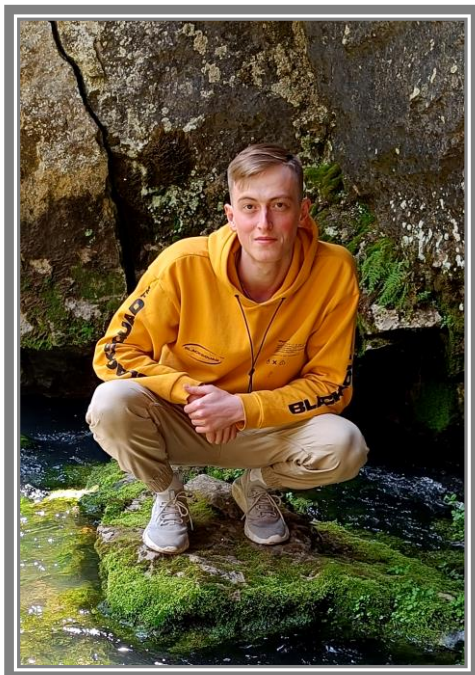


**Портфолио**  
аспиранта 4 года обучения  
Трофимова Дениса Михайловича



**1. Персональные данные и краткая автобиография**

Трофимов Денис Михайлович, гражданин Российской Федерации, родился 14 июля 1995 года в г. Уфа Республики Башкортостан.

С 1 октября 2019 года зачислен в аспирантуру ИПСМ РАН на направление подготовки: 22.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Протоколом ученого совета №14-19 от 19 ноября 2019 года утверждена тема научного исследования «Микроструктура и механические свойства интерметаллидных  $\beta$ -затвердевающих сплавов на основе  $\gamma(\text{TiAl})+\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ , легированных Nb, Zr и Hf».

Научный руководитель - д.т.н., заведующий лабораторией 07 «Материаловедение труднодеформируемых сплавов», Имаев Валерий Мазитович.

Обучался в СОШ с. Шингак-Куль Чишминского района с 2002 по 2013 г. В 2017 окончил Физико-технический институт Башкирского государственного университета: бакалавриат по направлению «Физика» 03.03.02 с ВКР на тему «АСМ-исследование структуры поверхности жидких кристаллов». В 2019 окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по направлению «Наноинженерия» 28.04.02 с ВКР на тему «Исследование сверхпроводящих свойств деформированной керамики Y123».

**2. Достижения до поступления в аспирантуру**

**3. Достижения в освоении образовательной программы аспирантуры**

20.02.2020: сдан кандидатский минимум по истории и философии науки, оценка «отлично»

23.01.2021: сдан кандидатский минимум по английскому языку, оценка «отлично»

**4. Достижения в научно-исследовательской деятельности**

В рамках выполнения НИР в период обучения в аспирантуре мною или при моем участии были выполнены следующие эксперименты и получены следующие результаты:

Проведены исследования  $\beta$ -затвердевающих сплавов  $\gamma$ -TiAl на основе Ti-44Al-0.2B, легированных Nb, Zr и Zr+Hf. В сплавах была получена микроструктура близкая к дуплексному типу. Испытания на растяжение проводились в интервале температур 20 - 900°C, а испытания на сопротивление ползучести при 700°C. Сплавы, легированные Zr и Zr + Hf, показали заметно более высокую прочность, более высокие температуры хрупко-пластичного перехода (ХВП) и повышенное сопротивление ползучести при сохранении почти такой же пластичности ниже температур ХВП по сравнению со сплавом, содержащим Nb.

Завершены рентгеноструктурные исследования модельных  $\gamma$ -TiAl сплавов составов Ti-44Al-0.2B, Ti-44Al-5Nb-0.2B, Ti-44Al-5Zr-0.2B и Ti-44Al-2.5Zr+2.5Hf-0.2B (ат. %). Выявлено влияние легирования на изменение параметров решеток интерметаллидных фаз  $\gamma$ -TiAl и  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al. Установлено, что легирование Zr и Zr+Hf в сравнении с легированием Nb ведет к заметному уменьшению степени тетрагональности  $\gamma$ -фазы и снижению несоответствия параметров решеток  $\gamma$ - и  $\alpha_2$ -фазы при незначительных изменениях в параметрах решетки  $\alpha_2$ -фазы. Полученные изменения степени тетрагональности  $\gamma$ -фазы и несоответствия параметров решеток интерметаллидных фаз  $\gamma$  и  $\alpha_2$  коррелируют с исследованным ранее влиянием легирования указанными элементами на механические свойства сплавов в области хрупко-вязкого перехода.

Проведено исследование  $\gamma$ -TiAl сплавов с повышенным легированием Nb, Zr и Hf для оптимизации состава сплава. Идея повышенного легирования заключалась в повышении эффекта твердорастворного упрочнения и в благоприятном изменении параметров решеток интерметаллидных фаз, а также в возможном повышении сопротивления окислению. Были выплавлены модельные слитки трех разных составов. Для всех сплавов с помощью деформационно-термической обработки получены близкие структурные состояния. Оценена микроструктура и проведены механические испытания на растяжение и ползучесть. Повышенное легирование Nb, Zr и Hf увеличивает  $\beta$ -стабилизацию и приводит к образованию в сплаве стабильной  $\beta(\beta_0)$ -фазы, которая не способствует росту пластичности и прочности, при этом снижая жаропрочность (сопротивление ползучести и/или длительную прочность), вероятнее всего, из-за локализации деформации в мягкой  $\beta(\beta_0)$ -фазе. Полученные результаты позволили оптимизировать и выбрать состав сплава для дальнейшего изучения.

Продолжается изучение разработанного на основе исследования модельных сплавов нового сплава состава Ti-44Al-X(Nb,Zr,Hf,B) (ат. %) (точный состав не указывается в силу конфиденциальных причин). Для нового сплава были изучены механические свойства в области хрупко-вязкого перехода для различных структурных состояний. В качестве исходного материала были использованы модельные 100-граммовые слитки, полученные с помощью аргоно-дуговой плавки на лабораторной установке. Предварительно сделано заключение о том, что дуплексная структура с объемным содержанием пластинчатой составляющей 70-80% является

наиболее подходящей в случае применения сплава в качестве материала лопаток турбины низкого давления для газотурбинного двигателя.

Для нового сплава состава Ti-44Al-X(Nb,Zr,Hf,V) (ат. %) исследована макро- и микроструктура габаритного слитка Ø300 мм. Установлено, что структура габаритного слитка является более крупнозернистой, чем в случае модельных (100-граммовых) слитков сплава. Показано, что размер колоний в слитке может быть измельчен с помощью предварительной термической обработки, включающей в себя нагрев и кратковременную выдержку в  $\beta$ -фазовой области с последующим ускоренным охлаждением. Предварительно оценены механические свойства сплава Ti-44Al-X(Nb,Zr,Hf,V) (ат. %) после деформационно-термической обработки в случае исходного габаритного слитка (Ø300 мм). Показано, что они несколько уступают свойствам сплава в случае исходного модельного (100-граммового) слитка.

Проведены механические испытания на растяжение и ползучесть сплавов составов Ti-43.5Al-X(Nb,Zr,Hf,V) (ат. %) (TNZ) и Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1V (ат. %) (TNM) с примерно идентичной микроструктурой дуплексного типа, полученной после идентичной деформационно-термической обработки. Показано, что разработанный TNZ-сплав обеспечивает примерно такой же уровень механических свойств на растяжение при 20-700°C, что и TNM-сплав, однако при 750-850°C прочность TNZ-сплава оказалась заметно выше, чем у TNM-сплава, при сохранении приемлемой пластичности. Несмотря на близость микроструктурных состояний сплавов, сопротивление ползучести, полученное для образцов TNZ-сплава, оказалось значительно выше, чем для образцов TNM-сплава. Пониженное сопротивление ползучести объясняется присутствием в TNM-сплаве заметного количества  $\beta(\beta_0)$ -фазы (не менее 3-5 об. %), являющейся менее жаропрочной при повышенных температурах, чем фазы  $\gamma$ -TiAl и  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al. Пониженное сопротивление ползучести образцов TNM-сплава коррелирует и с пониженной температурой хрупко-вязкого перехода, полученной для TNM-сплава в результате испытаний на растяжение. Таким образом, TNZ-сплав практически не уступает по пластичности TNM-сплаву (при комнатной температуре превосходит), но заметно превосходит последний по жаропрочности (сопротивлению ползучести) и высокотемпературной прочности (в интервале температур 700-850°C). Таким образом, новый TNZ-сплав показал лучшие механические свойства (повышенную высокотемпературную прочность и жаропрочность), чем сплав-конкурент (TNM-сплав).

Выполнены эксперименты по жаростойкости образцов модельных сплавов составов Ti-44Al-5Nb-0.2V, Ti-44Al-5Zr-0.2V и Ti-44Al-5(Zr+Hf)-0.2V, TNM-сплава состава Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1V и TNZ-сплава состава Ti-44Al-X(Nb,Zr,Hf,V) (ат. %). Изучали кинетику прибавления массы образцов сплавов в процессе длительного (в течение 500 ч) окисления на воздухе при 800°C. В процессе отжига образцы периодически извлекали из печи и взвешивали на аналитических весах. В результате эксперимента получили зависимости прироста массы образцов (в мг/см<sup>2</sup>) от времени. Наибольшую

жаростойкость (минимальное прибавление массы в процессе окисления) показал TNZ-сплав. С помощью растровой электронной микроскопии с использованием приставки для энергодисперсионного (EDS) микрорентгеноспектрального анализа было показано, что сопротивление окислению зависит от конкурентного образования на окисленной поверхности оксидов алюминия и титана. Превалирование образования на окисленной поверхности оксида алюминия, играющего защитную роль, обеспечило более высокое сопротивление окислению.

Статьи, опубликованные за период обучения в аспирантуре:

1-й год обучения (2019-2020 уч.год):

2-й год обучения (2020-2021 уч.год):

1. V.M. Imaev, A.A. Ganeev, D.M. Trofimov, N.Ju. Parkhimovich, R.M. Imaev, Effect of Nb, Zr and Zr + Hf on the microstructure and mechanical properties of  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl alloys // Materials Science & Engineering A 817 (2021) 141388. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141388> (Q1)

2. В.М. Имаев, Н.Ю. Пархимович, Д.М. Трофимов, Р.М. Имаев, Влияние Nb, Zr и Zr+Hf на параметры решеток интерметаллидных фаз и сопротивление ползучести  $\gamma$ -TiAl сплавов на основе Ti-44Al-0.2B // Письма о материалах. 11(4). 2021, pp. 524-530. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-524-530> (WoS без квантиля)

3-й год обучения (2021-2022 уч.год):

3. V.M. Imaev, N.Y. Parkhimovich, D.M. Trofimov, and R.M. Imaev, The influence of Nb, Zr and Zr + Hf on the lattice parameters and creep behavior of  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl alloys // J. of Materials Engineering & Performance. 2022. Issue 7. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06673-z> (Q4)

4-й год обучения (2022-2023 уч.год):

L.R. Shaikhutdinova, V.M. Imaev, D.M. Trofimov, R.M. Imaev, The effect of alloying and fluorination on the oxidation behavior of  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl based alloys // Letters on Materials. 2022. 12 (4). P. 343-349. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-4-343-349> (Q3)

**5. Достижения в общественной деятельности, спорте, других направлениях**