

АРМИЯ 2017,

24 августа 2017 г.



*ФГБУН Институт физики
прочности и
материаловедения Сибирского
отделения Российской
академии наук, г.Томск*

Перспективные разработки ИФПМ СО РАН для авиакосмической техники

Д.ф.-м.н. Найденкин Е.В.,

Лаборатория физического материаловедения

Государственная политика РФ в области космической деятельности

Основные положения Основ государственной политики РФ в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, утв. Президентом РФ от 19.04.2013 г. № Пр-906

Задачи государственной политики в области космической деятельности по обеспечению гарантированного доступа России в космос предусматривают создание космического ракетного комплекса для осуществления запусков **космических средств нового поколения** на высокие околоземные орбиты, а также к Луне, Марсу, Юпитеру и другим небесным телам Солнечной системы.

Государственная программа Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013-2020 годы», утв. постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 306

В результате реализации Госпрограммы, до 2020 года должны быть начаты летные испытания **пилотируемого транспортного комплекса нового поколения**.

Разработка пилотируемого транспортного корабля нового поколения

ОАО «РКК «Энергия» разрабатывает пилотируемый транспортный корабль нового поколения.

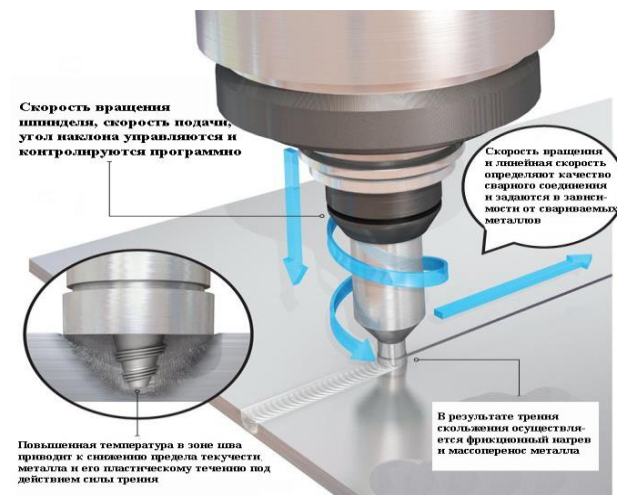
Корабль предназначен для доставки людей и грузов к Луне и на орбитальные станции, находящиеся на околоземной орбите.

Корабль является многоразовым, для его создания применяются **новейшие технологии**.

Корпус корабля планируется изготовить из современных высокопрочных алюминиевых сплавов с помощью технологии **сварки трением с перемешиванием**.

Сварка трением с перемешиванием позволяет получать соединения из новых, «несвариваемых» традиционными способами, алюминиевых сплавов.

Проблема: контроль качества сварных соединений и выявление дефектов, присущих сварке трением с перемешиванием.



Проект: Разработка высокоэффективной технологии контроля качества соединений, полученных методом сварки трением с перемешиванием

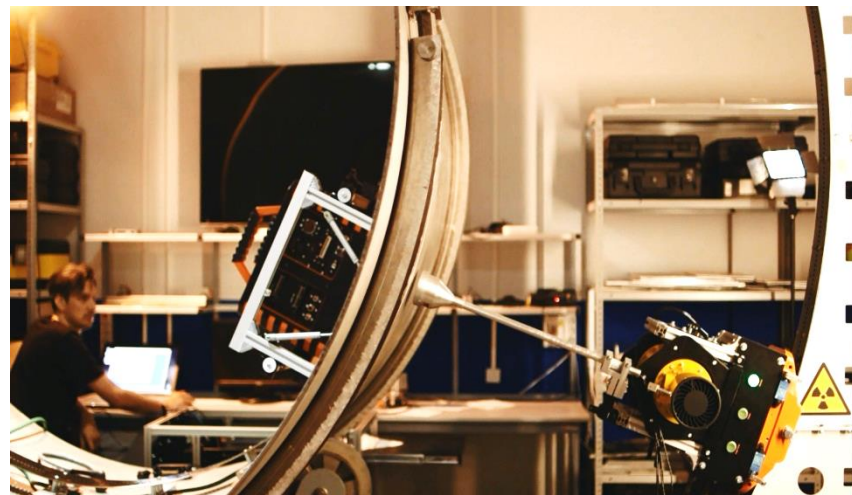
Проект реализован в 2013-2015 гг. в рамках постановления Правительства РФ № 218

Участники проекта

ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева»
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Результаты проекта

- ❑ В ОАО «РКК «Энергия» внедрены технология контроля качества и автоматизированный комплекс диагностики сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, для изготовления корпусных элементов ракетно-космической техники нового поколения
- ❑ Разработан стандарт предприятия на контроль качества сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, для изготовления корпусных элементов ракетно-космической техники нового поколения



Проект: Совершенствование технологии сварки трением с перемешиванием для формирования неразъемных соединений новых алюминиевых сплавов авиакосмического назначения

Проблема: Сложность подбора и соблюдения технологических режимов сварки высокопрочных алюминиевых сплавов для получения качественных бездефектных сварных соединений

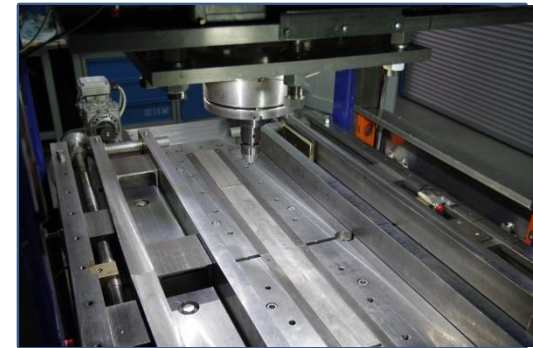
Проект реализуется в рамках ФЦП «ИиР 2014-2020 гг.», мероприятие 1.3, объем финансирования проекта 73,5 млн руб., в т.ч. 30 млн руб. – средства индустриального партнера

Участники проекта

ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель»

НИ Томский политехнический университет

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН



Результат

Разработана технология сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием позволяет **повысить прочность** сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов **на 10-20 %**

Ведутся работы по заключению договора на разработку и поставку на с ОАО «РКК «Энергия» комплекса сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием для изготовления корпусных элементов ракетно-космической техники нового поколения

Высокопрочные наноструктурные титановые сплавы, получаемые методами ИПД

		d_{cp} , мкм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
BT1-0	Крупнозернистое состояние	7	500	410	30
	Всестороннее прессование	0,46	870	820	15
ПТЗВ	Крупнозернистое состояние	6	780	770	22
	Всестороннее прессование	0,2	1240	1200	13
BT6	Крупнозернистое состояние	7	990	900	17
	Всестороннее прессование	0,18	1500	1400	12
BT22	Крупнозернистое состояние	200	1300	1200	8
	Всестороннее прессование	0,2	1640	1550	10

Проект: Разработка методов получения высокопрочных наноструктурных титановых сплавов для изготовления ответственных элементов конструкций космических спутниковых систем

Проект реализован в 2014-2015 гг. в рамках ФЦП ИР 2014-2020 гг.

Участники проекта

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

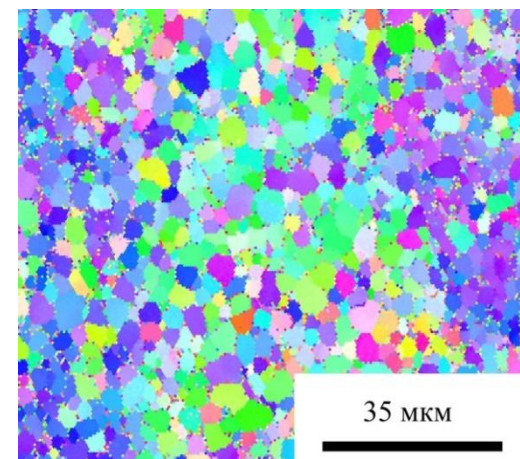
АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева – Индустриальный партнер

Результаты проекта

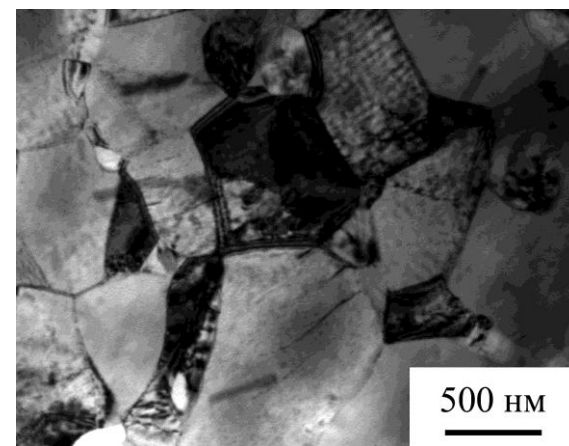
- ❑ Разработана технология получения высокопрочных круглых прутков титанового сплава BT22 с ультрамелкозернистой (нано-) структурой с использованием метода радиально-сдвиговой прокатки и последующего старения.
- ❑ Изготовлена и поставлена на АО «ИСС» опытная партия высокопрочных наноструктурированных прутков из титанового сплава BT22 диаметром 22 мм и длиной более 850 для изготовления высоконагруженных деталей и узлов авиакосмической техники.



Проект: Разработка методов получения высокопрочных наноструктурных титановых сплавов для изготовления ответственных элементов конструкций космических спутниковых систем



Показатель	Требование ТЗ	Результат
Диаметр прутка, мм	$22,0 \pm 0,5$	$22,0 \pm 0,5$
Длина прутка, мм	не менее 500	до 1000
Средний размер зерен, нм	не более 500	420 ± 70
Предел прочности, МПа	1470	1670
Предел текучести, МПа	1370	1570
Пластичность, %	не менее 6	6,3



Космический эксперимент «Пересвет» (в рамках МПО)

Ремонт стекол иллюминатора

Проблема: Образование кратеров при бомбардировке микрометеороидами ($\varnothing 50-60$ мкм) со скоростью 6-8 км/с

Нанесение многослойных защитных, прозрачных покрытий, разработанных в ИФПМ, снижает количество кратеров на 1 см^2 в 3 раза

В ИФПМ будут наноситься защитные покрытия на иллюминаторы космического корабля нового поколения «Федерация».



Задача: Разработать оборудование и технологию ремонта стекол иллюминаторов в условиях открытого космоса в дальних экспедициях.

Космический эксперимент «МДМ-диагностика» (в рамках МПО)

Исследование воздействия динамических нагрузок на корпусные элементы модуля российского сегмента Международной космической станции с использованием многоуровневого динамического моделирования

Участники: РКК «Энергия», ИФПМ СО РАН, ИМСС УрО РАН, ИМАШ УрО РАН, НГТУ.
Планируется участие ИГиЛ СО РАН и ИТПМ СО РАН

Сроки: 1 кв. 2017 г. - 4 кв. 2018 г.



Выбор критических элементов конструкции. Разработка алгоритмов ПО1 и ПО2, а также разработка вибростенда для комплексной системы определения динамических характеристик элементов конструкции

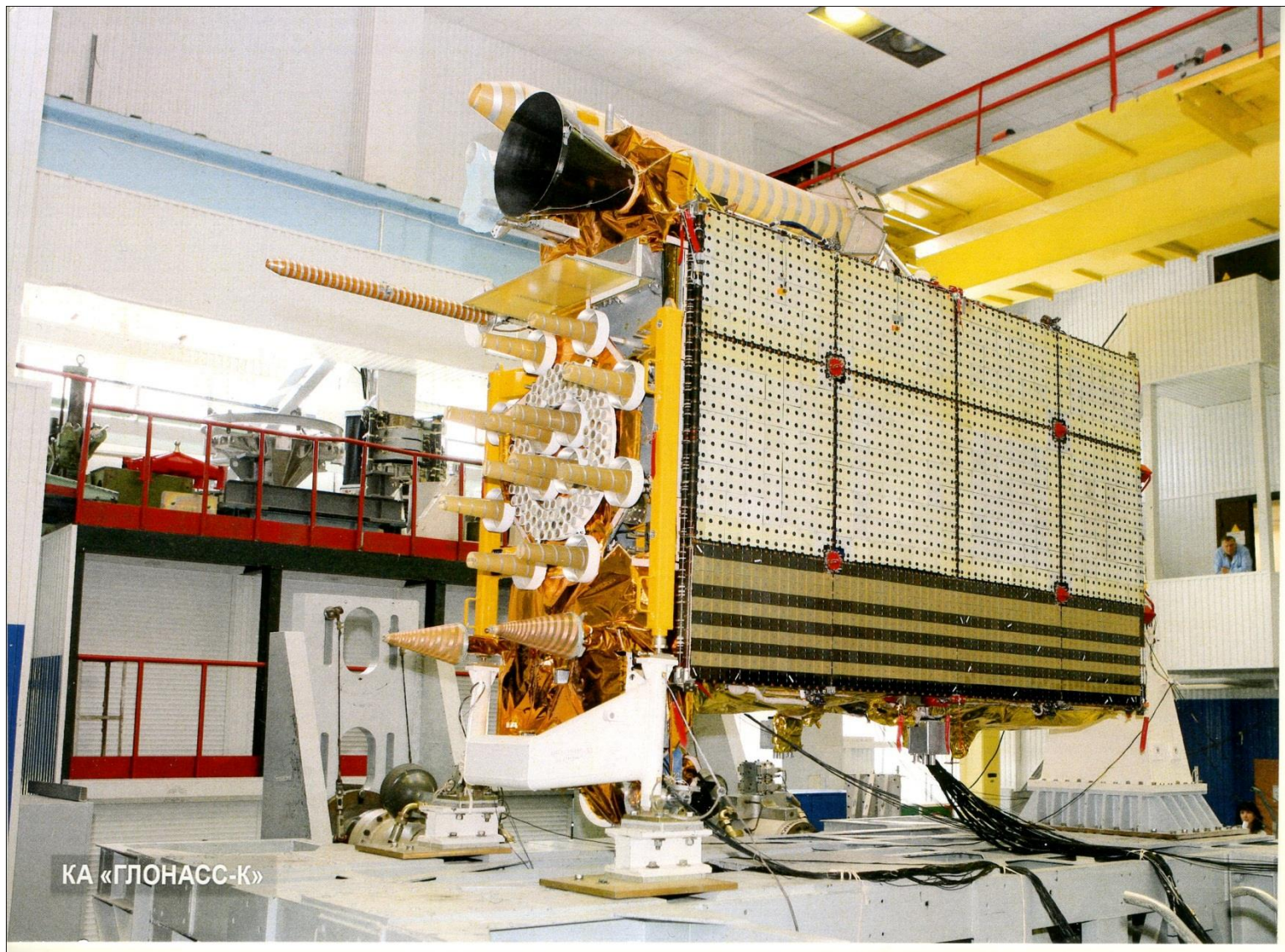
Экспериментальное исследование динамических и технических характеристик образцов элементов конструкции. Написание и отладка кода ПО1 и ПО2, изготовление вибростенда. Эскизный проект НА, экспериментальный образец НА, его испытания

Доработка ПО1 и ПО2. Создание МДМ модуля РКС. Изготовление летных и ГЛ-макетов НА

Проведение сеансов КЭ на модуле РС МКС

- Техническое задание на космический эксперимент (завершено)
- Научно-техническое обоснование (завершено)
- Техническое задание на научную аппаратуру (в работе)

Благодарю за внимание!



Цель работы:

Разработка титановых сплавов с ультрамелкозернистой (нано-) структурой и повышенной удельной прочностью на примере сплава BT22 с использованием методов интенсивной пластической деформации для изготовления ответственных элементов деталей и узлов ракетно-космической техники (в т.ч. спутниковых систем).

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»

1.2 Транспортные и космические системы

(Соглашение №14.604.21.0039, уникальный идентификатор проекта RFMEFIBBB14X0115)

Потребность в полуфабрикатах высокопрочного титанового сплава BT22 с ультрамелкозернистой структурой в виде прутков круглого сечения на АО "ИСС" имени академика М.Ф. Решетнева оценивается в настоящее время не менее 100 шт. в год и может увеличиться в случае утверждения новой Федеральной целевой программы космических исследований.

Преимущества использования титановых сплавов в авиакосмической промышленности

- высокая радиационная стойкость в интервале рабочих температур от минус 170°C до плюс 200°C;
- низкая активированность и быстрый спад во времени наведенной радиоактивности;
- высокая удельная и усталостная прочность;
- высокая коррозионная стойкость в природных средах до повышенных температур (до 400°C), в том числе в условиях радиационного воздействия;
- стабильность механических свойств при длительных выдержках;
- высокая технологичность, хорошая свариваемость различными видами сварки;
- пониженная намагничиваемость в магнитном поле (снижение электромагнитных помех)
- хорошая теплопроводность.

Технические требования в соответствии с ТЗ

- Хим. состав по ГОСТ 19807-91;
- диаметр прутка $22,0 \pm 0,5$ мм;
- длина прутка не менее 500 мм;
- средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры не более 500 нм (1-й тип по шкале микроструктур в соответствии с ГОСТ 26492–85);
- предел прочности не менее 1470 МПа (150 кгс/мм²);
- предел текучести не менее 1370 МПа (140 кгс/мм²);
- пластичность (деформация до разрушения) не менее 6%.

«Прутки предназначены для изготовления элементов высоконагруженных конструкций панелей БС, штанг и устройств отделения КА, изготавливаемых ОАО ИСС» (Технические требования ОАО «ИСС»).

Задачи, решаемые для достижения цели работы:

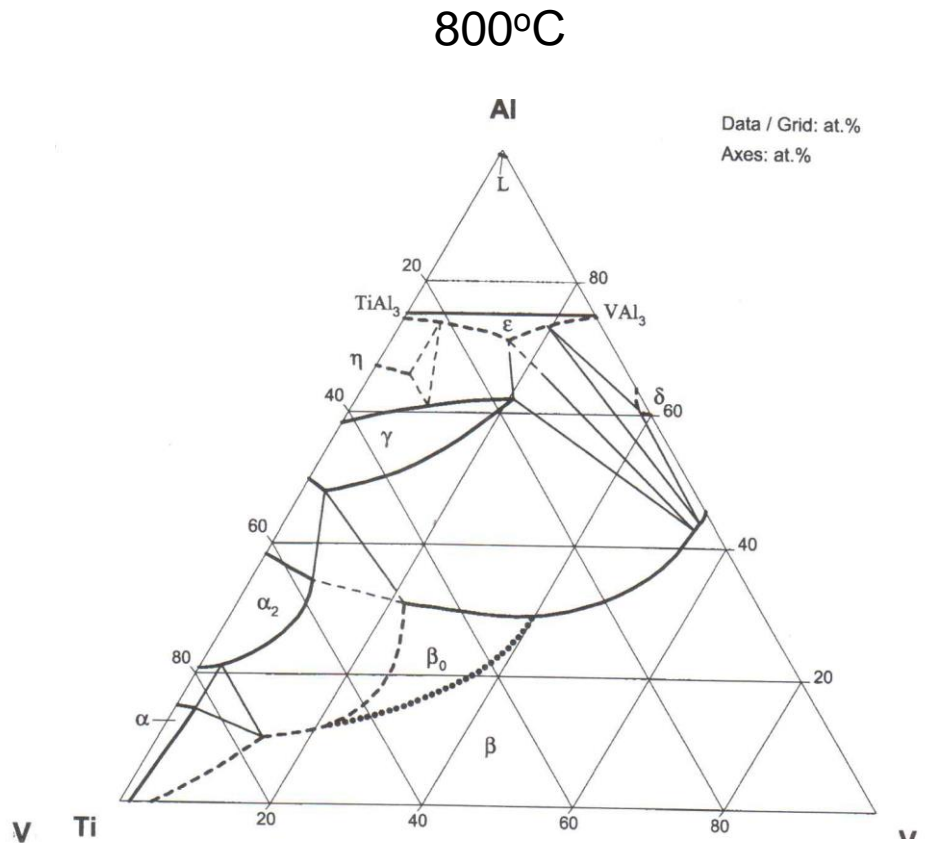
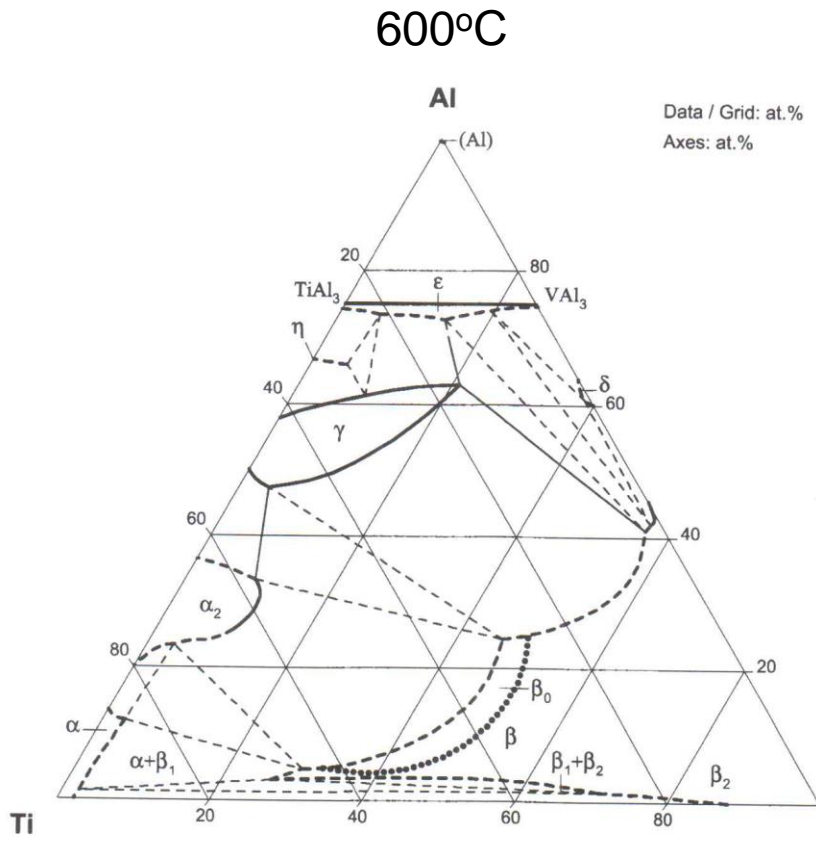
1. Разработка технологических режимов получения круглых прутков титанового сплава ВТ22 с ультрамелкозернистой структурой (температурно-скоростного интервала деформирования) и деформационная обработка указанного сплава методом радиально-сдвиговой прокатки в сочетании с термообработкой (старением);
2. Исследования структуры и фазового состава ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ22 после радиально-сдвиговой прокатки и последующего старения с использованием методов оптической металлографии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного и EBSD анализа;
3. Изучение механических свойств прутков круглого сечения титанового сплава ВТ22 с ультрамелкозернистой (нано-) структурой, полученной методом радиально-сдвиговой прокатки в сочетании с термообработкой.

Методики ИПД, структурных исследований и механических испытаний (оборудование)

- Обработка ИПД осуществлялась методом радиально-сдвиговой (поперечно-винтовой) прокатки на стане «14-40» (МИСиС);
- Старение проводили в печи типа *СНОЛ*;
- Оптическая металлография (*Olympus GX-71*);
- Растровая электронная микроскопия (*Quanta 200-3D*);
- Просвечивающая электронная микроскопия (*Jeol JEM 2100*);
- Рентгеноструктурный анализ (*Shimadzu XRD – 6000*);
- Анализ дифракции обратно-рассеянных электронов (*Quanta 200-3D* с приставкой *Pegasus*);
- Механические испытания на растяжение (*Instron 3369*) и сверхпластичность (*ПВ 3012-М*)

Диаграммы состояний системы Ti-Al-V

Хим. состав сплава переходного класса BT22:
4,74%Al, 5,57%Mo, 5,04%V, 0,81%Cr, 0,98%Fe,
основа Ti, % мас. (ГОСТ 19807-91)



Температура полного полиморфного β превращения $\sim 840^\circ\text{C}$

ИПД методом радиально-сдвиговой прокатки

Трехвалковый стан винтовой прокатки «14-40».

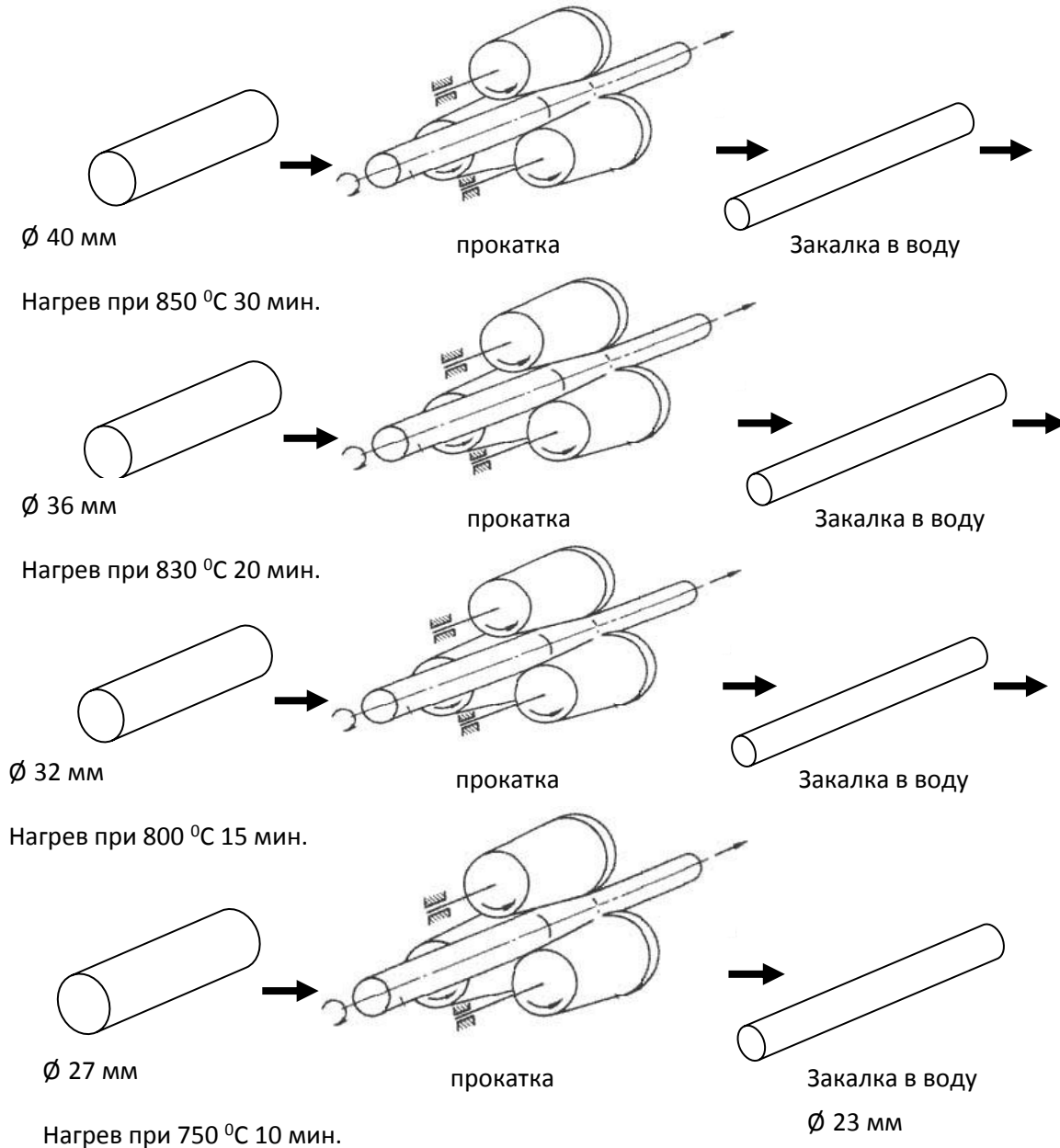


Определены технологические режимы радиально-сдвиговой прокатки ($850-650^{\circ}\text{C}$) в сочетании с низкотемпературной термообработкой (старением), и получены круглые прутки титанового сплава ВТ22 с УМЗ структурой диаметром 22 мм и длиной более 500 мм.

$$\dot{\epsilon} \sim 10^{-2} \text{c}^{-1}$$



Схема деформационно-термической обработки

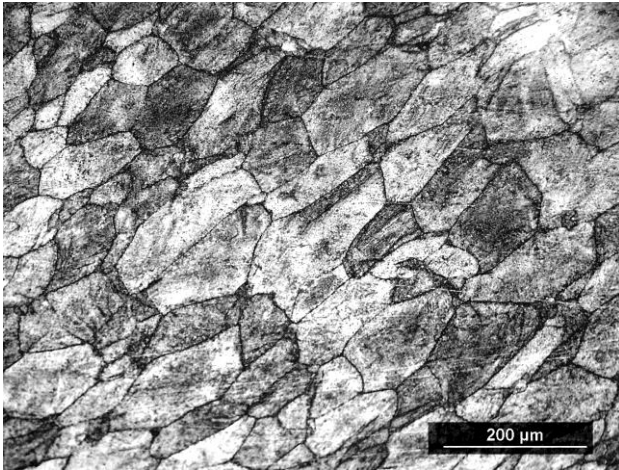


Коэффициент
вытяжки $K_v = 3,3$
($\epsilon = 1,2$).

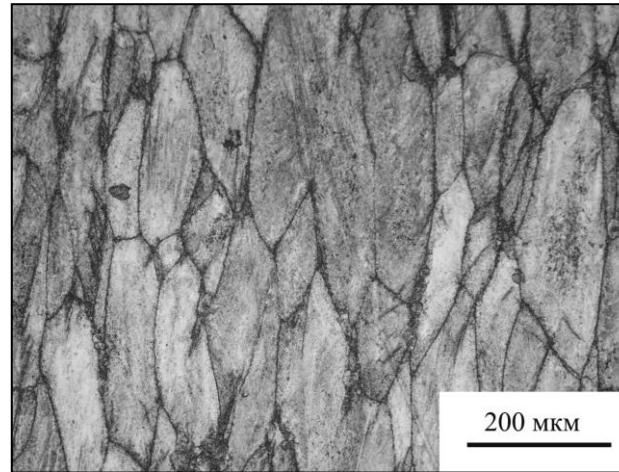
После радиально-
сдвиговой
прокатки прутки
сплава VT22
подвергались
старению в
интервале
температур 400-
500 °С.

Сплав ВТ22 в исходном состоянии

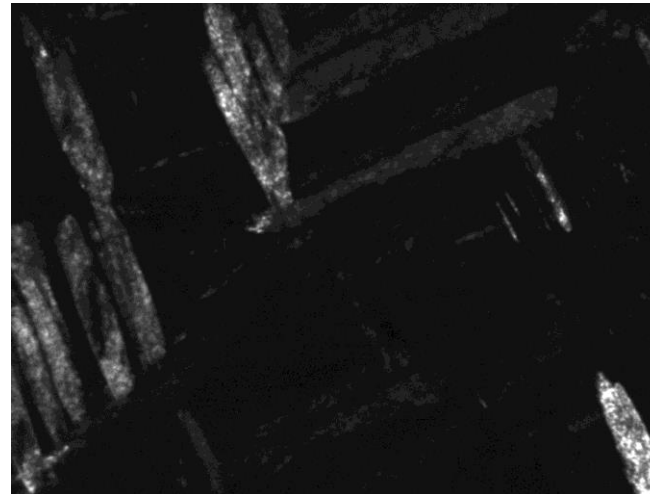
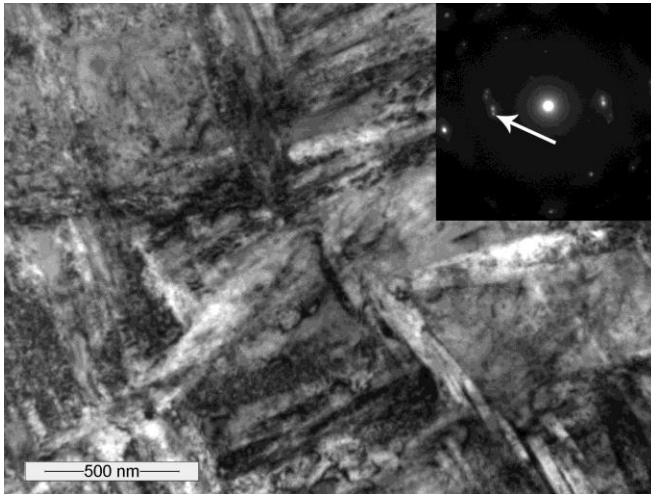
Поперечное сечение



Продольное сечение



$d = 50 \text{ мкм}$

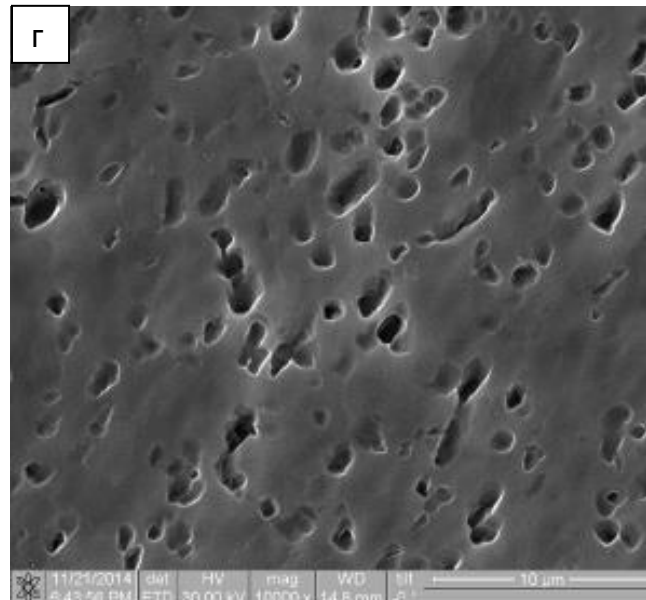
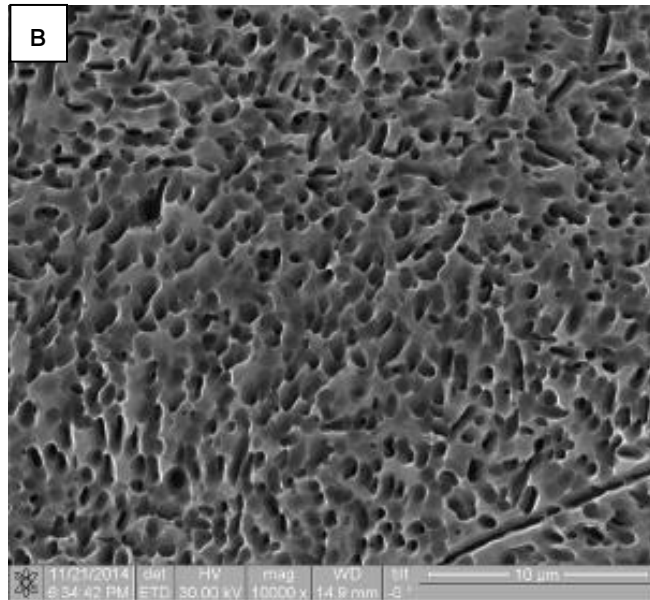
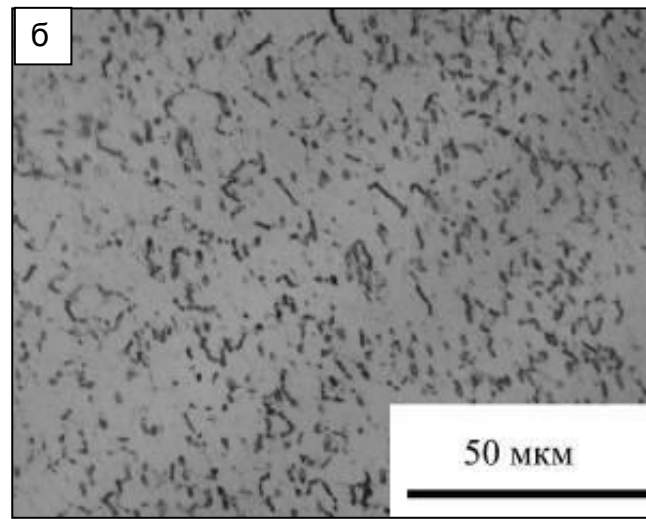
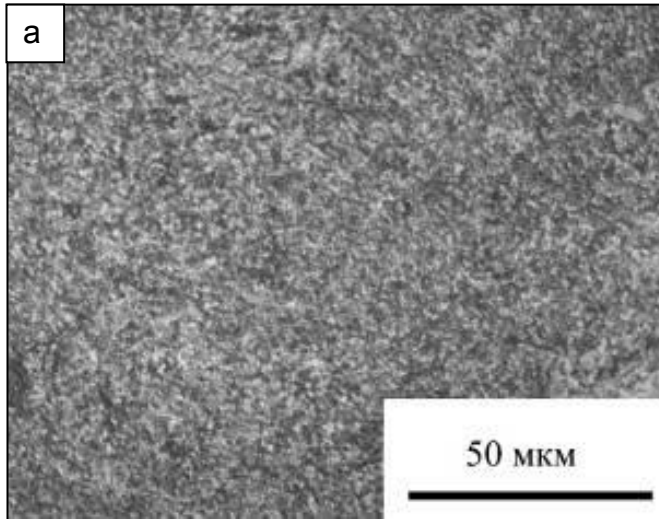


Толщина пластинок β -фазы около 100 нм с прослойками α -фазы толщиной 20-50 нм

Сплав ВТ22 после радиально-сдвиговой прокатки (режим 4)

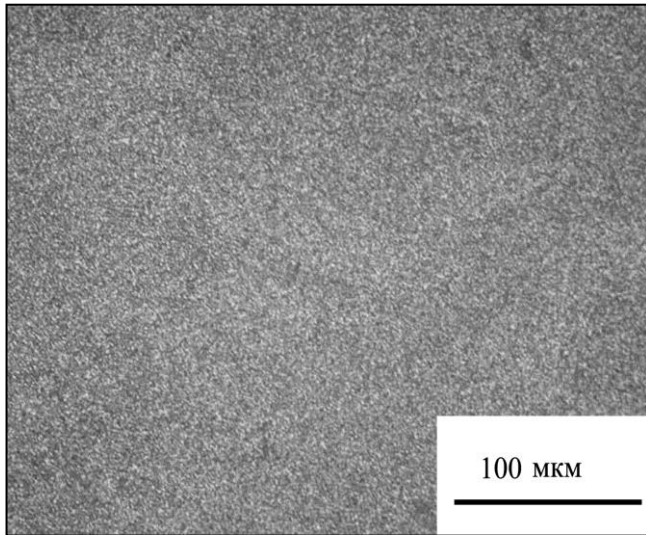
Центральная область

Периферийная область



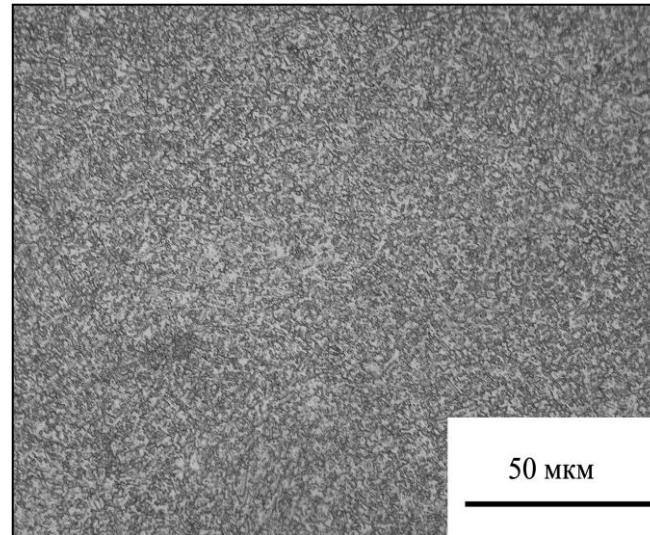
Сплав ВТ22 после радиально-сдвиговой прокатки (режим 6)

Поперечное сечение

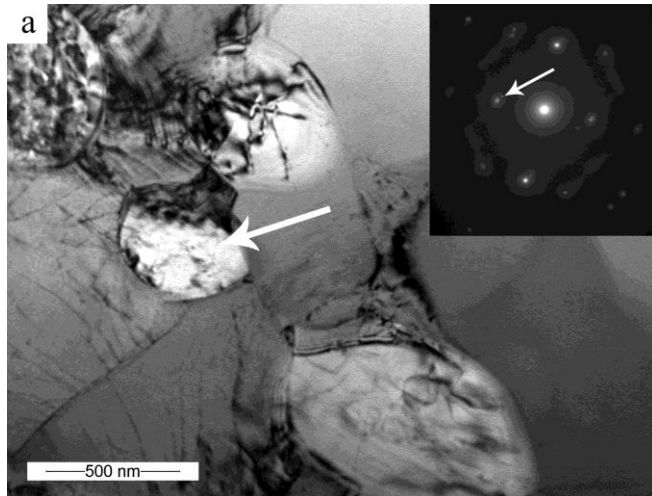


$d = 500$ нм

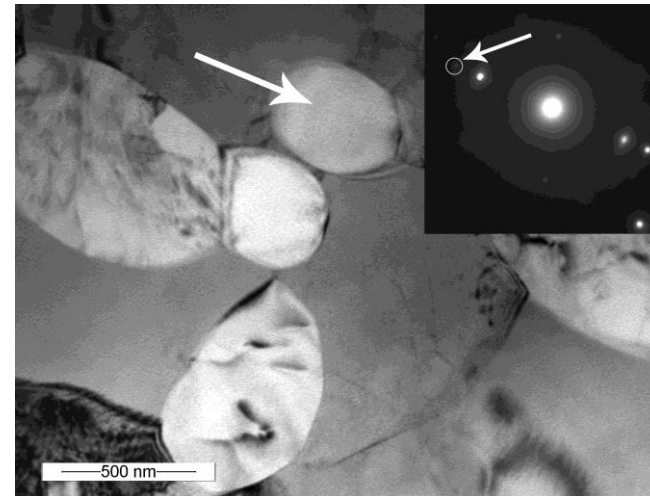
Продольное сечение



1-й тип по
шкале
микроструктур в
соответствии с
ГОСТ
26492-85



Стрелкой отмечена α -фаза



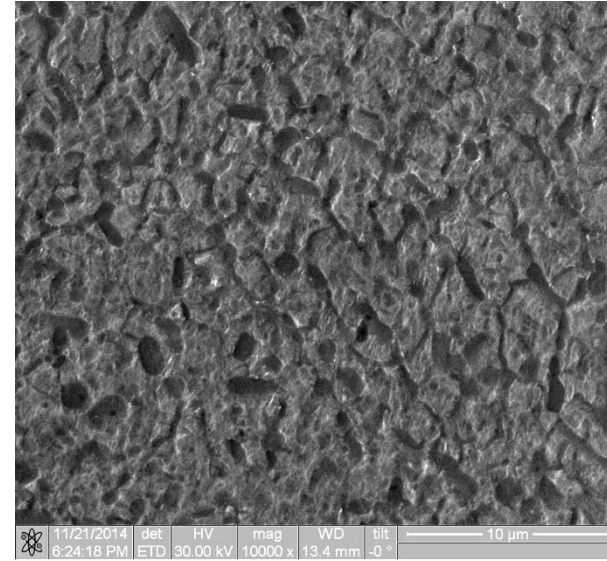
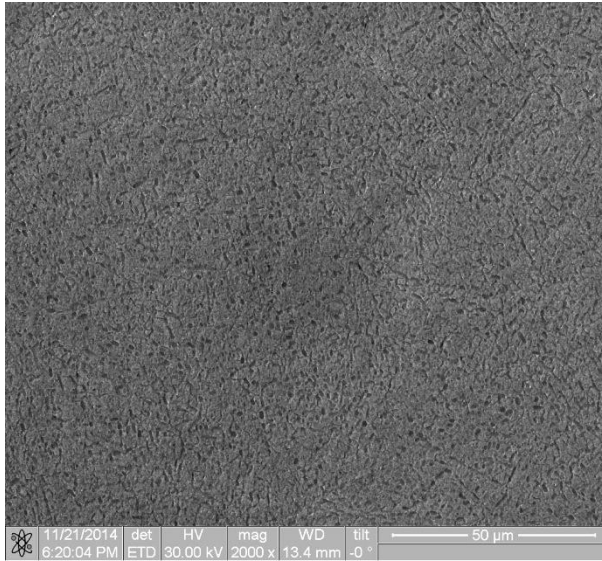
Стрелкой отмечена ω -фаза

Сплав ВТ22 после радиально-сдвиговой прокатки и отжигов

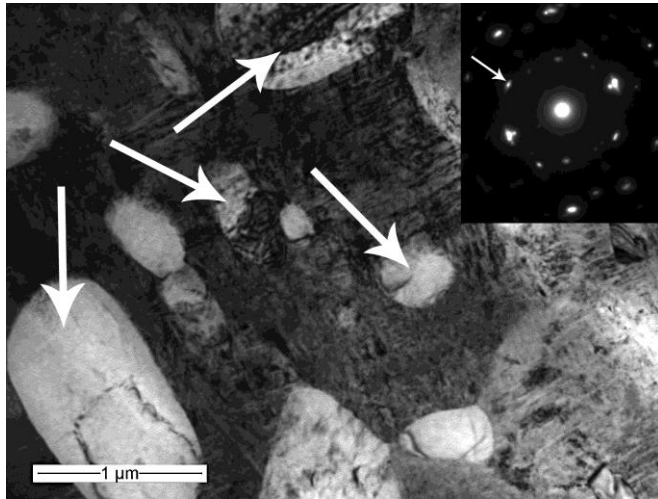
После прокатки и отжига 450°C, 5 часов

РЭМ

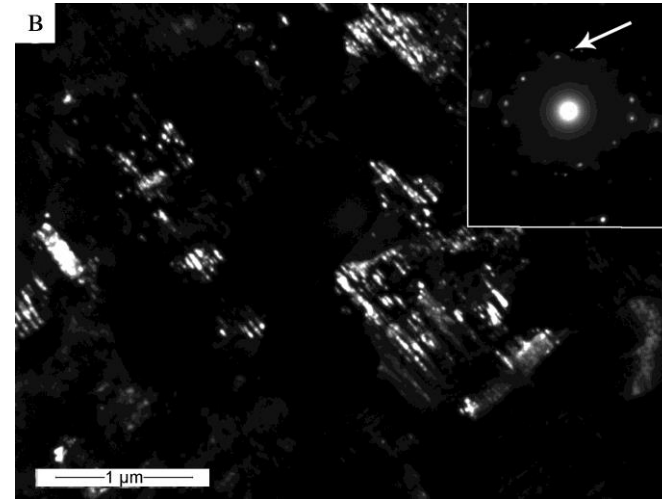
$d \sim 500$ нм



ПЭМ

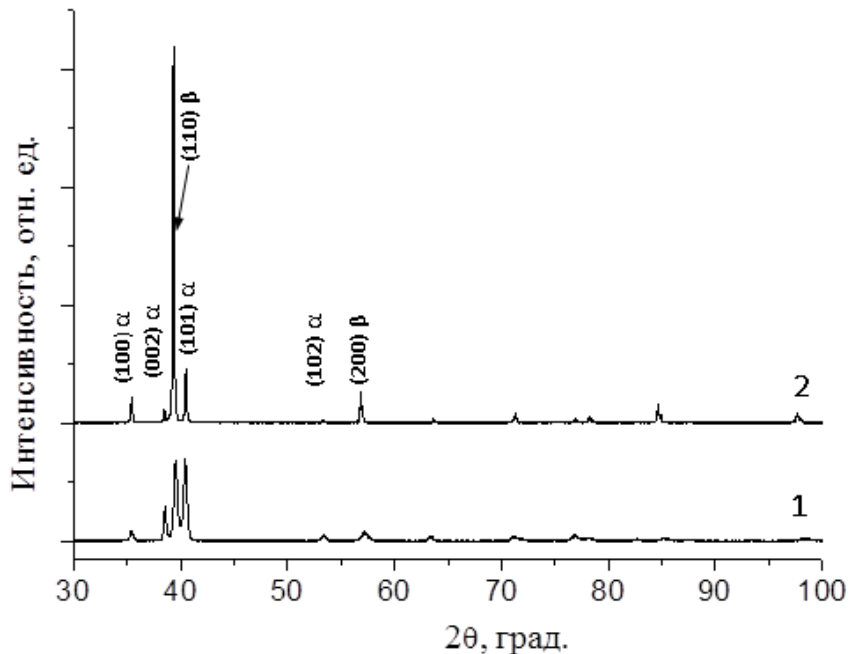


Стрелками отмечены зерна α -фазы (ω -фаза не выявляется).

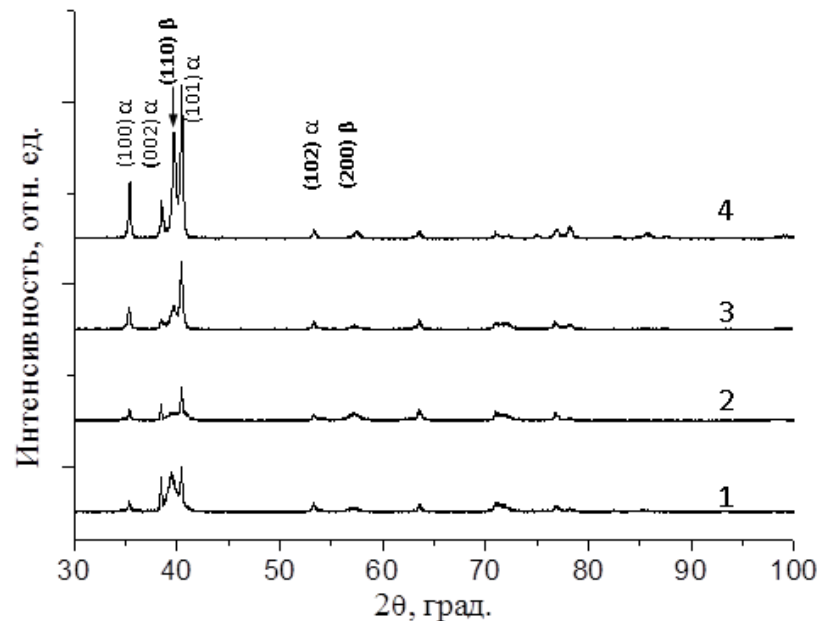


Темное поле в рефлексе $(111)_{\alpha}$ (показан стрелкой)

Рентгеноструктурный анализ сплава VT22



1 - исходное состояние, 2 – после радиально-сдвиговой прокатки



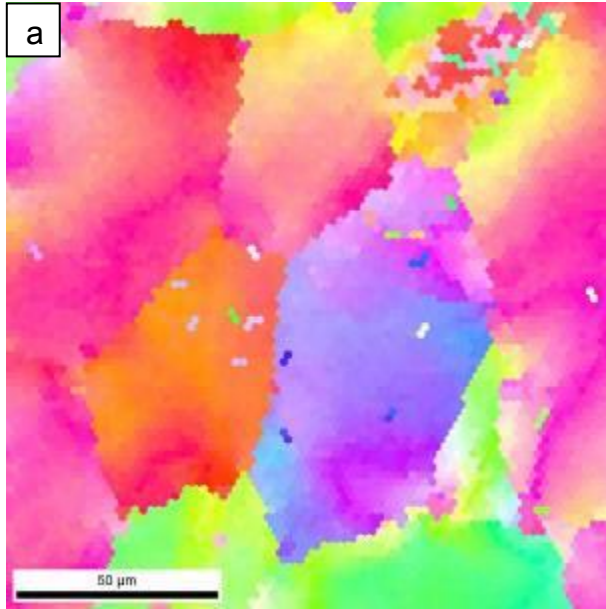
После РСП и последующих отжигов 5 часов: 1 – 400°C; 2 – 420°C; 3 – 450°C; 4 – 500°C

состояние	содержание фаз Ti _α / Ti _β , %	параметры решетки (a, c) Ti _α , нм	параметр решетки (a) Ti _β , нм	*ОКР, нм Δd/d Ti _α	*ОКР, нм Δd/d Ti _β
исходный	58/42	0,2932 0,4673	0,3226	55 6,1x10 ⁻⁴	-
прокатка 1_0	27/73	0,2928 0,4680	0,3242	-	-
прокатка+ отжиг 500 °С (5 часов)	57/43	0,2930 0,4673	0,3211	-	47 40,5x10 ⁻⁴

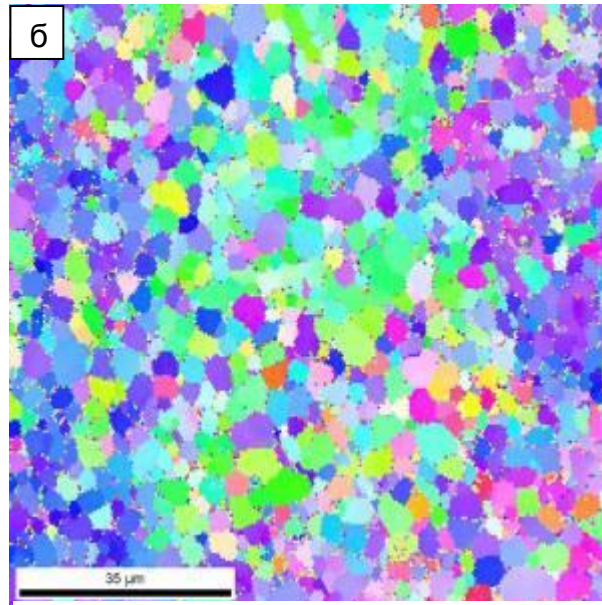
Последовательность фазовых превращений:
 $\beta \rightarrow \beta + \alpha + (\omega) \rightarrow \alpha + \alpha'' + \beta$

Исследования сплава BT22 методом EBSD анализа

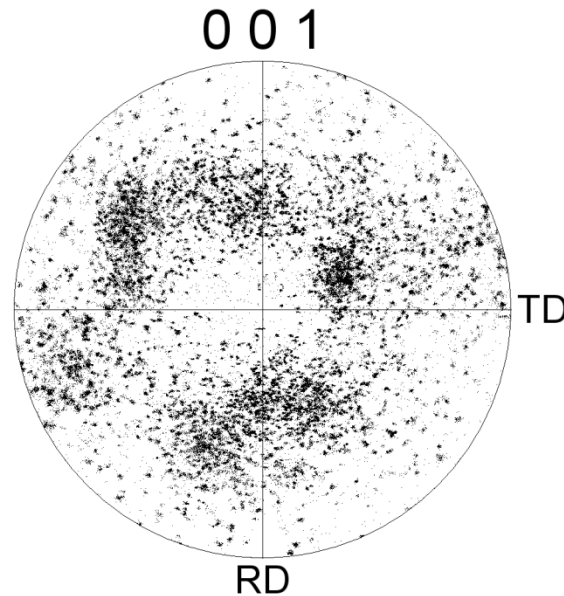
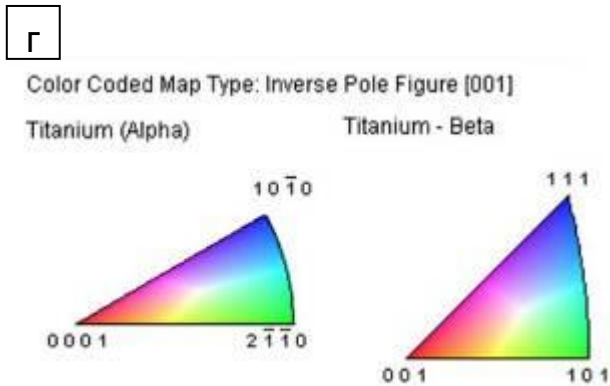
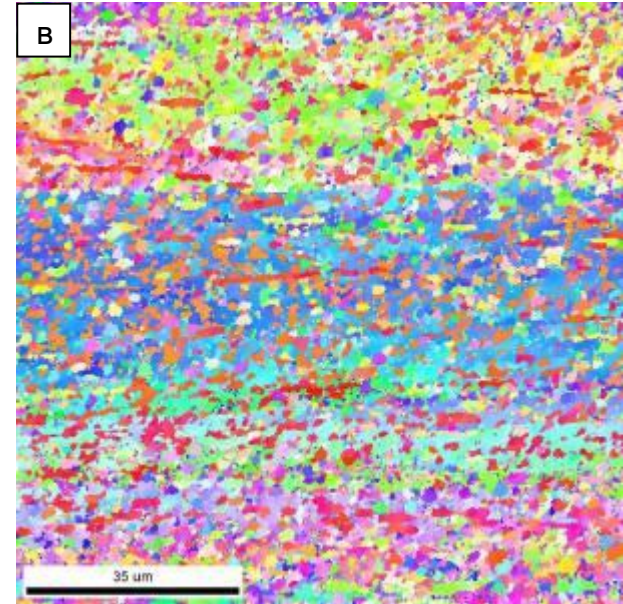
Исходное состояние



После винтовой прокатки



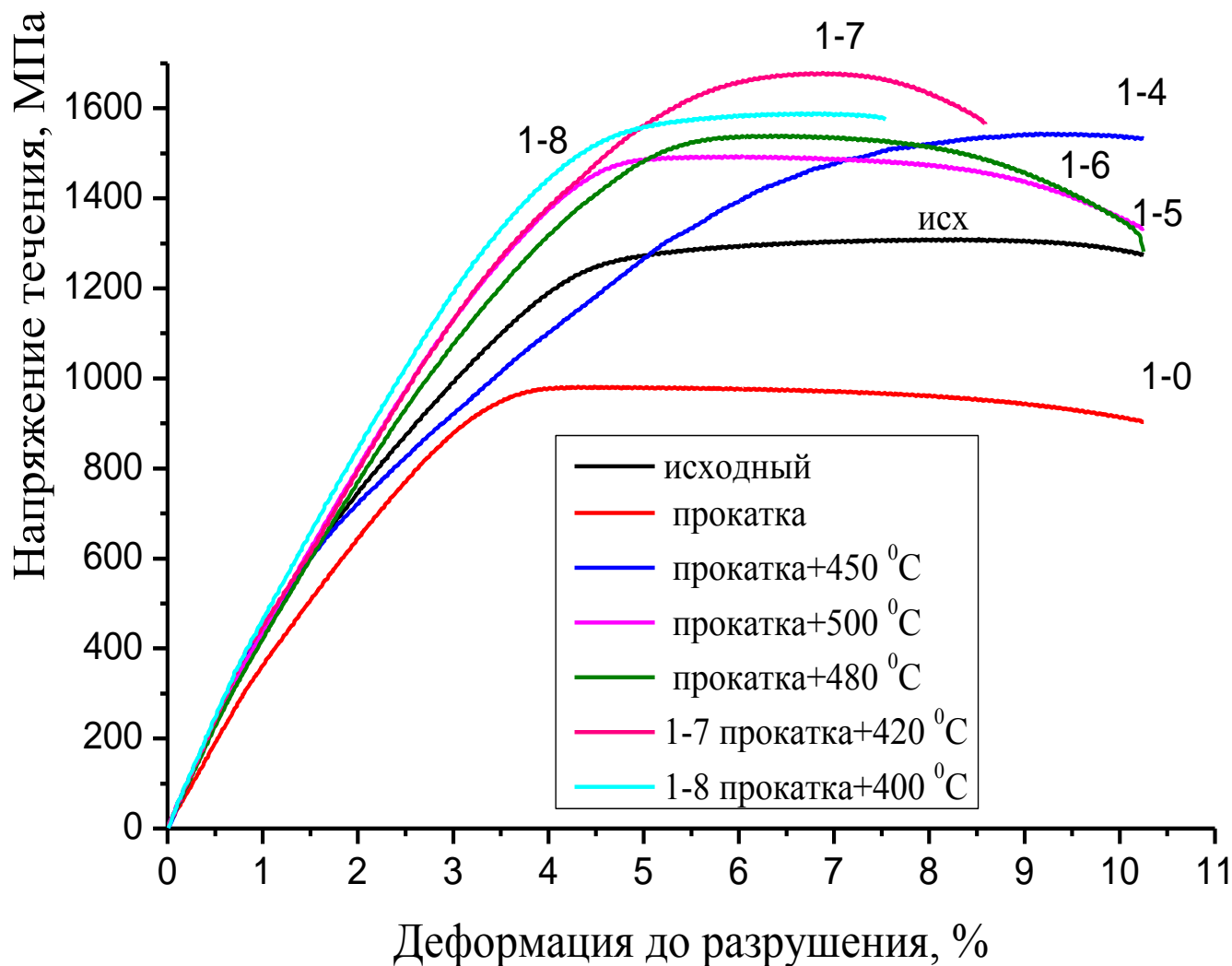
После РСП и старения



Прямая полюсная фигура (001) для β -фазы (поперечное сечение)

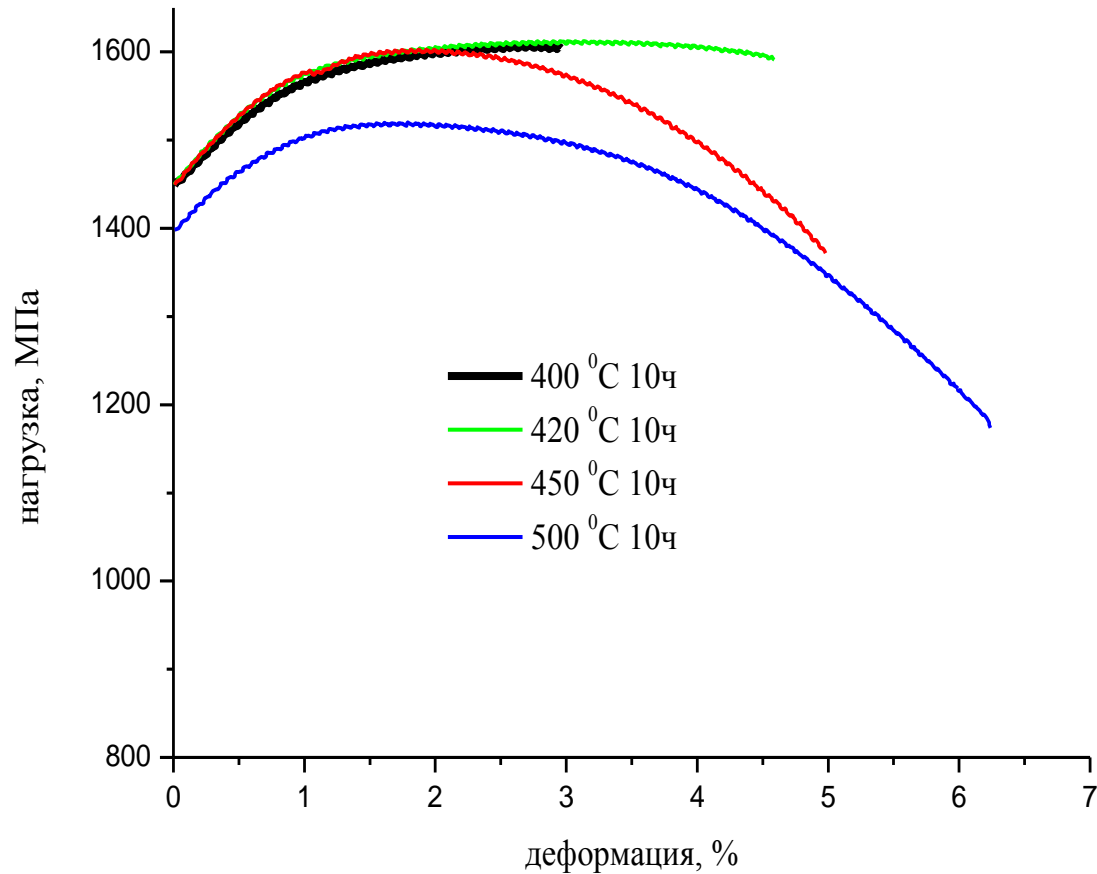
Текстура (001) \langle 110 \rangle

Механические свойства сплава ВТ22



Механические испытания показали возможность изготовления деталей и узлов из титанового сплава ВТ22 с ультрамелкозернистой (нано-) структурой путем механической обработки непосредственно после радиально-сдвиговой прокатки, когда сплав имеет наименее высокую прочность, с последующим упрочнением путем старения.

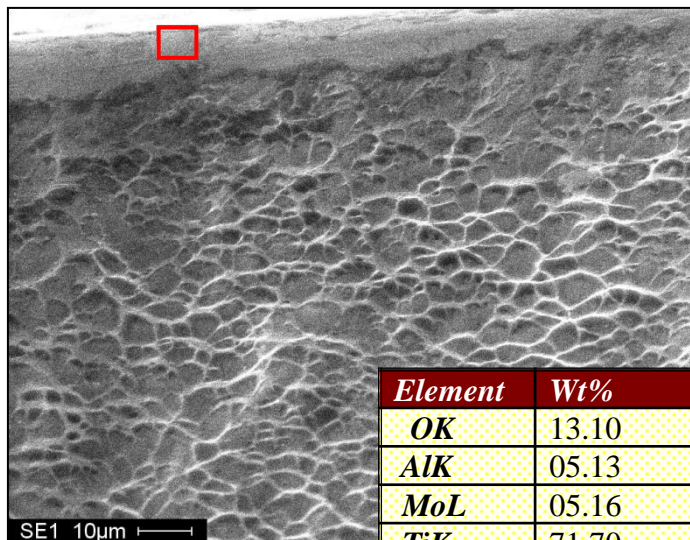
Механические свойства сплава ВТ22



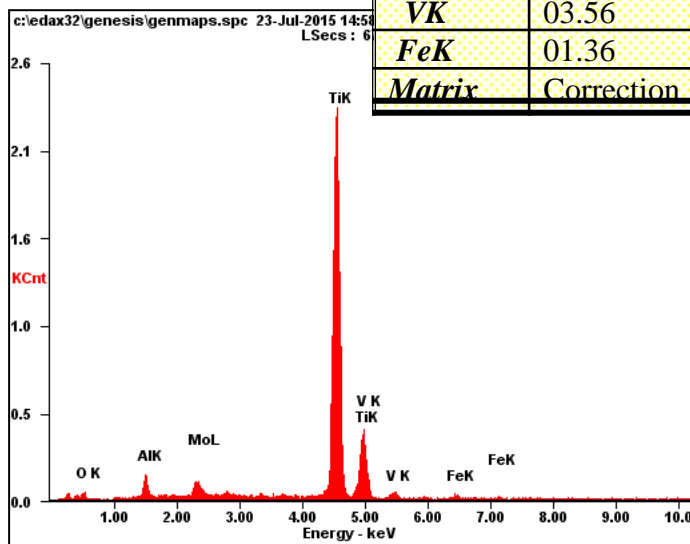
Режимы термообработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Прокатка 1 + старение 400 °C 10ч	1620	1450	3-4
Прокатка 1 + старение 420 °C 10ч	1610	1400-1450	5
Прокатка 1 + старение 450 °C 10ч	1620	1400	5
Прокатка 1 + старение 500 °C 10ч	1550	1400	7

Определение концентрации кислорода (толщины окисленного слоя) при старении

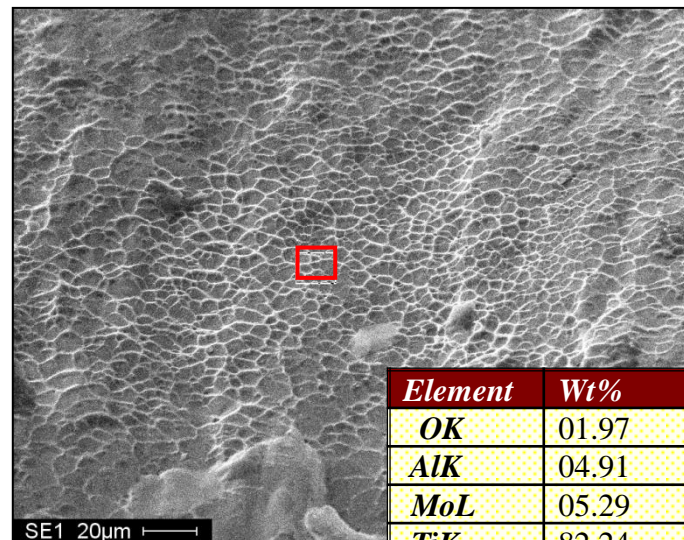
На поверхности



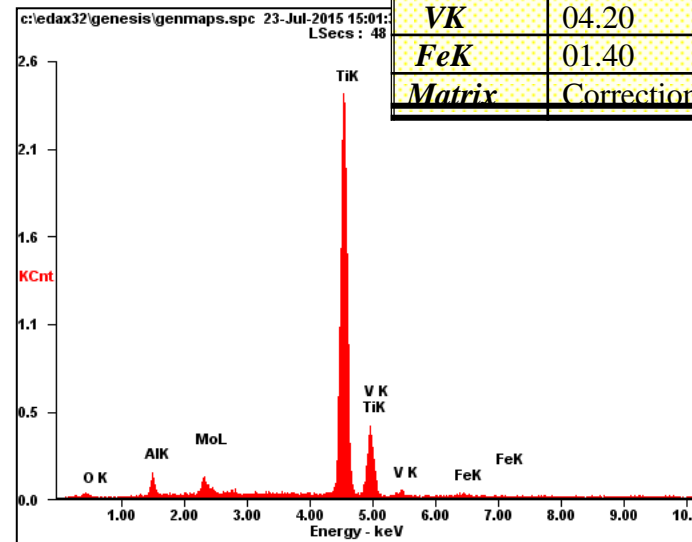
Element	Wt%	At%
OK	13.10	30.85
AlK	05.13	07.16
MoL	05.16	02.03
TiK	71.70	56.41
VK	03.56	02.63
FeK	01.36	00.92
Matrix	Correction	ZAF



На глубине 20 мкм

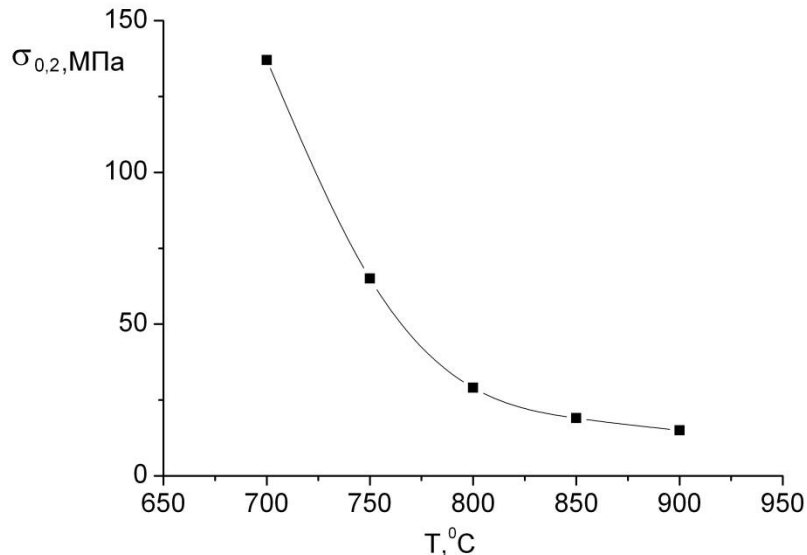
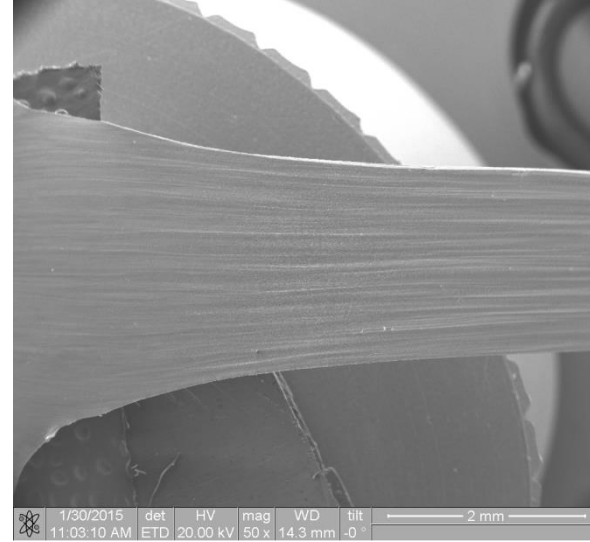
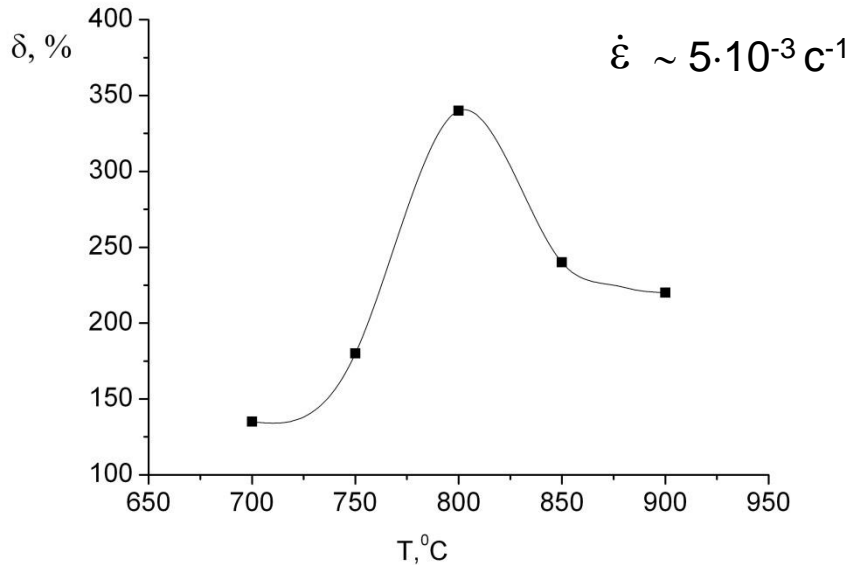


Element	Wt%	At%
OK	01.97	05.63
AlK	04.91	08.33
MoL	05.29	02.52
TiK	82.24	78.59
VK	04.20	03.77
FeK	01.40	01.15
Matrix	Correction	ZAF



Сверхпластичные свойства УМЗ сплава ВТ22

ВТ22 после радиально-сдвиговой прокатки и старения 420°C 5 ч



Таким образом, на образцах сплава ВТ22 с УМЗ структурой в рассматриваемых условиях наблюдается сверхпластическое течение. Это позволяет рекомендовать указанный выше режим для обработки заготовок сплава ВТ22 в режиме сверхпластической формовки.

Заключение

С использованием методов оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного и EBSD анализа показано, что в результате деформационно-термической обработки методом радиально-сдвиговой прокатки в прутках титанового сплава диаметром 22 мм формируется глобулярная ультрамелкозернистая структура с размером элементов менее 500 нм. Последующее старение приводит к распаду деформированной матрицы β -фазы с образованием мелкодисперсных выделений α -фазы и наноразмерных частиц метастабильной α'' -фазы. Формирование такой двухуровневой структуры, сочетающей зернограничное и дисперсионное упрочнение, приводит к существенному (более чем на 20%) повышению прочностных свойств сплава по сравнению с исходным состоянием.