

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ta–Zr, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЗАКАЛКИ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

© 2021 г. М.М. Серов<sup>1,2</sup>, А.Ю. Патрушев<sup>1,2</sup>, Д.П. Фарафонов<sup>1</sup>, Р.А. Валеев<sup>1</sup>, А.И. Сафарян<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ (НИУ)), г. Москва, Россия

*Статья поступила в редакцию 29.07.20 г., доработана 14.09.20 г., подписана в печать 17.09.20 г.*

**Аннотация:** Рассмотрено влияние высокоскоростной закалки расплава, реализуемой методом экстракции висящей капли расплава, бинарной системы Ta–Zr. Применяли две смеси элементарных порошков тантала и циркония с содержанием 60 и 6 % тантала соответственно. Композиции после смешивания прессовали при давлении 250 МПа в стальной пресс-форме на гидравлическом прессе. Спекание выполняли в вакуумной печи при температуре 1350 °С и давлении  $10^{-3}$  Па. Высокоскоростную закалку проводили в вакууме при давлении  $2 \cdot 10^{-2}$  Па при помощи электронно-лучевого нагрева и вращающегося диска-теплоприемника. Толщина полученных волокон составляла 15–80 мкм. Проведены исследования и сравнение результатов испытаний образцов быстроокаленных дискретных волокон сплава Ta–Zr и образцов, полученных в результате оплавления заготовки-штабика посредством электронно-лучевого нагрева (в литом состоянии). Установлено, что структура быстроокаленных волокон сплава с содержанием 6 мас.% Ta состоит из зерен игольчатой формы размером 5–10 мкм, а волокна с 60 мас.% Ta имеют столбчатую дендритную структуру. Изучение распределения тантала и циркония по поперечному сечению волокна показало, что при снижении скорости охлаждения менее  $10^3$  К/с в сплаве с долей тантала 60 мас.% развивается монотектоидное превращение. Выявлено, что у сплава с 6 мас.% Ta значение микротвердости быстроокаленного волокна в 1,5 раза выше, чем у того же сплава без закалки, а для сплава с 60 мас.% Ta такое же сопоставление дает 2-кратное превосходство.

**Ключевые слова:** закалка расплава, сплавы Ta–Zr, экстракция висящей капли расплава, волокно.

**Серов М.М.** – докт. техн. наук, гл. науч. сотр. лаборатории «Специальные металлические материалы и магниты» ВИАМ (105005, г. Москва, ул. Радио, 17), проф. кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» МАИ (НИУ) (125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4). E-mail: serovgmf@yandex.ru.

**Патрушев А.Ю.** – техник лаборатории «Специальные металлические материалы и магниты» ВИАМ, аспирант кафедры «Технологии и системы автоматизированного производства металлургических процессов» МАИ (НИУ). E-mail: lokotrains@yandex.ru.

**Фарафонов Д.П.** – нач.-к сектора лаборатории «Специальные металлические материалы и магниты» ВИАМ. E-mail: unz@mail.ru.

**Валеев Р.А.** – канд. техн. наук, нач.-к лаборатории «Специальные металлические материалы и магниты» ВИАМ. E-mail: valeev-r-a@mail.ru.

**Сафарян А.И.** – канд. техн. наук, инженер кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов» МАИ (НИУ). E-mail: an.safaryan@gmail.com.

*Для цитирования:* Серов М.М., Патрушев А.Ю., Фарафонов Д.П., Валеев Р.А., Сафарян А.И. Структура и свойства сплавов системы Ta–Zr, полученных методом высокоскоростной закалки из жидкого состояния. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2021. Т. 27. № 3. С. 66–72. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-66-72.

## Structure and properties of Ta–Zr alloy obtained by high-speed melt quenching from liquid state

M.M. Serov<sup>1,2</sup>, A.Yu. Patrushev<sup>1,2</sup>, D.P. Farafonov<sup>1</sup>, R.A. Valeev<sup>1</sup>, A.I. Safaryan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (ARSRIAM), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)), Moscow, Russia

*Received 29.07.2020, revised 14.09.2020, accepted for publication 17.09.2020*

**Abstract:** The paper considers the effect of Ta–Zr binary system splat quenching implemented by the method of pendant drop melt extraction. The study was conducted using two mixtures of tantalum and zirconium elementary powders with a content of 60 and 6 % of tantalum,

respectively. After mixing, the compositions were pressed at 250 MPa in a steel mold on a hydraulic press. Sintering was carried out in a vacuum furnace at 1350 °C and a pressure of  $10^{-3}$  Pa. Splat quenching was carried out in a vacuum at  $2 \cdot 10^{-2}$  Pa using electron-beam heating and a spinning disk absorber. Resulting fiber thickness was 15 to 80  $\mu\text{m}$ . The results of testing splat-quenched Ta–Zr alloy discrete fibers and samples formed as a result of rod stock melting by electron-beam heating (as-cast) were studied and compared. It was found that the structure of splat-quenched fibers of the alloy with a Ta content of 6 wt.% consists of 5–10  $\mu\text{m}$  needle-shaped grains, and the alloy with a Ta content of 60 wt.% has a columnar dendritic structure. A study of tantalum and zirconium distribution across the fiber cross-section showed that cooling rate reduction to less than  $10^5$  K/s leads to monotectoid transformation in the alloy with a tantalum content of 60 wt.%. It was found that for an alloy with 6 wt.% Ta the fiber microhardness value is 1.5 times higher in comparison with the same alloy without quenching, and for an alloy with Ta 60 wt.% it is higher by a factor of two.

**Keywords:** melt quenching, Ta–Zr alloys, pendant drop melt extraction, fiber.

**Serov M.M.** – Dr. Sci. (Eng.), chief researcher of the laboratory «Special metal materials and magnets» of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (ARSRIAM) (105005, Russia, Moscow, Radio str., 17), prof. of the Department of technologies and systems for automated production of metallurgical processes of Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)) (125993, Russia, Moscow, Volokolamsk highway, 4).  
E-mail: serovrmf@yandex.ru.

**Patrushev A.Yu.** – technician of the laboratory «Special metal materials and magnets» of ARSRIAM, postgraduate student of the Department of technologies and systems for automated production of metallurgical processes of MAI (NRU).  
E-mail: lokotrains@yandex.ru.

**Farafonov D.P.** – head of sector of the laboratory «Special metal materials and magnets» of ARSRIAM. E-mail: unz@mail.ru.

**Valeev R.A.** – Cand. Sci. (Eng.), head of the laboratory «Special metal materials and magnets» of ARSRIAM.  
E-mail: valeev-r-a@mail.ru.

**Safaryan A.I.** – Cand. Sci. (Eng.), engineer of Department «Materials science and processing technology» of MAI (NRU).  
E-mail: an.safaryan@gmail.com.

**For citation:** Serov M.M., Patrushev A.Yu., Farafonov D.P., Valeev R.A., Safaryan A.I. Structure and properties of Ta–Zr alloy obtained by high-speed melt quenching from liquid state. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 3. P. 66–72 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-66-72.

## Введение

Сплавы системы на основе тугоплавких металлов сохраняют прочность под воздействием высоких нагрузок при температурах более 1100 °C, в то время как сплавы на основе никеля, железа и кобальта при этих температурах уже разупрочняются.

Сплавы системы Ta–Zr [1–4] играют важную роль в качестве основного материала для высокотемпературных конструкционных изделий благодаря их высокой температуре плавления, хорошей формовости и коррозионной стойкости.

Кроме того, сплавы тантала и циркония часто используются в качестве легирующей добавки в некоторые стали и жаропрочные сплавы для улучшения таких их свойств, как коррозионная стойкость, механическая и усталостная прочность [5–12].

Одно из первых успешных применений сплавов на основе Ta–Zr в чистом виде или с добавлением Nb было в производстве оболочек ТВЭЛов и защитных покрытий благодаря их высокой стойкости к парам воды при повышенных температурах, термостабильности и низкому удельному электрическому сопротивлению. Еще одним немаловажным фактором, влияющим на выбор материала

для изготовления деталей, являются модуль упругости и твердость.

Для получения требуемых характеристик изделий из этих сплавов, как правило, усложняют исходный состав. Такой подход имеет ряд недостатков, связанных с возникновением структурных дефектов и неоднородностей. Поэтому можно попытаться усовершенствовать структуру путем изменения способов получения заготовок.

Одним из таких методов является высокоскоростная закалка расплава (ВЗР). В настоящей работе исследовалось влияние такой закалки на физические и механические свойства сплава Ta–Zr, содержащего 60 и 6 мас.% тантала.

## Используемые материалы и методы

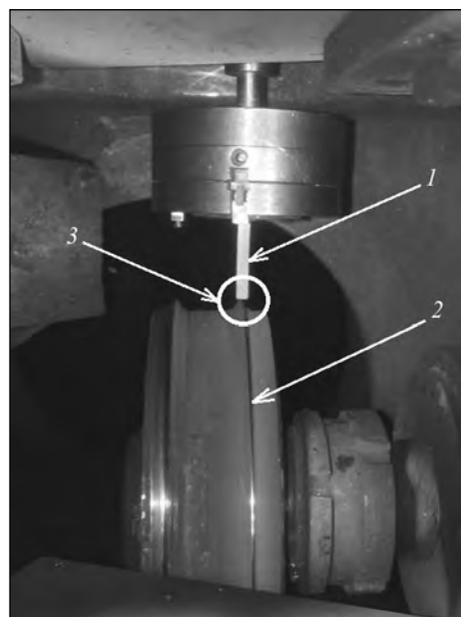
В работе была исследована структура образцов микрокристаллических волокон сплавов системы Ta–Zr, полученных методом ВЗР, и образцов, образовавшихся в результате оплавления заготовки-штабика посредством электронно-лучевого нагрева, т.е. не подвергавшихся ВЗР.

Использовались элементарные порошки Ta с чистотой  $\geq 99,5$  % и средним размером частиц

10 мкм, а также порошки Zr с чистотой  $\geq 98,0\%$  и средним размером частиц 15 мкм. Были подготовлены образцы, содержащие 60 и 6 мас.% тантала, путем смешивания элементарных порошков Ta и Zr до получения однородной композиции. Полученную смесь формовали в стальной пресс-форме на гидравлическом прессе под давлением 250 МПа в штабики с размерами  $5 \times 5 \times 50$  мм. Полученные заготовки спекали в вакууме  $10^{-3}$  Па. Было изготовлено по 3 заготовки каждого из составов.

Волокна для исследований были получены одним из видов бестигельной ВЗР — методом экстракции висящей капли расплава (ЭВКР) с электронно-лучевым нагревом заготовки. Суть данного способа получения микрокристаллических волокон сводится к тому, что нижний торец вертикально расположенной заготовки плавится с образованием висящей капли расплава. С каплей контактирует вершина рабочей кромки вращающегося охлаждаемого теплоприемника, которая заточена в форме равнобедренного треугольника. В зоне контакта происходит затвердевание расплава. Вследствие вращения теплоприемника затвердевший материал выносится из расплава в виде волокна и под действием центробежных сил сбрасывается с вершины рабочей кромки [13]. Главным преимуществом метода ЭВКР перед остальными методами получения волокон [14—17] является использование бестигельной плавки диспергируемого материала, что позволяет получать волокна из большого спектра материалов [18—21]. Внешний вид заготовки-штабика, закрепленного в оснастке для проведения ВЗР, представлен на рис. 1.

Исследования структуры волокон, полученных быстрой закалкой расплава, проводили после механической шлифовки и полировки на сукне с зернистостью от 46 до 5 мкм. Для выявления микроструктуры шлифа применялся травитель, в состав которого входит смесь 20 %  $\text{HNO}_3$  + 20 %  $\text{HF}$ , разбавленная в воде. Продолжительность обработки травителем поверхности образца составляла 2—3 с при комнатной температуре. Микроструктуру образцов волокон и образцов расплава, образовавшегося в результате плавления заготовки-штабика, изучали при помощи электронного микроскопа JMCA-733 (Joel, Япония). Исследование элементного состава проводили методами микроанализа с использованием сканирующего электронного микроскопа SU8010 (Hitachi, Япония).



**Рис. 1.** Рабочая зона установки ЭВКР-ЭЛУ

1 — заготовка-штабик в оснастке; 2 — рабочая кромка теплоприемника; 3 — область плавления торца заготовки и контакта с кромкой теплоприемника

**Fig. 1.** Working zone of the unit for pendant drop melt extraction with electron-beam heating

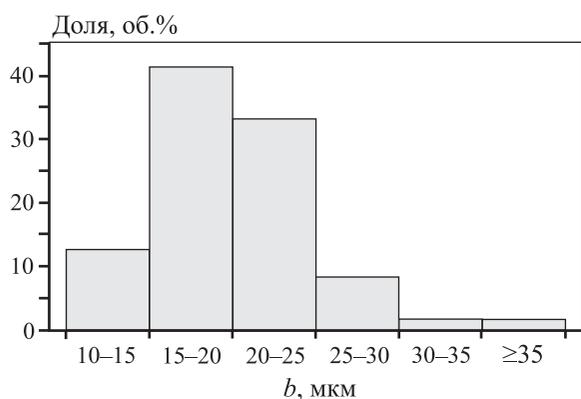
1 — rod stock in tooling; 2 — heat absorber working edge; 3 — area of rod end melting and contact with heat absorber edge

Микротвердость образцов определяли по методу Виккерса на приборе «Buehler 5124» (Micromet, Япония) под нагрузкой на индентор 50 г.

## Результаты и их обсуждение

Полученные методом ЭВКР волокна имели гладкую непрерывную поверхность. В поперечном сечении их толщина варьировалась от 15 до 80 мкм, достигая у отдельно взятых волокон 115 мкм. Гистограмма распределения волокон по толщине представлена на рис. 2.

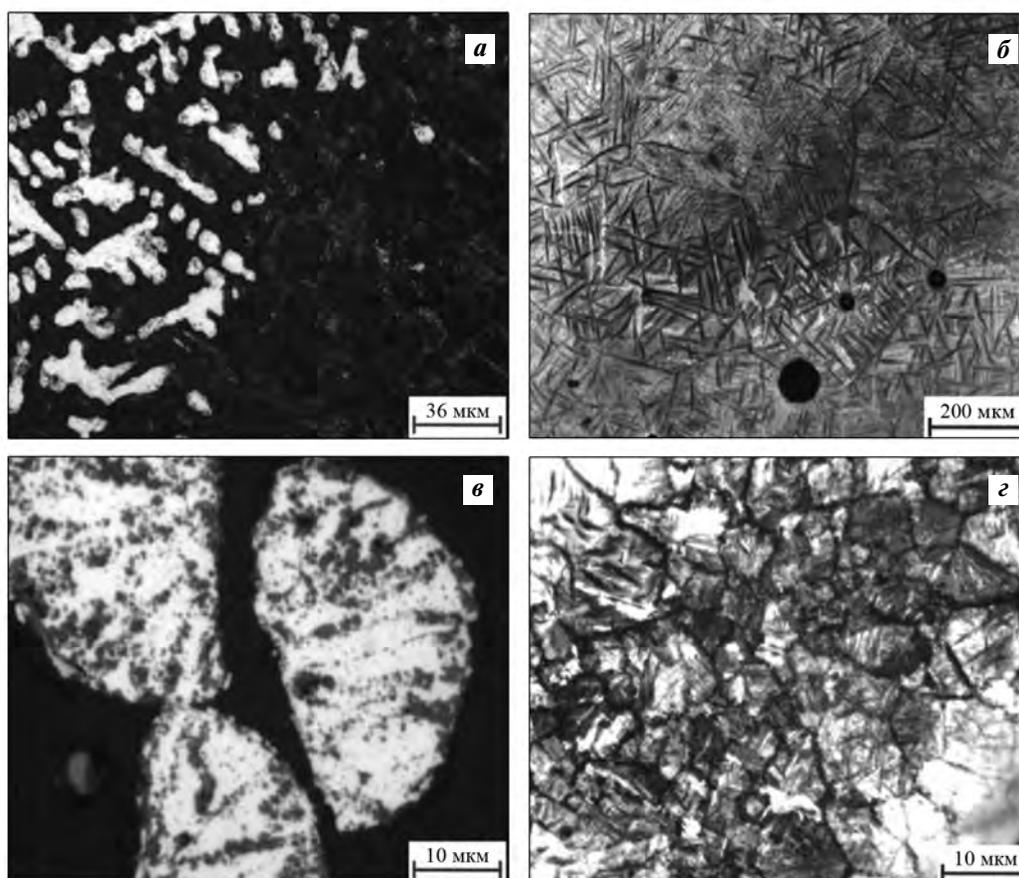
На рис. 3 приведены фотографии микроструктуры образцов быстрозакаленных волокон и образцов оплавленной заготовки-штабика, не подвергшихся закалке. Улитых образцов, содержащих 60 % тантала, структура дендритная с осями первого и второго порядка, а у быстрозакаленных волокон — столбчатая дендритная. Образцы с долей тантала 6 % имеют игольчатую структуру: в оплавленном состоянии размеры зерна составляют порядка 250 мкм, у быстрозакаленных волокон — в пределах 5—10 мкм.



**Рис. 2.** Гистограмма распределения волокон по толщине ( $b$ ) для сплава, содержащего 60 мас.% Ta

**Fig. 2.** Histogram of fiber distribution by thickness ( $b$ ) for the alloy containing 60 wt.% Ta

На изображениях структуры волокон, полученных методом микрорентгеноспектрального анализа (рис. 4), светлая область соответствует танталу, более темная — цирконию, серая — сплаву Ta—Zr. Анализ элементного состава образцов быстрозакаленных волокон показал, что в месте контакта расплава с теплоприемником содержание элементов Ta и Zr в серых областях микроструктуры примерно такое же, что и в исходной заготовке для экстракции. В светлых областях доля тантала несколько выше (70 мас.%). Для сплава с содержанием тантала 60 % в области, противоположной от зоны контакта расплава с диском-теплоприемником, на микроструктуре наблюдаются включения тантала с малым (3 мас.%) содержанием циркония. Ранее в работе [22] было показано, что в области



**Рис. 3.** Микроструктура образцов сплава Ta—Zr

$a, в$  — литое состояние (без закалки);  $б, г$  — микрокристаллическое (быстрозакаленное) Ta, мас.%.  $a, б$  — 60;  $в, г$  — 6

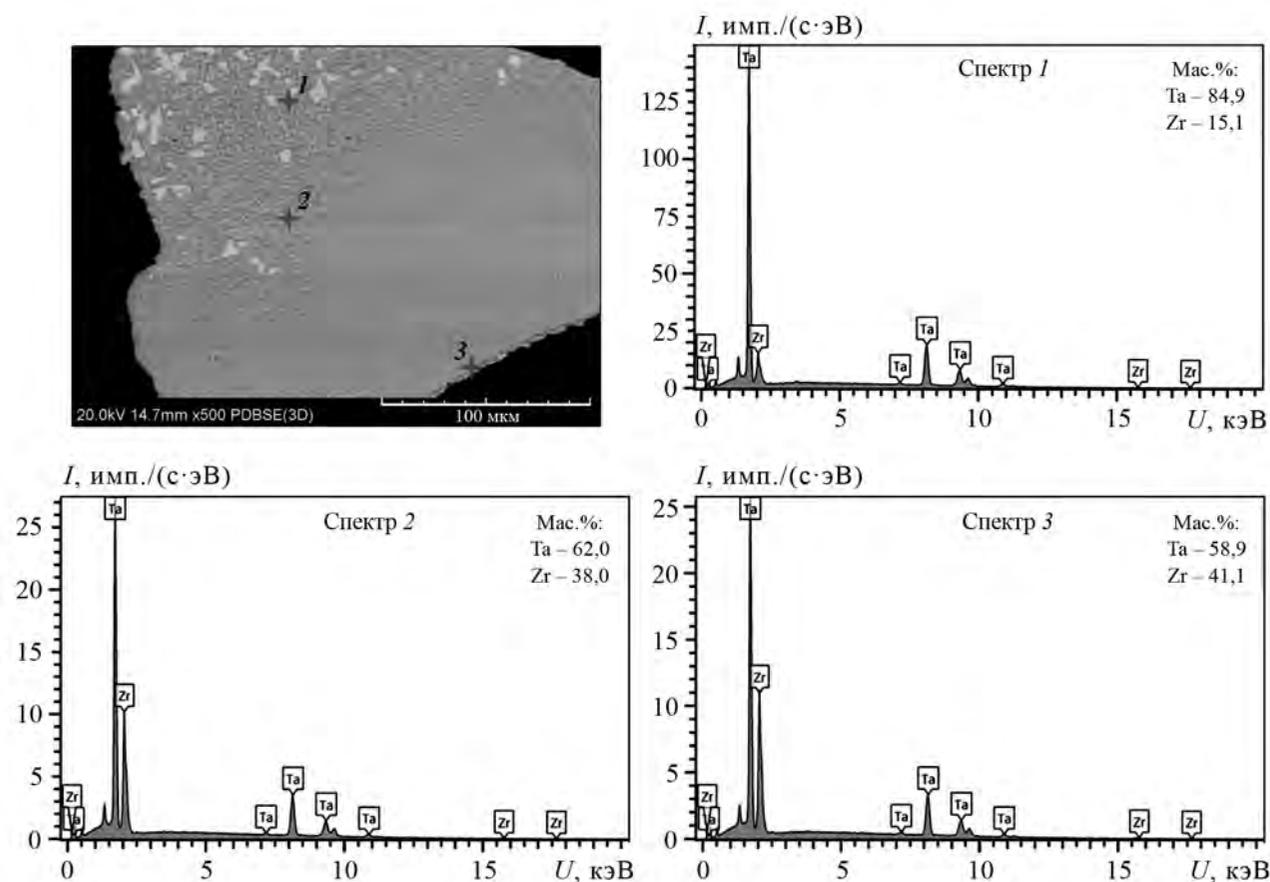
**Fig. 3.** Microstructure of Ta—Zr alloy samples

$a, в$  — as-cast condition (without quenching);  $б, г$  — microcrystalline (splat-casted) condition Ta, wt.%.  $a, б$  — 60;  $в, г$  — 6

**Микротвердость порошков Ta и Zr и сплава Ta–Zr в литом и микрокристаллическом состояниях**

Microhardness of Ta and Zr powders and Ta–Zr alloy in as-cast and microcrystalline conditions

Микротвердость, НВ						
Номер образца	Элементарный порошок		Сплав Zr–6%Ta		Сплав Zr–60%Ta	
	Ta	Zr	Без закалки	Быстрозакаленный	Без закалки	Быстрозакаленный
1	178,2	76,2	215,1	312,3	258,9	591,2
2	163,5	71,1	211,9	306,3	191,1	539,7
3	169,8	73,4	202,3	308,4	324,2	543,4
4	176,6	72,4	210,8	328,5	295,4	521,8
5	172,4	74,2	210,7	310,1	267,3	553,7
6	178,0	78,6	220,7	314,3	280,1	505,5
Средние значения						
	173,1	74,3	211,9	313,3	269,5	542,5



**Рис. 4.** Элементный состав волокна сплава Ta–Zr

**Fig. 4.** Elementary composition of Ta–Zr alloy fiber

контакта расплава с теплоприемником при использовании метода ЭВКР скорость охлаждения достигает  $5 \cdot 10^5$  К/с, а на расстоянии  $\sim 30$  мкм — снижается до  $10^4$  К/с. Из анализа диаграммы состояния системы Ta—Zr можно предположить, что при уменьшении скорости охлаждения ниже  $10^5$  К/с в сплаве успевает развиваться монотектоидное превращение.

Было проведено сравнение микротвердостей исходных порошков тантала и циркония и образцов их сплавов в незакаленном и быстрозакаленном состояниях. Из приведенных в таблице результатов испытаний следует, что образцы быстрозакаленных волокон с микрокристаллической структурой обладают твердостью, в разы превышающей твердость исходных порошков и образцов, не подвергшихся закалке.

## Заключение

Методом экстракции висящей капли расплава получены волокна сплавов системы Ta—Zr с содержанием тантала 60 и 6 мас.% толщиной 15—80 мкм.

Установлено, что структура быстрозакаленных волокон сплава, имеющих 6 мас.% Ta, состоит из зерен игольчатой формы размером 5—10 мкм. У сплава с содержанием 60 мас.% Ta структура столбчатая дендритная.

Исследование распределения тантала и циркония по поперечному сечению волокна показало, что при снижении скорости охлаждения менее  $10^5$  К/с в сплаве с содержанием тантала 60 мас.% развивается монотектоидное превращение.

Показано, что для сплава с 6 мас.% Ta значение микротвердости волокна в 1,5 раза выше микротвердости того же сплава, не подвергавшегося закалке, а сплав с 60 мас.% Ta по микротвердости волокна в 2 раза превосходит аналогичный сплав в литом состоянии, т.е. без закалки.

## Литература/References

1. Емельянов В.С., Годин Ю.Г., Евстюхин А.И. Исследование системы цирконий—тантал. *Атом. энергия*. 1957. Vol. 2. No. 1. С. 42—47.  
Emel'yanov V.S., Godin Yu.G., Evstyukhin A.I. Research of the zirconium—tantalum system. *Atomnaya energiya*. 1957. Vol. 2 No. 1. P. 42—47 (In Russ.).
2. Емельянов В.С., Годин Ю.Г., Евстюхин А.И. Механические свойства двойных и тройных сплавов циркония с танталом и ниобием при комнатной и повышенной температурах. В сб.: *Ядерное горючее и реакторные материалы*: Тр. II Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958 г.). 1959. С. 462—473.  
Emel'yanov V.S., Godin Yu.G., Evstyukhin A.I. Mechanical properties of double and triple alloys of zirconium with tantalum and niobium at room and elevated temperatures. In: *Nuclear fuel and reactor materials*: Proc. II Int. Conf. on the peaceful uses of atomic energy (Geneva, 1958). 1959. P. 462—473 (In Russ.).
3. Williams D.E., Jaskons R.J., Larsen W.L. The tantalum—zirconium alloy system. *Trans. Metall. AIME*. 1962. Vol. 224. No. 4. P. 751—756.
4. Pease L.F., Brophy J.H. Some modifications in the diagram for the tantalum—zirconium system. *Trans. Metall. AIME*. 1963. Vol. 227. No. 5. P. 1245—1249.
5. Smirnov I.V., Tsverova A.S., Grinyaev K.V., Ditenberg I.A. Influence of annealing temperature on microstructure and microhardness of V—Cr—Ta—Zr alloy. In: *16th Int. Conf. of students and young scientists on prospects of fundamental sciences development* (Tomsk, 23—26 April 2019). 2019. Vol. 1909. P. 936—941. DOI: 10.1088/1757-899X/597/1/012050.
6. Peradze T., Stamateli I., Cederstrom J., Berikashvili T., Razov A., Gorgadze K. Shape memory effect in Ti—Ta—Zr alloys. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 2006. Vol. 23 (1—2). P. 39—43. DOI: 10.3233/JAE-2006-730.
7. Enayati M.H., Schumacher P., Cantor B. The structure and thermal stability of mechanically alloyed Ni—Nb—Zr amorphous alloys. *J. Mater. Sci.* 2002. Vol. 37 (24). P. 5255—5259. DOI: 10.1023/A:1021008620711.
8. Deo L.P., Kaufman M.J., Wang B., Nikodemski S. Crystal-line phases found in rapidly quenched Ni—Nb—Zr alloys. *J. Microscopy*. 2017. Vol. 267 (1). P. 49—56. DOI: 10.1111/jmi.12546.
9. Paglieri S.N., Pal N.K., Dolan M.D., Kim S.-M., Chien W.-M., Lamb J. Hydrogen permeability, thermal stability and hydrogen embrittlement of Ni—Nb—Zr and Ni—Nb—Ta—Zr amorphous alloy membranes. *J. Membr. Sci.* 2011. Vol. 378 (1—2). P. 42—50. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.04.049.
10. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки. *Вестн. Рос. академии наук*. 2020. Vol. 90. No. 4. С. 331—334. DOI: 10/31857/S0869587320040052.  
Kablov E.N. Materials of the new generation and digital technologies of their processing. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2020. Vol. 90. No. 4. P. 331—334 (In Russ.).
11. Tudoran S., Voiculescu I., Geantă V., Vizureanu P., Mâr-

- za Roşca I., Pătraşcu I., Ciocoiu R. Effects of the chemical composition on the microstructural characteristics of Ti—Nb—Ta—Zr alloys. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 572. P. 1—5. DOI: 10.1088/1757-899X/572/1/012022.
12. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиац. материалы и технологии*. 2015. No. 1 (34). С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.  
Kablov E.N. Innovative development FGUP «VIAM» SSC RF on implementation of the «Strategic directions of development of materials and technologies of their reprocessing for the period till 2030». *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2015. No. 1 (34). P. 3—33 (In Russ.).
  13. Гращенков Д.В., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Высокотемпературные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений. *Авиац. материалы и технологии*. 2017. No. S. С. 318—328. DOI: 10/18577/2071-9240-0-S-318-328.  
Grashchenkov D.V., Efimochkin I.Yu., Bol'shakova A.N. High-temperature composite materials reinforced with particles and fibers of refractory compounds. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2017. No. S. P. 318—328 (In Russ.).
  14. Tang Z.Z., Hsieh J.H., Zhang S.Y., Li C., Fu Y.Q. Phase transition and microstructure change in Ta—Zr alloy films by co-sputtering. *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 198. P. 110—113. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.10.019.
  15. Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Высокотемпературный гибкий волокнистый теплоизоляционный материал. *Тр. ВИАМ*. 2015. No. 1. С. 15—19. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.06.2020).  
Babashov V.G., Varrrik N.M. High-temperature flexible fiber insulation material. *Trudy VIAM*. 2015. No. 1. P. 15—19. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 29.06.2020) (In Russ.).
  16. Yang D., Zhou X., Cheng T., Sun K., Huang D. Development of rotary shear equipment for preparing short metal fibers. In: *IEEE 8th Int. Conf. on CIS & RAM* (Ningbo, 19—21 Nov. 2017). 2017. P. 105—110. DOI: 10.1109/ICCIS.2017.8274757.
  17. Ивахненко Ю.А., Баруздин Б.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г. Высокотемпературные волокнистые уплотнительные материалы. *Авиац. материалы и технологии*. 2017. No. S. С. 272—289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.  
Ivakhnenko Yu.A., Baruzdin B.V., Varrrik N.M., Maksimov V.G. High-temperature fiber sealing materials. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2017. No. S. P. 272—289 (In Russ.).
  18. Серов М.М., Борисов Б.В. Получение металлических волокон и пористых материалов из них методом экстракции висящей капли расплава. *Технолог. легких сплавов*. 2007. No. 3. С. 62—65.  
Serov M.M., Borisov B.V. Obtaining metal fibers and porous materials from them by extraction of a hanging drop of melt. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 2007. No. 3. P. 62—65 (In Russ.).
  19. Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Алешина Р.Ш. Металлические волокна из жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы. *Авиац. материалы и технологии*. 2016. No. 1. С. 44—52. DOI: 10.185.77/2071-9140-2016-0-1-44-52.  
Farafonov D.P., Degovets M.L., Aleshina R.Sh. Metal fibers from heat-resistant alloys alloyed with platinum group metals. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2016. No. 1. P. 44—52 (In Russ.).
  20. Li Q., Niinomi M., Hieda J. Deformation-induced  $\omega$  phase in modified Ti—29Nb—13Ta—46 Zr alloy by Cr addition. *Acta Biomater.* 2013. Vol. 9. P. 8027—8035.
  21. Lin Chang, Jue Liu, Hai-Lin Yang. Effects of Zr contents on the microstructure, mechanical properties and biocompatibility of Ta—Zr alloys. *Mater. Sci. Forum*. 2018. Vol. 914. P. 37—44. DOI: 4028 /MSF.914.37.
  22. Анциферов В.Н., Серов М.М. Получение закалкой из расплава волокон и материалов. LAP LAMBERT Acad. Publ., 2014.  
Antsiferov V.N., Serov M.M. Obtaining by quenching from a melt of fibers and materials. LAP LAMBERT Acad. Publ., 2014 (In Russ.).