**FWRW-2021-0002**

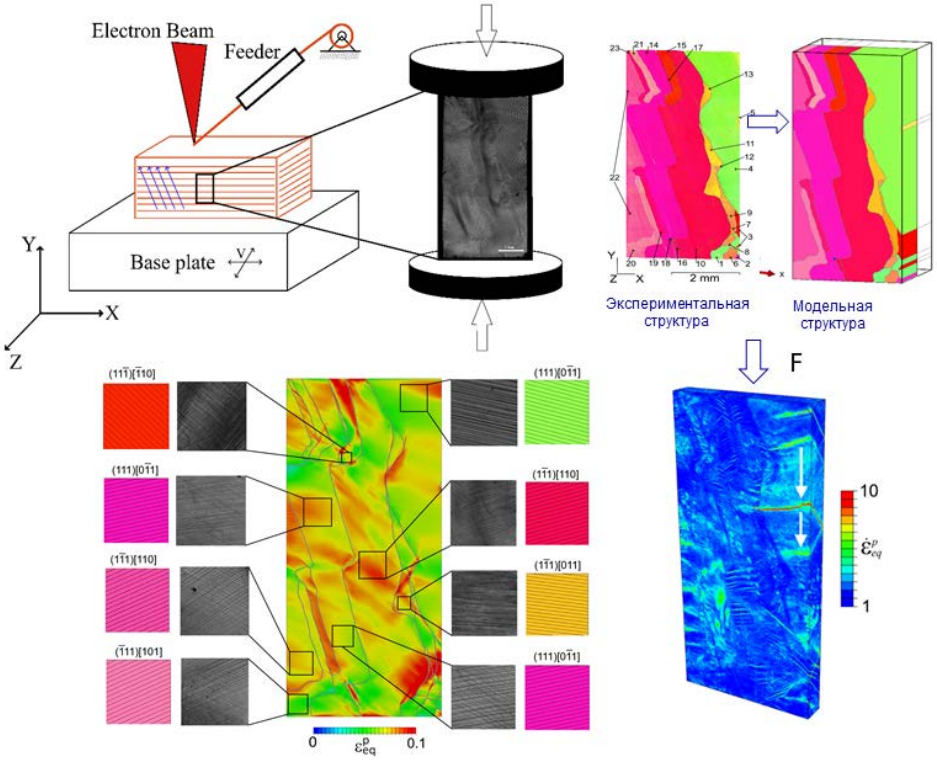
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) и University of New South Wales (Австралия)

# ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ АДДИТИВНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

**В.А. Романова** (9609692982, varvara@ispms.ru), **Р.Р. Балохонов** (9609692981, rusy@ispms.ru)

Публикация: V. Romanova, D. Lychagin, M. Pisarev, O. Zinovieva, R. Balokhonov, Grain-scale deformation mechanisms in an additively manufactured aluminium bronze oligocrystal, Facta Universitatis. Ser. Mech. Eng. (2024), DOI: 10.22190/FUME231128002R. IF=10.1.

Современные требования к цифровым двойникам конструкционных металлических материалов и изделий определили необходимость учета не только геометрических особенностей изделия, но и комплекса данных о структурно-обусловленных особенностях механического поведения материала изделия. Эффективным инструментом для получения таких данных является компьютерное моделирование с применением моделей физической теории пластичности кристаллов. Однако такие модели оперируют микроструктурными материальными параметрами, определение которых является не решенной проблемой. Авторами предложен оригинальный подход к определению искомых микроструктурных параметров. Подход базируется на применении передовых аддитивных технологий для получения металлических олигокристаллов, являющихся уникальными объектами для экспериментального исследования механизмов деформации на разных масштабных уровнях, разработки физических моделей пластичности, учитывающих морфологию и кристаллографическую ориентацию зерен и особенности дислокационного скольжения, и определения материальных параметров этих моделей. Методология подхода продемонстрирована на примере получения олигокристаллов алюминиевой бронзы методом электронно-лучевого послойного наплавления проволоки и их экспериментального изучения.




Численно-экспериментальное исследование механизмов деформации в олигокристалле алюминиевой бронзы, полученном электронно-лучевым послойным наплавлением проволоки

**FWRW-2021-0003**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

# МЕХАНИЗМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ПОВЫШЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ, КОРРОЗИОННЫХ, И УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИКЕЛИДА ТИТАНА, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НАЛИЧИЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННОЙ НА НАНОМАСШТАБНОМ УРОВНЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

**Л.Л. Мейснер**(llm@ispms.ru), **Ф.А. Дьяченко**(dfa@ispms.ru), **С.Н. Мейснер**(msn@ispms.ru), **М.Г. Остапенко** (artifakt@ispms.ru), **В.О. Семин** (vosemin@ispms.ru)

Публикации: [1] Meisner L.L., D'yachenko F.A., Semin O.V., Ostapenko M.G., Meisner S.N., Bogdanov A.A., Yuzhakova S.I., Loban V.V. Influence of jewelry surface vibromechanical processing on the structure and mechanical properties of TiNi alloy// Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67. – No. 6. –P. 791 – 799. DOI: 10.1007/s11182-024-03180-7, импакт-фактор журнала 0.4.
[2] Meisner L.L., Meisner S.N., Panin S.V., Bogdanov A.A., Semin V.O. Ostapenko M.G., D'yachenko F.A., Savkin K.P. Effect of tantalum ion implantation on deformation behavior and fracture of TiNi SMA. Part I. quasi-static tension // Materials Science and Engineering. A. – 2024. – Vol. 892. – P. 146064(1 – 20) DOI:10.1016/j.msea.2023.146064, импакт-фактор журнала 6.1.

Изучены структура субмикрокристаллического (СМК) поверхностного слоя никелида титана (NiTi), фрагментированного методом вибромеханической (ВМ) обработки на глубину ~100 мкм и свойства образцов с СМК-слоем на поверхности – прототипов изделий для микроэлектронной промышленности и медицины. Установлено, что причиной почти двукратного повышения коррозионной стойкости NiTi в биохимическом растворе после ВМ-обработки (1) является механическая аморфизация его наружного слоя на глубину ~100 нм (2-3). Причиной повышения предела пластичности в ~2.5 раза (4) образцов с СМК-слоем является нанокристаллическая градиентная двухфазная (B2+B19′) структура (5-6), стабилизированная на глубину 2-3 мкм от поверхности дислокационной структурой ячеистого типа. Причиной повышения усталостной долговечности в ~1.5 раза образцов NiTi после ВМ-обработки (7) является подавление процессов накопления усталостной деформации на начальных стадиях циклирования за счет остаточных напряжений сжатия (рис.8) во внутренней части СМК-слоя, расположенной на глубине более 3 мкм от поверхности и имеющей полигонизованную структуру B2 фазы с высокой плотностью дислокаций (9).

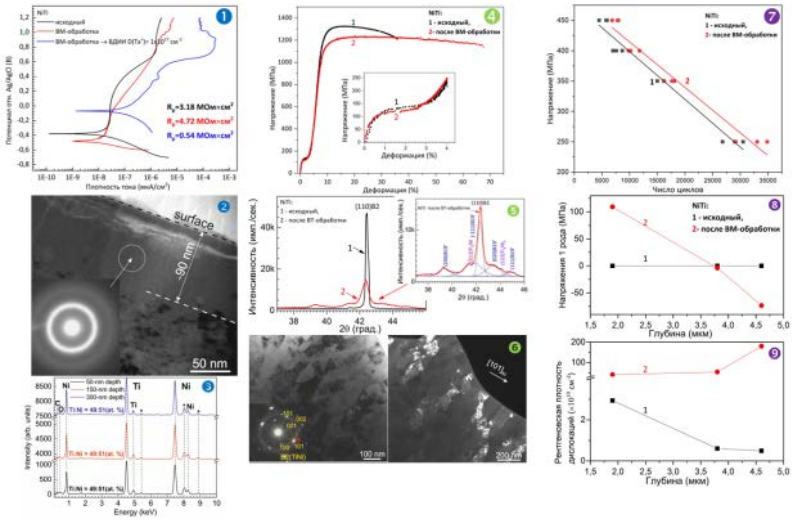



Рисунок – Структура и свойства образцов сплава TiNi до и после формирования поверхностного СМК-слоя: коррозионные (1), механические (4) и усталостные (7) свойства; наноструктура и химический состав СМК слоя вблизи поверхности (2, 3) и на глубине ~3 мкм (6), фазовый состав (5), напряжения 1 рода (8) и рентгеновская плотность дислокаций (9)

**FWRW-2021-0003**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## Улучшение фазового состава приповерхностного слоя никелевого жаропрочного сплава Инконель 718 воздействием низкоэнергетического сильноточного электронного пучка

**К.О. Акимов** (+7 3822 286 962, akinov_ko@ispms.ru), **К.В. Иванов** (+7 3822 286 858, ikv@ispms.ru)

Публикация: Demirtas, M., Ivanov, K.V., Purcek, G., Yanar, H. and Kaynak, Y. (2024), Surface modification of additively manufactured Inconel 718 alloy by low-energy high-current electron beam irradiation. Adv. Eng. Mater. 2400633. https://doi.org/10.1002/adem.202400633 DOI: 10.1002/adem.202400633, импакт-фактор журнала 3.4 (Clarivate, 2023)

Установлено, что в никелевом жаропрочном сплаве Инконель 718, полученном методом аддитивного производства способом селективного лазерного сплавления, присутствуют фазы Лавеса, негативно влияющие на механические и функциональные свойства сплава. Впервые показано, что в результате воздействия низкоэнергетического сильноточного электронного пучка в приповерхностном слое толщиной несколько микрометров фазы Лавеса растворяются в матрице. В результате нанотвердость приповерхностного слоя возрастает на 15%. Полученный результат может быть использован для поверхностной обработки никелевых жаропрочных сплавов, полученных методом аддитивного производства, с целью повышения их свойств.

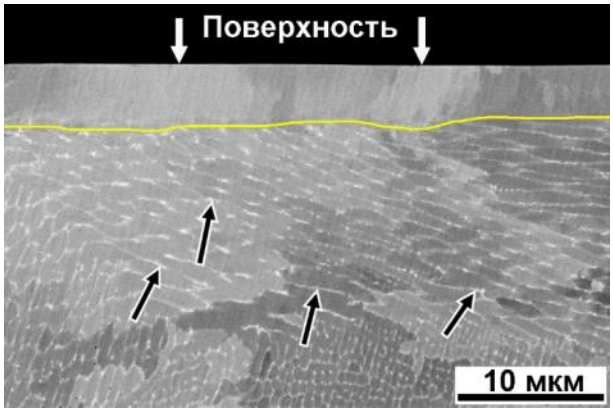


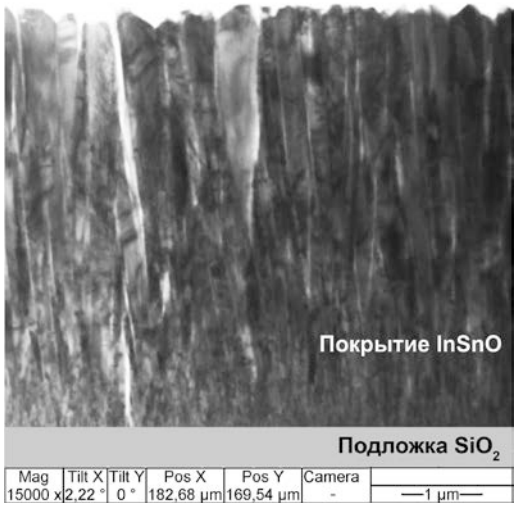

Рисунок – Микроструктура сплава Инконель 718, полученного методом селективного лазерного сплавления и обработанного воздействием низкоэнергетического сильноточного электронного пучка. Желтая линия обозначает границу модифицированного слоя. Черные стрелки указывают фазы Лавеса

**FWRW-2021-0003**

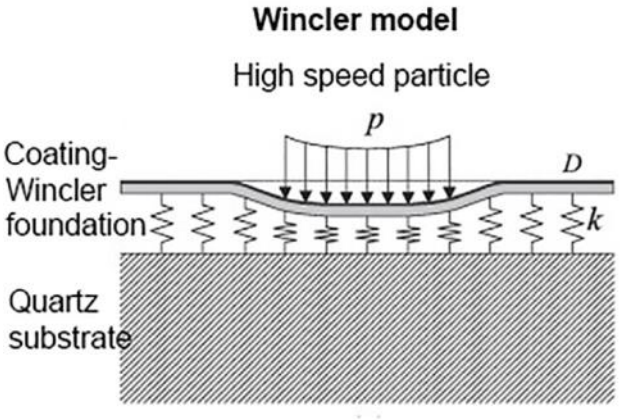
# ОСОБЕННОСТИ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ НА СТЕКЛЯННУЮ ПЛАСТИНУ С ПОКРЫТИЕМ InSnO С НИЗКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ $H^3/E^2$

В.П. Сергеев В.П. (+79138273715, vs@ispms.ru), М.П. Калашников (+79138413470, kmp1980@mail.ru), О.В. Сергеев (+79627809010, tehnovak@sibnet.ru), Р.Б. Турсунханова (+79521837895, iriska_23.97@mail.ru), А.В. Воронов (+79609715597, avor1964@mail.ru)

Изучены прозрачные в видимой области спектра покрытия In–Sn–O разной толщины с выраженной столбчатой структурой, нормальной к поверхности подложки, которые осаждались методом импульсного реактивного магнетронного распыления мишени из сплава индия с оловом на пластины кварцевого стекла. Столбцы состояли из единственной фазы $In_2O_3$ с ОЦК-решеткой. Измеренные значения вязкости разрушения образцов с покрытием In-Sn-O немного выше, а микротвердость ниже в сравнении с материалом подложки. При этом сопротивление пластической деформации покрытия $H^3/E^2$ имеет весьма малую величину менее 0,13 ГПа по сравнению с ранее изученными высокотвердыми нанокомпозитными покрытиями на основе нитридов и оксидов переходных металлов. Тем не менее, при ударном воздействии высокоскоростных микрочастиц железа покрытие оказывает высокую стойкость против локального разрушения поверхностного слоя стекла. Так плотность образующихся на поверхности кратеров уменьшается более чем в 3 раза. Полученный результат объясняется более интенсивной диссипацией энергии высокоскоростных частиц материалом покрытия, имеющего существенно более высокую плотность по сравнению с кварцевым стеклом. Сопутствующим фактором является выраженная столбчатая структура покрытий, играющая роль фундаментного основания Винклера. Согласно модели Винклера при нормальных ударах микрочастиц столбцы играют роль пружин сжатия, которые эффективно рассеивают энергию налетающих частиц, тем самым препятствуя образованию мелких кратеров. Эффект усиливается с увеличением толщины покрытия, где столбчатая структура более выражена.




а




б

Рисунок - ПЭМ-изображение столбчатой структуры покрытия In-Sn-O на кварцевой подложке в поперечном сечении (а) и схема, иллюстрирующая модель Винклера ударного воздействия высокоскоростной частицы на поверхность покрытия (б)

Публикации:

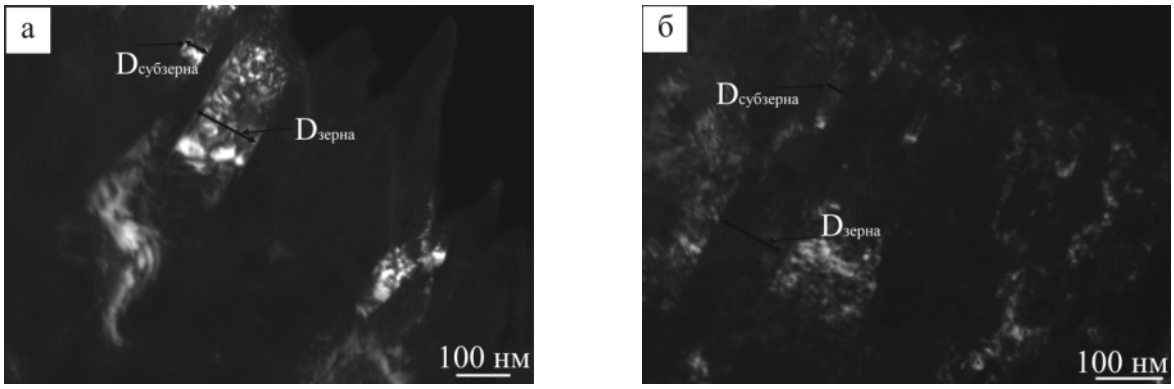
V.P.Sergeev,R.B. Tursunkhanova, M.P. Kalashnikov, O.V. Sergeev, A.V. Voronov, V.V. Neyfeld. The peculiar alterations of the optical and mechanical characteristics of the quartz glass plates with a reinforcing coating under the collision with a hyper-velocity flux of microparticles, Acta Astronautica, Volume 216, March 2024, Pages 428-436, https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.01.025

**FWRW-2021-0003**

# МОДИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ ТИТАНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ

С.В. Овчинников (+79833437067, ovmlmpin@ispms.ru), А.В. Воронов (+79609715597, avor1964@mail.ru)

С целью получения мультислоевых покрытий с регулируемыми свойствами слоёв выполнено исследование закономерностей модификации структурного состояния и механических свойств покрытий титана за счёт изменения энергии ионной активации роста слоёв в диапазоне потенциала электрического смещения подложки до -700 В. Установлено, что зависимости твёрдости и модуля Юнга (E) покрытий меняются немонотонно, в относительном диапазоне ± 20%, с наибольшими значениями, составляющими 7.4 и 214 ГПа, соответственно, при потенциале смещения - 500 В. При таких высоких значениях твёрдости покрытие сохраняет высокую пластичность и адгезионную прочность со стальной подложкой. Показано, что структурными факторами увеличения механических свойств являются: уменьшение поперечного размера столбчатых зёрен и субзёрен, увеличение скалярной плотности дислокаций до ≈ $3.5\times10^{11}$ $см^{-2}$, изгиба-кручения кристаллической решётки и локальных напряжений наноразмерного масштаба до величины ≈ E/75. Таким образом, установлено, что рост электрического потенциала смещения сначала приводит к накоплению, а в дальнейшем к возврату дефектов структуры.




Примечание – обозначены стрелками диаметры зёрен и субзёрен

Рисунок – Темнопольные изображения структуры покрытий титана, полученных при потенциале смещения -100 В (а) и –500 В (б).

Публикации:

S.V. Ovchinnikov, A.V. Voronov. Modification of mechanical properties and structure of titanium coatings depending of substrate bias potential // Thin Solid Films, 2024 – *в печати.*

**FWRW-2021-0004**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СОРАН)

# ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ, ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ B2↔R В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СПЛАВЕ Ti-50.9ат.%Ni

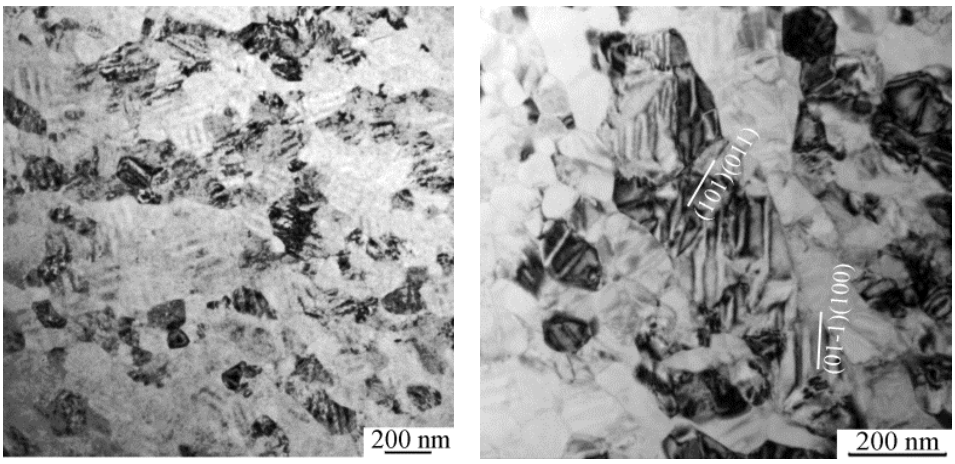
Т.М. Полетика (83822286820, poletm@ispms.ru), С.Л. Гирсова (girs@ispms.ru, 83822286820), А.И. Лотков (lotkov@ispms.ru, 83822492696), С.М. Биттер (bitter_sm@ispms.ru)

T.M. Poletika, S.L. Girsova, S.M. Bitter, A.I. Lotkov, K. A. Zheronkina. Effect of Aging Treatments on the Structure, Deformation Response, and R Transformation in Nanocrystalline Ti–50.9 at.% Ni Alloy.

*Physical Mesomechanics*, 2024. 27 (2), 152–162. DOI: 10.1134/S1029959924020048

Установлена взаимосвязь между эволюцией пространственного распределения когерентных частиц $Ti_3Ni_4$ в зёренно-субзёренной структуре с ростом температуры старения нанокристаллического сплава Ti–50,9 ат.% Ni и изменением морфологии R фазы в процессе B2→R превращений. Установлено, что изменение пространственного распределения частиц в наноструктуре от их расположения на дислокациях при низкотемпературном старении до выделения на дислокационных границах в условиях интенсивного старения сопровождается изменением морфологии R-фазы от нанодоменной до пластинчатой структуры самоаккомодации.

Показано, что нанодоменная структура R фазы способствует однородной деформации сплава при нагружении/разгрузке и стабилизации эффекта сверхэластичности. В то же время при нагружении сплава с пластинчатой морфологией R фазы происходит формирование полос локализованной деформации путем переориентации пластин R фазы по типу деформации Людерса.




а б

Рис. Структура нанокристаллического сплава Ti–50,9 ат.% Ni после цикла нагружение-разгрузка: после старения при 300°C (а) и после старения после 400°C (б)

**FWRW-2021-0004**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СОРАН)[1], ИФТТ РАН[2], НИТУ МИСиС[3]

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ПСЕВДО β-ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Е.В. Найденкин[1] (83822491245, nev@ispms.ru), И.П. Мишин[1] (mishinv1@yandex.ru, 83822286961), И.В. Раточка[1](ivr@ispms.ru), Б.Б. Страумал[2,3](straumal@issp.ac.ru), О.В. Забудченко[1](lekalune@mail.ru, 83822286961), О.Н. Лыкова[1](lon8@yandex.ru, 83822286803), А.И. Манишева[1](m.annmana21@gmail.com, 83822286961)

E.V. Naydenkin , I.P. Mishin, I.V. Ratochka , B.B. Straumal, O.V. Zabudchenko, O.N. Lykova, A.I. Manisheva. Mechanical Properties and Fracture of Ultrafine-Grained Near β Titanium Alloy under Three-Point Bending. *Physical Mesomechanics.* 2024. 27(6). 736–746. DOI 10.1134/S1029959924060109

Проведены сравнительные исследования структуры и механических свойств при трехточечном изгибе титанового сплава Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe, подвергнутого обработке методами всестороннего прессования и радиально-сдвиговой прокатки с последующим старением. Показано, что формирование ультрамелкозернистой структуры (размер зерен/субзерен $d < 1$ μm) указанными методами приводит к повышению прочностных свойств сплава, как при растяжении, так и при трехточечном изгибе (Рис.) по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием. В то же время сплав, подвергнутый обработке методом всестороннего прессования, демонстрирует более высокую стойкость к разрушению при трехточечном изгибе по сравнению со сплавом, обработанным методом радиально-сдвиговой прокатки с последующим старением, за счет повышенной пластичности. Это также определяет вязкий характер разрушения ультрамелкозернистого сплава, полученного методом всестороннего прессования, при испытании на трехточечный изгиб, по сравнению с хрупко-вязким разрушением сплава, полученного радиально-сдвиговой прокаткой с последующим старением.

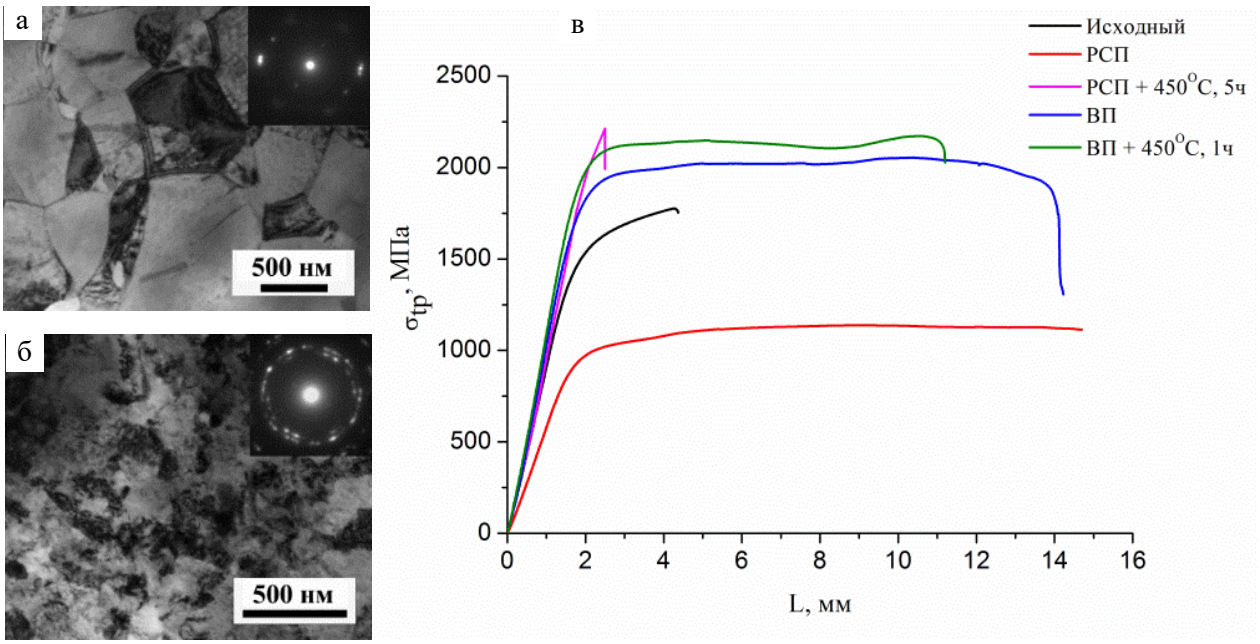



Рис. Микроструктура УМЗ сплава Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe после радиально-сдвиговой прокатки (а) и всестороннего прессования (б), а также кривые деформации указанного сплава с различной структурой при трехточечном изгибе (в)

**FWRW-2021-0004**

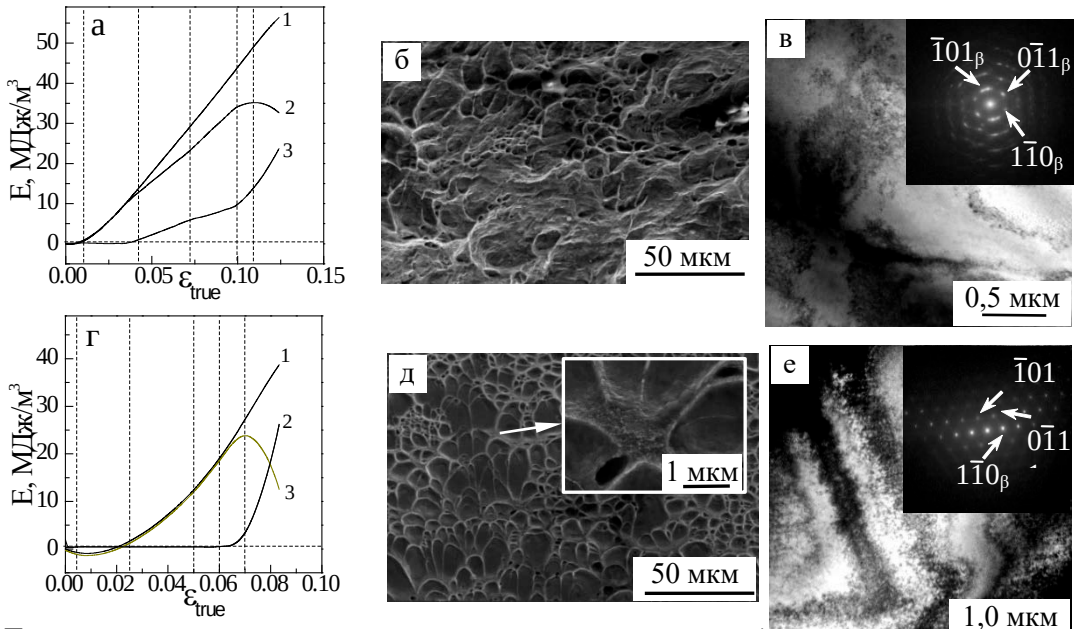
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СОРАН)[1], НИУ ТПУ[2], НИУ ТГУ[3], НГТУ[4]

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В СПЛАВЕ TI-42NB-7ZR НА ДИССИПАЦИЮ И НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ СУБСТРУКТУРЫ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

Легостаева Е.В.[1] (83822286935, lego@ispms.ru), Ерошенко А.Ю[1]. (83822286911, eroshenko@ispms.ru), Шаркеев Ю.П[1]. (83822492850, sharkev@ispms.ru), Вавилов В.П.[2] (83822701777, vavilov@tpu.ru), Скрипняк В.А.[3] (382278669, skrp2006@yandex.ru), Батаев В.А.[4] **(8383346-06-12,** bataev@corp.nstu.ru**)** и др.

Legostaeva E.V., Eroshenko A.Yu., Vavilov V.P., Skripnyak V.A et al.. «Influence of ultrafine-grained structure of Ti-42Nb-7Zr alloy on energy dissipation and storage under quasi-static tension» // Materials Letters. – 2024. – Vol. 375. – P. 137241. DOI:10.1016/j.matlet.2024. 137241.

Установлено, что начальная стадия деформации с постоянной температурой, где практически вся энергия пластической деформации поглощается материалом, в 1,8 раза больше для Ti-42Nb-7Zr в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии по сравнению с крупнокристаллическим (КК) состоянием, что в большей степени определяется субструктурным упрочнением, а также дисперсионным упрочнением наночастицами ω-фазы. Показано, что для сплава Ti-42Nb-7Zr в УМЗ состоянии количество выделившейся теплоты перед разрушением в 2 раза выше по сравнению с накопленной энергией деформации. Это приводит к формированию более крупных равноосных субзерен с пониженной плотностью дислокаций и свидетельствует о локальном разупрочнении сплава в УМЗ состоянии перед разрушением. Отличительной особенностью структурных превращений перед разрушением при квазистатическом растяжении сплава Ti-42Nb-7Zr в КК состоянии является формирование полос локализованной деформации с разориентированной ячеисто-сетчатой дислокационной субструктурой.




Диссипация и накопление энергии при пластической деформации (а, г) и РЭМ (б, д) и ПЭМ изображения (в, е) микроструктуры на стадии предразрушения сплава Ti-42Nb-7Zr: 1 – работа пластической деформации ($A_p$); 2 – удельное количество теплоты, выделившееся в процессе деформирования ($Q$); 3 – поглощенная энергия в процессе пластической деформации ($Es$); а-в – КК состояние, д-е – УМЗ состояние

**FWRW-2021-0005**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## Анализ диффузионно-реакционных процессов в порошковых материалах Ti–Al–B/$TiB_2$ в условиях спекания и синтеза

**Е.Н. Коростелева** (+7(3822)492771, e-mail: elenak@ispms.ru), **В.В. Коржова** (+7(3822)286841, e-mail: vicvic5@mail.ru), **А.И. Дмитриев** (телефон, e-mail: dmitr@ispms.ru)

Публикация:
**Korosteleva E.N., Korzhova V.V.** Phase composition and structure of powder materials of the Ti–Al–B/$TiB_2$ system after vacuum sintering and high-temperature synthesis // Russian Physics Journal, 2024, Vol. 67, No. 9, 1330-1339, DOI 10.1007/s11182-024-03251-9 (Q3)

Получены экспериментальные результаты исследования структуры и фазового состава порошковых материалов системы Ti–Al–B, сформированные в условиях вакуумного спекания и высокотемпературного синтеза в зависимости от сочетания компонентов: а) смесь элементарных порошков (Ti, Al и B); б) смесь с готовым соединением $TiB_2$. Исследуемое соотношение компонентов предполагало формирование двухфазного состава $TiAl_3$+$TiB_2$. Отмечено, что при спекании смеси Ti+Al+$TiB_2$ диборид сохраняется, но при этом выявлен TiB как результат перераспределения бора за счет его миграции. Обнаружено, что спекание прессовок из смеси Ti+Al+B в выбранной пропорции компонентов протекает в условиях высокого экзоэффекта, в результате чего образцы разрушались. Это позволило использовать данную смесь для высокотемпературного синтеза в режиме горения. В результате вакуумного спекания и СВС прессовок из смеси Ti+Al+B преимущественно формируется алюминид $TiAl_3$ и диборид титана $TiB_2$. При этом можно наблюдать некоторые переходные фазы. Показано, что после синтеза смеси Ti+Al+B можно получить порошковый продукт, прессовки из которого хорошо спекаются с сохранением своей формы при небольшой усадке, формируя прочный каркас.

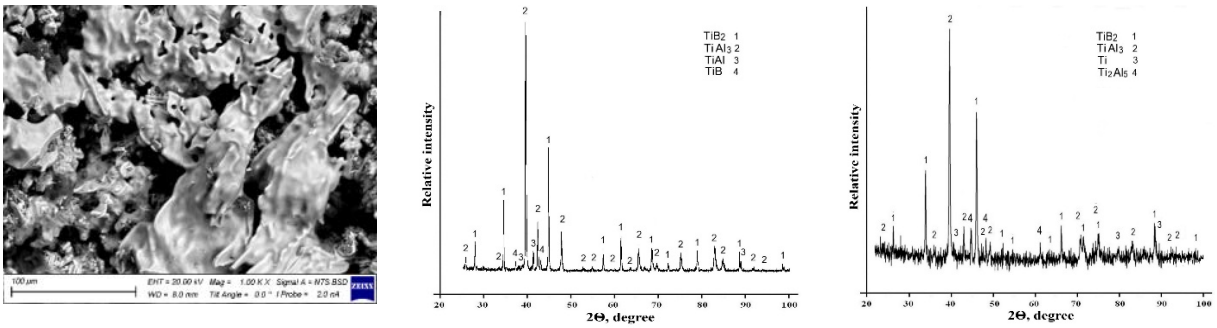



Рис. 1 РЭМ-изображение (а) и фазовый состав (б) образцов из смеси (Ti+Al+$TiB_2$); (в) - фазовый состав образцов из смеси (Ti+Al+B); $T_{спекания}$ =1300 °C

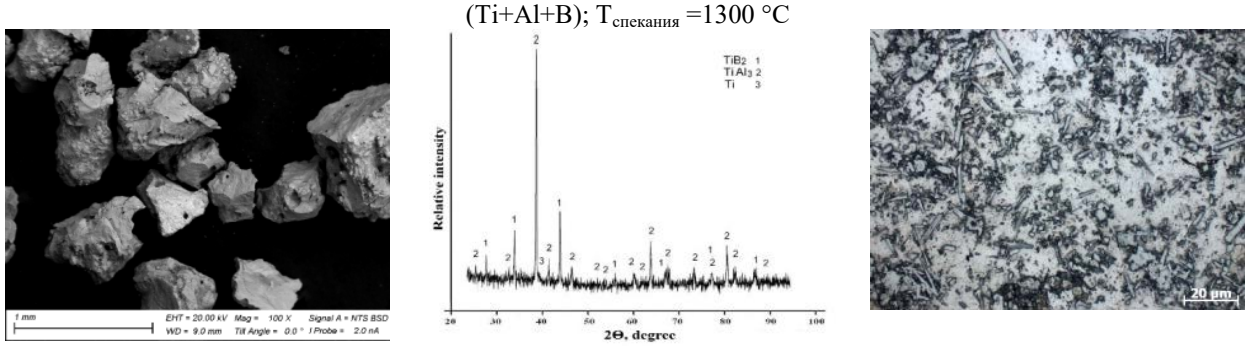



Рис.2. Общий вид (а), фазовый состав (б) и микроструктура после спекания (1300°C) порошкового продукта, полученного методом СВС из смеси (Ti+Al+B)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

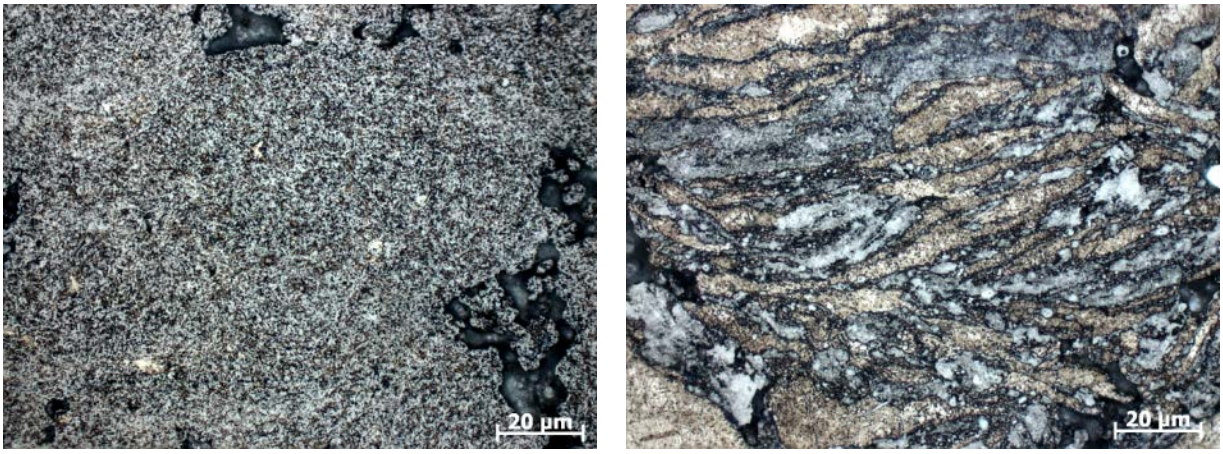
## ТИТАНОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ГИБРИДНЫМ КАРБИДО-БОРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

**Прибытков Г.А., Барановский А.В., Фирсина И.А., Кривопалов В.П.**

При механоактивации (МА) в среде толуола порошковых смесей титана (марки ТПП-8) и бора с целью получения композиционного порошка со структурой титаноматричного композита с карбидо-боридным упрочнением обнаружен эффект полного удаления бора из порошковой смеси. Этот эффект реализуется в результате образования летучих соединений бора с водородом (боранов) – продуктов реакции бора с водородом, который выделяется при деструкции молекул толуола в процессе механоактивации.

Полученный в результате титаноматричный композит содержит только частицы карбида титана в качестве упрочняющей фазы (рис. 1а). Карбидные частицы выпадают при нагреве твердого раствора, который образовался при растворении в решетке титана углерода, выделившегося при деструкции молекул толуола.

Композит с карбидо-боридным упрочнением (рис. 1б) был получен при термообработке механоактивированных (при умеренной интенсивности) порошковых смесей титана, бора и углерода (сажи) без добавления толуола или других углеводородных жидкостей.




а) б)

*Рисунок –. Оптические изображения микроструктуры механоактивированных и горячеуплотненных порошковых смесей после вакуумного отжига при 870 С:*
*а) - ТПП-8+4%В+ толуол; МА - 750 об/мин;*
*б) - ТПП-8+1%С+4%В; МА - 450 об/мин.*

**FWRW-2021-0006**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

# ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АЛЮМИНИДОВ $Al_3Me$ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СПЕКАНИЕМ

**Н.М. Русин**[1] (р.т. (3822) 286844; rusinnm@mail.ru),
**А.Л. Скоренцев**[2] (р.т. (3822) 286862; skoralexan@mail.ru)

С целью повышения трибомеханических свойств порошковый сплав Al-40Sn был легирован добавками титана. В ходе изучения структуры спечённых композитов Al-Sn-Ti было обнаружено, что олово при расплавлении растекается по объёму прессовки и становится ингибитором реакции взаимодействия между титаном и алюминием. В результате сплавообразование между указанными элементами протекает не полностью даже при расплавлении алюминия (рис. 1).

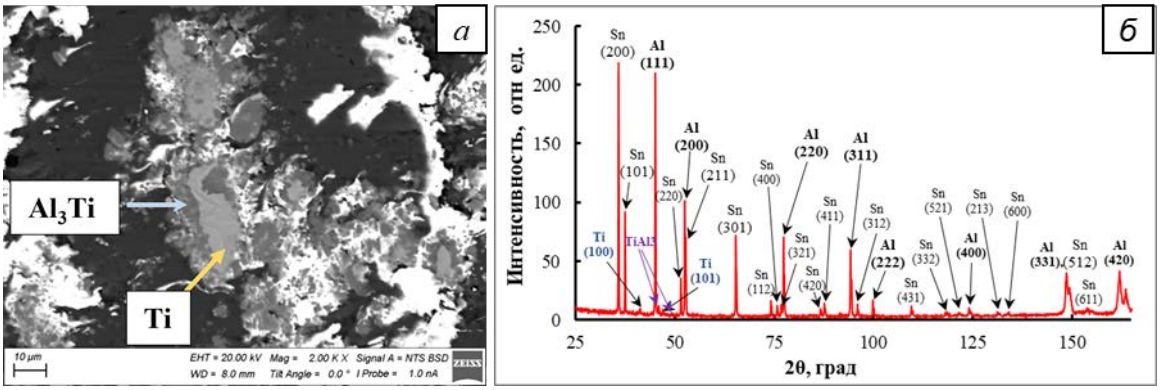



*Рис. 1. Структура и фазовый состав композита (%, ат.) Al-13Sn-5Ti, спечённого при 640 °С в течение часа*

Неполное протекание реакции сплавообразования между Ti и Al к моменту расплавления алюминия приводит к недостатку частиц тугоплавкой фазы $Al_3Ti$, необходимых для формирования каркаса, поддерживающего форму прессовки. С целью формирования такого каркаса в спекаемую смесь необходимо вводить готовые порошки $Al_3Ti$ в количестве, превышающем их порог перколяции. В результате получается трёхфазный композит с лучшей на 20-30 % износостойкостью, чем у базового антифрикционного сплава Al-40Sn, и почти вдвое его прочнее.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)[1] и организация-соисполнитель[2] ТГУ

## АНТИФРИЦИОННЫЙ ГИБРИДНЫЙ КОМПОЗИТ WC/Y–TZP–$Al_2O_3$/СТАЛЬ ГАДФИЛЬДА

**Н.Л. Савченко**[1] (+79069554541, savnick@ispms.ru), **И.Н. Севостьянова**[1] (sevir@ispms.ru), **М.В. Григорьев**[2] (mvgrigoriev@yandex.ru), **Д.А Гурьянов**[1] (desa-93@mail.ru), **А.П. Зыкова**[1] (zykovaap@mail.ru), **В.Р. Утяганова**[1] (filaret_2012@mail.ru), **Е.Н. Москвичев**[1] (em_tsu@mail.ru), **Д. В. Лычагин**[2] (lychagin@mail.tsu.ru), **С.Ю. Тарасов**[1] (tsy@ispms.ru)

Публикация: статья – Nikolai Savchenko, Irina Sevostyanova, Mikhail Grigoriev, Denis Gurianov, Anna Zykova, Veronika Utyaganova, Evgeny Moskvichev, Dmitry Lychagin, Sergei Tarasov. Hybrid composite with WC/Y–TZP–$Al_2O_3$ ceramic matrix and dispersed Hadfield steel particles. Ceramics International, Volume 50, Issue 8, 15 April 2024, Pages 13090-13100 https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.01.219. Impact factor 5.1.

Методом быстрого спекания при температуре 1350 °C в течение 20 мин получен плотный керамико-матричный композит WC/Y-TZP-$Al_2O_3$ с диспергированными частицами стали Гадфильда. В качестве компонента порошковой смеси наряду с порошками WC и стали Гадфильда использованы порошки плазменного пиролиза Y–TZP–$Al_2O_3$, что позволило в синтезированном композите получить гетерофазную микроструктуру, состоящую из агломератов WC, эвтектических сфер $ZrO_2$/$Al_2O_3$ и заэвтектических зерен $ZrO_2$ + $Al_2O_3$ с фазами t - $ZrO_2$, α - и γ - $Al_2O_3$. Кроме этого в композите были обнаружены фазы тройных оксидов $Al_2(WO_4)_3$ и $MnFe_2O_4$. Твердость и вязкость разрушения $K_{1C}$ составила 13,7±0,3 ГПа и 7,4±0,4 МПа·$м^{1/2}$, соответственно. Высокая вязкость разрушения достигнута за счет эффективно действующей комбинации механизмов повышения вязкости за счет сложной внутренней структуры и наличия пластичных частиц стали Гадфильда в керамической матрице WC/Y-TZP-$Al_2O_3$ (Рисунок). В условиях высокоскоростного трения при скоростях скольжения до 37 м/с такие композиты демонстрировали высокую износостойкость с одновременно сверхнизким значением коэффициента трения (~0,07).

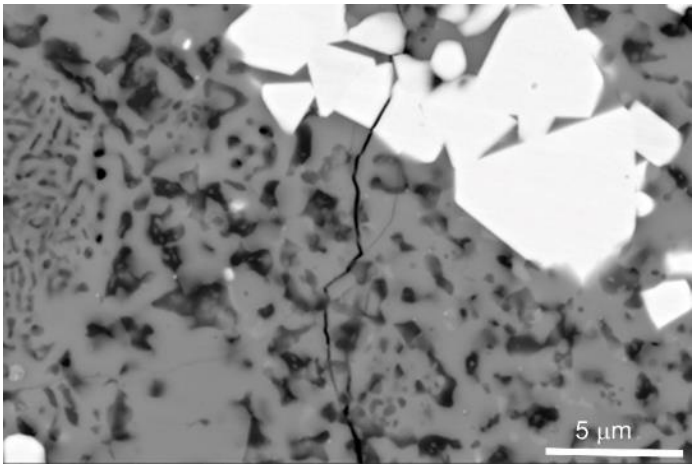



Рисунок. – Изображение полированной поверхности композита WC/Y-TZP-$Al_2O_3$ с радиальной трещиной от угла отпечатка индентора Виккерса.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## СТРУКТУРА КОНТАКТНЫХ СЛОЁВ СТАЛИ И ИХ РАЗРУШЕНИЕ ПРИ СУХОМ СКОЛЬЖЕНИИ ПО СТАЛИ ПОД ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ПРИ РАЗНЫХ СООТНОШЕНИЯХ ВИТКОВ ПИТАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА (проект FWRW-2021-0006)

**В.В. Фадин** (т.286-815, fvv@ispms.ru), **М.И. Алеутдинова (т.89234258865, aleut@ispms.ru)** (т. 286-815, fvv@ispms.ru)

Публикация: статья –Structure of the contact layers of steel and their deterioration in dry sliding against steel under high-density electric currents at different turn ratios of a supply transformer// Russian Physics Journal, 2024, Vol.67, No.1, 1-8. DOI 10.1007/s11182-024-03081-9, импакт-фактор журнала 0.66.

Изучено структурное состояние контактных слоёв стали Ст3 при сухом скольжении по стали 45 под переменным электрическим током высокой плотности. Установлено, что достижение высокой износостойкости материала и высокой электропроводности контакта при скольжении под переменным электрическим током высокой (более 100 А/см$^2$) плотности возможно только при образовании FeO между контактными поверхностями. Фазовый состав контактных слоёв стали Ст3 после трения под током содержит более 75 об.% FeO, остальное – фазы α-Fe и γ-Fe. Интенсивность изнашивания $I_{hc}$ материала снижается при увеличении коэффициента трансформации питающего трансформатора (таблица).

Таблица. Объёмные концентрации фаз в контактном слое стали и контактные характеристики ($\sigma_{Ac}$, $I_{hc}$, $j_c$) при скольжении под током и при разных коэффициентах трансформации питающего трансформатора в режиме катастрофического изнашивания

| ***k*=62** | | | ***k*=29** | | | ***k*=13** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $c_v$(FeO) | $c_v$(γ-Fe) | $c_v$(α-Fe) | $c_v$(FeO) | $c_v$(γ-Fe) | $c_v$(α-Fe) | $c_v$(FeO) | $c_v$(γ-Fe) | $c_v$(α-Fe) |
| 0.75 | 0.03 | 0.22 | 0.83 | 0.01 | 0.16 | 0.81 | 0.03 | 0.16 |
| $\sigma_{Ac}$, S/cm$^2$ | $I_{hc}$ , $\mu$m/km | $j_c$, A/cm$^2$ | $\sigma_{Ac}$, S/cm$^2$ | $I_{hc}$, $\mu$m/km | $j_c$, A/cm$^2$ | $\sigma_{Ac}$, S/cm$^2$ | $I_{hc}$, $\mu$m/km | $j_c$, A/cm$^2$ |
| 310 | 44 | 500 | 190 | 33 | 330 | 95 | 6 | 200 |

* ***k***- коэффициент трансформации питающего трансформатора; $c_v$ – фазовая концентрация, об.%; $\sigma_{Ac}$ – удельная контактная электропроводность; $I_{hc}$ –интенсивность изнашивания; $j_c$–плотность тока

Контактная поверхность образца состоит из двух секторов, в которых износ протекает под воздействием разных основных механизмов. В одном секторе изнашивание осуществляется за счет адгезии и пластического оттеснения (сектор 1), в другом за счет образования вязкой квазижидкой фазы (сектор 2) (рисунок).

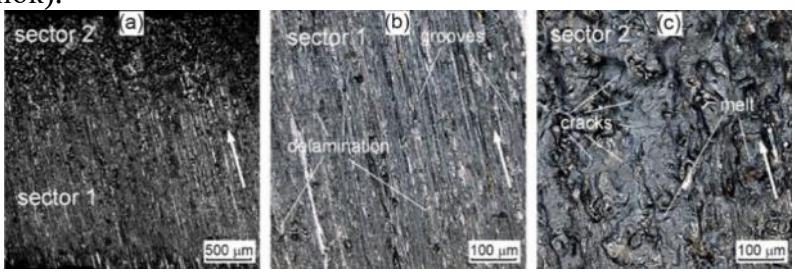



Рисунок. – Морфологическое различие секторов изношенной поверхности стали: a) общий вид номинальной поверхности контакта, b) изношеннная поверхность в секторе 1, c) изношенная поверхность в секторе 2 (стрелка показывает направление скольжения контртела)

**FWRW-2021-0007**

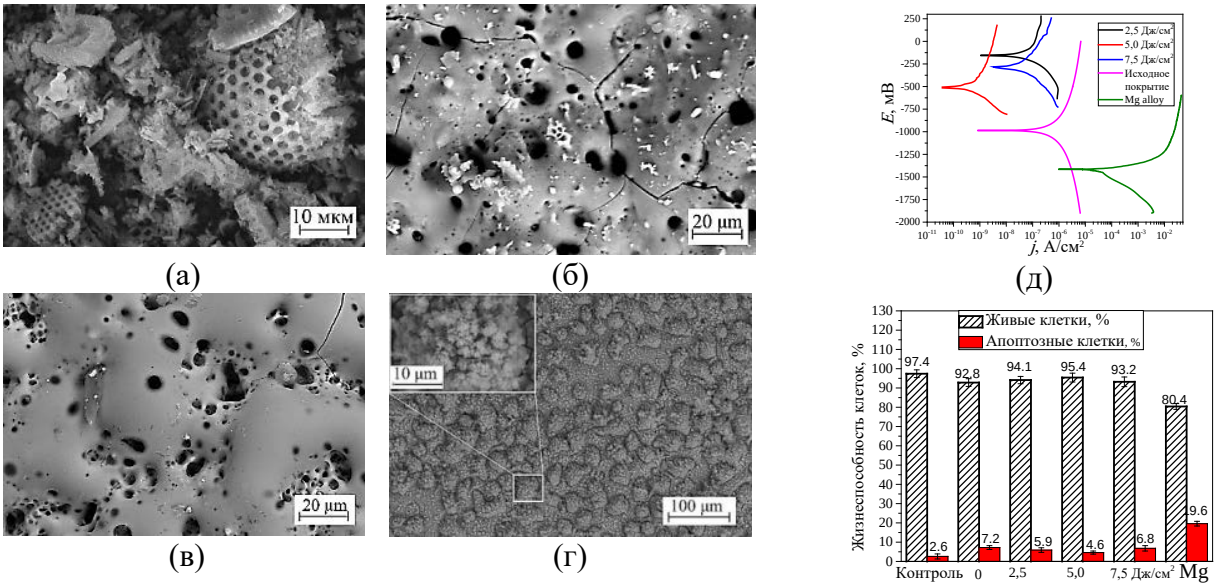
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)[1] и Томский политехнический университет[2]

# МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДИАТОМИТОВЫХ МИКРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ ОБРАБОТКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

М.Б. Седельникова[1] (8(3822)286-887, mariyased@ispms.ru), А.Д. Кашин[1] (8(3822)286-887, kash@ispms.ru), О.В. Бакина[1] (8(3822)286-825 ovbakina@ispms.ru), П.В. Уваркин[1] (8(3822)286-911, uvarkin@ispms.ru), Н.А. Лугинин[1] (8(3822)286-911, nikishek90@ispms.ru), М.А. Химич[1] (8(3822)286-887, khimich@ispms.ru), K.V. Ivanov[1] (8(3822)286-858, ikv@ispms.ru), Ю.П. Шаркеев[1,2] (8(3822)490-850, sharkeev@ispms.ru).

Mariya B. Sedelnikova, Alexander D. Kashin, Olga V. Bakina, Pavel V. Uvarkin, Nikita A. Luginin, Yurii P. Sharkeev, Margarita A. Khimich, Olga V. Kazmina, Edgar S. Dvilis, Konstantin V. Ivanov, Surface modification of diatomite-based micro-arc coatings for magnesium implants using low-energy high-current electron beams processing technique // Metals. – 2024. – Vol. 14. – P. 248, https://doi.org/10.3390/met14020248. (Q1, IF 2.6).

Модификация поверхности микродуговых покрытий из диатомита с использованием низкоэнергетических сильноточных электронных пучков (НСЭП) с плотностью энергии от 2,5 до 7,5 Дж/см$^2$ позволила кардинально изменить морфологию поверхности покрытий, и значительно повысить их коррозионную стойкость. При этом, плотность тока коррозии снизилась на три порядка, до 4,6 × 10$^{-10}$ А·см$^{-2}$, а поляризационное сопротивление увеличилось на четыре порядка до 1,4 × 10$^8$ Ом·см$^2$. Обработка электронным пучком способствовала повышению адгезионной прочности покрытий, критическая нагрузка при скретч-тестировании повысилась до 19 Н, что в 1,8–2,5 раза выше по сравнению, с необработанными покрытиями. Биологические исследования показали высокую жизнеспособность клеточной линии NIH/3T3 после контакта с образцами экстрактов покрытий.




(а) (б) (д)

(в) (г) (е)

Рисунок – СЭМ-изображения (а) - диатомит, (б) – микродуговое покрытие, (в) - покрытие после обработки НСЭП (7,5 Дж/см$^2$), (г) - кальцийфосфатный слой на поверхности микродугового покрытия после обработки НСЭП и выдерживания в SBF растворе; (д) - потенциодинамические поляризационные кривые коррозии; (е) – жизнеспособность клеток.

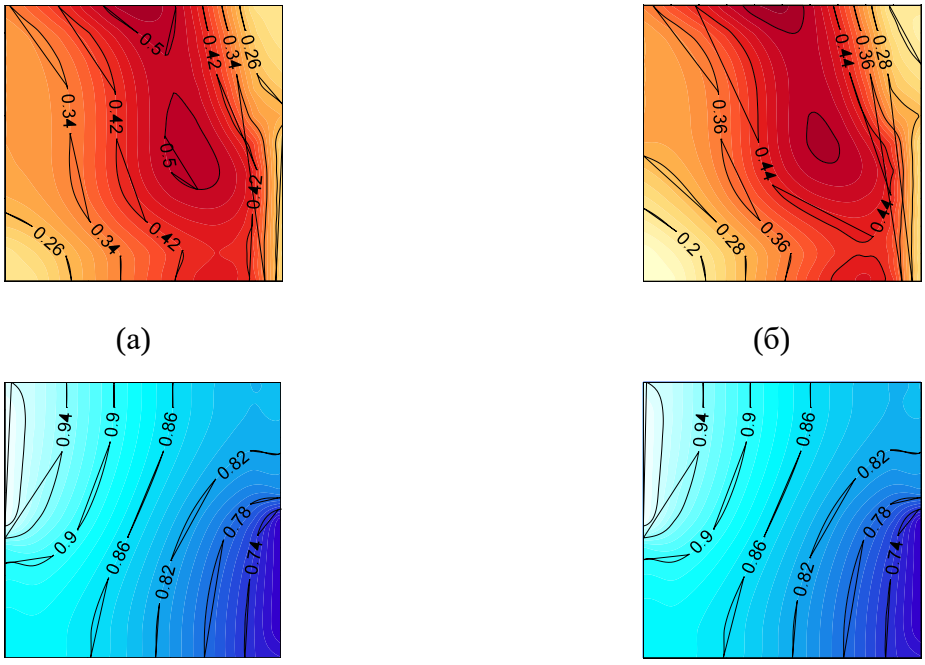
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## СТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОМ СЛОЕ

**Н.Н. Назаренко** (83822286898, nnelli@ispms.ru), **А.Г. Князева** (83822286964, anna-knyazeva@mail.ru)

Публикация: Nazarenko, N.N., Knyazeva, A.G. Stationary modes of compressible fluid flow in a thermodynamically consistent coupled model. Lobachevskii Journal of Mathematics, 45(5), 2391–2402 (2024). DOI: 10.1134/S1995080224602492, импакт-фактор журнала 0.8.

Структура пористых сред чрезвычайно разнообразна, а движущиеся в них газы и жидкости существенно различаются по транспортным и реологическим свойствам. В работе представлена новая связанная модель течения сжимаемой жидкости в пористой среде. Описан вывод определяющих соотношений в рамках термодинамически согласованного подхода. В результате классические модели теории фильтрации дополнены термодинамически согласованными определяющими соотношениями, учитывающими явление бародиффузии. Представлен пример связанной двумерной модели, учитывающей изменение давления, связанное с перераспределением примесей в результате различных транспортных явлений. Установлено, что наибольшее влияние на характер течения оказывает безразмерный комплекс, определяющий режим течения: диффузионный или конвективный (число Пекле). Ускорению массопереноса способствует увеличение пористости слоя и учет эффекта связности. Эта работа представляет интерес при описании процессов массообмена в природных и биологических средах.




(а) (б)

(в) (г)

Рисунок – Распределение концентрации (а, б) и даления (в, г) в конвективном режиме без учета $\alpha_C = 0$ (левая колонка) и с учетом коэффициента концентрационного расширения $\alpha_C = 0.5$ (правая колонка)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук[1] (ИФПМ СО РАН) и Сибирский Государственный медицинский университет[2] (СибГМУ)

## FWRW-2021-0007. СИНТЕЗ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО Ti/Al НАНОПОРОШКА ДЛЯ КОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

**О.В. Бакина**[1] (83822286825, ovbakina@ispms.ru), **Н.В. Сваровская**[1] (83822286964, nvsv@ispms.ru), **В.Р. Чжоу**[1] (83822286825, chzhou.vr@ispms.ru), **Е.А. Глазкова**[1] (83822286964, eagl@ispms.ru), **А.С. Ложкомоев**[1] (83822286825, asl@ispms.ru), **Л.Ю. Иванова**[1] (83822286964, ivanova_lu@ispms.ru), **Л.В. Спирина**[2] (89131183188, spirinalvl@mail.ru), **М.И. Лернер**[1] (8 3822 492 619, lerner@ispms.ru)

Публикация: O. V. Bakina, N. V. Svarovskaya, V. R. Chzhou, E. A. Glazkova, A. S. Lozhkomoev, L. Yu. Ivanova, L. V. Spirina, M. I. Lerner. Synthesis of Porous Composites Based on Electroexplosive Ti/Al Nanopowder for Bone Implants //Physical Mesomechanics. – 2024. – Т. 27. – №. 5. – С. 556-565. – DOI: 10.1134/S1029959924050059, импакт-фактор журнала 1.8.

При создании костных имплантатов одной из важнейших проблем является получение структуры имплантируемого материала с заданной пористостью и размером пор. В настоящей работе впервые предложен подход к формированию заданной пористой структуры материала с использованием активных бикомпонентных наночастиц Ti/Al. Разработанный режим двухступенчатого спекания позволяет создать транспортные поры для равномерного удаления порообразователя (мочевины) и связующего, а использование наночастиц Ti/Al способствует получению образцов с модулем упругости 2,33 ГПа, свойственным кортикальной кости, и низкой токсичностью. При спекании наночастицы окисляются, формируя объемный пористый композит $TiO_2/Al_2O_3$. Количество ионов, выделяющихся из пористых материалов в биологические жидкости, растет с увеличением удельной поверхности образцов, однако во всех случаях значительно ниже предельно допустимых значений. Полученные образцы имеют большой потенциал применения в качестве биоматериалов для изготовления скаффолдов и соединительных винтов.

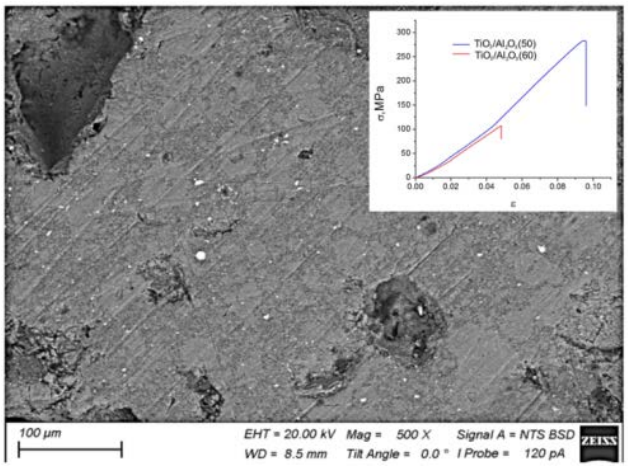



Рисунок – СЭМ изображение пористого образца $TiO_2/Al_2O_3$; на врезке - кривые зависимости деформации от напряжения в испытаниях на сжатие образцов

**FWRW-2021-0008**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)[1], НИ ТГУ[2] и ВНИИНМ[3]

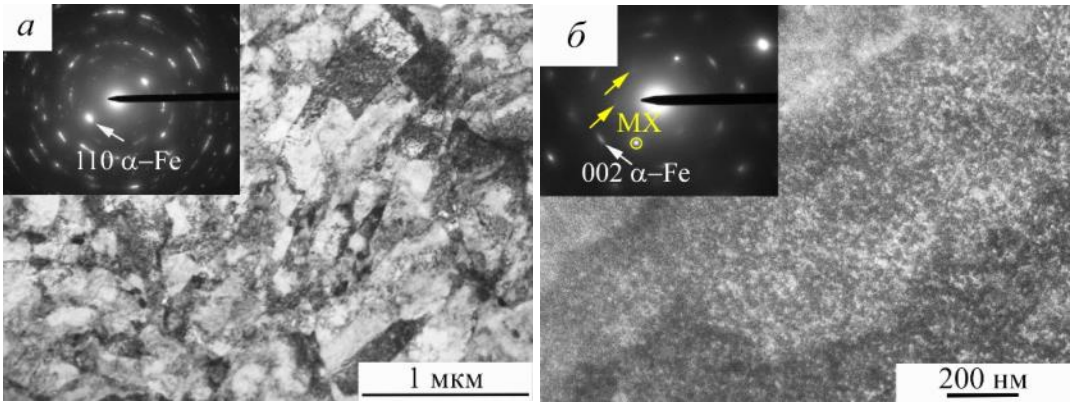
## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181

**Н.А. Полехина**[1] (89234214737, nap@ispms.ru), **И.Ю. Литовченко**[1] (89138241694, litovchenko@ispms.ru), **С.А. Аккузин**[1] (89521624143, s.akkuzin@ispms.ru), **К.В. Спиридонова**[1] (89234065025, almaevakv@ispms.ru), **В.В. Осипова**[2] (89539244806, lera.linnik.1999@mail.ru), **В.М. Чернов**[3] (89153530825, vmchernov@bochvar.ru), **М.В. Леонтьева-Смирнова**[3] (89168283551, mvleontyeva-smirnova@bochvar.ru)

Публикация: Polekhina N.A., Litovchenko I.Y., Akkuzin S.A., Spiridonova K.V., Osipova V.V., Chernov V. M., Leontyeva-Smirnova M.V. Microstructural Deformation and Fracture of Reduced Activation Ferritic-Martensitic Steel EK-181 under Different Heat Treatment Conditions // Physical Mesomechanics. – 2024. – V. 27. – P. 529-540. – https://doi.org/10.1134/S1029959924050035, IF 2.025.

Длительная (3000 ч.) выдержка при 600 °С в кислородосодержащем жидком Pb не оказывает заметного влияния на закономерности пластической деформации и механизмы разрушения в процессе растяжения ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при разных (20, 680, 700 и 720 °С) температурах, по сравнению с состоянием после традиционной термической обработки (ТТО: закалка и отпуск).

С повышением температуры растяжения от 20 до 720 °С происходит интенсификация процессов распада мартенсита – искривление и фрагментация мартенситных пластин и реек с формированием практически равноосных зерен феррита, увеличение плотности и размеров частиц вторых фаз ($M_{23}C_6$ и MX), снижение плотности дислокаций, динамическая полигонизация, и динамическая рекристаллизация при $T \geq 700$ °С. В ходе деформации при 700 и 720 °С стали после выдержки в Pb укрупнение ферритной структуры происходит более интенсивно, по сравнению с ТТО. Эффективность основных механизмов упрочнения стали (зернограничное, субструктурное, дисперсионное, твердорастворное), сохраняется на хорошем уровне после выдержки в Pb. Независимо от исходного структурного состояния она разрушается преимущественно по механизму вязкого ямочного транскристаллитного разрушения при всех рассматриваемых температурах.

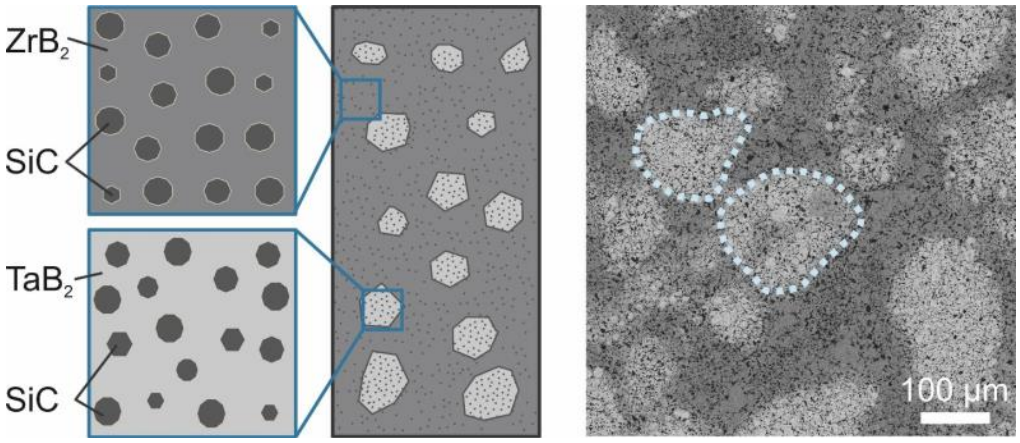



а – светлопольное изображение и картина микродифракции,
б – темнопольное изображение в рефлексе частиц MX и картина микродифракции.
Рисунок – Электронно-микроскопические изображения деформированной микроструктуры стали ЭК-181 в области шейки образцов, разрушенных при 20 °С

**FWRW-2021-0009**

# УСТАНОВЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С МНОГОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЙ АДАПТАЦИЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ВЫСОКИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАДЕЖНОСТЬ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Разработаны научные принципы структурной организации керамических композитов по типу «композит в композите». На примере керамических композитов $ZrB_2$-SiC-$TaB_2$ показано, что двойная композитная структура в керамике обеспечивает высокий прирост трещиностойкости. При гомогенном распределении включений SiC и $TaB_2$ в керамической матрице $ZrB_2$ наибольшее значение $K_{1C}$ = 4±0.2 МПа*м$^{1/2}$, при равнозначном количественном содержании компонентов в керамическом композите, но с двойной композитной структурой с матрицей $ZrB_2$-SiC и композитными включениями $TaB_2$-SiC величина $K_{1C}$ составила 12±0.3 МПа*м$^{1/2}$. Изменение типа структурной организации в керамических композитах от гомогенного распределения включений в керамической матрице до структуры «композит в композите» приводит к изменению механизма абразивного изнашивания. Керамические композиты с гомогенным распределением включений при абразивном воздействии изнашиваются с образованием подповерхностных трещин и отрывом больших объемов материала, абразивное изнашивание керамических композитов с двойной композитной структурой происходит по механизму «сухой эрозии». Экспериментально доказано, что при одинаковом компонентном составе керамических композитов устойчивость к абразивному изнашиванию при структурной организации «композит в композите» гораздо выше, чем при гомогенном распределении включений в керамической матрице. Полученные композиционные материалы предназначены для изготовления ответственных элементов бурового оборудования, в которых исключается возможность использования металлов и сплавов. Керамические композиты с двойной композитной структурой обеспечат расширение области использования керамических материалов.




а) б)

Структурная схема керамического композита $ZrB_2$-SiC-$TaB_2$ с двойной композитной структурой (а), структура (СЭМ) керамического композита $ZrB_2$-SiC-$TaB_2$ с двойной композитной структурой (б).

Результаты опубликованы

Ales Buyakov, Vasiliy Shmakov, Svetlana Buyakova Dual composite architectonics: Behavior of $ZrB_2$–SiC–$TaB_2$ composites under abrasive conditions Ceramics International V. 50, I. 1, Part B, 2024, P. 1849-1856. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.10.284.

**FWRW-2021-0010**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРИМИДА ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИКЛЕ И СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ

**А.А. Богданов**[1] (+7 3822 286922, bogdanov@ispms.ru), **С.В. Панин**[2] (+7 3822 286904, svp@ispms.ru)

Публикация: Bogdanov, A.A.; Panin, S.V. Prediction of Fatigue Life of Polyetherimide/Carbon Fiber Particulate Composites at Various Maximum Stresses and Filler Contents. Polymers 2024, 16, 749. https://doi.org/10.3390/polym16060749, IF JCR 4.7

Проведено комплексное исследование усталостного поведения композитов на основе полиэфиримида, наполненных короткими углеродными волокнами длиной 200 мкм, в условиях приложения циклических нагрузок. Содержание наполнителя составляла 10, 20 и 30 мас.%, а максимальное напряжение в цикле составляло 55, 65 и 75 МПа. Была разработана модифицированная модель усталости, основанная на полученных экспериментальных результатах и уравнении Баскина. Новизна результатов связана с разработкой модели, описывающей взаимосвязь структуры и свойств, которая учитывает, как максимальное напряжение в цикле, так и содержание углеродного волокна в композитах (рис. 1). Кроме того, предложен “алгоритм” проектирования таких композитов в соответствии с критерием длительного срока службы. Результаты данного исследования могут быть применены при проектировании композитов для конструкционных применений с заданными усталостными свойствами.

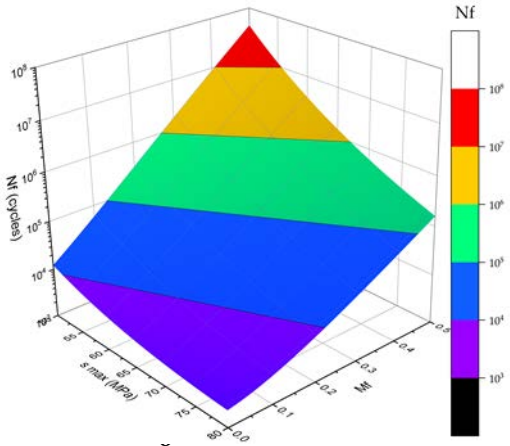



Рисунок. – Зависимость усталостной полимерных композитов на основе полиэфиримида от максимального напряжения в цикле и содержания углеродных волокон

**FWRW-2021-0011**

## Связь законов дисперсии автоволн локализованной пластичности с характеристиками дислокационных субструктур

Дисперсионное соотношение (вид функции частоты колебаний от волнового числа) для всех мод автоволн локализованной пластичности имеет параболическую форму $\omega(k) \sim k^{\beta}$, показатели степени $\beta$ которой принимают значения 1, 2, 5/2 или 3 в зависимости от стадии деформационного упрочнения, как показано на рисунке и в таблице.

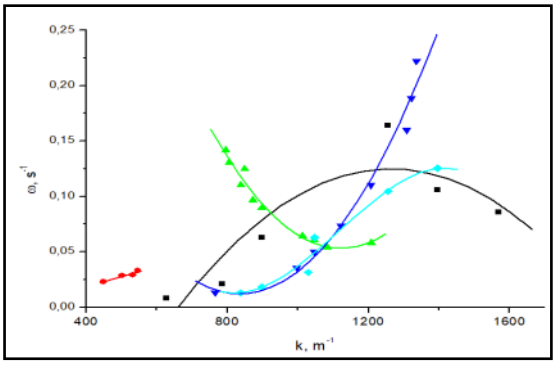



Рисунок - Дисперсионные кривые $\omega(k)$ для стадий: ■ – легкого скольжения в монокристаллах, ● - деформации Людерса, ▲- линейного деформационного упрочнения, ▼-параболического деформационного упрочения, ♦- коллапса автоволны локализованной пластичности

Таблица. Стадийность кривой пластического течения и дисперсионные соотношения

| Стадия кривой пластического течения | Зависимость напряжения от деформации | Дисперсионное соотношение | Тип нелинейного уравнения |
|---|---|---|---|
| Деформация Людерса | $\sigma = const \sim \varepsilon^0$ | $\omega(k) \sim \left(\frac{\Lambda}{\vartheta}\right) k \sim k$ | Клейна-Гордона |
| Линейное деформационное упрочнение | $\sigma \approx \theta_{II}\varepsilon \sim \varepsilon$ | $\omega(k) \sim \left(\frac{\Lambda^2}{\vartheta}\right) k^2 \sim k^2$ | нелинейное Шредингера |
| Параболическое деформационное упрочнение | $\sigma \approx \theta_{III}\varepsilon^{1/2} \sim \varepsilon^{1/2}$ | $\omega(k) \sim \left(\frac{\Lambda^{5/2}}{\vartheta}\right) k^{5/2} \sim k^{5/2}$ | - |
| Предразрушение (коллапс автоволны пластичности) | $\sigma \approx \theta_{IV}\varepsilon^n \sim \varepsilon^n$ | $\omega(k) \sim \left(\frac{\Lambda^3}{\vartheta}\right) k^3 \sim k^3$ | Кортевега-де Вриза |

Коэффициенты дисперсионных соотношений $\omega(k)$ содержат размер дислокационного ансамбля $\Lambda$ и время релаксации $\vartheta$. При этом величины $\Lambda^2$ и $\Lambda^3$ рассматриваются как площадь поверхности и объем элемента дислокационной субструтуры, соответственно, а форма дисперсионного соотношения (показатель β) прямо указывает на тип нелинейного уравнения, отвечающего процессу с диссипацией.

Так деформация Людерса описывается нелинейным уравнение Клейна-Гордона, стадия линейного деформационного упрочнения – нелинейным уравнением Шредингера, а стадия коллапса автоволны локализованной пластичности – уравнением Кортевега-де Вриза.

Опубликовано:

1. *Зуев Л.Б.* Квантованный характер скачкообразной пластической деформации // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 24. № 12. С. 9-11.

2. *Зуев Л.Б., Баранникова С.А.* Структурная природа дисперсии автоволн локализованной пластичности // Письма в ЖТФ. 2024. Т.24. № 24. С.

**FWRW-2022-0001**

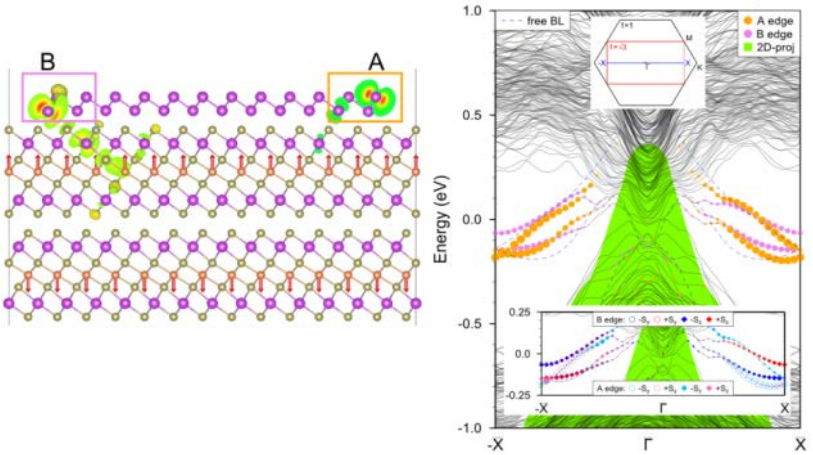
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), DIPC[2], СПбГУ[3], SiSOR[4], ИК СО РАН[5], НГУ[6], ИГМ СО РАН[7], МГУ[8], Сколтех[9]

## ОБЪЯСНЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ КВАНТОВЫМ СПИН-ХОЛЛОВСКИМ И КВАНТОВЫМ АНОМАЛЬНО-ХОЛЛОВСКИМ ИЗОЛЯТОРАМИ

**С.В. Еремеев**[1] (+7-3822-286-843, eremeev@ispms.ru), **И.И. Климовских**[2], **Д.А. Естюнин**[3], **С.О. Фильнов**[3], **К. Шимада**[4], **О.Е. Терещенко**[3,5,6], **К.А. Кох**[3,7], **А.С. Фролов**[8,9] и др.

Публикация: I.I. Klimovskikh, S.V. Eremeev, D.A. Estyunin, S.O. Filnov, K. Shimada, V.A. Golyashov, N.Yu. Solovova, O.E. Tereshchenko, K.A. Kokh, A.S. Frolov, A.I. Sergeev, V.S. Stolyarov, V. Mikšić Trontl, L. Petaccia, G. Di Santo, M. Tallarida, J. Dai, S. Blanco-Canosa, T. Valla, A.M. Shikin, E.V. Chulkov, Interfacing two-dimensional and magnetic topological insulators: Bi bilayer on $MnBi_2Te_4$-family materials, Mater. Today Adv. – 2024. – Vol. 23. – P. 100511.
DOI: 10.1016/j.mtadv.2024.100511, импакт-фактор 8.1.

Открытие собственного антиферромагнитного топологического изолятора $MnBi_2Te_4$, стимулирует исследования квантового аномального эффекта Холла (QAH). Фаза QAH характеризуется топологически защищенными киральными краевыми состояниями и квантованной холловской проводимостью в нулевом магнитном поле. Экспериментально подтверждено предсказанное антиферромагнитное межслоевое упорядочение, а также влияние обменного взаимодействия на топологическую зонную структуру. Ультратонкие пленки висмута, в частности бислой Bi(111), представляют собой один из наиболее перспективных 2D топологических материалов, уникальные свойства которого успешно продемонстрированы в различных структурах. В настоящей работе проведено изучение гетероструктуры состоящей из бислоёв Bi на поверхности $MnBi_2Te_4$. Показано, что топологические поверхностные состояния смешиваются с состояниями бислоя Bi, что приводит к специфической электронной структуре интерфейса. Обменное взаимодействие приводит к расщеплению одномерных краевых состояний в бислое, которое зависит от геометрии края и направления магнетизации в поверхностном слое, что делает данную гетероструктуру перспективной для использования в устройствах спинтроники.




Пространственное распределение заряда краевых состояний и краевая зонная структура бислоя висмута на поверхности $MnBi_2Te_4$. Пунктирные синие кривые показывают спектр зигзаг края в свободном бислое.

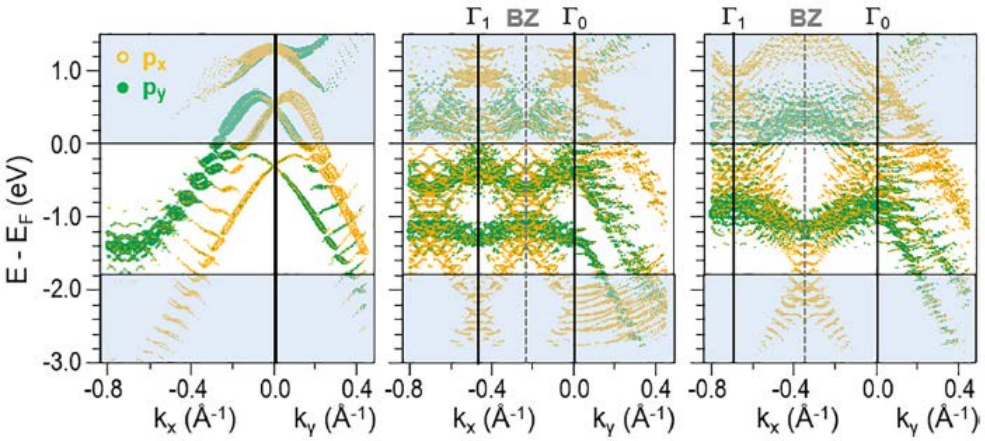
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)
DIPC[2], СПбГУ[3], UPV[4], ТПУ[5]

## ГЕЛИКОИДАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СПЛАВА $BiAg_2$ НА АТОМАРНО ТОЧНЫХ ВИЦИНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ СЕРЕБРА

**Ю.М. Коротеев**[1,2,3] (+7-3822-286-843, koroteev@ispms.ru), Х.Э. Ортега[2,4], Л.А. Святкин[2,5], Е.В. Чулков[2,3,4] и др.

Публикация: J.E. Ortega, G. Vasseur, F. Schiller, I. Piquero-Zulaica, A.P. Weber, J. Rault, M.A. Valbuena, S. Schirone, S. Matencio, L.A. Sviatkin, D.V. Terenteva, Y.M. Koroteev, E.V. Chulkov, A. Mugarza, J. Lobo-Checa, Atomically precise step grids for the engineering of helical states, Phys. Rev. B. – 2024. – Vol. 109. – P. 125427.
DOI: 10.1103/PhysRevB.109.125427, импакт-фактор 3.2.

Спин-орбитроника — новое направление электроники, использующей спин-орбитальное взаимодействие (СОВ), для генерации и регистрации спиновых токов, а также для управления этими токами. Создание элементной базы этой отрасли требует фундаментального понимания явлений обусловленных сильным СОВ. Поверхностный сплав $BiAg_2$, проявляющий СОВ большой силы, является хорошим кандидатом для изучения влияния рельефа поверхности на свойства спин-расщепленного двумерного электронного газа. В рамках теории функционала плотности изучено влияние вицинальной поверхности подложки Ag на геликоидальные состояния Рашбы поверхностного сплава $BiAg_2$. Когерентное рассеяние на ступенях поверхностей (1179) и (423) приводит к выраженной орбитально-селективной перестройке зон, при этом эффект сильного отталкивающего рассеяния на ступенях наблюдается в основном для $p_y$-зон. Сверхрешетка ступеней приводит также к сильной реконфигурации спиновой текстуры. В целом, наши результаты демонстрируют потенциал определенных ступенчатых сверхрешеток для создания спиральных зон не только с точки зрения дисперсии энергии, но и с точки зрения их спин-орбитальной текстуры.




Электронная структура геликоидальных состояний Рашбы поверхностного сплава $BiAg_2$ на гладкой (111) (слева) и вицинальных (1179) (в центре) и (423) (справа) поверхностях серебра. Поверхностные электронные зоны $p_y$ типа показаны зелеными, а $p_x$ типа желтыми кружками. Размер кружка пропорционален величине вклада состояний поверхностных атомов.

**FWRW-2022-0002**

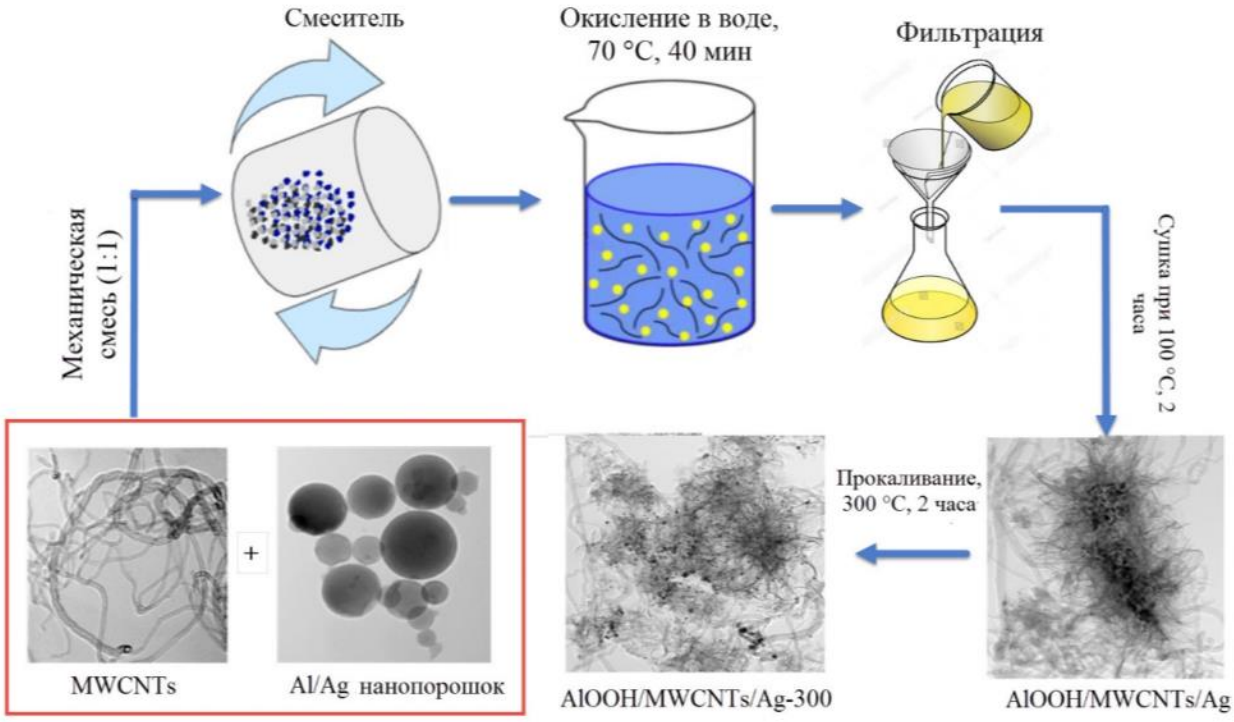
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## ГИБРИДНЫЙ АДСОРБЕНТ С АНТИМИКРОБНЫМИ СВОЙСТВАМИ

**С.О. Казанцев** (+79618877445, kzso@ispms.ru), **А.С. Ложкомоев** (+79138659911, asl@ispms.ru)

Публикация: статья – 10.1007/s00339-024-08017-1, IF 2,5.

Впервые получен гибридный адсорбент состава AlOOH/MWCNTs/Ag путем окисления водой наночастиц Al/Ag, закрепленных на поверхности углеродных нанотрубок. В результате окисления наночастиц формируются нанолистовые структуры AlOOH в виде цветка, в центре которых располагаются кластеры Ag. Установлено, что при нагревании адсорбента до 300 °C происходит миграции наночастиц серебра на периферию нанолистов и поверхность углеродных нанотрубок, что способствует заметному повышению антибактериальной активности материала. Установлено, что благодаря высокой удельной поверхности 265 $м^2/г$ и составу, полученный адсорбент способен в равной степени удалять из воды различные типы органических красителей. Максимальная адсорбционная емкость по метиленовому синему, эозину и индигокармину составила 63,1, 75,0 и 82,4 мг/г соответственно. Полученный материал может быть использован в качестве неселективного адсорбента для очистки воды с высоким бактериальным загрязнением.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## НАРУШЕННАЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СИММЕТРИЯ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР УЛУЧШЕНИЯ КАРБОКСИЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЙ

**Н.Г. Бобенко, В.Е. Егорушкин**

Публикация: Bobenko N., Shunaev V., Korusenko P., Egorushkin V., Gluchova O. Broken crystal symmetry of MWCNTs as the key factor in improvement of carboxyl functionalization // Synthetic Metals. – 2024. – Vol. 307. – P. 117677.

В рамках данного исследования были получены многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), легированные азотом МУНТ (N-МУНТ) и облученные ионным пучком N-МУНТ (irr-N-МУНТ). Irr-N-МУНТ продемонстрировали наибольшее количество углеродных кристаллитов, наличие дефектов Стоуна-Уэйлса, а также областей деформации растяжения-сжатия, сдвига и кручения. Все эти факторы способствовали увеличению карбоксильной функционализации на поверхности трубки. Скручивание суперячеек irr-N-МУНТ на 45 градусов снизило барьер для образования карбоксила в 2,5 раза по сравнению с недеформированными нанотрубками. В результате показано, что добавление азота, ионно-лучевое облучение и индуцированные деформации создают необходимые условия для функционализации COOH путем изменения физико-химических свойств поверхности МУНТ. Эти идеи подчеркивают потенциал инженерных углеродных нанотрубок в приложениях, требующих высокой реакционной способности поверхности и химической функциональности, таких как хранение энергии, сенсорные технологии, механическое усиление и биомедицина.

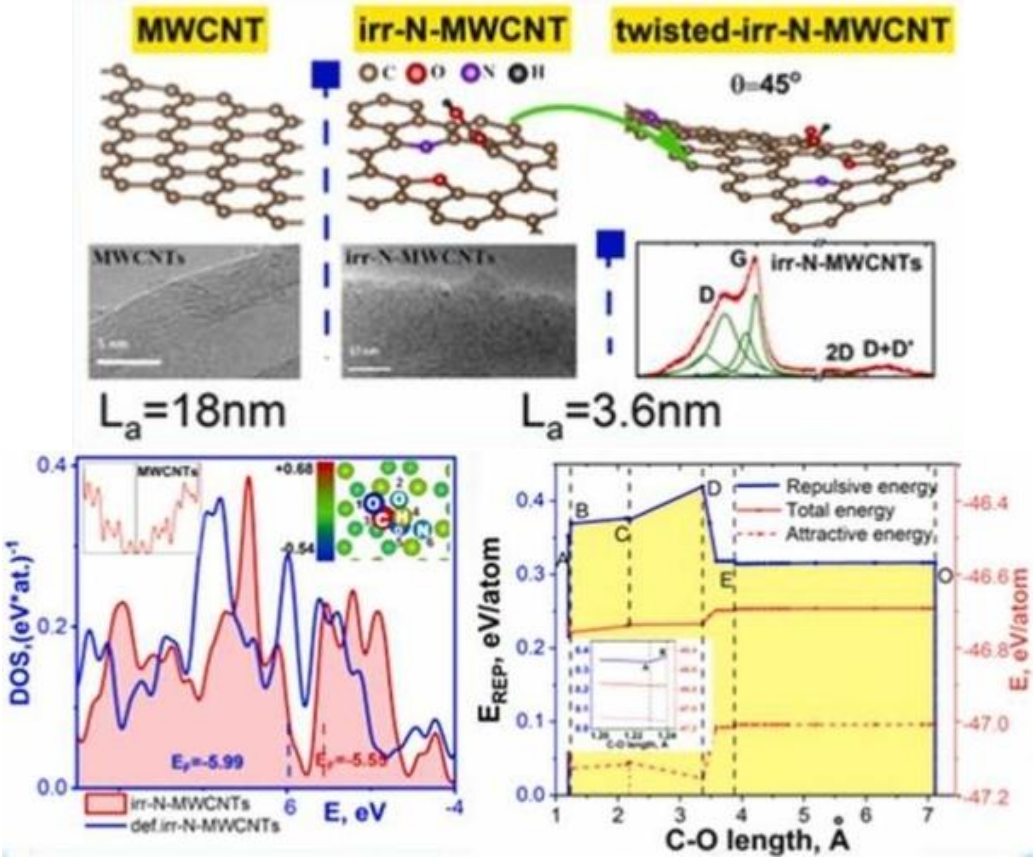



Рисунок – нарушенная симметрия кристалла в МУНТ, irr-N-МУНТ и скрученной на 45 градусов irr-N-МУНТ на электронную структуру, зарядовую плотность и полную энергию.

**FWRW-2022-0003**

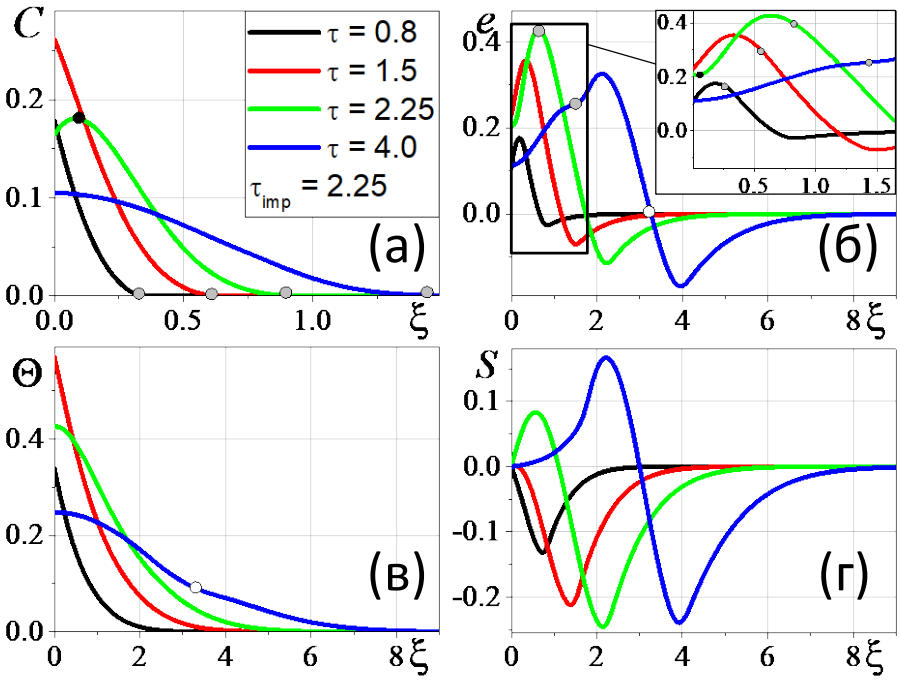
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## ВЗАИМОВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ, ТЕПЛОВОЙ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА ПОТОКОМ ЧАСТИЦ ПРОЯВЛЯЕТСЯ В ИСКАЖЕНИЯХ ВОЛН. ЭТО МОЖНО ОБНАРУЖИТЬ ТОЛЬКО ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВЯЗАННЫХ МОДЕЛЕЙ

**Е.С. Парфенова** (+73822286810, Linasergg@mail.ru), **А.Г. Князева** (+73822286831, anna-knyazeva@mail.ru)

Публикация: Parfenova E.S., Knyazeva A.G. The influence of external action on the dynamics of elastic, thermal and concentration waves propagation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 238, 126486. –https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126486, Impact Factor 5.0, Q1
Parfenova E.S., Knyazeva A.G. Surface treatment of metal by combined particle beam // International Journal of Engineering Science. 2024. Vol. 205, 104150. –https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2024.104150, Impact Factor 5.7, Q1

Результат получен на основе связанной нелинейной модели, в которой учтены перекрестные эффекты. Модель обоснована средствами термодинамики необратимых процессов. Исследование совместно протекающих диффузии внедряемой примеси, теплопроводности и распространения упругих возмущений на начальной стадии процесса поверхностной обработки потоком частиц показало, что искажения на профилях волн есть следствие взаимодействия разномасштабных процессов. В зоне диффузии на волне деформации искажения связаны с положением экстремумов и переднего фронта волны концентрации примеси (черный и серые круги на рисунках). На тепловой волне обнаружены искажения в местах изменения знака деформации (отмечено белым кругом на рисунке).




Примеры распределений концентрации внедряемой примеси (а); деформации (б); температуры (в); напряжений (г) в безразмерных переменных в разные моменты времени

**FWRW-2022-0004**

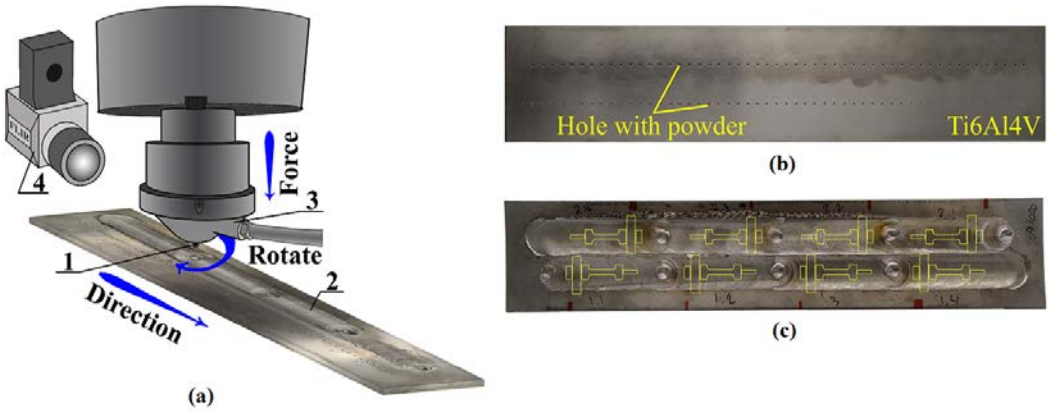
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА ВТ-6, ЛЕГИРОВАННОГО ПОРОШКАМИ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

**А.П.Зыкова**[1] (zykovaap@mail.ru), **А.В. Воронцов**[1] (телефон, e-mail), **С.Ю. Тарасов. Руководитель**[1] ( tsy@ispms.ru)

Публикация: статья –Anna Zykova, Andrey Vorontsov, Andrey Chumaevskii, Denis Gurianov, Nickolai Savchenko, Evgeny Kolubaev and Sergei Tarasov. Microstructures and Characterization of Ti6Al4V Alloy Friction Stir Alloyed with Cu and Al Powders. ES Materials and Manufacturing 2024, 25, 1205. DOI: 0.30919/esmm1205. (Q1, Impact factor 4.0).

Сотрудниками ИФПМ СО РАН изучена структурная эволюция и механические свойства титанового сплава после механического легирования смесями медных и алюминиевых порошков с помощью фрикционной перемешивающей обработки (ФПО). Композиционные материалы синтезировались путем подмешивания порошковых смесей с массовыми соотношениями Cu/Al 2:1, 1:1 и 1:2 в матрицу сплава Ti6Al4V с использованием инструмента ФПО из никелевого суперсплава. Содержание α(α')-Ti увеличивалось во всех образцах после первого прохода ФПО, но затем медленно уменьшалось с увеличением количества проходов ФПО до 4. В зоне перемешивания, полученной путем ФПО с подмешиванием смесей порошков 2:1, 1:1 и 1:2, были обнаружены интерметаллиды TixCuyAlz, TixAly и TixCuy. Максимальная прочность на растяжение в диапазоне 1050-1200 МПа была достигнута после 4-проходной ФПО на всех образцах с ~35% снижением пластичности по сравнению с исходным сплавом. Полученные композиты предназначены для улучшения традиционно низкой износостойкости титановых сплавов за счет in-situ образования интерметаллидных соединений.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ КОМПОЗИТОВ CUAL7-W-WC

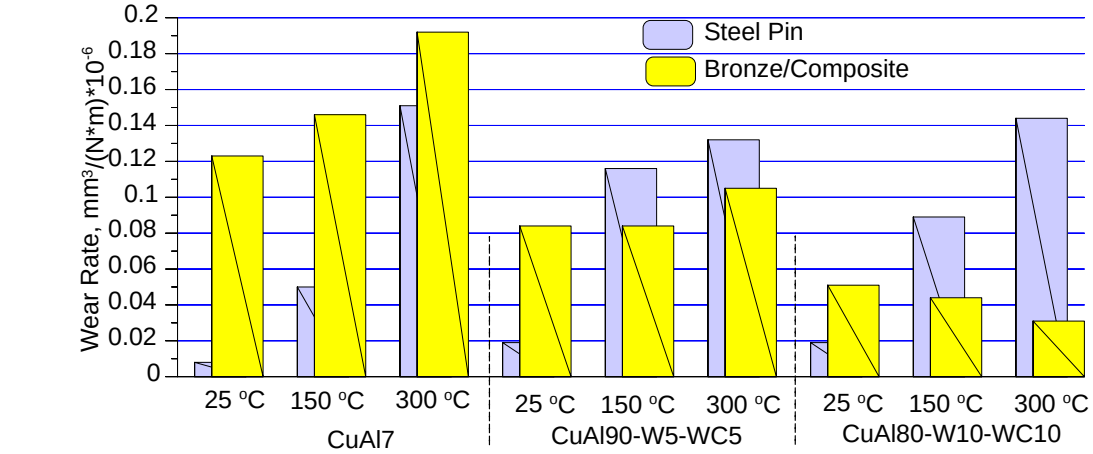
**Е.Н. Москвичев** (89138095914, em_tsu@mail.ru), **Н.Н. Шамарин** (89050790729, shnn@ispms.ru), **Н.Л. Савченко** (89069554541, savnick@ispms.ru)

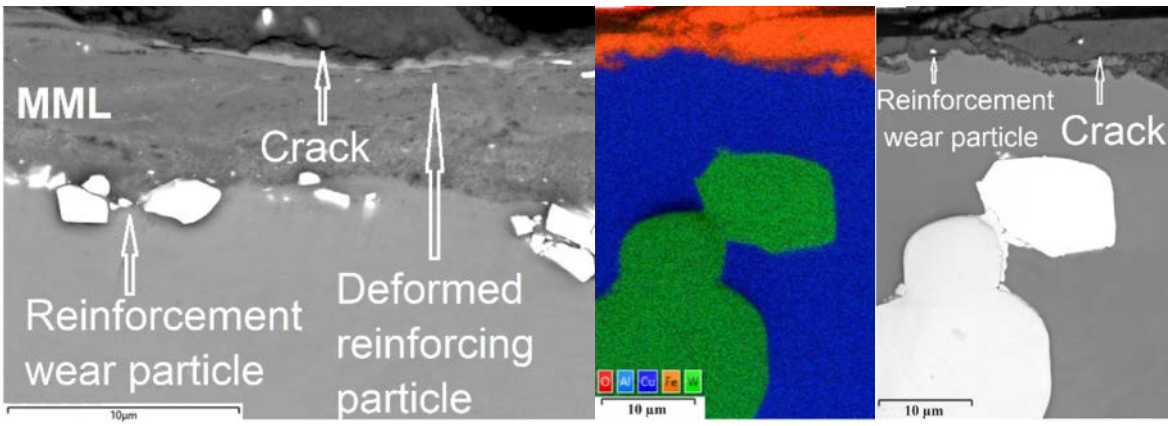
Публикация: Evgeny Moskvichev, Nikolay Shamarin, Nickolai Savchenko. High temperature tribological properties of additively manufactured WC reinforced CuAl7–W composites // Wear, Volumes 556–557, 15 November 2024, 205535 – https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205535 Q1, Impact factor 5.3;

Разработаны износостойкие композиционные материалы на основе алюминиевой бронзы с добавкой частиц вольфрама и карбида вольфрама. Такие композиты были получены с использованием гибридной аддитивной электронно-лучевой технологии с применением бронзовой проволоки и порошков W и WC.

За счет содержания в подповерхностной структуре композитов сильно деформированных вольфрам-содержащих частиц, которые экранировали абразивное действие W и WC, удалось добиться значительного прироста износостойкости материала. В то же время стальное контртело при повышенных температурах изнашивалось меньше, чем в случае пары “сталь/бронза CuAl7”.

Полученные композиты CuAl7-W-WC представляют большой интерес как для промышленного применения, так и для научных исследований, поскольку изменение их компонентов позволяет создавать материалы с превосходными механическими, физическими и химическими свойствами, адаптированными к конкретным применениям.



**FWRW-2022-0005**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН))

## ОБЪЕМНЫЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СИСТЕМЫ Ni-Al-Cr, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Е.Г. Астафурова** (+7-3822-286865, elena.g.astafurova@ispms.ru), **Е.А. Загибалова**, **С.В. Астафуров**, **Е.А. Колубаев**

Публикация: Astafurova E., Reunova K., Zagibalova E., Astapov D., Astafurov S., Kolubaev, E. Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Properties of Intermetallic Ni-Al-Cr Material Produced by Dual-Wire Electron-Beam Additive Manufacturing // *Metals* **2024**, *14*, 75. https://doi.org/10.3390/met14010075

Методом двухпроволочной электронно-лучевой аддитивной технологии с использованием промышленных проволок NiCr и Al получены объемные беспористые заготовки интерметаллидных сплавов системы Ni-Al-Cr. Экспериментально установлены закономерности формирования фазового состава интерметаллидов при вариации соотношения объемов проволок, подаваемых в процессе аддитивного производства. Показано, что при соотношении NiCr/Al=3/1 в заготовках образуется смесь упорядоченной и разупорядоченных фаз на основе интерметаллида $Ni_3(Al,Cr)$, а полученные образцы обладают хорошими механическими свойствами (предел текучести 650 МПа, удлинение более 10% при T = 873K). Полученные результаты показали перспективность двухпроводного электронно-лучевого аддитивного производства сплавов для высокотемпературного применения.

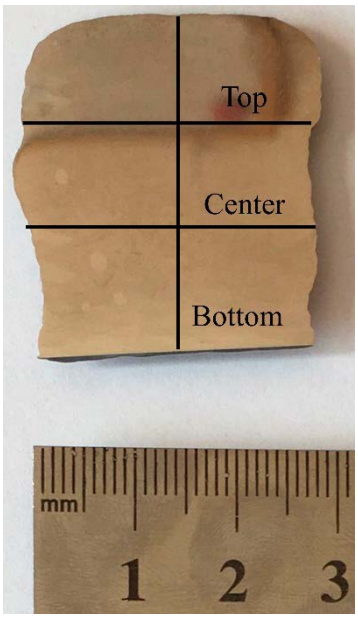



Рисунок. Металлографическое изображение поперечного сечения заготовки интерметаллидного сплава системы Ni-Al-Cr, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производства.

**FWRW-2024-0001**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

**А.О. Панфилов** (panf-o@mail.ru), **А.В. Воронцов** (vav@ispms.ru), **В.В. Шмаков** (vvs82@tpu.ru), **Н.Л. Савченко** (savnick@ispms.ru), **Д.А. Гурьянов** (gurianov@ispms.ru), **А.А. Гусаренко** (aag@ispms.ru), **В.Р. Утяганова** (filaret_2012@mail.ru), **В.А. Красновейкин** (volodia74ms@yandex.ru), **С.Ю. Тарасов** (tsy@ispms.ru), **А.П. Зыкова** (zykovaap@mail.ru)

A. Zykova, A. Panfilov, A. Vorontsov, V. Shmakov, N. Savchenko, D. Gurianov, A. Gusarenko, V. Utyaganova, V. Krasnoveikin, S.Tarasov. Microstructural and phase evolution of Ti6Al4V in electron beam wire additive manufacturing and on the subtransus quenching and normalization // Materials Science & Engineering A. - 2024. - Vol. 898. - P. 146384. https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146384 (Impact Factor 6.1, Q1)

Установлено, что микроструктура ВТ6, полученного электронно-лучевой аддитивной технологией, неоднородна и характеризуется такими структурно-фазовыми состояниями как: зернограничная α-фаза, колонии α/β пластин, α/α′′ и $\alpha/\alpha_2$. Закалка ВТ6 при 900 °С с последующим охлаждением в воде привела к сохранению структуры зернограничной α-фазы и $\alpha/\alpha_2$, тогда как α/β превратилась в α/α′. Нормализация ВТ6 при 900 °С с последующим охлаждением на воздухе привела к образованию α′′-Ti и ω-Ti помимо первичной α-фазы. Ориентационное соотношение α-Ti зависело от интенсивности нагрева таким образом, что количество зерен с углами разориентировки 60, 60.8, 63.3° увеличивалось от исходного образца ВТ6 к нормализованному. После закалки повышаются значения предела прочности и пластичности в среднем на 10%, что приводит к наилучшему их соотношению, по сравнению с ВТ6 без термообработки.

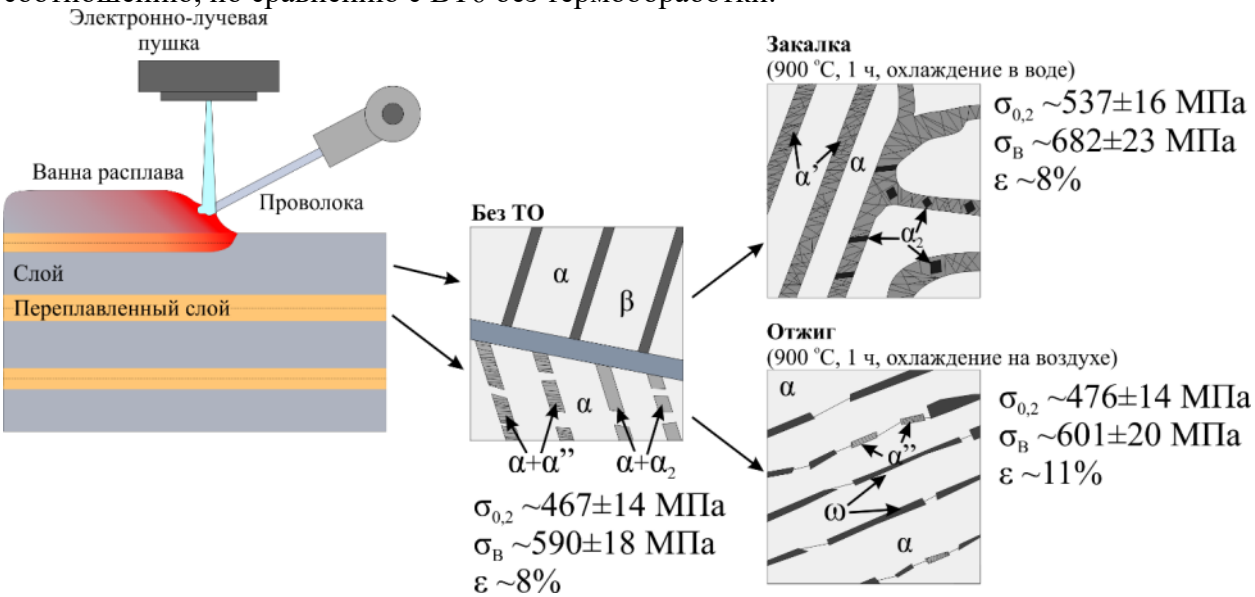



Схема печати и схематические изображения микроструктуры ВТ6, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией, после закалки и после нормализации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЕВОЙ БРОНЗЫ БрАМц3-1 МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ДУГОВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

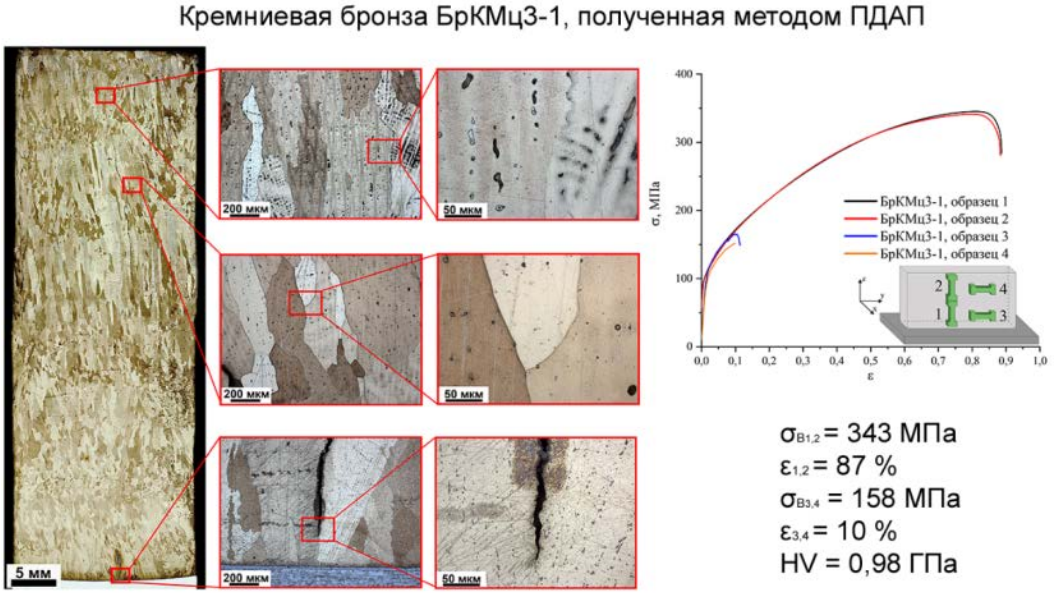
**А.О. Панфилов** (panf-o@mail.ru), **А.В. Николаева** (philip371g@gmail.com), **В.М. Семенчук** (svm_70@ispms.ru), **Д.А. Гурьянов** (gurianov@ispms.ru), **Н.Л. Савченко** (savnick@ispms.ru), **А.В. Воронцов** (vav@ispms.ru), **С.Ю. Тарасов** (tsy@ispms.ru), **А.П. Зыкова** (zykovaap@mail.ru)

Zykova, A.P.; Panfilov, A.O.; Nikolaeva, A. V; Semenchuk, V.M.; Gurianov, D.A.; Savchenko, N.L.; Vorontsov, A. V; Tarasov, S.Y. Characterization microstructure and mechanical behavior of WAAM silicon bronze CuSi3Mn1 // Materials Letters. – 2024. Vol. 377. – P. 137397. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137397. (Q2, Impact factor 2.7).

Особенностью полученной бронзы является её дендритная микроструктура, куда заложена уникальная комбинация как столбчатых, так и равноосных зерен α-Cu, дополненная частицами $Mn_5Si_3$ и $MnFe_2Si$ в междендритных пространствах. Однако зафиксировано формирование горячих трещин в зонах, где концентрация силицидов оказалась наиболее высокой. Это привело к существенным различиям в прочности напечатанных образцов, в зависимости от их ориентации: вертикально расположенные образцы продемонстрировали прочность на растяжение 158 МПа, в то время как горизонтально ориентированные – до 343 МПа.

Полученные результаты имеют не только академическую ценность, но и благоприятно сказываются на промышленном применении проволочной дуговой аддитивной технологии (WAAM) для производства сложных компонентов. Используя предлагаемую технологию получения кремниевой бронзы, производители могут разрабатывать и создавать детали повышенной сложности с улучшенными свойствами, что открывает новые возможности в авиастроении, машиностроении и энергетике.

Этот не только подчеркивает значимые механизмы формирования микроструктуры в процессе 3D печати, но и подкрепляет возможность использования аддитивных технологий для создания деталей с предсказуемыми свойствами.




Изображение напечатанной стенки из кремниевой бронзы с дендритной микроструктурой

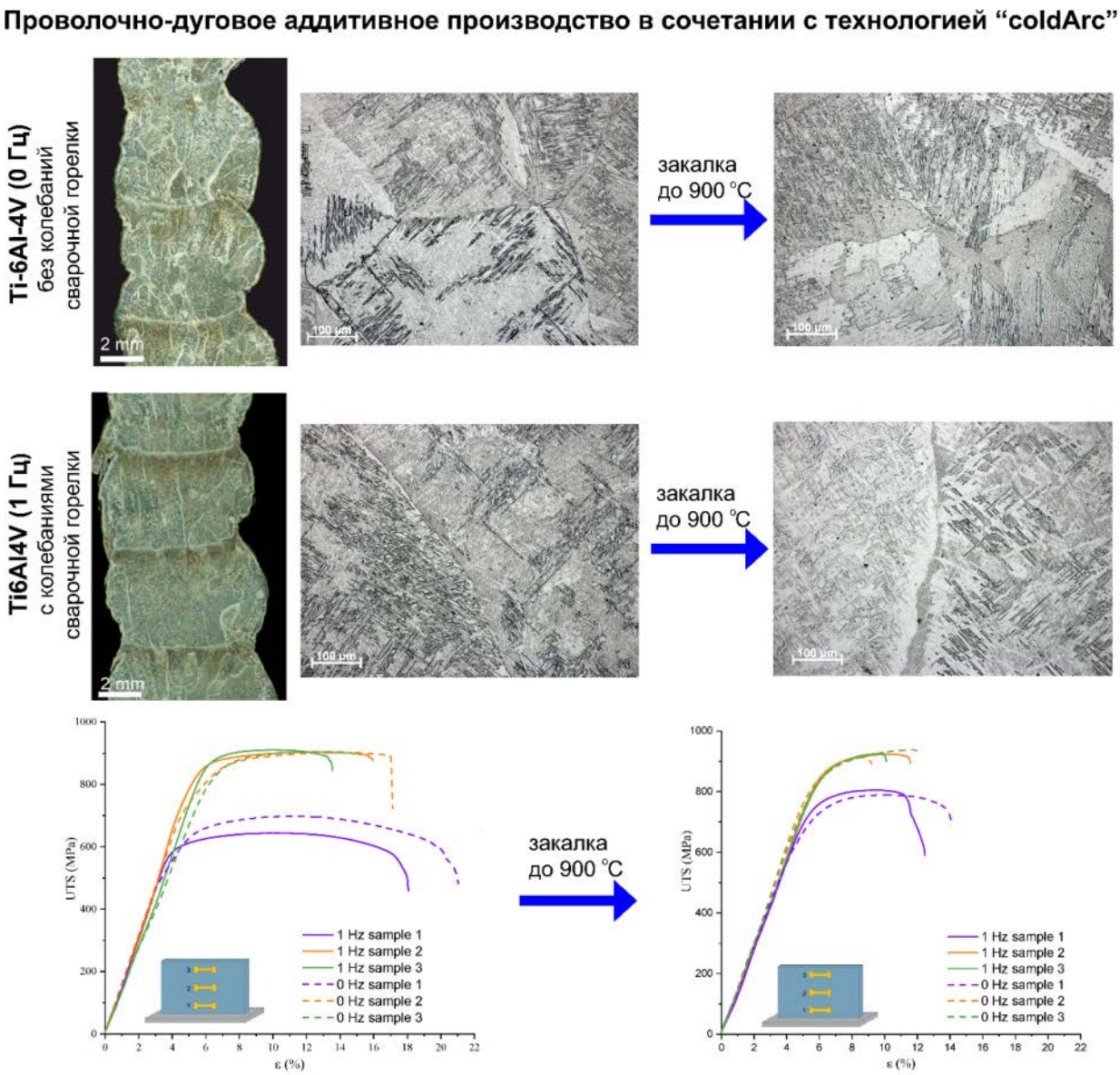
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

## ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ ПЕЧАТИ И ЗАКАЛКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

**Н.Л. Савченко** (savnick@ispms.ru), **А.В. Николаева** (philip371g@gmail.com), **А.О. Панфилов** (panf-o@mail.ru), **А.В. Воронцов** (vav@ispms.ru), **В.М. Семенчук** (svm_70@ispms.ru), **Д.А. Гурьянов** (gurianov@ispms.ru), **Е.А. Колубаев** (eak@ispms.ru), **С.Ю. Тарасов** (tsy@ispms.ru), **А.П. Зыкова** (zykovaap@mail.ru)

A. Zykova, N. Savchenko, A. Nikolaeva, A. Panfilov, A. Vorontsov, V. Semenchuk, D. Gurianov, E. Kolubaev, S. Tarasov. Effect of “ColdArc” WAAM Regime and Arc Torch Weaving on Microstructure and Properties of As-Built and Subtransus Quenched Ti-6Al-4V // Materials. – 2024. – Vol. 17(10). – P. 2325. https://doi.org/10.3390/ma17102325 (Impact Factor 3.1, Q2)

По сравнению с обычными дуговыми процессами технология «coldArc» обеспечивает стабильность дуги и строго контролируемое тепловложение, что позволяет управлять процессом изготовления изделия. Экспериментально установлено, что стратегия печати с поперечными колебаниями сварочной горелки с частотой 1 Гц препятствует эпитаксиальному росту β-зерен, что способствует формированию более однородной структуры со столбчато-равноосными зернами с более низким значением соотношения длины к ширине первичных β-зерен. Обнаружено, что при охлаждении внутри первичных зерен β-Ti формируется более однородная структура $\alpha/\alpha'+\beta$ по всей высоте изделия по сравнению со стратегией печати без использования колебаний сварочной горелки. Закалка образцов сплава ВТ6, без использования колебаний сварочной горелки, после нагрева до 900 °C с последующим охлаждением в воде приводит к более однородной структуре. Показано, что закалка практически не влияет на структуру и свойства сплава ВТ6, полученного с поперечными колебаниями сварочной горелки. При этом для обеих стратегий нанесения слоев после закалки уменьшается удлинение, предшествующее разрушению, в среднем на 30%. Таким образом, получение образцов ВТ6 методом проволочно-дугового аддитивного производства в сочетании с технологией “coldArc” со стратегией осаждения 1 Гц имеет большой потенциал стать основным направлением производства этого сплава с высоким уровнем механических характеристик. Данные сплавы могут быть использованы в качестве сложных по форме изделий в таких отраслях промышленности, как аэрокосмическая, энергетическая, ядерная и биомедицина.




Макро- и микроструктура в поперечном сечении, кривые напряжение-деформация при испытаниях на растяжение сплавов ВТ6 (без колебаний сварочной горелки) и ВТ6 (с колебаниями сварочной горелки) до и после закалки