка в зону плавления составляет до 10 мм/мин, при этом при данной скорости отношение толщины к ширине волокна составляет в среднем 0,47 – 0,57; – скорость вращения диска теплоприемника также стоит выбирать средней  $\approx 25$  м/с, для обеспечения стабильности процесса.

Таблица 1 – Данные по толщине и ширине волокон из сплава ВЗК полученных методом ЭВКР, при различных режимах получения в среде аргона и вакуума

№ партии	Атмосфера в рабочей камере	Давление, Па	Скорость вращения $\omega$ , м/с	Скорость подачи Уп, мм/мин	Средняя толщина волокна $h$ , мкм	Доверительный интервал $h$	Коэффициент вариации $h$ , %	Средняя ширина волокна $b$ , мкм	Доверительный интервал $b$	Коэффициент вариации $b$ , %	Отношение $h/b$
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	13	14
1.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	15	до 15	69,00	8,20	15,13	170,0	9,70	24,13	0,41
2.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	15	до 15	114,90	10,60	10,28	271,2	10,60	16,28	0,42
3.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	15	до 15	128,00	12,80	13,16	206,7	11,10	18,16	0,62
4.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	25	до 15	65,80	12,30	15,10	175,9	11,10	20,10	0,37
5.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	25	до 15	95,90	13,20	14,25	192,0	10,50	23,25	0,50
6.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	25	до 15	108,30	7,20	15,35	176,5	10,10	20,35	0,29
7.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	35	до 15	50,40	7,70	14,15	123,7	14,00	33,15	0,41
8.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	35	до 15	76,30	11,70	12,23	152,6	13,20	22,14	0,50
9.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	35	до 15	92,30	19,90	16,32	184,6	12,40	31,14	0,50
10.	Вакуум	$1 \cdot 10^{-2}$	45	до 15	80,30	18,90	27,18	145,5	14,80	34,18	0,55
11.	Аргон	10	15	до 15	112,30	11,20	24,16	309,0	14,20	33,16	0,33
12.	Аргон	10	30	до 15	89,30	7,50	20,13	205,4	7,60	25,13	0,43
13.	Аргон	10	35	до 15	93,30	8,80	26,39	214,6	8,90	35,39	0,43
14.	Аргон	$1 \cdot 10^2$	20	до 15	123,80	9,70	23,22	278,8	10,40	28,22	0,44
15.	Аргон	$1 \cdot 10^2$	20	до 15	103,10	11,10	20,46	252,9	10,30	26,46	0,44
16.	Аргон	$1 \cdot 10^2$	20	до 15	117,50	11,50	21,12	250,2	10,40	29,12	0,47
17.	Аргон	$1 \cdot 10^3$	20	до 15	72,20	7,50	15,17	131,5	9,60	22,17	0,55
18.	Аргон	$1 \cdot 10^3$	20	до 15	105,10	11,00	16,22	219,0	11,70	22,22	0,48
19.	Аргон	$1 \cdot 10^3$	30	до 15	87,30	10,30	19,30	169,8	11,30	24,3	0,51
20.	Аргон	$1 \cdot 10^4$	15	до 15	75,80	12,80	15,31	172,7	10,70	21,31	0,44

Также оценивалось влияние среды получения на стабильность процесса, показано, что зависимость толщины волокон от скорости вращения в вакууме и аргоне при постоянной скорости подачи (до 15 мм/мин) схожа. По мере увеличения скорости вращения диска теплоприемника происходит увеличение разброса толщины получаемых волокон, и на скоростях вращения более 35 м/с толщины волокон начинает увеличиваться с одновременным увеличением коэффициентов вариации и доверительных интервалов. Исследования показали, что средний разброс значений толщин получаемых волокон приблизительно вдвое больше в аргоне, чем в вакууме.

Таким образом, в данной главе показана принципиальная возможность получения волокон из кобальтового высоколегированного сплава ВЗК в среде аргона и вакуума, определен предпочтительный режим для получения волокон с требуемой геометрией в среде вакуума, показана корреляция между геометрическими параметрами и параметрами получения волокон. При этом аналогичные зависимости наблюдаются для волокон из других исследуемых составов.

#### **Глава 4. Влияние метода ЭВКР на структуру и механические свойства высоколегированных сплавов на основе кобальта**

Рентгенофазовый и просвечивающий электронный анализы показали наличие аморфной фазы в полученных образцах (рис. 2). Под действием высоких скоростей охлаждения в сплаве ВЗК происходит образование трех фаз: твердых растворов на основе Со с ГЦК ( $\alpha$ -Со) и ГП ( $\epsilon$ -Со) решетками и аморфной фазы (рис. 2, а), соотношение кристаллической и аморфной фазы составляет 43 % к 57%. В сплаве В4К происходит образование четырех фаз: твердых растворов на основе  $\epsilon$ -Со и  $\alpha$ -Со, карбидов WC и аморфной фазы (рис. 2, в), карбиды WC выкристаллизовываются у верхней грани волокна неравномерно, доля аморфной фазы в волокнах из сплава В4К составляет 59,67%, доля кристаллической фазы 40,33%. В сплаве В5К происходит образование четырех фаз: твердых растворов на основе  $\alpha$ -Со и  $\epsilon$ -Со, аморфной фазы, и фазы Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (рис. 2, д), соотношение кристаллической и аморфной фаз составляет 37 % к 63%.

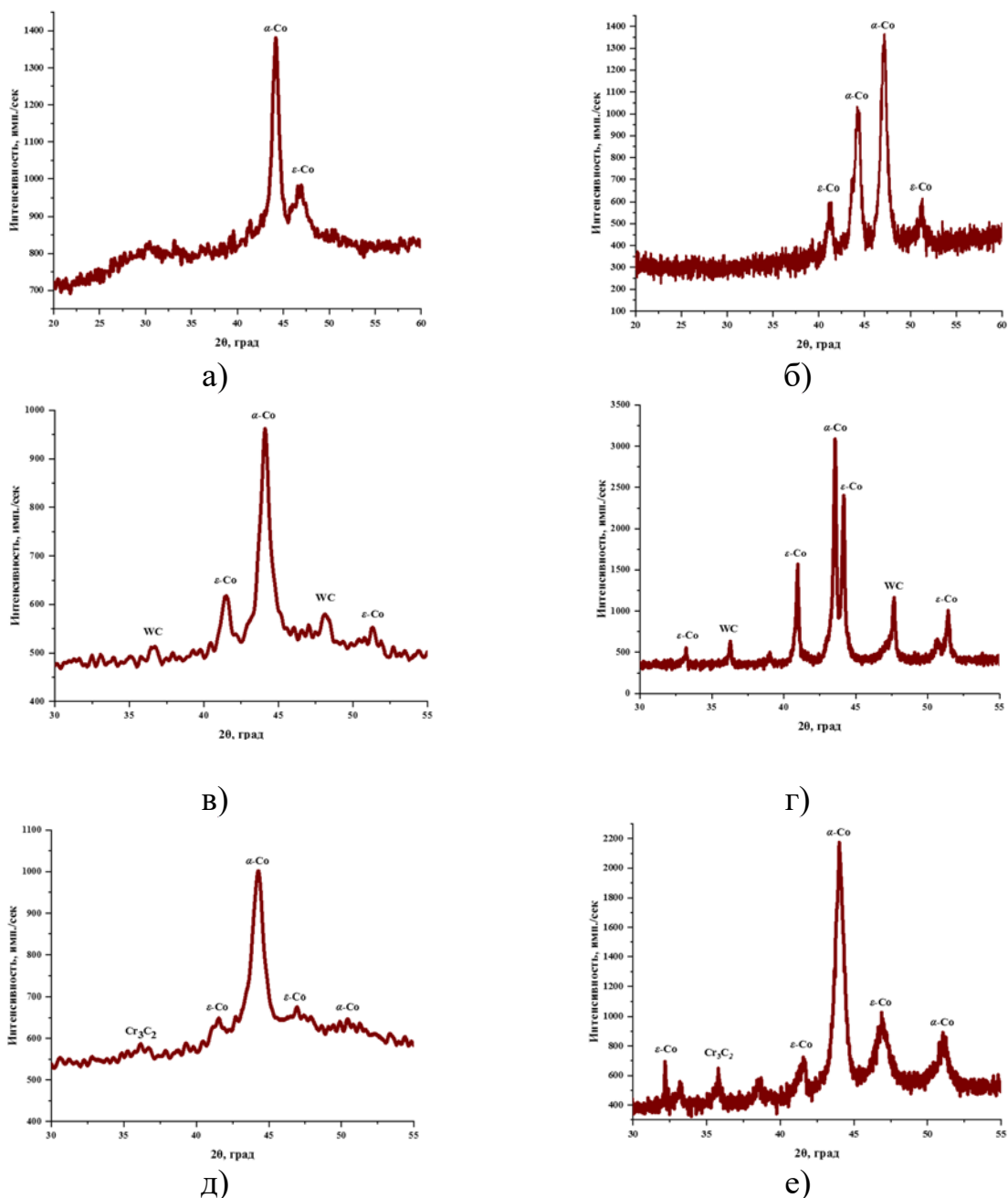


Рис. 2 Рентгенограммы волокон из кобальтовых высоколегированных сплавов: а) сплав ВЗК; б) сплав ВЗК после отжига; в) сплав В4К; г) сплав В4К после отжига; д) сплав В5К; е) сплав В5К после отжига

По результатам ДТА разработаны режимы термической обработки, заключающиеся отжиге в муфельной печи полученных образцов при температурах 600°С для волокон из сплава ВЗК, 800°С волокон из сплава В4К, 700°С для волокон из сплава В5К, время выдержки всех образцов одинаковое. Данные режимы обеспечили кристаллизацию аморфной фазы в исследуемых образцах, что подтверждается данными РФА (рис. 2, в, г, е), при этом период решетки  $\alpha$ -фазы после отжига существенно увеличивается для сплавов ВЗК и В5К, но уменьшается для сплава В4К, также количество

$\alpha$ -фазы после отжига уменьшается для сплавов В3К и В4К, но увеличивается для сплава В5К.

В табл. 2 приведены периоды решетки, атомные объемы и объемные доли  $\gamma$ - и  $\varepsilon$ -фаз. Периоды решетки  $\gamma$ - и  $\varepsilon$ -фаз, а также осевые отношения ГП- $\varepsilon$ -фазы варьируются в широких пределах. Корреляции вариаций периодов решетки и осевых отношений с количеством тех или других легирующих элементов найти не удалось. Это связано с большим количеством основных легирующих элементов, а также вероятно с тем, что, как и в большинстве сплавов, в частности никелевых жаропрочных сплавах легирующие элементы неравномерно распределяются в присутствующих в сплаве фазах. ВЗР также существенно влияет на величины периодов решетки и осевые отношения, при этом характер этих изменений различается для разных сплавов. Так период решетки  $\gamma$ -фазы после ВЗР существенно снижается для сплавов В3К и В5К, но увеличивается для сплава В4К, при этом количество фазы после ВЗР увеличивается для сплавов В3К и В4К, но снижается для сплава В5К.

Таблица 2 – Периоды решетки, осевые отношения ГП-  $\varepsilon$ -фазы и объемные доли  $\alpha$ - и  $\varepsilon$ - фаз исследуемых образцов в литом, состоянии ВЗР до и после термообработки

Сплав	Состояние	$a_\alpha$	$a_\varepsilon$	$c_\varepsilon$	$c_\varepsilon/a_\varepsilon$	$V_\alpha$	$V_\varepsilon$
		Å				-	%
В3К	Литое	3,571	2,532	4,115	1,625	36,0	64,0
	ВЗР	3,550	2,533	4,100	1,619	58,1	41,9
	После отжига	3,582	2,523	4,085	1,619	37,0	63,0
В4К	Литое	3,541	2,518	4,161	1,652	38,8	61,2
	ВЗР	3,560	2,514	4,107	1,634	48,2	51,8
	После отжига	3,552	2,487	4,049	1,628	45,5	54,5
В5К	Литое	3,568	2,507	4,11	1,639	41,1	58,9
	ВЗР	3,543	2,512	4,091	1,628	35,7	64,3
	После отжига	3,547	2,479	4,056	1,636	42,6	57,4

Единственная корреляция наблюдается для величины осевого отношения для ГП-  $\varepsilon$ -фазы, которая снижается для сплавов В4К и В5К. Также неоднозначно ВЗР влияет на соотношение фаз. Если для сплавов В3К и В4К после ВЗР количество  $\alpha$ -фазы существенно увеличивается, соответственно от 36 до 58,1% и от 38,8 до 48,2%, то для сплава В5К ее

количество снижается от 41,1 до 35,7%. Кроме того, после ВЗР происходит уширение рефлексов, преимущественно  $\epsilon$ -Со, что свидетельствует о более интенсивном искажении кристаллической решетки этой фазы.

Оценка влияния ВЗР на механические свойства исследуемых образцов показала следующее: фиксация аморфной фазы приводит к сильному упрочнению волокон с одновременным увеличением микротвёрдости, из исследуемых систем наибольшей прочностью обладают волокна из сплава В5К (1556 МПа), они по механическим свойствам близки к зарубежной холоднотянутой микропроволоке из сплава Haynes 25. Так для сплава В3К происходит повышение микротвёрдости и уменьшение нормального модуля упругости в среднем на 20% (161 НV и 58,7 ГПа). Для сплава В4К происходит увеличение микротвёрдости в среднем на 49 % (681 НV), уменьшение нормального модуля упругости в среднем на 41 % (114,29 ГПа). Что связано с наличием в волокне карбидов WC. В сплаве В5К происходит увеличение твердости в среднем на 44 % (450 НV), уменьшение нормального модуля упругости в среднем на 36 % (68,7 ГПа). Прочность образцов в результате фиксации аморфного состояния увеличивается для сплава В3К на 30% (376 МПа), для сплава В4К на 15% (170 МПа) и на 52% (796 МПа) для сплава В5К.

Кристаллизация аморфной фазы после отжига в исследуемых образцах приводит к снижению твердости и прочности, так для волокон из сплава В3К отжиг при 600°C приводит к уменьшению их микротвёрдости и увеличению нормального модуля упругости в среднем на 13% (115 НV и 33 ГПа). Для волокон из сплава В4К отжиг при температуре 800°C приводит к уменьшению их микротвёрдости и увеличению нормального модуля упругости в среднем на 15% (318 НV и 11 ГПа). Для волокон из сплава В5К отжиг при температуре 700°C приводит к уменьшению их микротвёрдости и увеличению нормального модуля упругости в среднем на 18% (180 НV и 41 ГПа). После отжига происходит уменьшение предела прочности на разрыв для сплава В3К на 14% (180 МПа), для сплава В4К на 18% (210 МПа) и на 12% (181 МПа) для сплава В5К.

Для сравнительной оценки механических характеристик волокон из сплава В5К и микропроволоки из сплава Haynes 25 были проведены дополнительные испытания волокон из сплава В5К после отжига по режиму

нагрев до 650°C, выдержка 100 ч и нагрев до 800°C, выдержка 100 ч. Оценка прочностных характеристик показала, что прочность образцов волокон из сплава В5К в не отожжённом состоянии близка к прочности микропроволок из сплава Haynes 25, по мере увеличения температуры отжига происходит снижение прочности исследуемых образцов, однако для сплава В5К прочность после отжига при 800°C превышает прочность образцов из сплава Haynes 25.

## **Глава 5. Оценка эксплуатационных свойств материала щеточного уплотнения на основе кобальтовых высоколегированных сплавов**

В главе приведена оценка эксплуатационных свойств полученных образцов, эксплуатационные свойства оценивались на базе разработанного во ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ испытательного оборудования и методики испытаний для исследования основных свойств уплотнительных материалов проточного тракта ГТД собранные в ММ 1.595-3-147-2002 «Методика исследования эксплуатационных свойств истираемых материалов проточного тракта ГТД». Оценивались такие свойства как: жаростойкость, термостойкость, эксплуатационные характеристики при высокоскоростном контактном взаимодействии.

Оценка жаростойкости производилась при температуре 700°C, в течении 100 ч выдержки, замер массы образцов производился каждые 20 ч. Исследования показали, что наименьший прирост удельной массы наблюдается на образцах из сплава В5К, полученные в результате исследований данные представлены на рис. 3.

Термостойкость характеризует способность волокон сохранять прочность и гибкость при теплосменах. Метод оценки термостойкости заключается в определении количества рабочих теплосмен, приводящих к разрушению волокон или потере пластичности. Для оценки термостойкости полученных образцов проводилась серия экспериментов при температурах 500 °С, 600 °С, 700 °С, 800 °С. Количество изгибов определялось на 5 образцах каждого состава, за один образец принималось одно волокно, результаты исследований приведены на рис. 4.



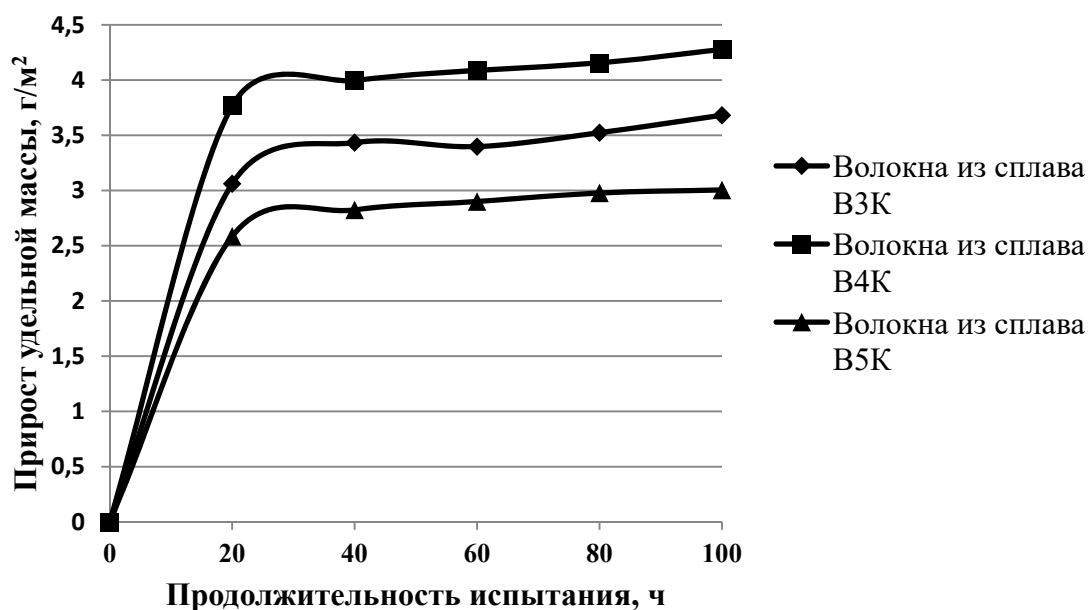


Рис.3 Кинетика изотермического окисления на воздухе при температуре 700°C образцов волокон из кобальтовых высоколегированных сплавов

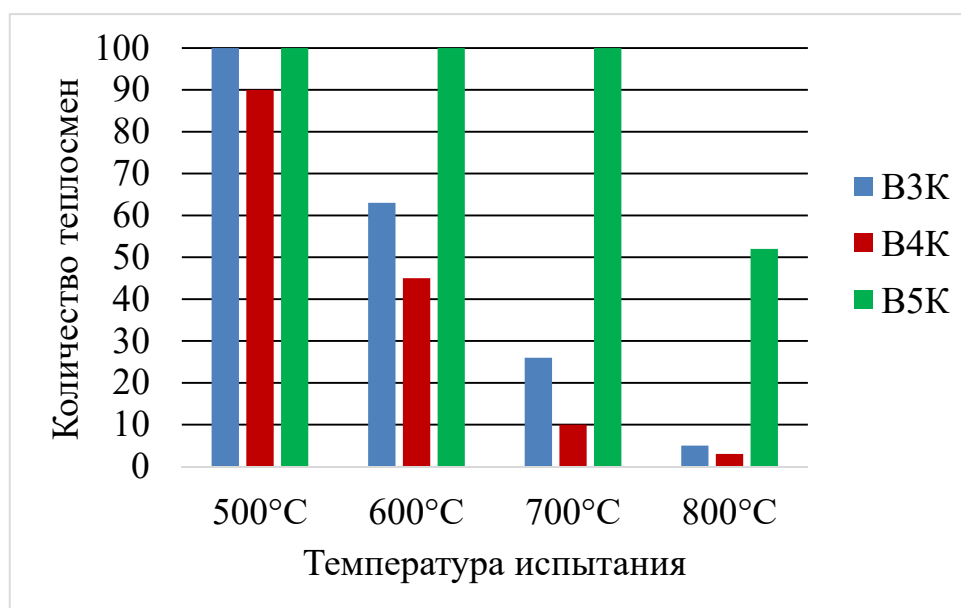


Рис. 4 Результаты определения термостойкости образцов волокон из кобальтовых сплавов В3К, В4К, В5К

Исследования показали, что для волокон из сплава В5К рабочие температуры лежат в пределах 700°C, при этом частично данные волокна сохраняют свои механические характеристики при температуре до 800 °С, однако имеют ограниченный ресурс работы после 52 теплосмен. Меньшей рабочей температурой обладают образцы из волокон сплава В3К, при этом они частично работоспособны при температуре до 600°C. Наименьшей

теплостойкостью обладают образцы из сплава В4К, в данных волокнах при температурах более 500°С происходит снижение пластических характеристик, что вызывает разрушение образцов после 90 цикла теплосмены, однако стоит отметить, что данные волокна изначально не обладали высокими характеристиками пластичности из-за наличия в их составе крупных включений WC.

Оценка эксплуатационных характеристик при высокоскоростном контактном взаимодействии показала что волокна, полученные из сплавов В3К и В5К при моделировании контакта щеточного уплотнения с ротором при высоких скоростях вращения (порядка 6800 об/мин) не приводят к сильному износу ответной части модели ротора, повышение шероховатости поверхности модели ротора для данных сплавов составляет 0,514 Ra для волокон из сплава В3К и 0,500 Ra для волокон из сплава В5К соответственно, при этом на торцах волокон отсутствуют следы сваривания и после проведения исследований геометрия модели ЩУ не изменилась. В случае моделирования взаимодействия модели ЩУ из сплава В4К с моделью ротора происходит сильный износ поверхности модели ротора в зоне контакта, при этом среднее изменение шероховатости составляет 9,342 Ra, также наблюдается вырывание волокон для большинства моделей ЩУ на основе сплава В4К, что связано с низким модулем упругости волокон и их высокой твердостью.

### **Выводы по работе**

1. Показана принципиальная возможность получения волокон из кобальтовых сплавов типа В3К системы Co-Cr-W методом ЭВКР, при этом получение волокон проводилось на установке ЭВКР-РН в среде аргона и вакуума. Показано, что полученные волокна в поперечном сечении по форме близки к эллипсу, при этом возможно получение как дискретных, так и непрерывных волокон.

2. Установлены зависимости критерия соотношения высоты и ширины получаемых волокон от режимов проведения процесса экстракции висящей капли расплава на установке ЭВКР-РН для сплава В3К, системы Co-Cr-W. По установленным зависимостям отработаны режимы получения волокон

требуемой геометрии из сплавов В3К, В4К, В5К системы Co-Cr-W, для последующего применения в составе щёточных уплотнений.

3. Увеличение разброса толщины получаемых волокон, происходит с увеличением скорости вращения диска теплоприемника и при скорости вращения более 35 м/с толщина волокон начинает увеличиваться с одновременным увеличением коэффициентов вариации и доверительных интервалов. В среде аргона это объясняется наличием газов в зоне контакта диска теплоприемника и заготовки, что ведет к снижению стабильности ведения процесса ЭВКР. Исследования показали, что средний разброс значений толщин получаемых волокон приблизительно вдвое больше в аргоне, чем в вакууме

4. Исследование влияния метода ЭВКР на структуру высоколегированных кобальтовых сплавов системы Co-Cr-W показало следующее: Так, под действием высоких скоростей охлаждения в сплаве В3К происходит образование трех фаз: твердых растворов на основе Co с ГЦК ( $\alpha$ -Co) и ГП ( $\epsilon$ -Co) решетками и аморфной фазы. При этом соотношение кристаллической и аморфной фазы составляет 43 % к 57%. В сплаве В4К происходит образование четырех фаз: твердых растворов на основе  $\epsilon$ -Co и  $\alpha$ -Co, карбидов WC и аморфной фазы. При этом карбиды WC выкристаллизовываются у верхней грани волокна неравномерно. Расчет соотношения доли аморфной и кристаллической фазы показал, что доля аморфной фазы в волокнах из сплава В4К составляет 59,67%, доля кристаллической фазы 40,33%. В сплаве В5К происходит образование четырех фаз: твердых растворов на основе  $\alpha$ -Co и  $\epsilon$ -Co, аморфной фазы, и фазы Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. При этом соотношение кристаллической и аморфной фазы составляет 37 % к 63%. В волокнах из сплава В5К структура имеет трёхзонный характер, зона контакта волокна с теплоприемником характеризуется аморфной фазой, середина волокна представляет собой твердый раствор на основе  $\epsilon$ Co, вершина волокна представляет собой зону, обогащенную Ni имеющую дендритную структуру, при этом направление роста дендритов совпадает с направлением теплоотвода.

5. Отличие механических характеристик литых образцов и волокон исследуемых сплавов объясняется фазовыми превращениями (образованием аморфной фазы и твердых растворов), происходящими при высоких

скоростях охлаждения. Так, для сплава В3К происходит повышение микротвердости и уменьшение нормального модуля упругости в среднем на 20% (161 HV и 58,7 ГПа). Что коррелирует с литературными данными. Для сплава В4К происходит увеличение микротвердости в среднем на 49 % (681 HV), уменьшение нормального модуля упругости в среднем на 41 % (114,29 ГПа). Что связано с наличием в волокне карбидов WC. В сплаве В5К происходит увеличение твердости в среднем на 44 % (450 HV), уменьшение нормального модуля упругости в среднем на 36 % (68,7 ГПа). Что связано с образованием аморфной фазы, твердых растворов на основе  $\alpha$ -Co  $\varepsilon$ -Co, и выделением карбидов Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

6. По результатам ДТА разработаны режимы термической обработки, обеспечивающие кристаллизацию аморфной фазы, что позволяет повысить нормальный модуль упругости полученных образцов. Так для волокон из сплава В3К отжиг при 600°C приводит к уменьшению их микротвердости и увеличению нормального модуля упругости в среднем на 13% (115 HV и 33 ГПа). Для волокон из сплава В4К отжиг при температуре 800°C приводит к уменьшению их микротвердости и увеличению нормального модуля упругости в среднем на 15% (318 HV и 11 ГПа). Для волокон из сплава В5К отжиг при температуре 700°C приводит к уменьшению их микротвердости и увеличению нормального модуля упругости в среднем на 18% (180 HV и 41 ГПа).

7. Прочность образцов в результате фиксации аморфного состояния увеличивается для сплава В3К на 30% (376 МПа), для сплава В4К на 15% (170 МПа) и на 52% (796 МПа) для сплава В5К. После термической обработки происходит уменьшение предела прочности на разрыв уменьшается для сплава В3К на 14% (180 МПа), для сплава В4К на 18% (210 МПа) и на 12% (181 МПа) для сплава В5К. По уровню механических свойств волокна из сплава В5К после отжига находятся на уровне серийно применяющейся в составе ЩУ зарубежной микропроволоки Nupes 25, а в некоторых аспектах и превосходят ее.

8. Оценка жаростойкости полученных образцов показала, что большей стойкостью к окислению при температуре 700 °C среди исследуемых систем обладают волокна из сплава системы В5К, исходя из полученных значений,

волокна из данной системы меньше подвержены коррозии при данной температуре.

9. Оценка термостойкости образцов показала, что волокна из сплава В5К работоспособны при температуре до 700 °С. Частично они сохраняют свои механические свойства до 800 °С, но их ресурс ограничен 52 теплосменами. Образцы из волокон сплава В3К менее устойчивы к высоким температурам. Они могут работать только до 600 °С. Волокна из сплава В4К наименее термостойкие. При температуре выше 500 °С их пластические характеристики ухудшаются, что приводит к разрушению образцов после 90 циклов теплосмен. Однако стоит учесть, что эти волокна изначально не обладали высокой упругостью из-за крупных включений карбидов вольфрама в их составе.

10. По результатам исследований для применения в составе ЩУ для авиационных и наземных ГТД и ГТУ можно рекомендовать волокна из сплава В3К на рабочие температуры до 600°С и волокна из сплава В5К на рабочие температуры до 700°С. Дальнейшее направление работ связано с изготовлением образцов для стендовых испытаний и отработкой методики исследования механических и эксплуатационных свойств полученных волокон.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

### **Список публикаций в ведущих научных журналах и изданиях, включенных в международные системы цитирования**

1. Pozhoga O.Z., Serov M.M., Yaroshenko A.S., Senkevich K.S., Study of mechanical properties of rapidly quenched fiber from orthorombic alloy based on  $Ti_2AlNb$  // Journal of Physics: Conference Series. 16th International Scientific and Technical Conference Rapid Solidification Materials and Coatings. 2019. С. 012033.

### **Список публикаций в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК**

1. Фарафонов Д.П., Серов М.М., Патрушев А.Ю., Лещев Н.Е., Ярошенко А.С., Металлические волокна для новых материалов авиационных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). С. 23-34;

2. Скугорев А.В., Мельникова Д.А., Столянков Ю.В., Ярошенко А.С., Жаростойкость и технологическая пластичность сплава системы Fe-Cr-Al-Y для сотовых уплотнений проточной части газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). С. 3-12;

### **Список публикаций в других научных журналах и сборниках трудов**

1. Ярошенко А.С., Применение металлических волокон в перспективных щеточных уплотнениях ГТД / Ярошенко А.С., Серов М.М. // В книге: 18-я Международная конференция "Авиация и космонавтика - 2019". Тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 254-255.

2. Ярошенко А.С., Способ изготовления металлических волокон для щеточных уплотнений / Патрушев А.Ю., Ярошенко А.С. // В книге: 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы 19-ой Международной конференции. Москва, 2020. С. 700-701.

3. Ярошенко А.С., Получение быстрозакаленных материалов из сплава системы Co-Cr-C-W / Ярошенко А.С., Патрушев А.Ю., Серов М.М. // В книге: Гагаринские чтения - 2020. Сборник тезисов докладов. 2020. С. 1038.

4. Ярошенко А.С., Быстрозакаленные материалы на основе кобальта и их применение в составе щеточных уплотнений ГТД / Ярошенко А.С., Серов М.М. // В сборнике: Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы XVIII Международной научно-технической конференции. Москва, 2021. С. 71-74.

5. Ярошенко А.С., Применение материалов на основе сложнолегированных кобальтовых сплавов в составе щеточных уплотнений газотурбинных двигателей / Патрушев А.Ю., Ярошенко А.С., Серов М.М. // В сборнике: Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы XX Международной научно-технической конференции. Москва, 2023. С. 40-42.