

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

На правах рукописи

Стрельникова Ангелина Анатольевна

**Влияние степени предварительной горячей деформации псевдо-альфа
сплавов титана на их кратковременные и эксплуатационные свойства**

Направление подготовки: 22.06.01 Технология материалов

Код и наименование

Направленность: 22.06.01_06 Материаловедение (по отраслям)

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Стрельникова А.А.
Научный руководитель: профессор,
д.т.н., Скотникова М.А.

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ Машиностроения Института ИММиТ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ Машиностроения: – *Любомудров Сергей Александрович – к.т.н., доцент*

Научный руководитель: – *Скотникова Маргарита Александровна – д.т.н., профессор*

Внешний рецензент – *Миронова Екатерина Викторовна – к.т.н., начальник ЦЗЛ СПб ОАО «Красный Октябрь»*

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.

В производстве часто требуется прогнозирование состояния оборудования и машин при определенных условиях эксплуатации. Например, в условиях низких или высоких температур, разных климатических условиях. Для более точного прогноза эксплуатационных свойств оборудования и машин, необходимо знать структуру, механические, физические и другие свойства используемого материала, а также технологические процессы изготовления изделий. Знание совокупности вышеперечисленных параметров с высокой степенью достоверности позволяет прогнозировать надежность машин во время эксплуатации.

Актуальность работы заключается в предлагаемом комплексном подходе исследования свойств титанового сплава 3М, который позволит разработать научно-обоснованные технологические режимы изготовления деталей и внедрить их в производство. В работе впервые определено влияние степени горячей деформации на свойства фаз титанового сплава 3М.

Цель работы. Изучение влияния степени горячей деформации псевдоальфа сплава титана на его кратковременные и эксплуатационные свойства.

Задачи исследования:

1. Исследование влияния степени горячей деформации на механические свойства сплава 3М.
2. Исследование влияния степени горячей деформации на структуру сплава 3М.
3. Исследование влияния степени горячей деформации на фазовый состав сплава 3М.
4. Исследование влияния степени горячей деформации на свойства α - и β – фаз сплава 3М.

5. Исследование влияния степени горячей деформации на эксплуатационные свойства материала.

Научная новизна

Впервые получены результаты исследования механических свойств (твердости) пластин альфа- фаз и бета- прослоек титанового двухфазного (альфа + бета) сплава ЗМ, а также экспериментально на нано-уровне исследованы трибологические характеристики пар трения «сплав ЗМ - сталь».

Теоретическая и практическая значимость

Были получены результаты зависимости механических свойств (твердости) пластин альфа- фаз и бета- прослоек титанового двухфазного (альфа + бета) сплава ЗМ от степени высокотемпературной деформации – теоретическая значимость.

Практическая значимость. Результаты испытаний титанового сплава ЗМ можно применять на предприятиях и заводах, в лабораториях для оценки прочности, надежности, прогнозирования технического состояния элементов и ответственных деталей в сферах авиа -, приборостроения при различных условиях эксплуатации. В частности, результаты испытаний титанового сплава научной работы использовались для разработки и исследования изделия в определенных условиях эксплуатации с помощью метода цифровых двойников.

По результатам, проведенных в работе, опытов можно судить о влиянии высокотемпературной деформации на физико-механические свойства титанового сплава ЗМ и их взаимосвязи с эксплуатационными свойствами. Указанные результаты можно применить в расчетах к парам трения при сухом и жидком трении.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на:

1. Тринадцатом всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах 23-25 октября 2019 года (23 октября 2019 года, Санкт-Петербург)
2. XVIII Международной конференции «Авиация и космонавтика» Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики - 2019»
3. Научно-практической конференции XLVIII «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ» (20 ноября 2019 г., Санкт-Петербург)
4. Международной конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» (MMESE-2019), 20 июня 2019 г
5. IV Всероссийской научно-технической конференции «Климат-2019: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы». Геленджик, ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова. 16.05.2019 — 17.05.2019. 2019.
6. Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг - 2019», Челябинск

Публикации

За период работы над темой были опубликованы 7 рецензируемых научных статей, из них 2 статьи, индексируемых в Scopus и 5 статей, индексируемых в РИНЦ.

Представление научного доклада: основные положения

1. Результаты исследования влияния степени горячей деформации на механические свойства титанового сплава 3М.
2. Результаты исследования микроструктурного анализа образцов.
3. Результаты исследования влияния степени деформации на фазовый состав.
4. Результаты исследования влияния степени деформации на свойства α - и β - фаз.

5. Результаты исследования влияния высокотемпературной деформации на трибологические свойства титанового сплава.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Титановые сплавы являются перспективными материалами, применение которых в промышленности, строительстве постоянно возрастает [1-5].

Большое количество работ посвящено изучению влияния разных видов обработок (термической, химикотермической, пластической и др.) на механические свойства и структуру титановых сплавов [6-8], в том числе влияние степени деформации на материал [9-12].

В производстве основными методами исследования материала являются макро-, микроструктурный, рентгенографический анализы, методы испытания на ударный изгиб и методы статистических испытаний на растяжение [13-16]. В последние годы кроме часто используемых методов стали применять метод инструментального индентирования [17-19]. Данный метод исследования позволяет определить физико - механические свойства сплава (инструментальную твердость, работу пластической деформации и работу упругого восстановления, и другие свойства материала) локально и наиболее точно.

Также для изготовления некоторых изделий (например, турбинные лопатки, корпусное оборудование атомных энергетических установок) важно знать не только механические свойства применяемых материалов, но и их трибологические свойства. Это связано с необходимостью принятия решений на этапе опытно-конструкторской разработки деталей и узлов машин, работающих в условиях трения. Проблеме изучения трибологических свойств титановых сплавов посвящен ряд исследований, например, [20-22], но результаты данных исследований не являются всеобъемлющими и требуют дополнительных уточнений, в том числе с помощью проведения экспериментальных исследований.

1. Объект и методы исследования

Исследования проводились на образцах титанового сплава 3М с разной степенью деформации 80%, 83%, 86%, 90%, 93%, полученных в результате высокотемпературной обработки давлением – ковкой. Образцы были подвергнуты отжигу (температура нагрева – 870°C; время выдержки – 1 ч 30 мин; охлаждение – воздух). Результаты химического состава образцов приведены в Таблице 1.

Таблица № 1.

Химический состав образцов проката со степенью деформации 80%, 83%, 86%, 90%, 93%.

Химический состав, массовая доля элементов, %												
Элементы/ степень деформации	Al	Si	Fe	O	H	N	C	Zr	Ni	Cu+Ni	V+Sn	∑пр им.
ОСТ1 92077-91	3,5- 5,0	0,12	0,25	0,15	0,006	0,04	0,10	0,30	<0,08	<0,10	<0,15	<0,30
93	4,45	0,08	0,10	0,04	0,0043	0,002	0,015	0,07	<0,08	<0,10	<0,15	0,23
90	4,55	0,09	0,10	0,035	0,002	0,003	0,016	0,05	<0,08	<0,10	<0,15	0,24
86	4,40	0,09	0,09	0,034	0,0017	0,005	0,015	0,07	<0,08	<0,10	<0,15	0,21
83	4,45	0,08	0,10	0,037	0,001	0,005	0,016	0,07	<0,08	<0,10	<0,15	0,23
80	4,50	0,09	0,09	0,04	0,0016	0,004	0,016	0,06	<0,08	<0,10	<0,15	0,25

Исследование химического состава образцов с разной степенью деформацией на рентгеновском приборе Niton XL и анализаторе газа Eltra OH 900.

Исследование фазового состава структуры титанового сплава 3М проводилось методом оптической микроскопии на приборе NIKON ECLIPSE MA100N.

Исследование влияния степени деформации на физико-механические свойства (твердость, эластичность и пластичность материала) α - и β - фаз титанового сплава проводилось методом инструментального индентирования. Исследования проводились на приборе Micro Indentation Tester CSM (рис.1).

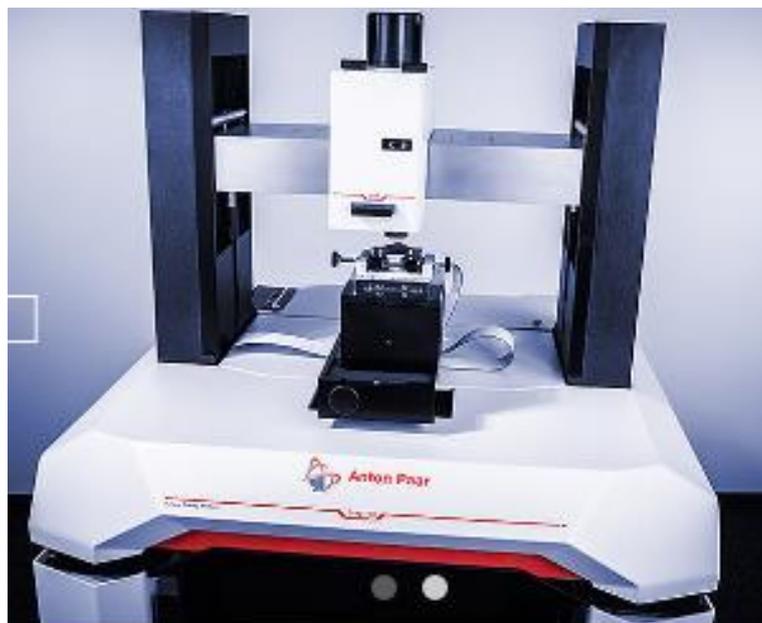


Рис.1 Micro Indentation Tester CSM

Исследования влияния биологических смазочных сред на трибологические свойства пары трения «сталь – титановый сплав 3М» осуществляли на приборе Micro Indentation Tester CSM (рис.1).

2. Результаты и их обсуждение

2.1 Влияние высокотемпературной деформации на механические свойства

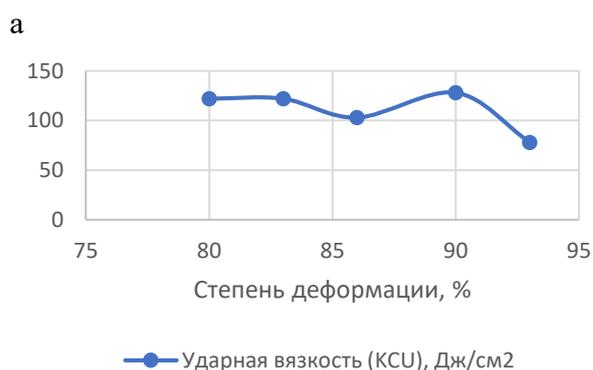
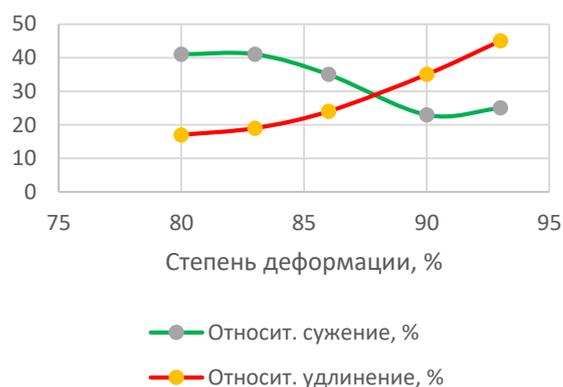
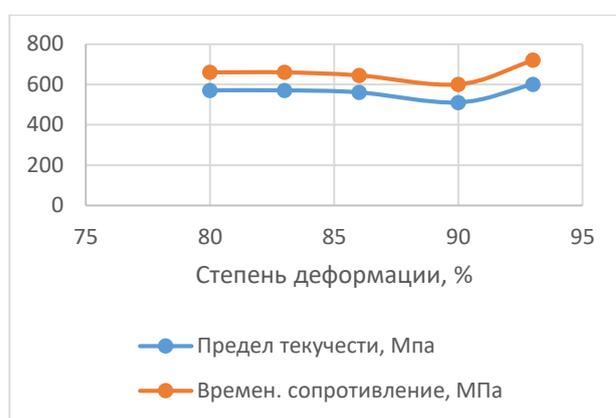
Испытания на растяжение проводили на машине испытательной Instron по ГОСТ 1497, тип образцов III №7. Испытания на ударную вязкость проводили на оборудовании «Копер маятниковый ТСКМ-300-13» по ГОСТ 9454-78, тип образцов I. Температура проведения испытания 20 °С.

Результаты механических свойств образцов представлены ниже в Таблице 2, а также на Рис. 2 для наглядности.

Таблица №2.

Механические свойства образцов со степенью деформацией 80%, 83%, 86%, 90%, 93%

Степень деформация, %	Времен. сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относит. сужение, %	Относит. удлинение, %	Ударная вязкость (КСУ), Дж/см ²
Требования ОСТ1 92062-90	540-755	>490	>30	>12	>70
80	660	570	41	17	122
83	660	570	41	19	122
86	645	560	35	24	103
90	600	510	23	35	128
93	720	600	25	45	78



в

Рис. 2 Диаграммы механических свойств образцов со степенью деформацией 80%, 83%, 86%, 90%, 93%: а – Предел прочности, временное сопротивление, б – относительное удлинение, относительное сужение, в – ударная вязкость

Из результатов механических испытаний на растяжение с увеличением степени деформации до 83% видно, что предел прочности σ_B , предел текучести

$\sigma_{0,2}$ и относительное удлинение δ повышаются, а относительное сужение Ψ снижается. Таким образом, материал интенсивно упрочнялся, а его характеристики пластичности уменьшались, в тоже время, оставаясь на достаточно высоком уровне. При дальнейшем увеличении до 90%, происходит снижение предела прочности σ_B и предела текучести $\sigma_{0,2}$, а затем возрастание. При этом значения относительного сужения Ψ продолжает снижаться, а относительного удлинения - возрастать. Таким образом, с увеличением степени деформации прочностные характеристики и пластические свойства в целом улучшаются.

2.2 Микроструктурный анализ образцов

Микроструктура образца со степенью деформацией 80%

Структура металла имеет пластинчатое строение – колония чередующихся α - и β -фаз. Большое количество двойников свидетельствует о деформации механизма двойникования. Структура сплава неоднородна, зерна вытянуты вдоль проката.

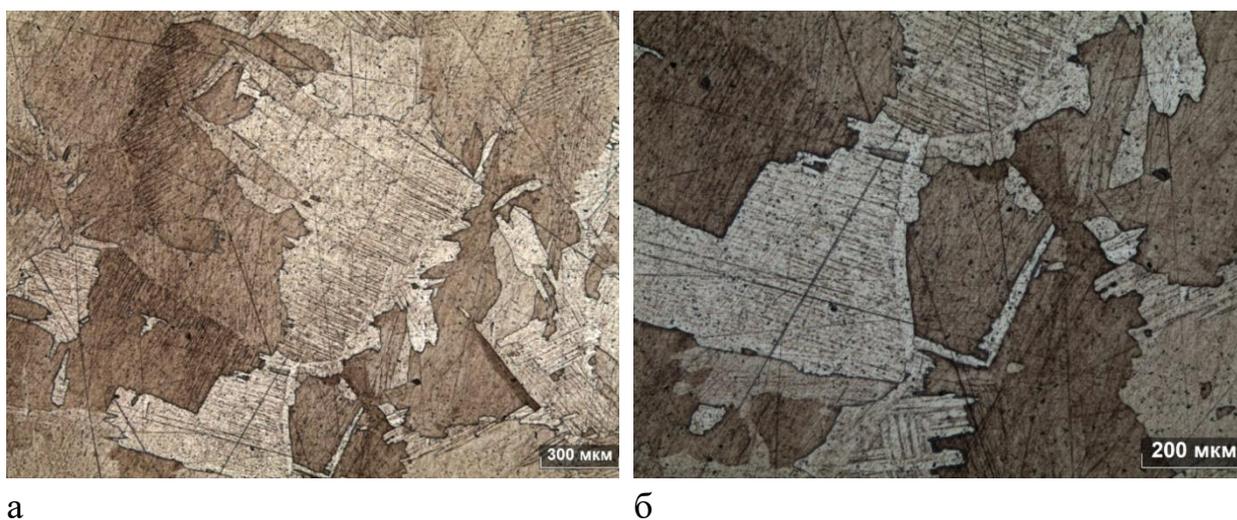


Рис. 3 Микроструктура образца с деформацией 80%, а) x50, б) x100

Микроструктура образца со степенью деформацией 83%

Структура металла имеет пластинчатое строение – колония чередующихся α - и β -фаз. Большое количество двойников свидетельствует о деформации механизма двойникования. Структура сплава неоднородна, зерна вытянуты вдоль проката.

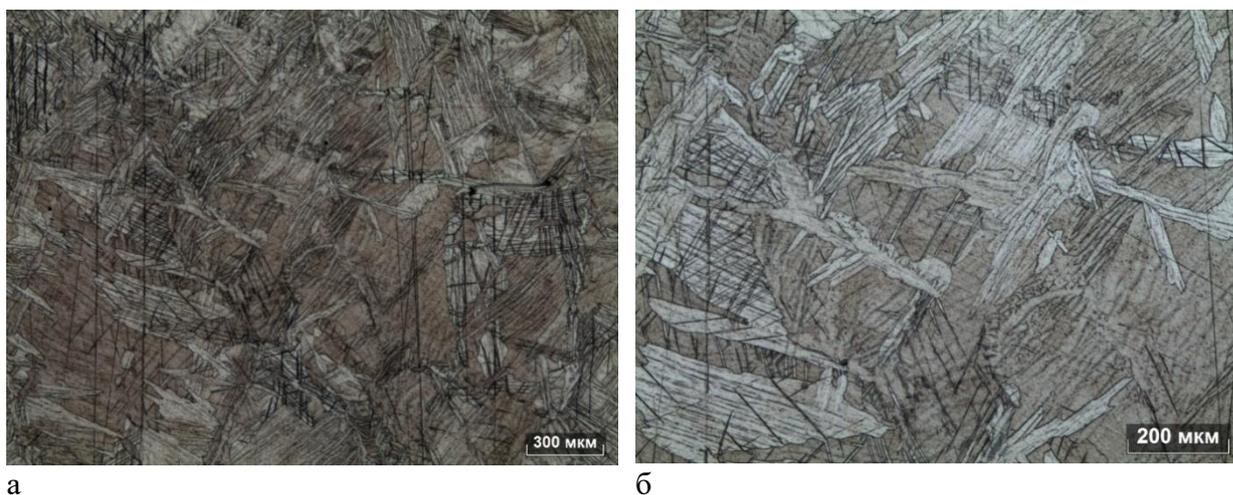


Рис. 4 Микроструктура образца со степенью деформацией 83%, а) x50, б) x100

Микроструктура образца со степенью деформацией 86%

Структура сплава более однородна. Микроструктура металла имеет пластинчатое строение (α - и β -фазы). В структуре также присутствуют двойники



Рис.5 Микроструктура образца со степенью деформацией 86 % а) x50, б) x100

Микроструктура образца со степенью деформацией 90%.

Структура сплава более однородна, зерна вытянуты вдоль проката.

Структура металла имеет пластинчатое строение (α - и β -фазы). При увеличении $\times 100$ виден процесс рекристаллизации β -фазы в α - фазу (рис. 6, б).

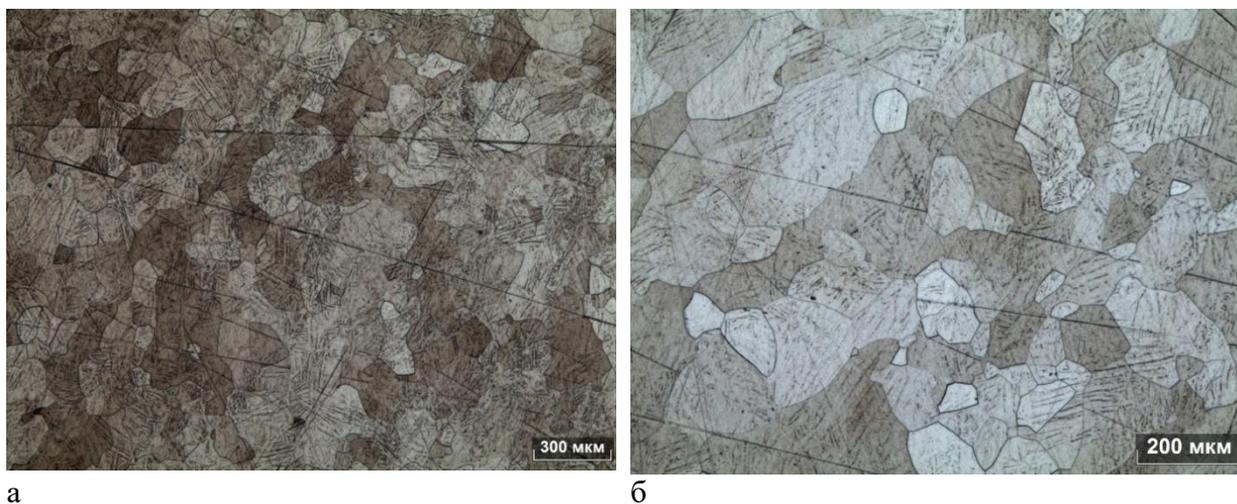


Рис. 6 Микроструктура образца с деформацией 90% а) $\times 50$, б) $\times 100$

Микроструктура образца со степенью деформацией 93%.

Сплав имеет мелкодисперсную однородную, рекристаллизованную структуру. Микроструктура металла имеет глобулярное строение, выраженное α -фазой. Вдоль направления проката в зернах видна остаточная β -фаза.

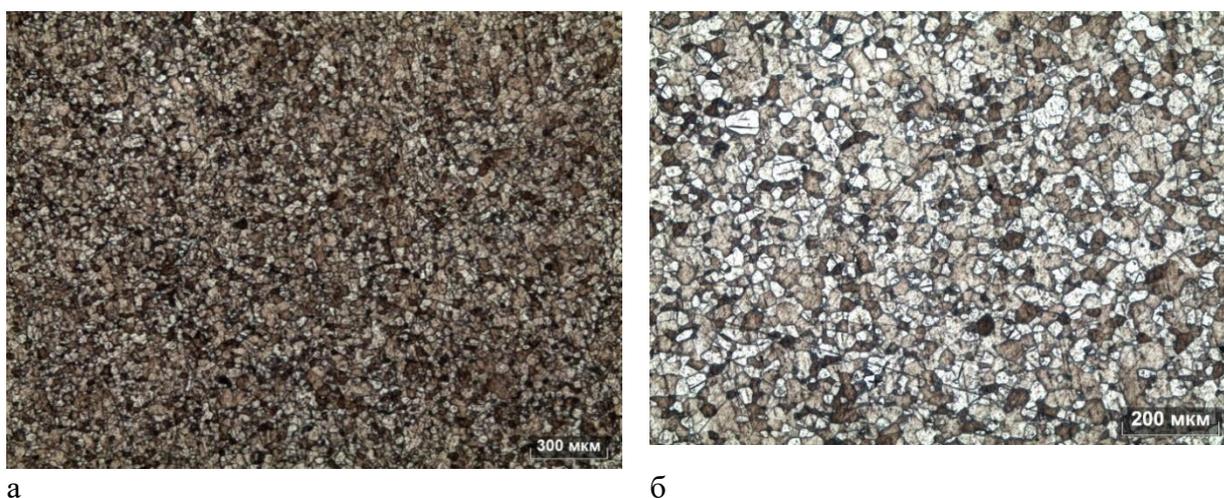


Рис. 7 Микроструктура образца с деформацией 93% а) $\times 50$, б) $\times 100$

По результатам исследования микроструктуры образцов титанового сплава 3М, можно сделать вывод о том, что с увеличением степени горячей деформации структура металла становится более однородной. Микроструктура при деформации 80% имеет пластинчатое строение (колония чередующихся α - и β -фаз), а при деформации 93% уже имеет глобулярное строение, выраженное в основном α -фазой.

2.3 Исследование влияния степени деформации на фазовый состав.

Титановый сплав 3М - двухфазный сплав. Определение фазового состава сплава при разных степенях деформации происходило подсчетом процентного соотношения α - и β - фаз в структуре каждого образца. Результаты, которые приведены в таблице 3 ниже, также представлены на рисунке 8.

Таблица 3

Процент β -фазы, занимаемой от всей площади шлифа.

Образец со степенью предварительной деформации, %	80	83	86	90	93
Процент β -фазы, занимаемой от всей площади шлифа, %	34,52	32,71	30,77	20,05	6,99

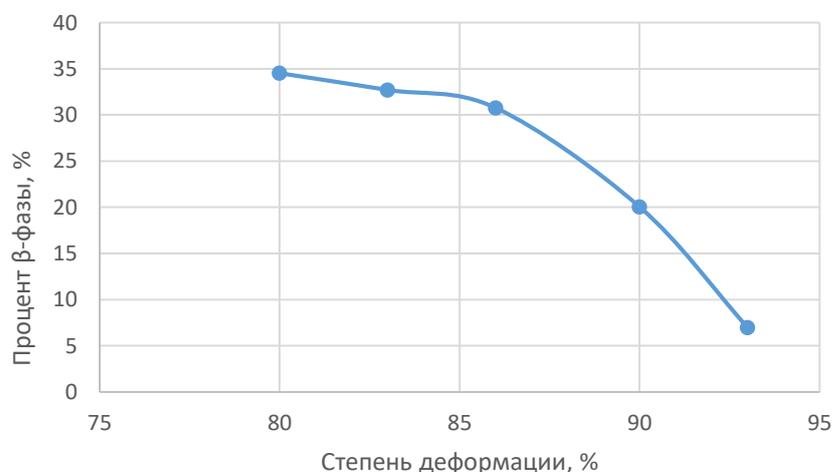


Рис. 8. Диаграмма зависимости процента β -фазы, занимаемой от всей площади шлифа, от степени деформации

Из представленных в таблице 1 результатов, видно, что фазовый состав образцов имеет в своей структуре α - и β -фазы, причём процент β -фазы во много раз меньше α -фазы, и с увеличением степени деформации количество β -фазы уменьшается.

2.4 Исследование влияния степени деформации на свойства α - и β – фаз.

Было проведено исследование влияние степени деформации на физикомеханические свойства (твёрдость и пластичность материала) методом **инструментального индентирования.**

Инструментальное индентирование проводили при непрерывном внедрении индентора алмазной пирамиды Виккерса в α - и β -фазы образцов исследуемого сплава при постоянной нагрузке (F) 50 мН. Время нагружения 30 сек, а затем алмазную пирамиду Виккерса отводили до полной потери контакта с образцом. Во время всего испытания в виде диаграмм регистрировались значения нагрузки (F) и глубины погружения (h) индентора (рис. 9, а).

Непрерывное измерение значений глубины внедрения индентора от перемещения этого индентора при нагружении и снятии нагрузки позволяет определить следующие свойства сплава: значения инструментальной твёрдости (H_{IT}), глубины погружения индентора (h), работы пластической деформации W_{plast} , работа упругой деформации W_{elast} , механической работы W_{total} при индентировании.

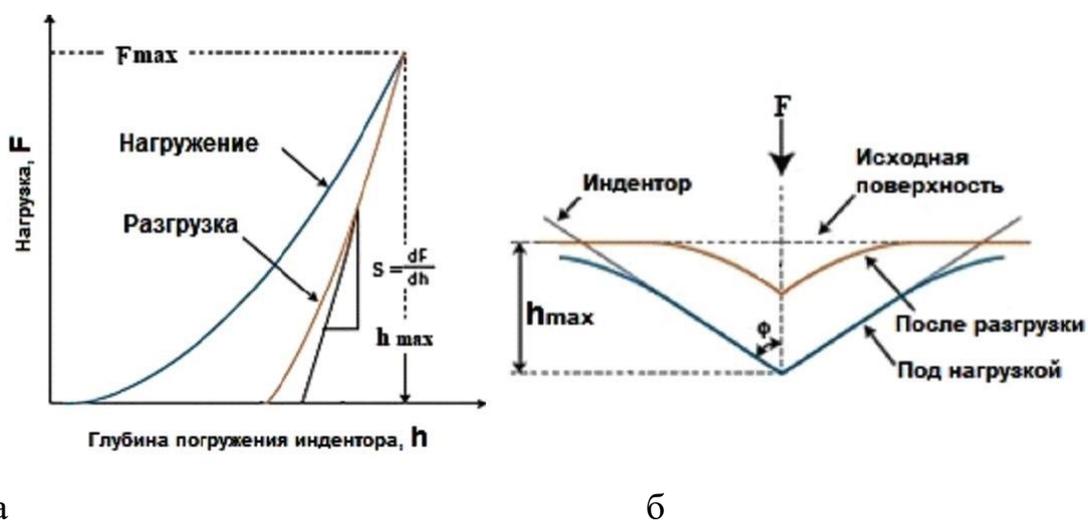


Рис. 9. а - Диаграмма индентирования – зависимость нагрузки от глубины внедрение, б - Схема продольного сечения зоны индентирования

При снятии приложенной нагрузки (остановке инструмента) часть работы упругой деформации исчезает, что сопровождается выделением энергии и восстановлением микрорельефа поверхности (рис. 9, б) [23, 24].

Результатами измерений при индентировании всех характеристик для каждой фазы и каждой степени деформации являются диаграммы зависимости нагрузки F_n (Н) от времени t (с) и диаграммы зависимости глубины индентирования h (мкм) от времени t (с). Также на основании полученных диаграмм можно построить общую диаграмму зависимости нагрузки F_n от глубины индентирования h .

Графики результатов, обработанные и приведенные к среднему значению, представлены на диаграммах зависимостей нагрузки F_n от глубины индентирования h для каждой фазы (см. рисунки 10.а - 10.б).

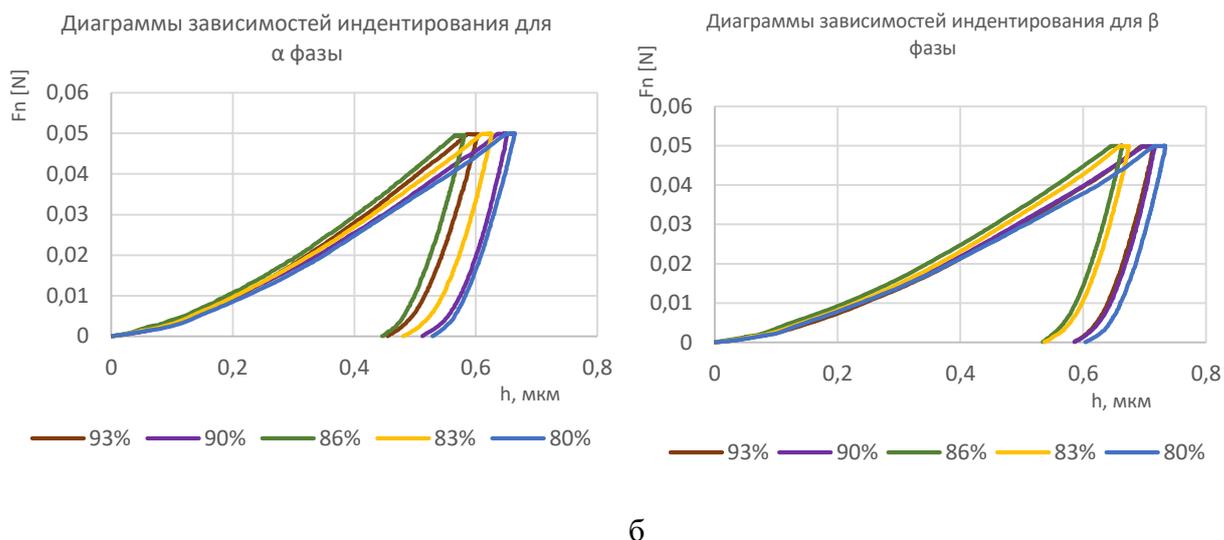


Рис. 10. Диаграмма зависимостей нагрузки F_n от глубины индентирования: а - для каждой степени деформации для α -фазы, б - для каждой степени деформации для β -фазы.

Из приведенных графиков можно получить всю информацию о свойствах материала. Рассмотрим влияние степени деформации на твёрдость и пластичность материала.

По глубине внедрения h_{\max} можно судить о твердости материала: чем меньше глубина внедрения, тем больше сопротивления материала, соответственно, больше твердость. Из рисунков 10.а – 10.б видим, что глубина внедрения α - фазы меньше глубины внедрения β -фазы при всех степенях деформации. При этом глубина внедрения уменьшается до 86% деформации, затем увеличивается до 90% и снова уменьшается. Диаграммы глубины индентирования приведены на рисунке 11. а. Разница глубин внедрения между фазами α и β больше всего отличается при степени деформации 86% и 93%, следовательно, и твердость больше всего отличается между фазами при этих степенях деформации, что подтверждается диаграммами зависимости твердости инструментальной H_{IT} , МПа от степени деформации ε , % (см. рис. 11. б). Исходя из результатов по глубине внедрения, мы можем сказать, что твёрдость самая высокая для α - фазы при степени деформации 86%, для β - фазы, а низкая твёрдость при степени деформации 80% для обеих фаз.

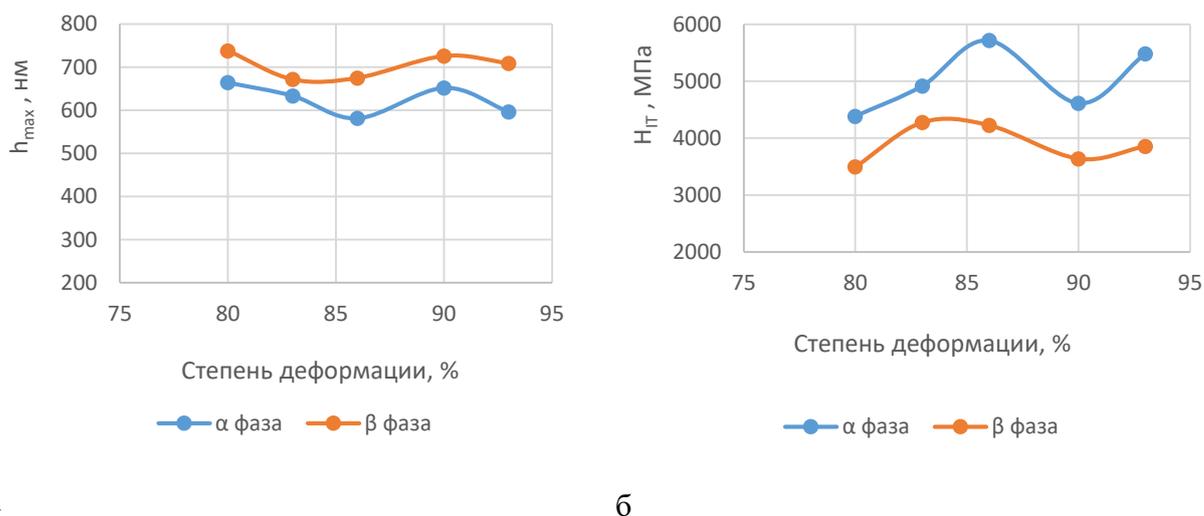


Рис. 11 Диаграмма зависимостей: а - Максимальной глубины индентирования от степени деформации, б - Твердости индентирования от степени деформации

Далее рассмотрим влияние степени деформации на пластичность материала. Остаточная глубина отпечатка после снятия нагрузки h_p говорит о пластичности поверхности материала: чем меньше h_p , тем больше восстанавливается материал после снятия приложенной нагрузки, и тем материал менее пластичный и более эластичный.

Из рисунков 10. а, б видно, что глубина отпечатка после снятия нагрузки h_p α -фазы меньше глубины отпечатка после снятия нагрузки β -фазы при всех степенях деформации. То есть α -фаза менее пластичная, чем β -фаза при каждой степени деформации. Если сравнивать между собой глубины отпечатка после снятия нагрузки степеней деформации для β -фазы, то видим, что глубина отпечатка после снятия нагрузки уменьшается до 86%, затем увеличивается. Для α -фазы глубина отпечатка после снятия нагрузки возрастает до 83%, затем снижается до степени деформации 86%, после возрастает до 90%, и затем снижается. Таким образом, для β -фазы более пластичной является степень деформации 93% и менее – 86%, а для α -фазы более пластичной является степень деформации 90% и менее – 86%. Наглядно результаты изображены в виде диаграмм на рисунке 12.

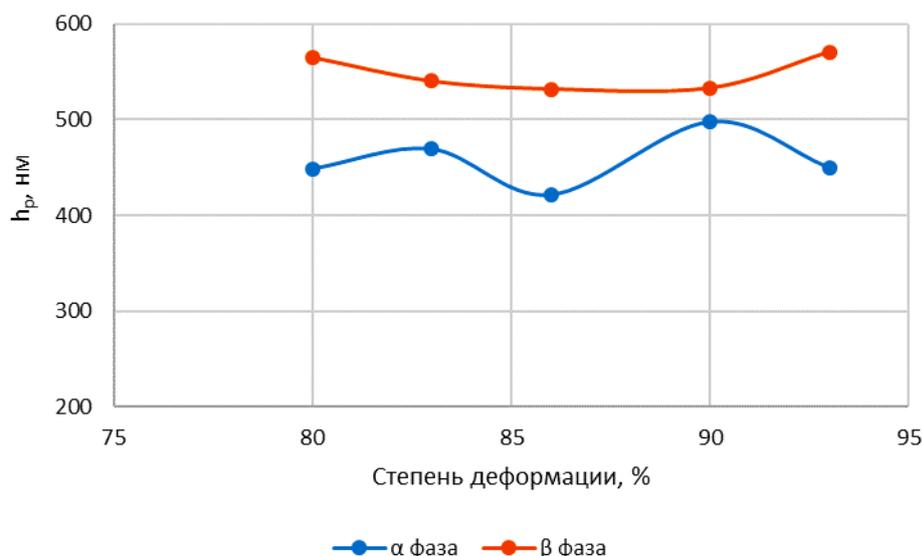


Рис. 12. Диаграмма зависимости остаточной глубины отпечатка после снятия нагрузки h_p от степени деформации

2.5 Исследование влияния высокотемпературной деформации на трибологические свойства титанового сплава

В работе исследовались образцы титанового сплава 3М со степенью деформации 80%, 86%, 93%. Испытания проводилась на приборе Micro Indentation Tester CSM, обеспечивающее возвратно-поступательное движение трущихся тел. Процесс трения происходил между стальным шариком диаметром 3 мм и образцами титанового сплава 3М (применена модель контакта сфера-плоскость). Испытания материала были проведены в условиях сухого трения и жидкого трения (трения с биологическим маслом) при нагружении от 30 мН до 10 Н. В ходе испытания исследовали глубину внедрения P_d и остаточную глубину R_d после упругой релаксации поверхности образца.

На рисунке 13 приведены графики результатов проведения трибологических испытаний (исследований на царапину (Scratch), на которых видно, что при разной степени деформации и разном виде трения материал

имеет разные пластические свойства (разную эластичность). Рассмотрим более подробно полученные результаты.

По графикам глубины внедрения Pd при разных степенях деформации при сухом трении и трении с биологическим маслом видно, что при увеличении нагружения (от 30 мН до 10Н) вдоль царапины, длиной 2 мм, происходит увеличение глубины внедрения не зависимо от степени деформации и вида трения.

Сравнивая графики степеней деформации между собой можно увидеть, что при сухом трении с увеличением степени деформации увеличивается глубина внедрения. А при трении с биологическим маслом глубина внедрения немного уменьшается, а затем увеличивается с увеличением степени деформации.

Графики глубины внедрения Pd - «ступенчатые», это указывает на образование частиц фрикционного переноса при увеличении нагружения во время проведения испытания. Анализируя диаграммы, видно, что скопление частиц фрикционного переноса увеличивается с увеличением степени деформации при обоих видах трения. Таким образом, мы можем судить о механизме изнашивания материала.



Рис. 13. Графики результатов проведения трибологических испытаний: исследований на царапину (Scratch) образцов со степенью деформации 80%, 86% и 93%

Далее рассмотрим, как ведёт себя материал после снятия нагрузки. На рисунке 13 приведены графики релаксации (восстановления) материала R_d при разных степенях деформации при сухом трении и трении с биологическим маслом. Анализируя полученные диаграммы, можно сделать вывод о том, что материал восстанавливается лучше при трении с биологическим маслом.

Проанализировав диаграммы P_d и R_d , можно заметить, что восстановление материала наименьшее при степени деформации 80%. Таким образом, при меньшей степени деформации материал более пластичный (и менее твёрдый). Следовательно, с увеличением степени деформации сплав становится более твёрдым и менее пластичным.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

1) Механические свойства в целом улучшаются с увеличением степени высокотемпературной деформации.

2) Изучив микроструктуру образцов титанового сплава 3М, видим, что с увеличением степени горячей деформации структура металла становится более однородной. Микроструктура при деформации 80% имеет пластинчатое строение (колония чередующихся α - и β -фаз), а при деформации 93% уже имеет глобулярное строение, выраженное в основном α -фазой. Процесс рекристаллизации, превращение β -фазы в α -фазу, виден при деформации 90%.

3) Фазовый состав титанового сплава изменяется под влиянием высокотемпературной деформации: с увеличением степени деформации процентное содержание α - фазы возрастает, а β - фазы снижается с 34,52% до 6,99%.

4) Исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства фаз титанового сплава 3М показало следующее: α - фаза более твердая (менее пластичная), чем β - фаза. Твёрдость самая высокая для α - фазы при степени деформации 86%, для β - фазы – 83%, а низкая твёрдость при степени

деформации 80% для обеих фаз. В целом, твердость сплава с увеличением степени деформации улучшается.

5) Исследование влияния высокотемпературной деформации на эксплуатационные свойства сплава 3М показало, что с увеличением степени деформации титановый сплав становится более твёрдым и менее пластичным. Так же материал восстанавливается лучше при трении с биологическим маслом, чем при сухом трении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сенкевич К.С. Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинолаобзор// Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2017. № 4. С. 71-78.
2. Мухаметрахимов М.Х. Применение наноструктурных материалов из титанового сплава вт6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности// Сб. Кайбышевские чтения. Сборник докладов I межвузовской молодежной научной школы-конференции. 2018. С. 109-114.
3. Федулов В.Н. Режимы упрочнения высокопрочного ($\alpha+\beta$)-титанового сплава вт23 для применения в авиационной технике // Литье и металлургия. 2018. № 3 (92). С. 141-147.
4. Илларионова А.А. Титан и его применение в строительных и архитектурных сооружениях// В сборнике: Уральская школа молодых металлургов. материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Из-во: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. С. 306-309.
5. Niinomi Mitsuo, Kazuo Kagami. Recent topics of titanium research and development in Japan. «Ti-2015. Science and technology». Proceedings of the 13th World conference on titanium. San Diego. USA// The Minerals, Metals and Materials Society. 4 (2016) 27–40.
6. J. Li, J.Zhou, A. Feng, S. Huang, X. Meng, Y. Sun, Y. Sun, X. Tian and Y. Huang, Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature. Materials Science & Engineering A, (734) (2018) 291-298
7. L.C. Zhou, Y.H. Li, W.F. He, G.Y. He, X.F. Nie, D.L. Chen, Z.L. Lai, Z.B. An, Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening, Materials Science & Engineering A, (578) (2013) 181-186.

8. R. Shi, Z.H. Nie, Q.B. Fan, F.C. Wang, Y. Zhou, X. Liu, Correlation between dislocation-density-based strain hardening and microstructural evolution in dual phase TC6 titanium alloy, *Materials Science & Engineering A*. 715 (2018) 101-107.
9. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Применение высокочастотных установок при формировании структурно-механических свойств сортового проката//Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 11. С. 509-514
10. Калетина Ю.В., Грешнова Е.Д., Калетин А.Ю., Пилюгин В.П. Влияние деформации на структуру и свойства сплава Гейслера Ni47Mn42In11//ВЕСТНИК ПНИПУ 2018 Т. 20, № 2. С.5-11
11. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Влияние кручения на степень сдвиговой деформации при различных способах волочения круглой проволоки// Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 25. С. 52-58.
12. Тамаркин М.А., Шведова А.С., Тищенко Э.Э. Методика проектирования технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования// Вестник машиностроения. 2018. № 4. С. 78-83.
13. Панин П.В., Дзунович Д.А., Лукина Е.А. Расчет эталонных интегральных интенсивностей рентгеновской дифракции для α - и β -фаз в титановых сплавах// Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). С. 4.
14. Чаусов Н.Г., Марущак П.О., Пилипенко А.П., Маркашова Л.И. Влияние ударно-колебательного нагружения на механические свойства $\alpha + \beta$ титановых сплавов// Механика машин, механизмов и материалов. 2017. № 3 (40). С. 96-101.
15. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на механические свойства и структуру экспериментальной композиции высокопрочного псевдо- β -титанового сплава // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). С. 22-29.
16. Ляхов А.В., Гадалов В.Н., Макарова И.А., Ельников Е.А., Ерохин Р.Ю., Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Пантюхин О.В. Исследование влияния

термоциклической обработки на спеченные псевдо- α -титановые сплавы// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 219-227.

17. Макаров А.В., Скорынина П.А., Волкова Е.Г., Осинцева А.Л. Влияние нагрева на структуру, фазовый состав и микромеханические свойства метастабильной аустенитной стали, упрочненной наноструктурирующей фрикционной обработкой// Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 12. С. 1257-1264.

18. Яременко О.Б., Куранов А.Е., Васильцов С.Ю. Инструментальное индентирование как неразрушающий метод оценки механических характеристик конструкционных материалов// Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2020): Сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате. 2020. С. 274-278.

19. Скотникова М.А., Попов А.А., Иванова Г.В., Цветкова Г.В. Исследование свойств поверхности сплавов с помощью инструментального индентирования// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 5. С. 460-466.

20. Белый А . В ., Кукареко В . А ., Кононов А . Г . и др . // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 6. – С. 571–577.

21. Чертовских С . В . Триботехнические характеристики ультрамелкозернистого титана и его сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008.

22. В.М. Савостиков, А.И. Потекаев, А.Н. Табаченко, Е.Ф. Дударев, И.А. Шулепов, Физико-механические и трибологические свойства титановых сплавов с градиентным антифрикционным покрытием Ti–C–Mo–S, Известия высших учебных заведений. Физика, т. 55, № 9, 2012, с 71-77.

23. ГОСТ Р 8.748-2011 Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании

24. Попов А.А. Повышение износостойкости инструмента при механической обработке труднообрабатываемых заготовок: научный доклад. <http://elib.spbstu.ru>. 2020. 25с.

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

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК, Scopus, Web of Science

1. M.A. Skotnikova, G.V. Ivanova, A.A. Strelnikova «Macromechanism destruction of structurally and crystallographically textured titanium billets». Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, Volume 1097-1105 (**Scopus**)

2. M.A. Skotnikova, G.V. Ivanova, A.A. Strelnikova, A.A. Popov, I.S. Syundyukov «Localization of plastic deformation in austenitic steel at low-temperature cycling loading» Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020. С 175-182 (**Scopus**)

Публикации в других изданиях

3. M.A. Skotnikova, G.V. Ivanova, A.A. Strelnikova « Macromechanism destruction of structurally and crystallographically textured titanium billets». Сборник Трудов Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг -2019», Челябинск

4. M.A. Скотникова, Г. В. Иванова, А.А. Стрельникова, А.А. Попов, И.С.Сюндюков «Локализация пластической деформации в аустенитной стали при низкотемпературном циклирующем нагружении». Современное машиностроение. Наука и образование ММЕСЕ-2019, 20 июня 2019 г. т.8, 444-454, 2019

5. M.A. Скотникова, Г. В. Иванова, А.А. Стрельникова «Механизмы разрушения структурно и кристаллографически текстурированных титановых

заготовок на воздухе и в морской воде». Сб. трудов IV Всероссийская научно-техническая конференция «Климат-2019: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы». Геленджик, ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова. 16.05.2019 — 17.05.2019. 2019. С 147-160.

6. А.А. Стрельникова «Контроль качества производства заготовок деталей из конструкционной рессорно-пружинной стали». Сборник Тринадцатый всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах 23-25 октября 2019 года. С 61-63.

7. А.А. Стрельникова «Исследование механизмов разрушения структурно и кристаллографически текстурированных титановых заготовок для авиации и космонавтики». 11 Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. Москва, МАИ, 2019- 261с. С 234- 235

8. Стрельникова А.А. «Контроль качества производства заготовок цементуемых деталей, работающих на трение». Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2019 г. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. – СПб.: Изд-во ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – с.334. С. 118-121.

Аспирант _____ Стрельникова А.А.
(подпись)