Наиболее значимые научные результаты ИФПМ СО РАН, полученные в рамках проектов государственного задания в 2022 году

Динамика поверхности Cu(001) с субмонослойными покрытиями свинца

Тонкие пленки свинца привлекают большое внимание благодаря наличию сверхпроводимости и формированию волны зарядовой плотности, что стимулирует активный интерес к их электронной и фононной структуре. Случай субмонослойных покрытий Pb, выращенных на Cu(001) представляет собой систему с несогласованной решеткой, демонстрирующую богатую и сложную феноменологию. В области субмонослойного покрытия наблюдается несколько поверхностных структур и фазовых переходов. Для покрытий ниже 0.6 ML существуют различные структуры поверхности: структура $c(4\times4)$, представляющая собой поверхностный сплав; адслой со структурой $c(2\times2)$ и структура $c(5\sqrt{2}\times\sqrt{2})$, содержащая доменные стенки. В настоящей работе с использованием потенциалов межатомного взаимодействия построенных в методе погруженного атома исследована взаимосвязь атомной структуры покрытий и фононных спектров в различных двумерных фазах. Дополнительные расчеты равновесной атомной структуры этих фаз выполнены с использованием теории функционала электронной плотности. Показано, что динамическая устойчивость структур Pb/Cu(001) увеличивается с увеличением покрытия от 0.375 ML [$c(4\times4)$] до предельного 0.6 ML [$c(5\sqrt{2}\times\sqrt{2})$], когда формируется плотный слой Pb. Увеличение покрытия также приводит к постепенному смещению Рэлеевской моды поверхности меди в сторону более высоких энергий и появлению новых смешанных мод колебаний адсорбат-подложка.

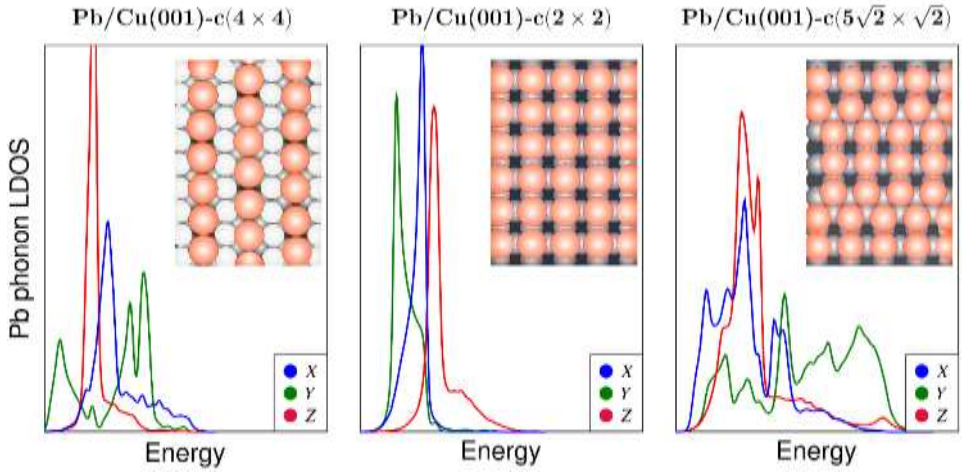


Рисунок – Парциальные плотности фононных состояний Pb для разных покрытий

Авторы: к.ф.-м.н. Борисова С.Д., д.ф.-м.н. Еремеев С.В., д.ф.-м.н. Русина Г.Г.

Опубликовано: Borisova S.D., Eremeev S.V., Rusina G.G., Chulkov E.V. Surface dynamics on submonolayer Pb/Cu(001) surfaces // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2022. – Vol. 24. – P. 5164–5170. – DOI: 10.1039/D1CP05705G.

Тема FWRW-2022-0001

Влияние концентрации примесей на диффузии H и O в сплавах титана

Разработан подход, позволяющий учитывать влияние концентрации примесей замещения, а также их комбинаций на диффузию легких элементов (водород, кислород) в титановых сплавах. Проведены расчеты температурного коэффициента диффузии с использованием метода Лендмана и статистического подхода, а также миграционных барьеров и энергий нулевых колебаний, полученных методом теории функционала плотности. Принималась во внимание концентрация примесей, а также их положение относительно диффундирующего атома. Впервые получены аналитические выражения для температурного коэффициента диффузии водорода в идеальном и легированном TiFe. Установлено, что из всех рассмотренных примесей Ni и Co на подрешетке железа, а также Al, замещающий титан, замедляют диффузию водорода. Метод был апробирован также на сплавах Ti-Al, при этом рассматривалась диффузия кислорода. Показано, что в случае нескольких примесей наиболее стабильной является конфигурация с примесными атомами, расположенными во вторых соседях относительно друг друга. Показано, что легирование Nb, а также Nb-Ta понижает коэффициент диффузии кислорода, тогда как Nb-Si или Nb-Al, напротив, приводит к его увеличению независимо от метода расчета. Данные исследования направлены на прояснение механизмов охрупчивания или окисления титановых сплавов и могут быть полезны для разработки путей повышения их функциональных свойств, в том числе при высоких температурах.

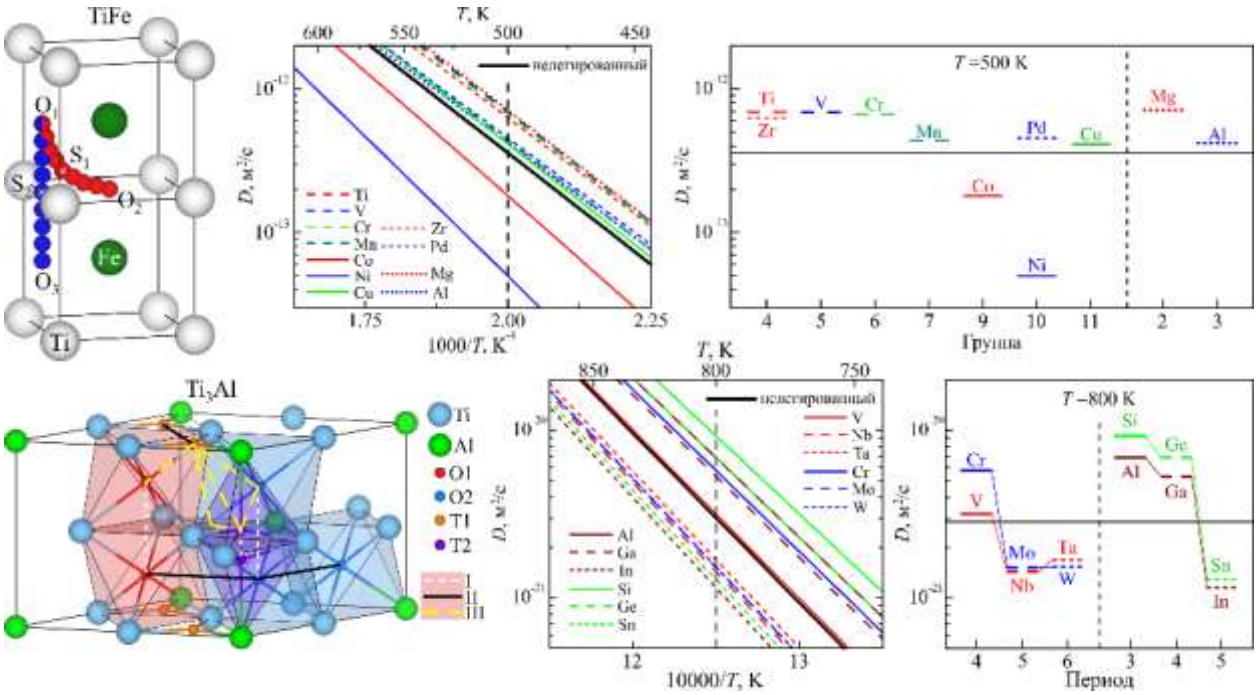


Рисунок – Влияние примесей на диффузию H в TiFe (вверху) и O в Ti_3Al (внизу)

Авторы: д.ф.-м.н. Кулькова С.Е., к.ф.-м.н. Бакулин А.В., Чумакова Л.С., Каспарян С.О.
Опубликовано:

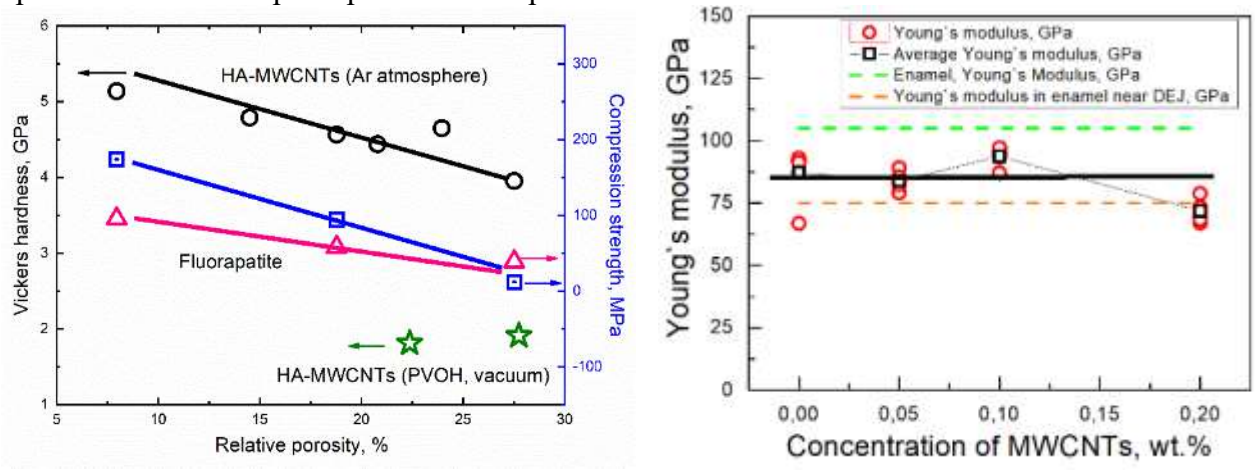
1. Kulkova S.E., Bakulin A.V., Chumakova L.S. Diffusion properties of hydrogen in B2-TiFe // Phys. Mesomech. – 2022. – Vol. 25. – No. 5. – P. 424–431.

2. Bakulin A.V., Kulkov A.S., Kulkova S.E. Impurity influence on the hydrogen diffusivity in B2-TiFe // Int. J. Hydrogen Energy. – 2022. (in print).

Тема FWRW-2022-0001

Модуль Юнга и твердость по Виккерсу гидроксиапатитовой биокерамики с малым количеством многослойных углеродных нанотрубок

Экспериментально исследованы механические характеристики композитной керамики гидроксиапатита (ГА), содержащей небольшое количество многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) в диапазоне 0.05–0.5% масс. Показано, что увеличение концентраций нанотрубок приводит почти к линейному повышению твердости по Виккерсу в 1.3 раза и прочности композита на сжатие, что сопоставимо по абсолютным значениям с литературными данными по твердости (3-5 ГПа) и прочности на сжатие (95–370 МПа) эмали. Аналогичная линейная тенденция для твердости и прочности наблюдалась с изменением пористости композита (рисунок а). Результаты исследования модуля Юнга композита в зависимости от концентрации МУНТ представлены на рисунке (б). Красные кружки показывают рассчитанный модуль Юнга для каждого испытания на вдавливание в каждом образце. Средние модули Юнга показаны незаштрихованными квадратными символами. Черная линия (средний модуль Юнга для ГА керамики без добавок) и зеленая линия (наибольшее и наименьшее эталонное значение модуля Юнга для эмали) представлены для сравнения. Выявлено, что существенной разницы между модулем Юнга спеченных композитов ГА-МУНТ и ГА керамики без добавок МУНТ не наблюдается. При варьировании концентраций нанотрубок данный параметр для спеченного композита изменяется незначительно и близок к эмали (75–100 ГПа). Добавки многослойных углеродных нанотрубок приводят к повышению как показателя упругости в ~1,5 раза, так и сопротивления пластической деформации в ~3 раза, что улучшает трибологические характеристики поверхности.



а б

Рисунок – (а) зависимость средней твердости по Виккерсу и прочности на сжатие от относительной пористости; (б) зависимость модуля Юнга от концентраций МУНТ композита ГА–МУНТ

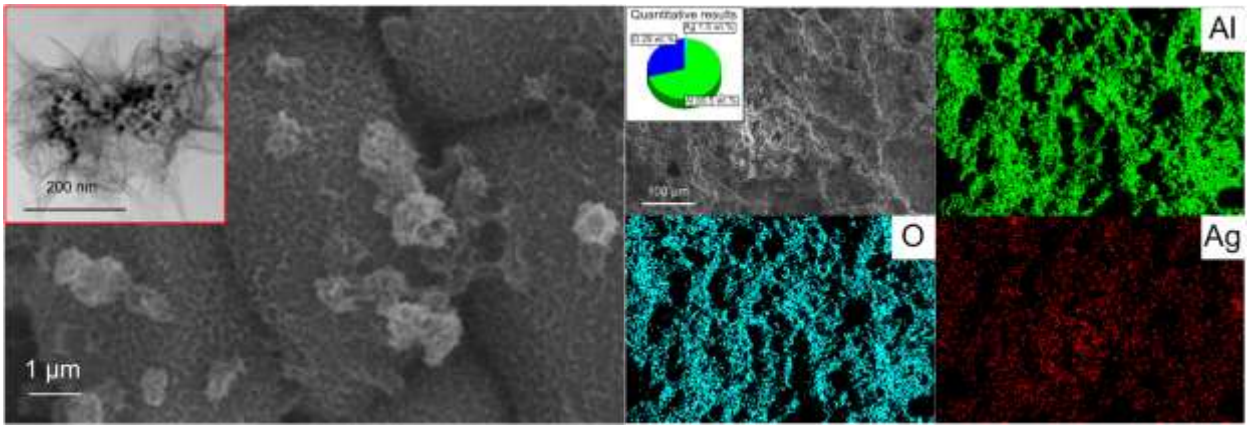
Авторы: к.ф.-м.н. Пономарев А.Н., Резванова А.Е.

Опубликовано: Barabashko M, Ponomarev A., Rezvanova A., Kuznetsov V., Moseenkov S. Young's Modulus and Vickers Hardness of the Hydroxyapatite Bioceramics with a Small Amount of the Multi-Walled Carbon Nanotubes //Materials. – 2022. – Vol. 15. – No. 15. – P. 5304. https://doi.org/10.3390/ma15155304.

Тема FWRW-2022-0002

Формирование и антибактериальная активность композиционного покрытия AlOOH/Ag на макропористой α-Al_2O_3 керамике

Пористая керамика зачастую нуждается в модификации поверхности, которая может быть реализована добавлением различных функциональных группы или наночастиц. Модификация позволяет улучшить сорбционные и селективные характеристики керамики, ее антимикробные и фотохимические свойства, а также каталитическую активность. В работе на поверхности макропористой α-Al_2O_3 керамики, были сформированы наноструктурные покрытия из нанолистового бемита (AlOOH), импрегнированного наночастицами Ag. Модификация позволила повысить эффективность удаления бактерий из воды с 76 до 98 % в динамическом режиме фильтрации. Полученные материалы могут быть использованы в системах микробиологической очистки воды, при этом керамическая основа позволяет проводить термическую регенерацию.



а б

Рисунок – Изображение поверхности пористой Al_2O_3 керамики, покрытой наноструктурами AlOOH/Ag (а); распределение элементов на поверхности пористой Al_2O_3 керамики после модификации наноструктурами AlOOH/Ag (б).

Авторы: Сенькина Е.И., к.ф.-м.н. Буяков А.С., Казанцев С.О., д.т.н. Бакина О.В., д.т.н. Ложкомоев А.С.

Опубликовано: Senkina E.I., Buyakov A.S., Kazantsev S.O., Bakina O.V., Krinitsyn M.G., Lozhkomoev A.S. Formation and Antibacterial Activity of AlOOH/Ag Composite Coating on Macroporous α-Al2O3 Ceramics // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – No. 8. – P. 1107.

Тема FWRW-2022-0002

Роль генерации вакансий в распространении концентрационных и механических волн при обработке металла потоком частиц

Предложена и обоснована в рамках термодинамики необратимых процессов математическая модель начальной стадии поверхностной обработки металла потоком частиц с учетом генерации вакансий. Модель учитывает взаимодействие разномасштабных процессов — диффузии внедренного материала и механических возмущений; конечность времени релаксации потока массы, что важно для быстропротекающих процессов; нелинейную зависимость коэффициента диффузии от состава и концентрации вакансий. Образование вакансий в процессе обработки в рамках динамической модели учтено впервые. Разработан алгоритм численной реализации модели. Выявлены изменения параметров и структуры волнового фронта, связанные с образованием вакансий. Показано, что при учете вакансий проникновение примеси в поверхностный слой подложки происходит быстрее, а на упругой волне наблюдается увеличение экстремумов. Существенное отклонение от равновесного значения концентрации вакансий замечено в области нахождения экстремумов напряжений и деформаций, не совпадающих с экстремумами концентраций.

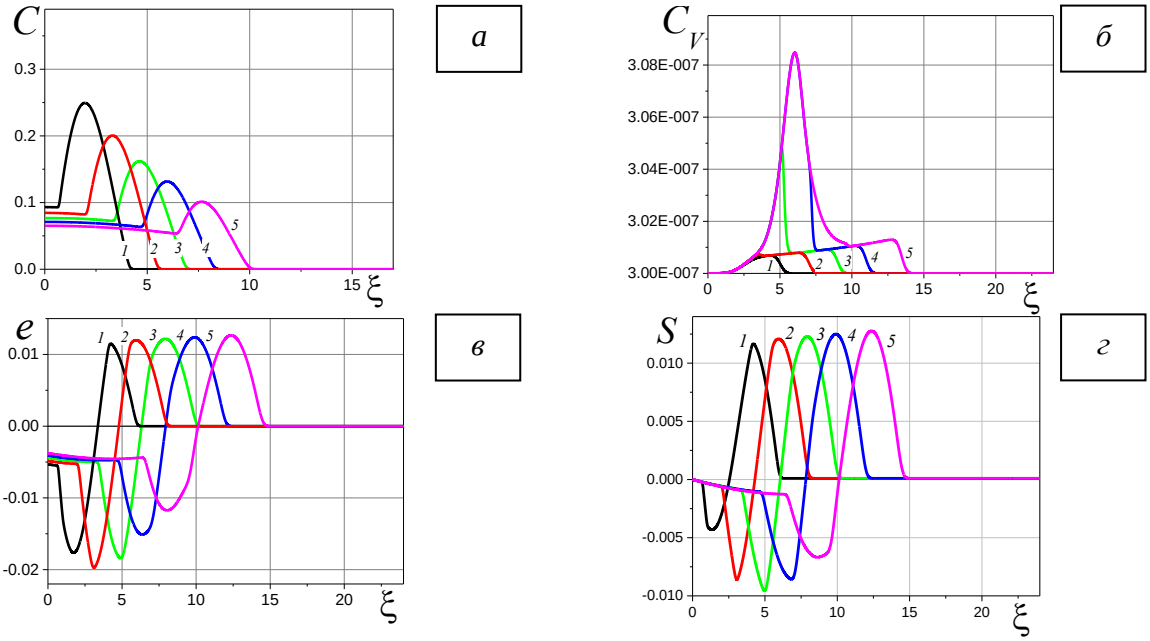


Рисунок – Пример решения связанной задачи. Распределения концентрации внедряемой примеси (*а*), концентрации вакансий (*б*), деформации (*в*) и напряжения (*г*) в разные моменты времени: 1 – 6.0; 2 – 8.0; 3 – 10.0; 4 – 12.0; 5 – 14.5.

Авторы: д.ф.-м.н. Князева А.Г., к.ф.-м.н. Парфенова Е.С.

Опубликовано:

Knyazeva A. G., Parfenova E. S. Nonlinear thermal elastic diffusion problems applicable to surface modification//Advanced Problems in Mechanics II. AP M 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2022. – P. 126–147.

Parfenova E.S., Knyazeva A.G. The chemical interaction charged particles with target material under surface treatment of metal with particle beam//ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics (в печати).

Князева А.Г., Парфенова Е.С. Программа для изучения начальной стадии процесса поверхностной обработки материала потоком частиц: Заявка на свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – 2022.

Тема FWRW-2022-0003

Проволочное электронно-лучевое аддитивное производство рассмотрено в качестве способа восстановления поврежденных изделий

Применение дорогостоящих жаропрочных никелевых сплавов накладывает существенные ограничения на возможность выпуска новых изделий взамен поврежденных в процессе эксплуатации или производства. С этой точки зрения часто используются методы восстановления поврежденных деталей. В опубликованной работе оценивалась возможность восстановления изделия из жаропрочного сплава на основе никеля (поврежденного в процессе производства, до стадии термообработки) методом проволочного электронно-лучевого аддитивного производства, а также исследовалась структурная однородность и свойства материала восстановленного аддитивного изделия. В ходе исследования было проведена имитация восстановления механически поврежденного изделия. Для этого было аддитивно сформировано изделие в виде тонкой стенки, затем с его поверхности было механически удалено несколько слоев. После чего на «поврежденной» поверхности продолжили аддитивно формировать изделие. Показано, что переходная область не содержит макро- и микродефектов. Количественный анализ результатов структурных исследований показал, что в переходной области структура материала изделия представлена более крупными дендритами по сравнению с исходным изделием и восстановленной областью. Также наблюдается увеличение размеров выделений γ′-фазы в переходной области. Оба явления связаны с увеличением результирующей погонной энергии в переходной области. Состав осей дендритов в трех областях не имеет существенных различий, что указывает на сохранение степени микросегрегации легирующих элементов. Химический состав γ-фазы аддитивно сформированного изделия отличается от исходного литого материала повышенным содержанием хрома и вольфрама, что является благоприятным эффектом, увеличивающим несоответствие между параметрами кристаллической решетки γ′ и γ фаз. Механические свойства и характер разрушения всех трех областей примерно одинаковы, за исключением того, что самый высокий предел прочности при растяжении достигается в области восстановления (1312 ± 94 МПа), а самое низкое относительное удлинение - в исходном изделии (2,6 ± 0,7%).

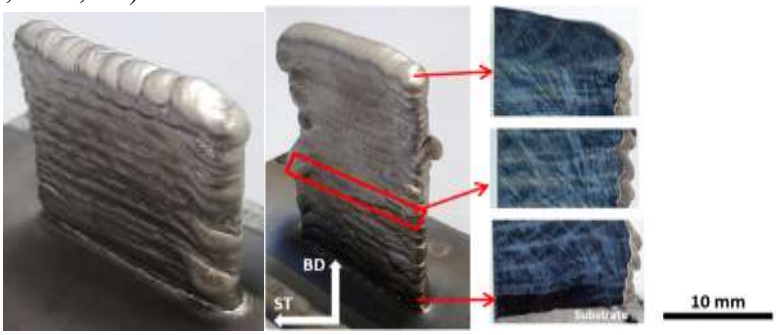


Рисунок – Общий вид исходного (а) и восстановленного (б) изделия, макроструктура материала изделия в продольном разрезе (в). BD-направление аддитивного выращивания, ST-траектория сканирования. Замкнутая красная линия показывает переходную область.

Авторы: Гурьянов Д.А., к.ф.-м.н Фортуна С.В., Никонов С.Ю., к.т.н. Калашникова Т.А., д.т.н. Чумаевский А.В., Утяганова В.Р., д.т.н. Колубаев Е.А., к.ф.-м.н Рубцов В.Е.

Опубликовано:

Assessment of Structure and Properties Homogeneity after Repairing of a Nickel-Based Superalloy Product by the Electron Beam Additive Technology. D. Gurianov, S. Fortuna, S. Nikonov [et al.]//Crystals. 2022. V. 12. P. 1400.

Тема FWRW-2022-0004

Особенности высокоскоростных процессов сварки алюминиевого сплава AA5059

Проведен сравнительный анализ сварных соединений алюминиевых сплавов AA5059, полученных высокоскоростной гибридной лазерно-дуговой сваркой и высокоскоростной лазерной сваркой. В работе показано, что при высокоскоростной гибридной лазерно-дуговой сварке и высокоскоростной лазерной сварке скорость сварки 7 м/мин способствует наименьшему испарению Mg и повышению прочности более чем на 95 % по сравнению с прочностью исходного сплава. Пористость сварного соединения, полученного высокоскоростной гибридной лазерно-дуговой сваркой, минимальна (0,02 %), а размер зерна меньше, чем у сварного соединения, полученного высокоскоростной лазерной сваркой. Значения микротвердости сварного шва, полученного высокоскоростной гибридной лазерно-дуговой сваркой, аналогично исходному сплаву в отличие от сварного соединения, полученного высокоскоростной лазерной сваркой, где наблюдается локальное повышение микротвердости.

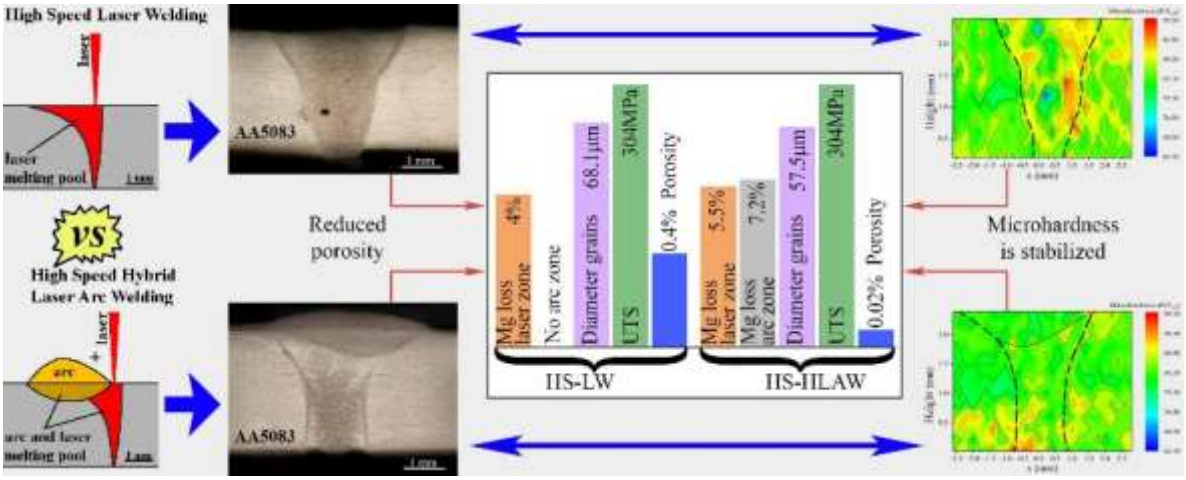


Рисунок – Структура и свойства образцов после лазерной и гибридной лазерной сварки

Авторы: к.т.н. Воронцов А.В., к.ф.-м.н. Зыкова А.П., д.т.н. Чумаевский А.В., д.т.н. Колубаев Е.А.

Опубликовано:

A. Vorontsov, A. Zykova, A. Chumaevskii, E. Kolubaev. Outstanding features of high-speed hybrid laser-arc welding compared to high-speed laser welding of AA5083 aluminum alloys//Vacuum. - 2022. - Vol. 196. - № 110736.

Тема FWRW-2022-0004

Микроструктура и механические свойства легированной ниобием аустенитной нержавеющей стали, полученной методом электронно-лучевого аддитивного производства

Исследованы фазовый состав, микроструктура и механические свойства образцов легированной ниобием аустенитной нержавеющей стали Fe-18.7Cr-9.5Ni-1.4Nb-1.6Mn-0.7Si-0.5Al-0.2Mo-0.2Co-0.1C (масс.%), полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства (ЭЛАП) с последующими термическими обработками при температуре 1100°C (ТО). Показано, что легирование стали ниобием способствует стабилизации аустенитной структуры, но не подавляет формирование столбчатой зёренной структуры в процессе ЭЛАП. Образцы в исходном состоянии (ИС, непосредственно после аддитивного выращивания) обладают преимущество аустенитной структурой с дендритами δ-феррита ($V_δ$=5-7 %, рисунки а,д) и обогащенными ниобием частицами Fe_2Nb, FeNb и NbC (рисунок б). Снижение объемного содержания δ-феррита и растворение частиц интерметаллидных фаз Fe_2Nb, FeNb в результате ТО (рисунки в,г,д) сопровождается незначительным снижением предела текучести и увеличением пластичности образцов (рисунок е). Механические свойства аддитивно-полученных сталей сопоставимыми со свойствами сталей, полученных традиционными методами.

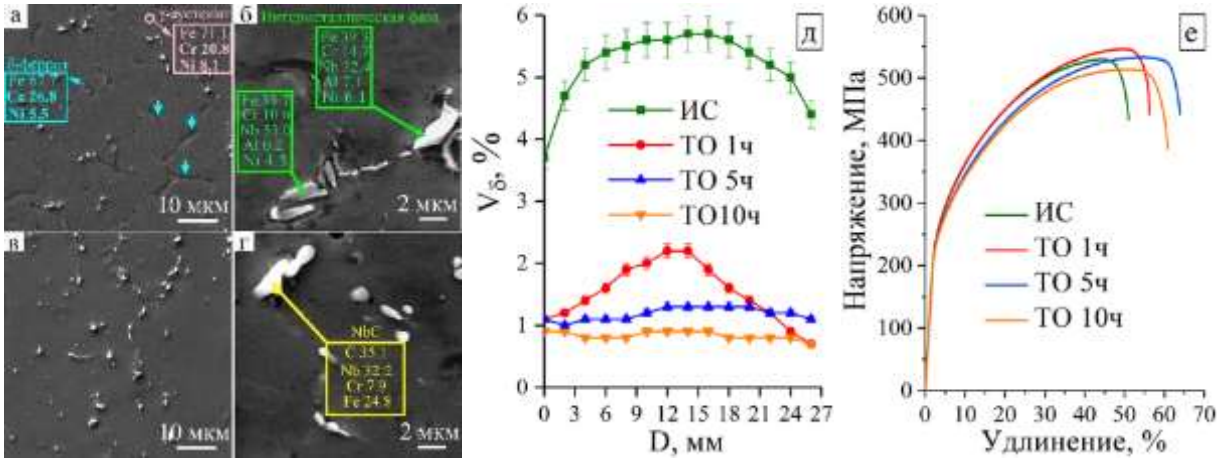


Рисунок – изображения (а-г) структуры образцов легированной ниобием хромоникелевой стали в ИС (а,б) и после ТО (продолжительность 10 ч, в,г), а также зависимости объемного содержания δ-феррита $V_δ$ от расстояния до подложки D (д) и кривые течения (е) для исходных и подвергнутых ТО образцов стали, полученных методом ЭЛАП.

Авторы: д.т.н. Колубаев Е.А., д.ф.-м.н. Астафурова Е.Г., к.ф.-м.н. Астафуров С.В., к.ф.-м.н. Майер Г.Г., Мельников Е.В., Панченко М.Ю., Реунова К.А.

Опубликовано:

M.Y. Panchenko, G.G. Maier, V.A. Moskvina, S.V. Astafurov, E.V. Melnikov, K.A. Reunova, E.A. Kolubaev, E.G. Astafurova. Microstructure and mechanical properties of Nb-alloyed austenitic CrNi steel fabricated by wire-feed electron beam additive manufacturing//Materials Characterization. 190 (2022). P. 112063.

Тема FWRW-2022-0005

Роль избыточного атомного объема в распространении трещин в железе

Путем компьютерного моделирования впервые показано, что локализация избыточного атомного объема и связанные с этим локальные структурные перестройки определяют динамику роста трещин в кристаллитах металлических материалов. На примере монокристаллов железа установлено, что в процессе нагружения кристаллита с трещиной вблизи ее вершины формируется область с избыточным атомным объемом. Дальнейшая эволюция трещины контролируется возможностью зарождения структурных дефектов в окрестности вершины, что определяется кристаллографической ориентацией трещины. При «неблагоприятной» ориентации структурные дефекты вблизи вершины не формируются, и разрушение является хрупким. Благоприятная ориентация трещины способствует формированию вблизи вершины особой зоны, содержащей структурные дефекты различного типа (локальные структурные трансформации, дислокации и т.д.). Деформирование такой трещины сопровождается испусканием дефектов из этой зоны, что приводит к уменьшению избыточного атомного объема, релаксации локальных напряжений и, как результат, к вязкому разрушению. Дизайн структуры металлического материала, учитывающий заданные условия нагружения, позволяет направленным образом влиять на режим роста зарождающихся трещин и управлять трещиностойкостью.

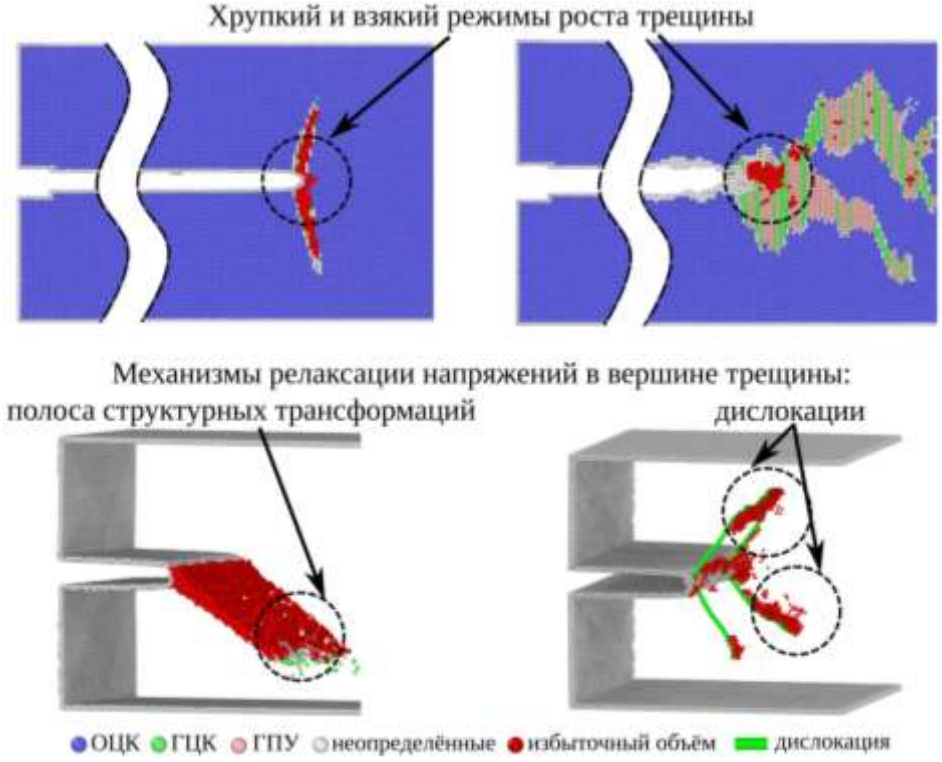


Рисунок – Режимы развития краевых трещин в кристаллитах железа при одноосном растяжении

Авторы: к.ф.-м.н. Крыжевич Д.С., к.ф.-м.н. Корчуганов А.В., д.ф.-м.н. Зольников К.П.

Опубликовано:

Kryzhevich D.S., Korchuganov A.V., Zolnikov K.P. Role of excess atomic volume in crack growth in bcc iron // Results in Physics. – 2022. – V. 33. – A. 105163.

Тема FWRW-2021-0002

Влияние механического стеснения на динамическую вязкость разрушения поликристаллического алюминия

На основе физически обоснованной математической модели построено релаксационное определяющее уравнение для описания пластического течения в 3D постановке. С использованием развитой модели на примере поликристаллического алюминия впервые показано, что влияние стесненных условий деформирования на вязкость разрушения металлических материалов определяется скоростью нагружения.

При низких скоростях нагружения, когда разрушение носит локализованный характер, стесненные условия деформирования ускоряют процесс разрушения поликристалла. При умеренных скоростях нагружения существует диапазон деформаций, в котором механическое стеснение материала обусловливает снижение скорости распространения трещин. При высоких скоростях нагружения, когда разрушение носит множественный характер, стесненные условия обеспечивают значимое снижение скорости роста трещин, повышая вязкость разрушения поликристалла. Полученные результаты актуальны для прогнозирования динамической вязкости металлических элементов механизмов и конструкций, функционирующих в сложного наряженного состояния и подвергающихся механическим нагрузкам различной интенсивности.

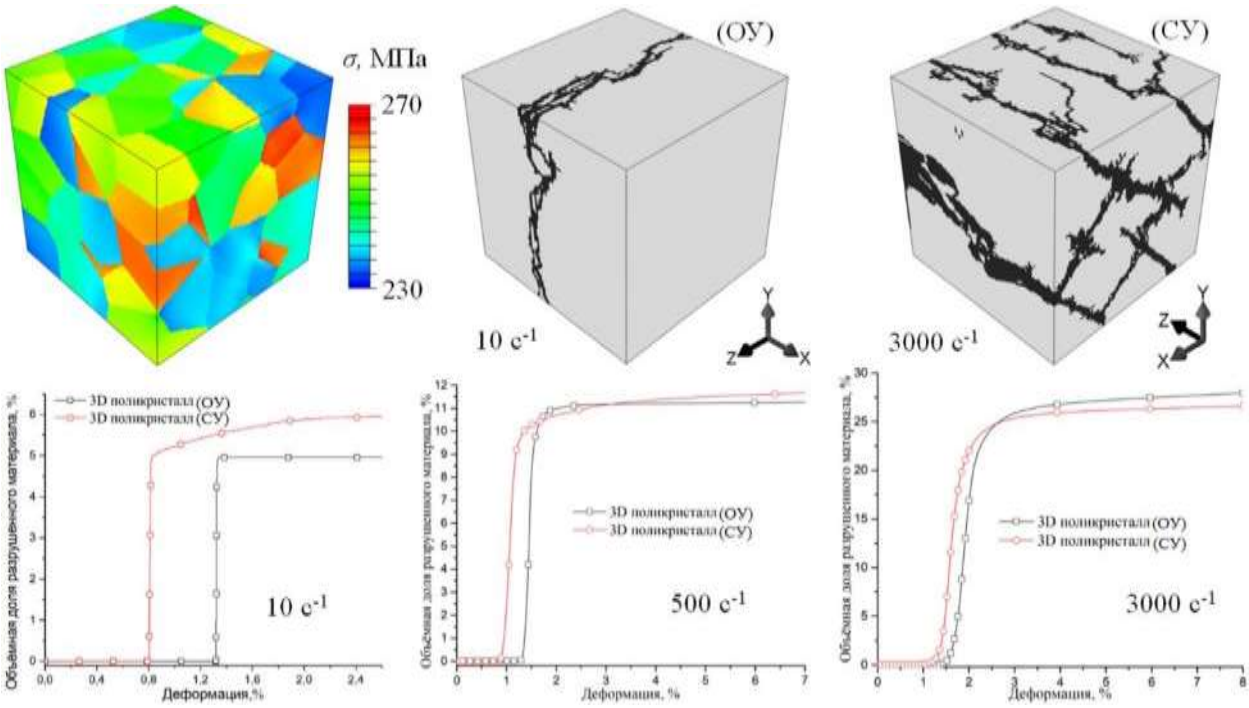


Рисунок – Типичное распределение интенсивности напряжений в поликристалле алюминиевого сплава 6061-Т6 на стадии предразрушения, характер разрушения поликристалла при низких и высоких скоростях растяжения вдоль оси X, а также примеры динамики накопления повреждений в обычных (ОУ – одноосное нагружение) и стесненных (СУ) условиях при низких, умеренных и высоких скоростях деформирования.

Авторы: д.ф.-м.н. Балохонов Р.Р., д.ф.-м.н. Романова В.А., Сергеев М.В.

Опубликовано:

Балохонов Р.Р., Сергеев М.В., Романова В.А. Моделирование деформации и разрушения поликристаллов алюминиевого сплава в условиях динамического нагружения// Физическая мезомеханика. – Т. 26. – № 1 (в печати).

Тема FWRW-2021-0002

Особенности состояния наноразмерных слоев воды между поверхностями слоистых гидроксидов металлов при высоких давлениях

С использованием атомистического моделирования впервые установлены последовательности фазовых превращений в наноразмерных слоях воды, заключенных между поверхностями слоистых гидроксидов металлов, при увеличении давления от атмосферного до 10 ГПа. Показано, что конкретная фаза льда, в которую кристаллизуется вода при высоких давлениях, определяется не только величиной давления, но в значительной степени – гидрофильностью поверхности минерала. В случае гидрофильного минерала «наностесненная» вода претерпевает два фазовых перехода: при P_1≈3,3 ГПа она переходит в твердую фазу с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) кристаллической структурой, при P_2≈6,7-7,1 ГПа происходит дальнейшее превращение в гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру. Поведение нанообъемов воды радикально меняется при уменьшении величины парциальных зарядов ограничивающих поверхностей. В случае гидрофильного минерала при P_1≈3,3 ГПа вода кристаллизуется непосредственно в ГЦК фазу. Результаты исследования позволяют лучше понять особенности состояния воды как лубриканта в пятнах локального контакта технических и природных высоконагруженных трибосистем и актуальны для прогнозирования режимов трения гидрофильных/гидрофобных поверхностей.

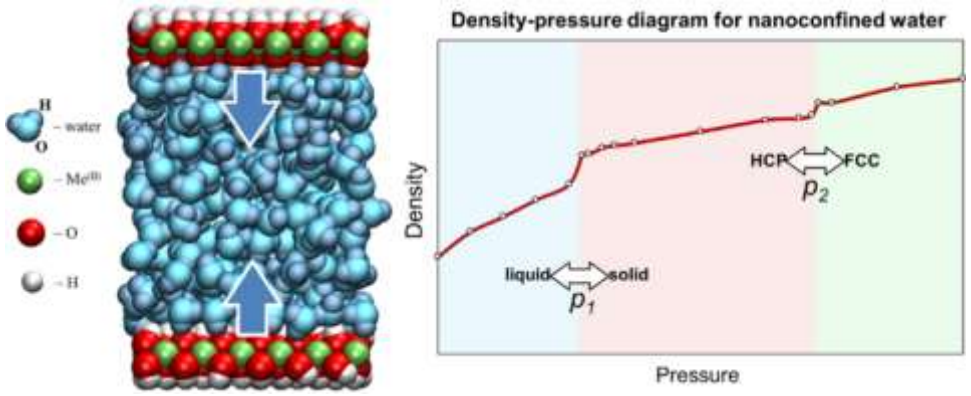


Рисунок – Структура наноразмерного слоя воды в жидком состоянии между минеральными поверхностями и полученная путем компьютерного моделирования кривая зависимости плотности воды от давления с указанием фаз

Автор: д.ф.-м.н. Шилько Е.В.

Опубликовано:

Tsukanov A.A., Shilko E.V., Popov M. Structure, Properties, and Phase Transformations of Water Nanoconfined between Brucite-like Layers: The Role of Wall Surface Polarity // Materials. – 2022. – V. 15. – Article 3043.

Тема FWRW-2021-0002

Антикоррозионные мультислойные покрытия на основе системы Si-Al-N-O на высокопрочных нержавеющих сталях для эксплуатации в условиях субтропического климата Вьетнама и Юго-Восточной Азии

Установлено, что нанесенное с помощью импульсного магнетронного распыления композиционных мишеней мультислойное покрытие на основе нитридов и оксидов кремния-алюминия повышает существенным образом коррозионную стойкость высокопрочных нержавеющих сталей типа ВНС-5 и 12Х18Н10Т, включая испытания в условиях субтропического климата Вьетнама и Юго-Восточной Азии. Анализ поляризационных кривых Тафеля подтверждает данные коррозионных испытаний – для мультислойного покрытия наблюдаются значительно более высокие значения поляризационного потенциала и на порядок меньшие значения плотности тока (рисунок). Мультислойное покрытие Al-Si-N/Al-Si-O, формируясь в аморфном состоянии, сохраняет достаточную пластичность и адгезию к поверхности стали, в отличие от однослойных Al-Si-N с нанокристаллической структурой на основе фаз AlN и α-Si_3N_4, имеющих высокую прочность, но испытывающих коррозионное растрескивание в экстремальных условиях.

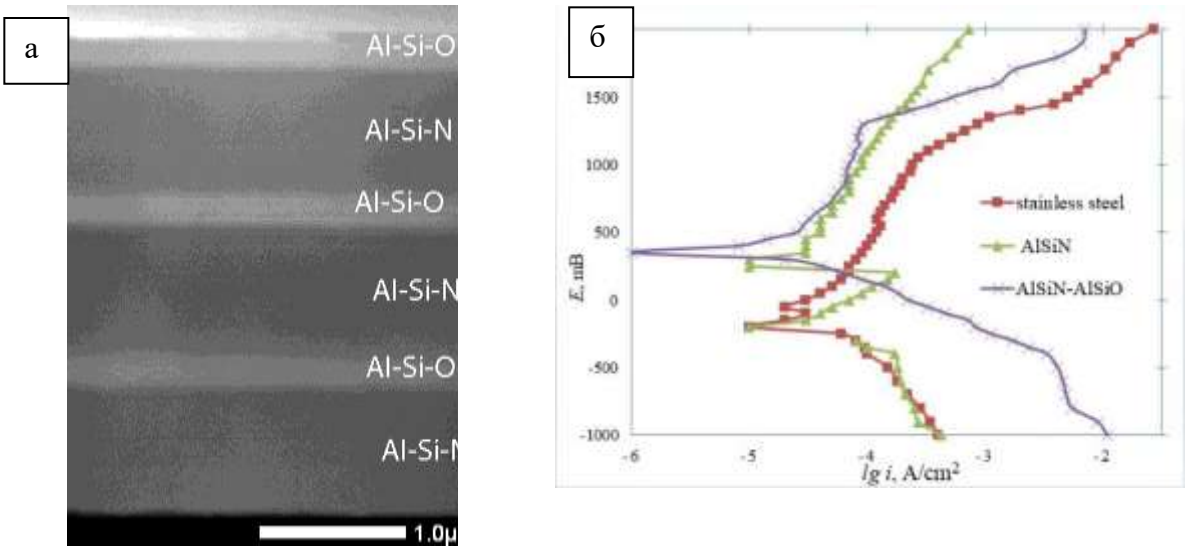


Рисунок – Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения мультислойного покрытия Al-Si-N/ Al-Si-O (а), потенциодинамические поляризационные кривые нержавеющей стали, однослойного покрытия Al-Si-N и многослойного Al-Si-N/Al-Si-O (б),

Авторы: д.т.н. Сергеев В.П., к.ф.-м.н Федорищева М.В., к.х.н. Дорофеева Т.И., к.т.н. Губайдулина Т.А.

Опубликовано:

Dorofeeva T., Gubaidulina T., Sergeev V., Fedorischeva M. Si-Al-N-O Multilayer Coatings with Increased Corrosion Resistance Deposited on Stainless Steel by Magnetron Sputtering // Metals. – 2022. – V. 12 (2). – P.254.

Тема FWRW-2021-0003

Научные принципы электронно-пучковой микрометаллургии поверхностных сплавов на основе титана на металлических подложках

Научное обоснование принципов электронно-пучковой (импульсной) микрометаллургии поверхностных сплавов на основе титана микронной толщины, изложенное в цикле научных публикаций и диссертационном исследовании 2022 года. На примерах конкретных систем из композиций на основе {Ti, Ta, Nb, Ni, Si} продемонстрирована многофункциональность (защита от коррозии, рентгеноконтрастность, биосовместимость, поверхностная прочность без потери пластичности) синтезированных поверхностных сплавов на подложках из никелида титана. Изучены механизмы, обеспечивающие высокие характеристики этих свойств, природа высокой адгезионной прочности, обусловленная слоевой архитектурой самих поверхностных сплавов и переходных к подложке слоев. Показано, что предварительно спрогнозированные и практически реализованные типы структур (аморф/нанокомпозит/кристалл), толщина и последовательность чередования подслоев обеспечивают высокую механическую совместимость поверхностных сплавов с подложкой. Исключение проблемы адгезионной прочности к подложкам, характерной для большинства металлических покрытий, позволяет рассматривать разработанный продукт – поверхностный сплав на основе титана микронной толщины – как альтернативу упомянутым покрытиям.

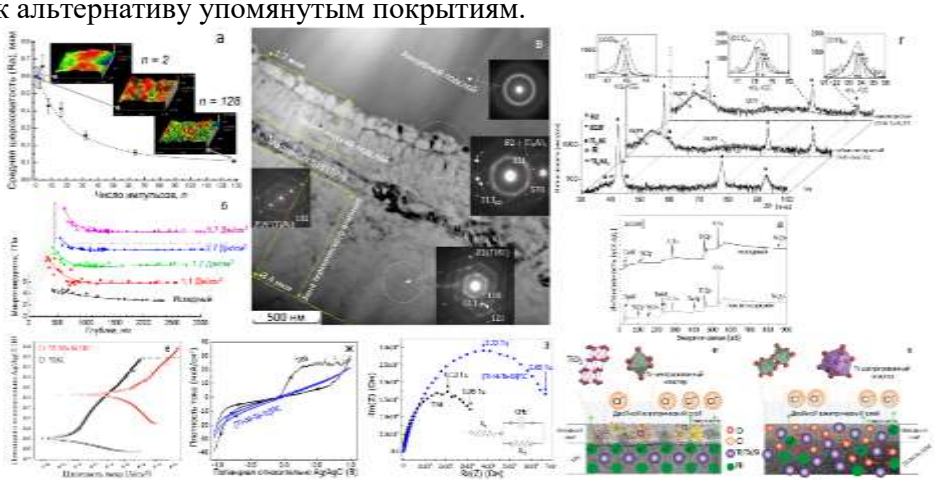


Рисунок – Электронно-пучковая (ЭП) модификация поверхностного слоя TiNi: зависимость R_a от числа импульсов воздействия n при плотности энергии E_s = 3,8 Дж/см^2(а), вставки – 3D изображения поверхностей после ЭП обработок при n=0 (исходный), 2, 128; зависимости микротвердости от глубины вдавливания индентора от E_s (n=5 – const) (б).

Исходная структура (в), фрагменты дифрактограмм (г), элементный состав и химическое состояние элементов на поверхности (д), потенциодинамические (е, ж) и импедансные (з) характеристики ПС на основе [Ti-Ni-Ta-Si] (а–в, ж-к) и [Ti-Ni-Nb-Si] (е).

Схемы (и, к), иллюстрирующие транспорт ионов Ni^{2+} (зеленые стрелки) от поверхности образцов TiNi (и) и [Ti-Ni-Ta-Si]ПС (к) в двойной электрический слой через свободные объёмы в оксидном слое.

Авторы: д.ф.-м.н. Мейснер Л.Л., к.ф.-м.н. Семин В.О., к.т.н. Мейснер С.Н., Дьяченко Ф.А., к.ф.-м.н. Остапенко М.Г.

Исследования опубликованы:

M.G. Ostapenko, V.O. Semin, F.A. D'yachenko, A.A. Neiman, L.L. Meisner, Structure and residual stress distribution in TiNi substrate after fabrication of surface alloy using electron-beam treatments, Acta Materialia (2022).

Semin, V. O., Ostapenko, M. G., Meisner, L. L., D'yachenko, F. A., & Neiman, A. A. (2022). Ti–Nb–Si-based surface alloy fabricated on TiNi SMA substrate through additive electron beam method: structure and perspectives. Applied Physics A, 128(8), 1-10.

Дьяченко Ф.А. Физико-механические свойства трех- и четырехкомпонентных поверхностных сплавов на основе титана, синтезированных на TiNi-подложке электронно-пучковым способом / Ф.А. Дьяченко//Автореф. дис. к-та техн. наук. – Томск, 2022. – 18с.

Тема FWRW-2021-0003

Кратковременная ползучесть титанового сплава системы Ti-Al-V-Mo в условиях легирования водородом

Исследовано влияние структуры и легирования водородом на закономерности кратковременной ползучести титанового сплава системы Ti-Al-V-Mo (марка ВТ16) при температуре 723 К (~0,4 $T_{пл}$). Показано, что формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры (средний размер зерен d = 0,26 мкм), приводящей к повышению плотности границ зерен и их переходу в неравновесное состояние, повышает скорость установившейся ползучести сплавов системы Ti-Al-V-Mo в исследованных условиях по сравнению с мелкозернистым (МЗ) состоянием (d = 9 мкм). В то же время чувствительность скорости установившейся ползучести к приложенному напряжению сплавов в УМЗ состоянии ниже по сравнению с мелкозернистым состоянием.

Наводороживание сплава Ti-Al-V-Mo до 0.15 мас.%H приводит к повышению скорости установившейся ползучести и уменьшению времени и величины деформации до разрушения. При этом влияние водорода на указанные параметры ползучести сплава в УМЗ состоянии ниже по сравнению с МЗ состоянием (рисунок а). Зависимость скорости установившейся ползучести от начального напряжения сплава Ti-Al-V-Mo в обоих состояниях удовлетворительно описывается степенным законом ползучести. Наводороживание сплава в обоих структурных состояниях приводит к нарушению степенного закона ползучести (рисунок б). Основным фактором, приводящим к нарушению степенного закона ползучести в исследуемых условиях, является увеличение диффузионной подвижности водорода с ростом приложенного напряжения.

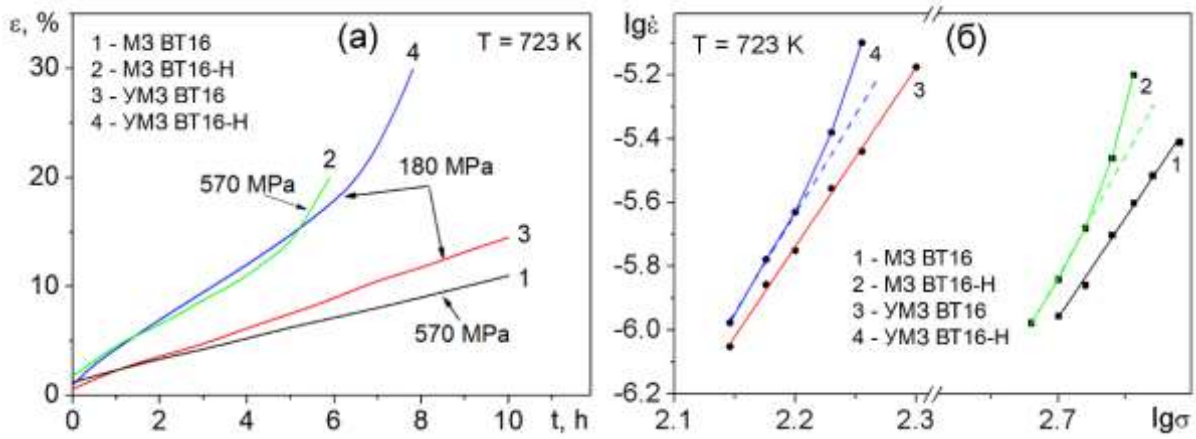


Рисунок – Кривые ползучести (а) и зависимость скорости установившейся ползучести от начального напряжения (б) сплава системы Ti-Al-V-Mo

Авторы: д.ф.-м.н. Грабовецкая Г.П., к.ф.-м.н. Мишин И.П., Степанова Е.П., Забудченко О.В.

Опубликовано:

G. Grabovetskaya, I. Mishin, E. Stepanova, O. Zabudchenko. Effect of Structure and Hydrogen on the Short-Term Creep of Titanium Ti-2.9Al-4.5V-4.8Mo Alloy // Materials 2022, 15, 3905.

Тема FWRW-2021-0004

Эволюция кристаллической структуры и дефектов кристаллического строения в никелиде титана под воздействием ковки с переменой оси деформирования при 573К

Исследования показали, что в результате abc-прессования образцов сплава Ti-50,2Ni (ат.%) с возрастанием заданной истинной деформации *e* (1.84, 3.60, 5.40, 7.43, 9.55) происходит эволюция микроструктуры образцов на двух структурно-масштабных уровнях: уменьшается как средний размер *D* крупных зёрен (от 27 до 12 мкм), так и средний размер *d* зёрен-субзёрен, локализованных в этих крупных зёрнах (от 350 до 130 нм). Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что плотность дислокаций после первой же деформации *e*=1.84 увеличивается на порядок (от 10^{14} m^{-2} до 10^{15} m^{-2}) и при повышении *e* до 9.55 достигает $2 \cdot 10^{15}$ m^{-2}, рисунок а. Установлено, что после прессования с *e*=1.84 предел текучести образцов σ_y увеличивается до 900 МПа (это в ~ 2 раза выше, чем в исходных образцах), а при возрастании *e* от 1.84 до 9.55 дополнительно повышается до 1000±25 МПа; при этом предел прочности σ_{UTS} образцов после прессования с *e* до 9.55 возрастает на ~15%, а напряжение начала площадки псевдотекучести σ_m не зависит от *e*, рисунок б. Показано, что при увеличении *e* от 1.84 до 9.55 σ_y и σ_{UTS} линейно возрастают при увеличении $d^{-1/2}$ в соответствии с соотношением Холла-Пэтча. Методом спектроскопии времени жизни (СВЖ) позитронов установлено, что дислокации являются основным типом дефектов в исходных образцах и единственным типом дефектов в образцах после abc-прессования. В исходных образцах наблюдается компонента СВЖ, соответствующая присутствию моновакансий в подрешётке атомов никеля B2 фазы (концентрация ~10^{-5}).

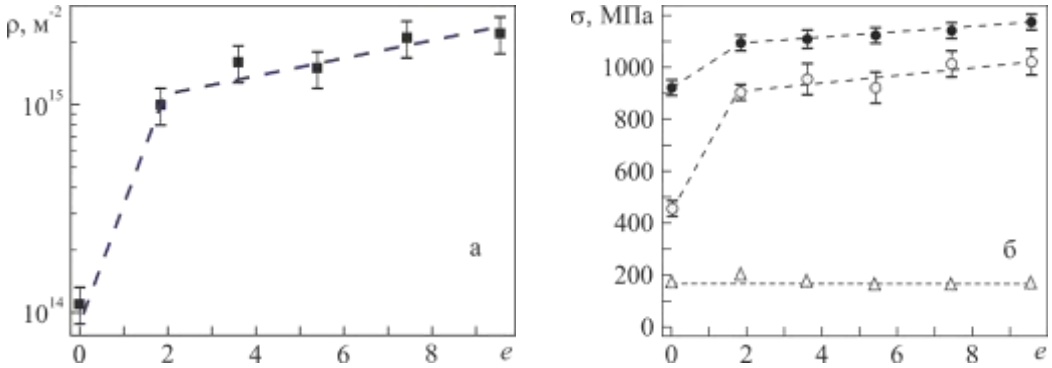


Рисунок – Зависимости плотности дислокаций (а) и напряжения начала площадки псевдотекучести σ_m (Δ), пределов текучести σ_y (о) и прочности σ_{UTS} (●) (б) от e.

Авторы: д.ф.-м.н. Лотков А.И., д.т.н. Кашин О.А., к.ф.-м.н. Гришков В.Н. и др.

Опубликовано:

Lotkov A., Kashin O., Grishkov V., Zhapova D., Krukovskii K., Gusarenko A., Girsova N., Bobrov D., Kashina O. Mechanical Properties of the Ti49.8Ni50.2 Alloy after Multi-Axial Forging at 573 K//Metals. – 2022. – V. 12. – P. 1043.

Lotkov A., Grishkov V., Laptev R., Zhapova D., Girsova N., Gusarenko A., Barmina E., Kashina O. Crystal Structure Defects in Titanium Nickelide after Abc pressing at Lowered Temperature//Materials. – 2022. – V. 15. – P. 4298.

Тема FWRW-2021-0004

Влияние пористости и размера зерна на фазовый состав и механические свойства керамики на основе диоксида циркония

Проведено исследование фазового состава на спеченной и разрушеной (после испытаний на осевое сжатие) поверхностях образцов диоксид циркониевой керамики стабилизированной оксидом иттрия (ZrO_2 5,5вес.% Y_2O_3) в широком диапазоне пористости (2±0,5 ÷ 40±2%) и размера зерна (0,53±0,1 ÷ 1,55±0,15 мкм). Установлено, что после механических испытаний во всех образцах керамики на поверхности разрушения регистрировалось появление моноклинной фазы, либо увеличение ее количества. Доля превращённой тетрагональной фазы в моноклинную (**Δ**Cm) при среднем размере зерен 0,7±0,15 мкм и выше уменьшается с увеличением пористости, а при фиксированном значении пористости увеличивается с ростом размера зерен. Склонность керамики на основе диоксида циркония к трансформационному тетрагонально – моноклинному фазовому превращению под воздействием приложенных напряжений с увеличением пористости уменьшается.

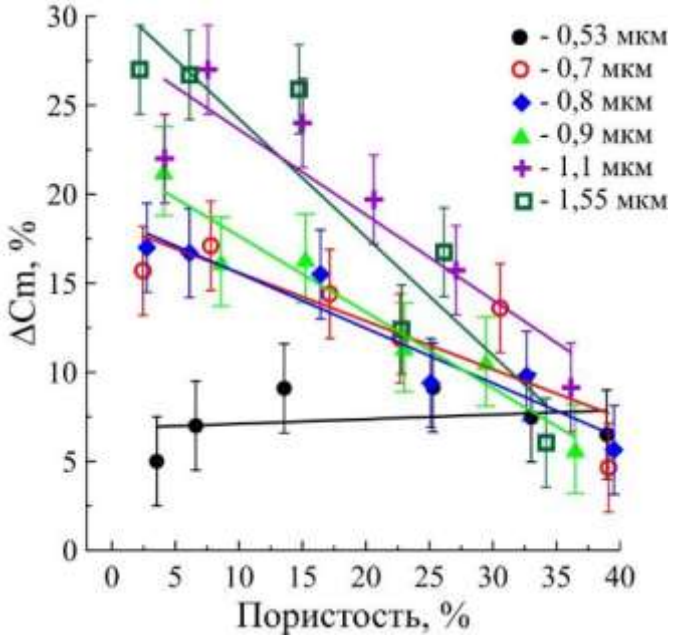


Рисунок – Зависимость доли превращённой тетрагональной фазы диоксида циркония в моноклинную (**Δ**Cm) от пористости

Авторы: к.т.н. Севостьянова И.Н., к.т.н. Саблина Т.Ю..

Опубликовано:

Sablina, T.Y., Sevostyanova, I.N., Shlyakhova, G.V. Influence of the Grain Size of ZrO_2 (Y_2O_3) Ceramics on the Hardness, Fracture Toughness and Formation of a Transformation-Deformation Relief in the Indentation Zone. Russ Phys J. – 2022. – V. 65, P. 635–642 https://doi.org/10.1007/s11182-022-02679-1 (FWRW-2021-0011, FWRW-2021-0005).

Севостьянова И.Н., Саблина Т.Ю., Горбатенко В.В. Исследование деформации и разрушения пористой керамики ZrO2 (Y2O3) при испытаниях на осевое сжатие с использованием метода корреляции цифровых изображений // Изв. вузов. Физика. – 2022. – №7(776). С. 48–54. DOI: 10.17223/00213411/65/7/48

Тема FWRW-2021-0005

Эффект самосмазывания композитов WC-(Fe-Mn-C) и WC/Y–TZP–Al_2O_3-сталь Гадфильда за счет трибохимически синтезированного $FeWO_4$

Был обнаружен эффект трибологической адаптации, обеспечиваемый трибохимическим образованием самовосстанавливающихся приповерхностных защитных слоёв, состоящих из мелких фрагментов WC и продуктов износа, имеющих в составе in-situ синтезированный в процессе высокоскоростного скольжения сложный оксид $FeWO_4$. Такие слои обеспечивали композитам WC-(Fe-Mn-C) эффект самосмазывания при высокоскоростном скольжении благодаря легкому сдвигу и квазивязкому поведению формирующихся на поверхности структур. На этой основе были разработана серия новых гибридных керамических композитов WC/Y–TZP–Al_2O_3, состоящих из агломератов зерен WC (~2.5 мкм), внутри которых находились частицы стали Гадфильда, и микронных (~2-10 мкм) сферических агломератов Y–TZP–Al2O3 с внутренней наноразмерной эвтектической структурой. В условиях высокоскоростного трения при скоростях скольжения до 37 м/с такие композиты демонстрировали приемлемую износостойкость с одновременно сверхнизким значением коэффициента трения (~0,07).

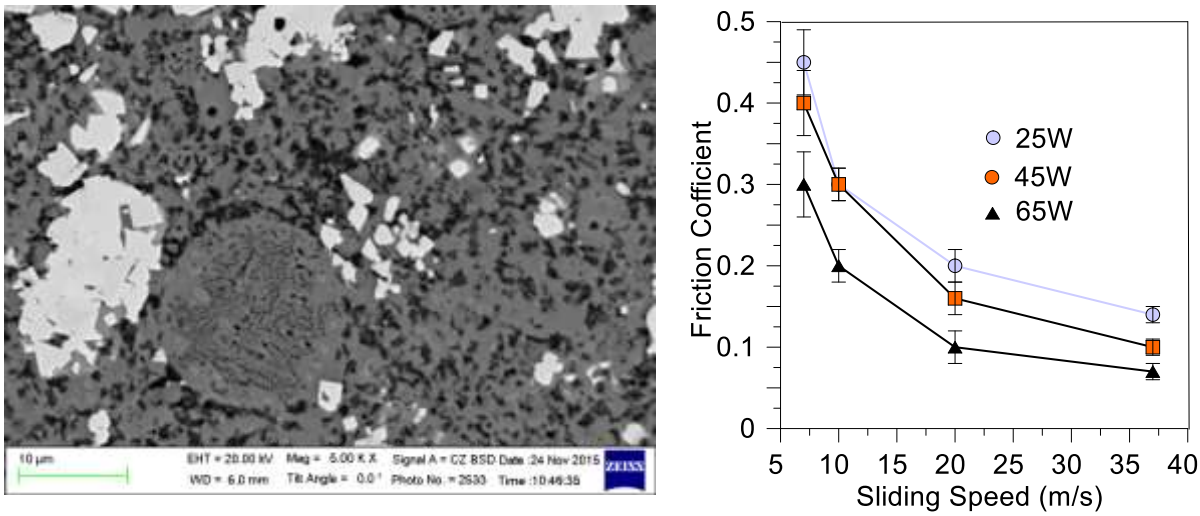


Рисунок – Структура гибридного композита WC/Y–TZP–Al_2O_3-сталь Гадфильда и зависимости коэффициента трения от скорости скольжения

Авторы: д.т.н. Тарасов С.Ю., д.т.н. Савченко Н.Л.

Опубликовано:

Savchenko, N.; Sevostyanova, I.; Tarasov, S. Self-Lubricating Effect of FeWO4 Tribologically Synthesized from WC-(Fe-Mn-C) Composite during High-Speed Sliding against a HSS Disk // Lubricants. – 2022, 10(5), 86.

Savchenko, N.; Sevostyanova, I.; Grigoriev, M.; Sablina, T.; Buyakov, A.; Rudmin, M.; Vorontsov, A.; Moskvichev, E.; Rubtsov, V.; Tarasov, S. Self-Lubricating Effect of WC/Y–TZP–Al_2O_3 Hybrid Ceramic–Matrix Composites with Dispersed Hadfield Steel Particles during High-Speed Sliding against an HSS Disk // Lubricants. – 2022, 10(7), 140.

Тема FWRW -2021-0006

Многоуровневый характер деформации и разрушения образцов Ti-6Al-4V в условиях ультразвукового воздействия

С помощью компьютерного моделирования на атомном масштабе проанализированы закономерности деформации и разрушения образцов Ti-6Al-4V при одноосном растяжении в условиях дополнительного нагружения нанометровым индентором, имитирующем ультразвуковую обработку поверхности. Показано, что такая обработка приводит к формированию верхнего слоя, состоящего из нанокристаллических фаз a-Ti, β-Ti, и нижележащего слоя, микроструктура которого представлена искривленными и фрагментированными пластинами α-фазы. Как следствие, дислокационное скольжение в обработанном ультразвуком поверхностном слое оказывается подавленным. Моделирование показало, что основными механизмами деформации фрагментированных пластин α-фазы являются зернограничное скольжение и двойникование. Миграция двойниковых границ осуществляется по механизму обратимых ГПУ→ОЦК→ГПУ превращений. На стадии предразрушения в упрочненном поверхностном слое развиваются некристаллографические полосы сдвига, зарождающиеся в нижележащих слоях.

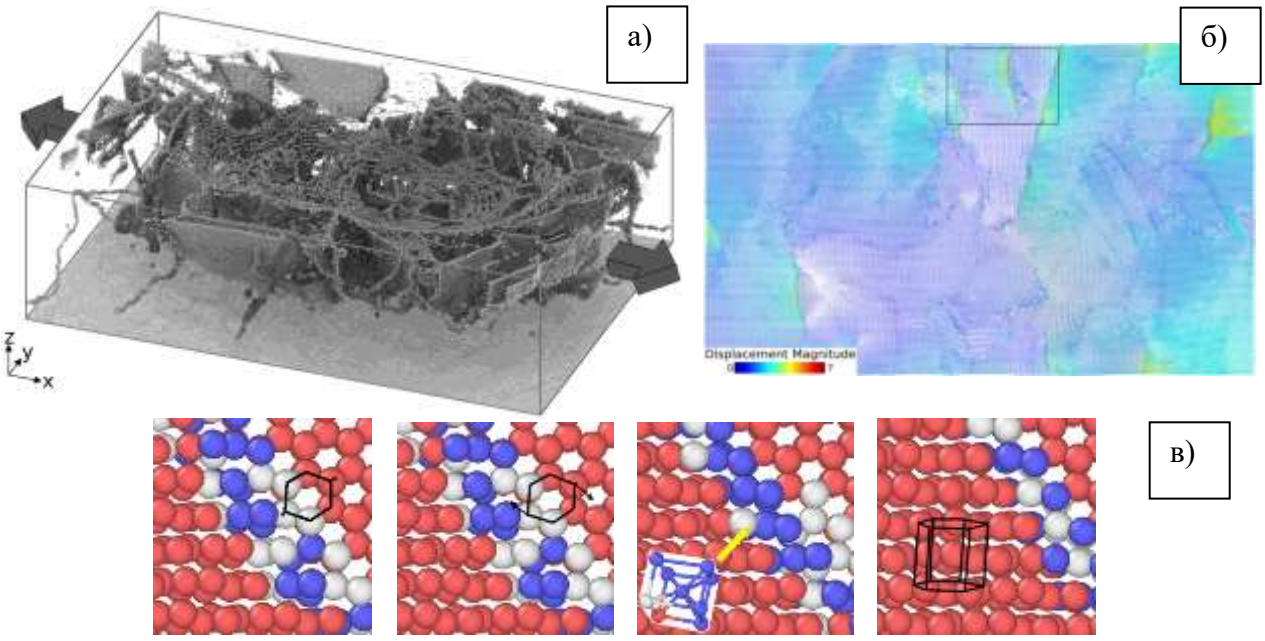


Рисунок – (а) структура приповерхностного слоя; (б) смещения атомов в поверхностном слое; (в) механизм обратимого ГПУ→ОЦК→ГПУ превращения

Авторы: д.ф.-м.н. Дмитриев А.И., к.ф.-м. н. Никонов А.Ю., д.ф.-м.н. Панин А.В.

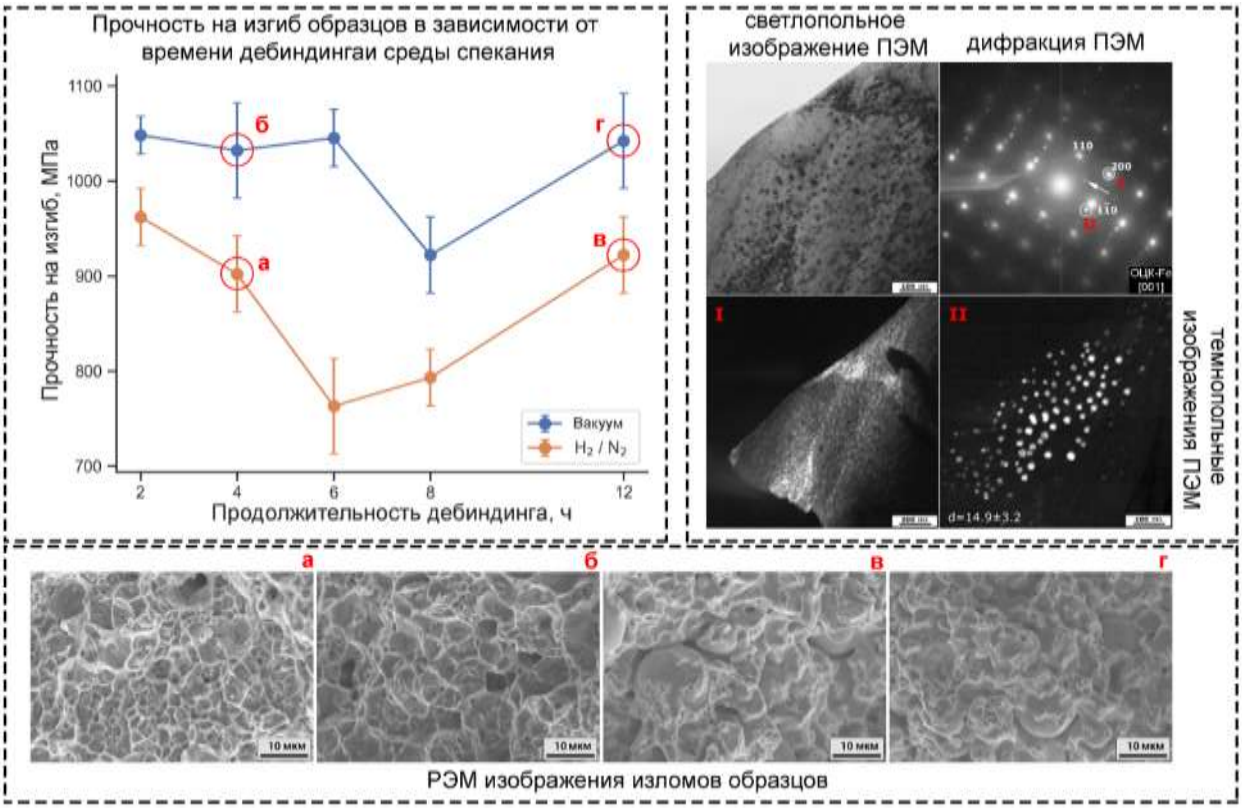
Опубликовано:

A.V. Panin, M.S. Kazachenok, A.I. Dmitriev, A.Yu. Nikonov, O.B. Perevalova, L.A. Kazancheva, E.A. Sinyakova, S.A.Martynov. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V under uniaxial tension // Mater. Sci. Eng, A.- 2022.- V. 832, - P. 142458.

Тема FWRW -2021-0006

Структура и механические свойства нанокристаллического псевдосплава Fe-10Cu, полученного аддитивным формованием

Нанокристаллические псевдосплавы, включающие два или более металлических компонента с ограниченной взаимной растворимостью представляют большой интерес для применения в различных областях машиностроения, поскольку могут обеспечить оптимальное сочетание физико-механических и химических свойств, недостижимое ни для одного из компонентов в отдельности. Применение экструзионной 3D-печати позволяет изготовить из псевдосплавов, например Fe-Cu, сложнопрофильные изделия. Для этого был разработан фидсток на основе электровзрывного бимодального порошка Fe-10Cu и полимерного связующего с высокой текучестью. Вакуумное спекание позволило получить объемные плотные образцы с прочностью на изгиб 1050 МПа благодаря формированию B2-подобной структуры с упорядоченными наноразмерными частицами меди в железной матрице.



Авторы: к.т.н. Криницын М.Г., к.т.н. Торопков Н.Е., к.т.н. Первиков А.В., д.т.н. Лернер М.И.

Опубликовано:

M. Krinitcyn, N. Toropkov, A. Pervikov, M. Lerner. Structure and mechanical properties of Fe-10Cu alloy obtained by material extrusion-based additive manufacturing method with bimodal powder // Powder Technology. – 2022. – V. 406. – P. 117593.

Тема FWRW -2021-0007

Закономерности формирования микродуговых покрытий с частицами β-трикальцийфосфата и волластонита на поверхности биорезорбируемого сплава Mg0,8Ca

Исследованы закономерности формирования и свойства микродуговых покрытий, синтезированных на поверхности биорезорбируемого сплава Mg0,8Ca при введении частиц β-трикальцийфосфата (β-ТКФ) и волластонита ($CaSiO_3$) в состав электролитов. Введение частиц ТКФ способствовало повышению адгезионной прочности покрытий до 19 Н в режиме скрэтч теста. Покрытия с частицами волластонита а также комбинированные покрытия, содержащие оба типа частиц, характеризовались высокой коррозионной стойкостью в физиологических средах и были более биосовместимы. Методом проточной цитометрии установлено, что количество жизнеспособных клеток NIH/3T3 после взаимодействия со всеми типами покрытий, составило 90,0–93,6%. Таким образом, структура, морфология, физико-механические, коррозионные и биологические свойства покрытий зависят от типа содержащихся в них частиц. Поверхностный слой покрытия, содержащий частицы, становится границей раздела, взаимодействующей с тканями и биологическими жидкостями. Изменяя состав дисперсной фазы, можно придавать модифицированной поверхности особые функциональные свойства (остеогенные, антикоррозионные, антибактериальные и др.).

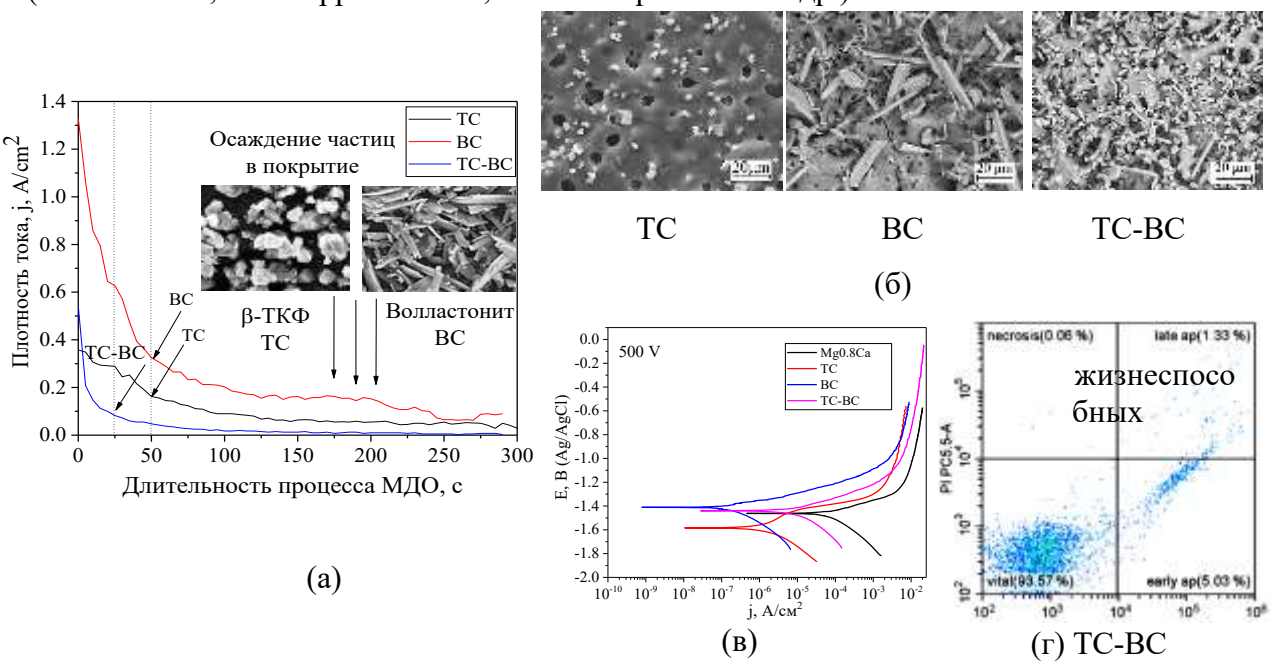


Рисунок – Графики зависимости плотности тока от длительности процесса микродугового оксидирования (а), морфология поверхности покрытий, содержащих частицы β-ТКФ (ТС), волластонита (ВС) и оба типа частиц одновременно (ТС–ВС) (б), поляризационные кривые коррозии покрытий трех типов (в), показатели жизнеспособности клеток NIH/3T3 после взаимодействии с покрытием (ТС–ВС)

Авторы: д.т.н. Седельникова М.Б., д.т.н. Бакина О.В., д.ф.м.н. Шаркеев Ю.П., к.т.н. Химич М.И., Кашин А.Д.

Опубликовано**:**

M.B. Sedelnikova, O.V. Bakina, A.V. Ugodchikova, T.V. Tolkacheva, M.A. Khimich, P.V. Uvarkin, A.D. Kashin, A.A. Miller, V.S. Egorkin, J. Schmidt, Yu.P. Sharkeev, The role of microparticles of β-TCP and wollastonite in the cre-ation of biocoatings on Mg0.8Ca alloy//Metals, 12 (2022) 1647.

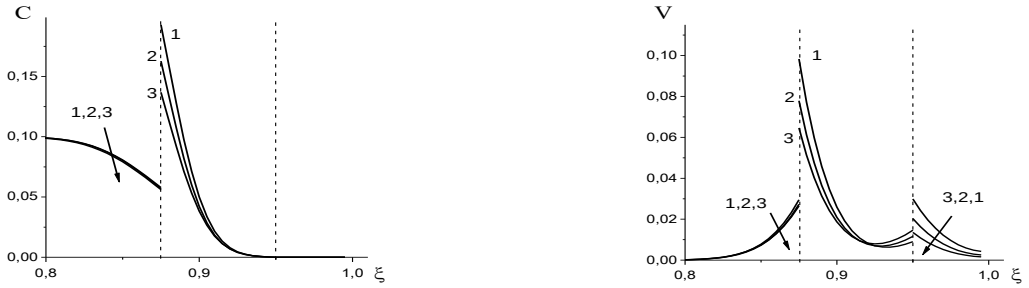
Тема FWRW -2021-0007

Влияние пористости на фильтрацию биологической жидкости через двухслойную стенку капилляра

На основе предложенной ранее модели течения биологической жидкости в капилляре с двухслойными пористыми стенками показано влияние режима течения жидкости на распределение скорости и концентрации диффузанта. Концентрация диффузанта в пористых слоях повышается с ростом пористости внутреннего слоя стенки капилляра, с увеличением подвижности диффузанта и с увеличением коэффициента концентрационного расширения. Вязкость биологической жидкости влияет сильнее при увеличении пористости внутреннего слоя капилляра. Скорость диффузанта в области границ раздела возрастает, когда слои стенки капилляра имею разную пористость, что связано с возрастанием градиента концентрации, который увеличивается на границе областей. Для достижения необходимой скорости проникания диффузанта из области макропоры через микропористые стенки капилляр должен иметь внутренний слой с большой пористостью, а размер, меньший, чем размер внешнего слоя. Это обеспечивает прерывистое поступление переносимого компонента в окружающую капилляр среду.

Решаемая задача является важной и актуальной задачей для описания и понимания влияния вязкости крови на процесс фильтрации, поскольку ее вязкость – это основной фактор, определяющий течение крови по капиллярам.

а б



в г

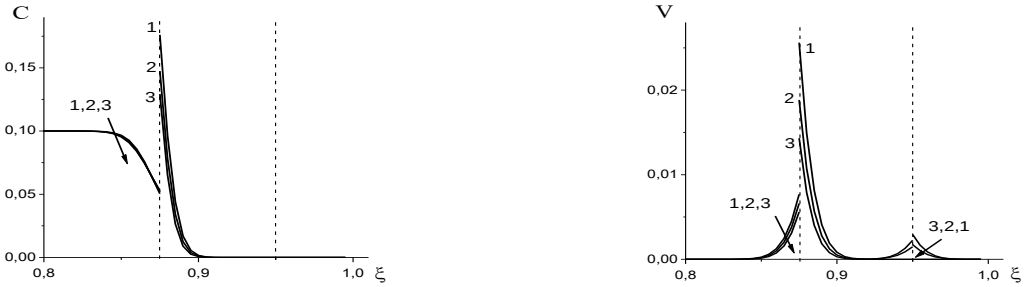


Рисунок – Распределение концентрации (а,б) и скорости (в,г) по радиусу капилляра при конвективном (а,в) и диффузионном (б,г) переносе вещества и разных значениях пористости во внутреннем пористом слое капилляра 1.– m_2=0,3; 2. – m_2=0,35; 3. – m_2=0,4; m_3=0,2

Авторы: к.ф.-м.н. Назаренко Н.Н., д.ф.-м.н. Князева А.Г.

Опубликовано: Влияние пористости и вязкости на фильтрацию биологической жидкости через двухслойную стенку капилляра // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2022. – Т. 65. – № 6(775). – С. 68-74.

Тема FWRW -2021-0007

Высокая термическая стабильность мелкодисперсных частиц ZrO_2 как один из основных факторов повышения термической стабильности и высокотемпературной прочности малоактивируемых ванадиевых сплавов системы V–Cr–(Ta, W)–Zr

Установлено, что после отжига при 1200 °С в сплаве V-Cr-Zr мелкие (< 20 нм) частицы ZrO_2 по-прежнему характеризуются ГЦК модификацией кристаллической решетки с незначительным разбросом параметра (a). На их фоне обнаружены более крупные (размерами 20 – 50 нм) частицы ZrO_2 – тетрагональной модификации. Таким образом, следствием увеличения размеров частиц ZrO_2 при 1200 °С является активизация фазовой трансформации из высокотемпературной ГЦК в тетрагональную по причине уменьшения относительного вклада поверхностной энергии в свободную энергию.

После указанного отжига в сплаве V-Cr-Zr наблюдается снижение плотности дислокаций до $(0.7 – 3)\times10^{10}$ $см^{-2}$, которые по-прежнему оказываются закрепленными наноразмерными частицами ZrO_2, что свидетельствует о реализации механизма дисперсного упрочнения даже после высокотемпературного (0.67 $T_{пл}$) отжига. Высокая эффективность совместного дисперсного плюс субструктурного упрочнения является следствием блокировки дислокационного скольжения мелкодисперсными частицами, стабилизированными кислородом в твердом растворе, что обеспечивает стабильность высокодефектного состояния даже при высоких температурах.

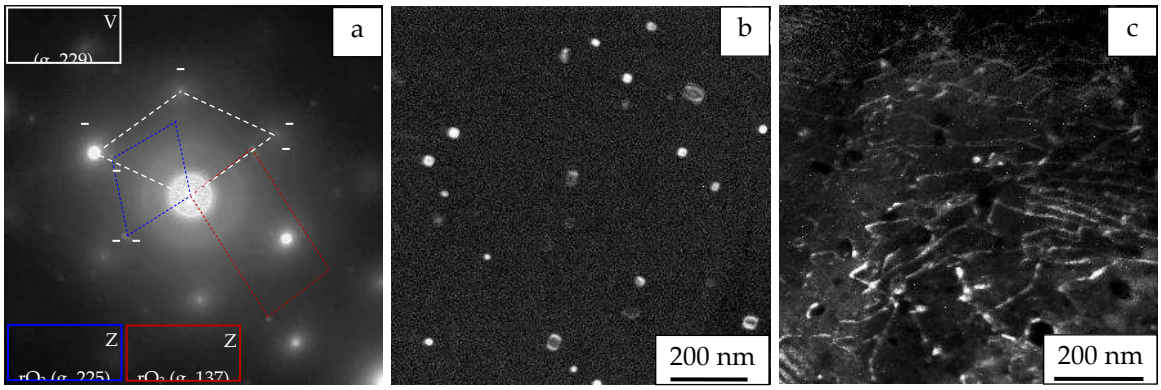


Рисунок – Высокая термическая стабильность мелкодисперсных частиц ZrO_2. Картина микродифракции (a), темнопольные изображения гетерофазной (b) и дислокационной (c) структуры в сплаве V-Cr-Zr после ХТО с $C_O \approx 1.3$ ат. % и отжигом при 1200 °С. ПЭМ.

Авторы: д.ф.-м.н. Дитенберг И.А., д.ф.-м.н. Тюменцев А.Н., к.т.н. Смирнов И.В., Гриняев К.В., Суханов И.И.

Опубликовано:

Ditenberg I.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V., Tyumentsev A.N., Chernov V.M., Potapenko M.M. Microstructure and mechanical properties of V-Cr-Zr alloy with carbide and oxide strengthening // Materials Science and Engineering A. – 2022. – V. 843. – Art. № 143159;

Тюменцев А.Н., Суханов И.И., Дитенберг И.А., Чернов В.М. Теоретический анализ термической стабильности наноразмерных частиц неметаллических фаз в малоактивируемых ванадиевых сплавах с дисперсным упрочнением // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. – №. 4. – С. 160–162.

Тема FWRW -2021-0008

Механизмы упрочнения 12 %-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823

Основными механизмами упрочнения 12 % хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 являются: дисперсное упрочнение наноразмерными карбонитридами типа MX (M = Nb, Mo, X = C, N) по механизму Орована; зернограничное упрочнение за счет мартенситных блоков и зерен феррита; субструктурное упрочнение за счет малоугловых границ мартенситных ламелей и повышенной плотности дислокаций.

Вклады от зернограничного дисперсного и субструктурного упрочнения после высокотемпературной термомеханической обработки выше, по сравнению с традиционной термической обработкой в 1.2, 1.8 и 1.3 раз, соответственно. С учетом соотношения Лэнгфорда-Коэна, высокотемпературная термомеханическая обработка обеспечивает вклад в упрочнение в ≈ 2.7 раз выше по сравнению с традиционной термической обработкой. Это обусловлено особенностями структурных состояний стали после высокотемпературной термомеханической обработки, по сравнению с традиционной термической обработкой: меньшими размерами мартенситных ламелей и блоков, повышенной плотностью дислокаций, уменьшением средних размеров и увеличением объемной доли наноразмерных частиц.

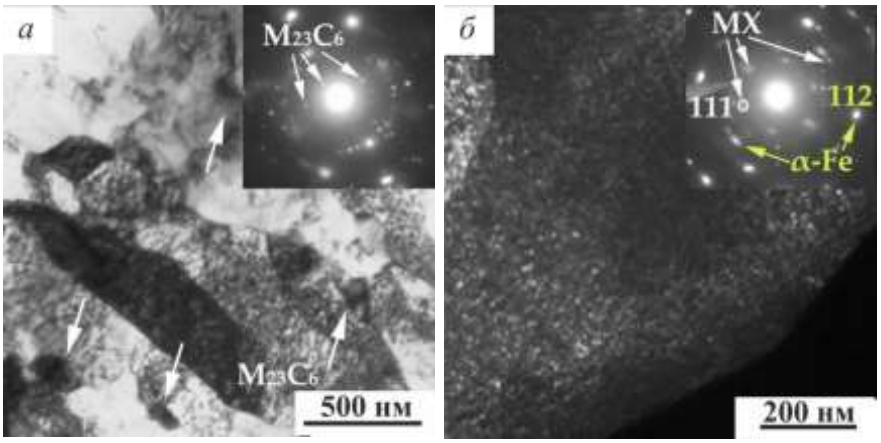


Рисунок – Изображения микроструктуры стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки: а – светлопольное изображение и микродифракционная картина, б – темнопольное изображение в рефлексе частиц MX и микродифракционная картина.

Авторы: к.ф.-м.н. Алмаева К.В., д.ф.-м.н. Литовченко И.Ю., к.ф.-м.н. Полехина Н.А.

Опубликовано:
Алмаева К.В., Литовченко И.Ю., Полехина Н.А., Линник В.В. Известия ВУЗов. Черная Металлургия. 2022. Т. 65. № 12. (в печати).

Тема FWRW -2021-0008

Взаимодействие с водородом порошка, полученного методом механохимического легирования полифазной порошковой системы Ti-Ni титаном

Хранение и транспортировка водорода в твёрдых носителях, гидридах металлов более безопасно, по сравнению с хранением водорода в сжатом и жидком виде. Славы системы Ti-Ni обладают коррозионной устойчивостью, способны обратимо адсорбировать водород, имеют низкий удельный вес среди потенциально пригодных носителей водорода, что обуславливает их перспективность как материалов-носителей водорода. Наибольшей сорбционной ёмкостью водорода среди всех фаз системы Ti-Ni обладает фаза Ti_2Ni. На сорбционную способность водорода материалом влияет структурно-фазовое состояние, размер зерна/частиц, структурные дефекты материала. Выявлены закономерности изменения структуры, фазового состояния и взаимодействия с водородом полифазной порошковой системы Ti-Ni эквиатомного состава в результате её механохимического легирования титаном. Обнаружено, что порошок состава Ti-Ni после механохимического легирования Ti в количестве от 5 до 25 масс. % состоял из фаз TiNi (B2, B19`) и двух изоморфных модификаций фазы Ti_2Ni, отличающихся размерами элементарных ячеек. Параметр решётки Ti_2Ni (I) сохранялся неизменным при механохимическом легировании титаном, т.е. фаза Ti_2Ni (I) наследуется легированными порошками из исходного порошка Ti-Ni. Фаза Ti_2Ni (II) образуется в процессе механохимического легирования, а размер её элементарной ячейки зависил от дефектности структуры, формируемой в процессе механохимического легирования. Показано, что параметр решетки фазы на основе Ti_2Ni (II) соответствует гидридам $Ti_2NiH_{1,9}$ – $Ti_2NiH_{2,8}$ при 90 – 360 минутах гидрирования.

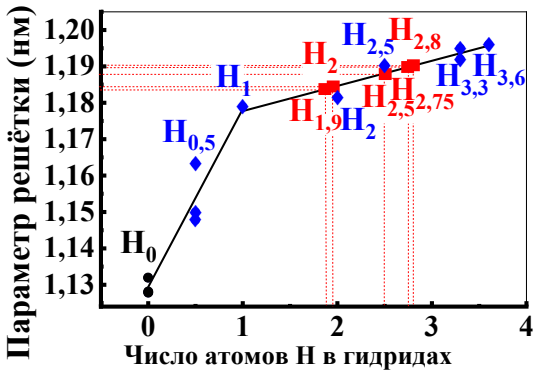


Рисунок – Зависимость параметра ячейки Ti_2Ni (II) гидрированной порошковой смеси состава (Ti-Ni) – Ti (15 % масс.) от числа атомов водорода в формульной единице гидридов Ti_2NiH_x: литературные данные – (●) параметр решётки Ti_2Ni, (♦) параметр решётки $Ti_2NiH_{0,5}$, Ti_2NiH_1, Ti_2NiH_2, $Ti_2NiH_{2,5}$, $Ti_2NiH_{3,3}$ и $Ti_2NiH_{3,6}$; экспериментальные данные (■)

В результате электрохимического гидрирования порошка состава (Ti-Ni) – Ti (15 % масс.), образуется твёрдый раствор внедрения на основе фазы Ti_2Ni (I), образует с водородом твердый раствор, тогда как на основе фазы Ti_2Ni (II) формируются гидриды с разным содержанием водорода от $Ti_2NiH_{1,9}$ до $Ti_2NiH_{2,8}$.

Авторы: к.т.н. Абдульменова Е.В., Буякова С.П., Кульков С.Н.

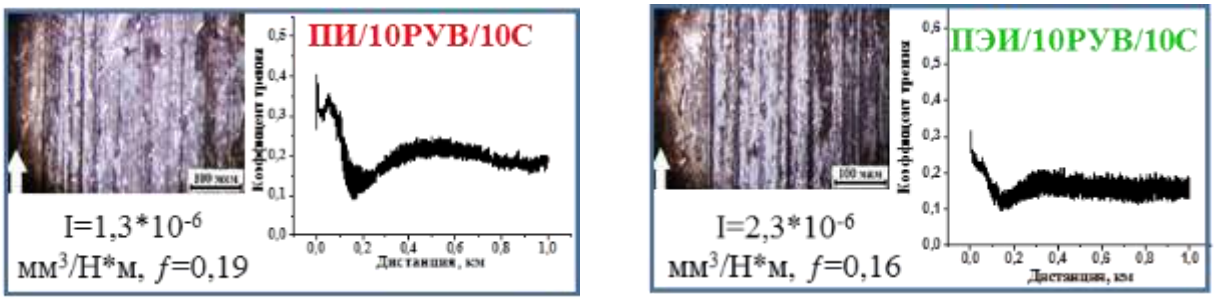
Опубликовано:

E.V. Abdulmenova, S.P. Buyakova, S.N. Kulkov. Electrochemical hydrogenation of Ti-Ni powder mechanochemically alloyed with titanium // Intermetallics. – 2022. – V 151. – P.107739.

Тема FWRW -2021-0009

Роль формирования трибологических слоев в повышении антифрикционных свойств композитов на основе высокоэффективных термопластов, наполненных углеродными волокнами

Проведен сравнительный анализ трибологических свойств композитов на основе полиимида (ПИ) и полиэфиримида (ПЭИ) в условиях линейного трибоконтакта (схема «вал-колодка») при варьировании нагрузки, скорости скольжения и материала контртела. Показано, что повышение трибологических свойств (снижение коэффициента трения и повышение сопротивления изнашиванию) может быть достигнуто за счет формирования трибологического слоя, который защищает поверхность трения от режущего и пропахивающего воздействия неровностей на поверхности контртел (рисунок). В ненаполненных полимерах трибологические слои не формировались, в то время как дисперсное упрочнение разрушенными углеродными волокнами являлось причиной формирования трибослоя. Дополнительное введение микрочастиц графита и MoS2 за счет модификации структуры трибослоя в процессе трения дополнительно повышала его модуль упругости, что было определено по данным наноиндентирования.



(а) (б)

Рисунок – Топография поверхности трибослоя и временная зависимость коэффициента трения в трехкомпонентных композитах на основе ПИ (а) и ПЭИ (б), содержащих 10 вес. % микрочастиц графита и 10 вес. % рубленных углеродных волокон

Авторы: д.т.н. Панин С.В., к.т.н. Буслович Д.Г., к.т.н. Алексенко В.О., к.ф.-м.н. Корниенко Л.А., к.т.н. Бяков А.В., д.ф.-м.н. Шугуров А.Р.

Опубликовано**:**

Panin, S.V.; Luo, J.; Buslovich, D.G.; Alexenko, V.O.; Kornienko, L.A.; Byakov, A.V.; Paimushin, V.N.; Shugurov, A.R. Role of Testing Conditions in Formation of Tribological Layers at Line Contacts of Antifriction CF-Reinforced PI- and PEI-Based Composites. Molecules 2022, 27, 6376. https://doi.org/10.3390/molecules27196376

Тема FWRW -2021-0010

Упругопластический инвариант
как число Рейнольдса при пластическом течении

При анализе зависимости $\lambda V_{aw}(T)$, установлено, что произведение λV_{aw} имеет размерность кинематической вязкости среды. Тогда инвариантное соотношение

$$\frac{\lambda V_{aw}}{\chi V_t} = \hat{Z} \approx \frac{1}{2}.$$

приобретает смысл аналога числа Рейнольдса, характеризующего режимы ламинарного и турбулентного движения жидкости и записываемого в виде

$$\mathrm{Re} = \frac{lV}{\nu} = \frac{\rho l V}{\mu},$$

где l –характерный пространственный масштаб потока, V – его скорость, ν – кинематическая, а μ –динамическая вязкость среды. В случае пластического течения можно полагать, что $l \equiv \lambda, V \equiv V_{aw}$ и $\nu \equiv \chi V_t$.

Рассмотрен температурный ход величин λV_{aw} и кинематической вязкости χV_t, входящих в уравнение инварианта и показано, что в основе автоволновых механизмов пластического течения. Известно, что скорость движения последних под действием приложенного напряжения контролируется вязкостью фононного электронного газа, в соответствии с соотношением $V_{disl} = (b/B)\sigma$, где B - константа торможения дислокаций.

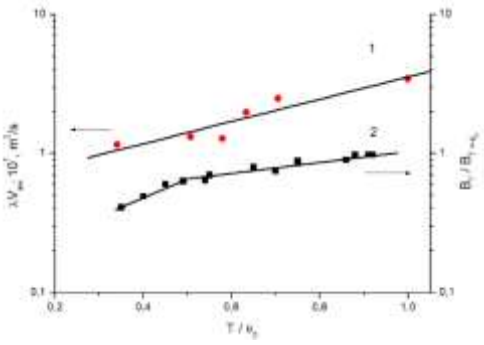


Рисунок – Температурный ход зависимостей $\lambda V_{aw}(T)$ (1,←) и $B_T/B_{T=\theta_D}(T)$ (2,→)

Сопоставление показанных на рисунке экспериментально полученной зависимости $\lambda V_{aw}(T)$ и зависимость $B_T/B_{T=\theta_D}(T)$ показывает, что при падении температуры испытания от $T/\theta_D = 1$ до $T/\theta_D = 0.3$ значения зависимостей $\lambda V_{aw}(T)$ и $B_T/B_{T=\theta_D}(T)$ также уменьшаются в одинаковой степени, то есть, приближенно выполняется соотношение $\lambda V_{aw}/\chi V_t \approx \mathrm{const}$. Это постоянство можно рассматривать как указание на температурную независимость упругопластического инварианта.

Авторы: д.ф.-м.н. Зуев Л.Б., д.ф.-м.н. Баранникова С.А., к.ф.-м.н. Колосов С.В.

Опубликовано:
Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Колосов С.В. Автоволновое описание температурного эффекта при деформации ГЦК металлов // ЖТФ. - 2022. - Т. 92. - № 12. - С. 1814-1819.

Тема FWRW -2021-0011

Формирование нерегулярного паттерна на переходных стадиях пластического течения

На основе развитого ранее подхода к описанию пластической деформации выяснены причины и условия формирования нерегулярного паттерна, наблюдаемого экспериментально на переходных стадиях пластического течения. Деформируемая среда рассматривается как нелинейная система с непрерывно меняющимся распределением носителей необратимой деформации на двух пространственных и временных мезоскопических масштабах. Динамика формирования паттерна описывается системой двух нелинейных уравнений параболического типа для динамических параметров порядка. На основе анализа решений уравнений показано, что формирование нерегулярного паттерна макроскопической деформации на переходных стадиях пластического течения определяется возбуждением автосолитонов. На стадии перехода от линейного к параболическому упрочнению возбуждаются затухающие статические автосолитоны. Возбуждение автосолитонов определяется амплитудой начального возмущения, Случайное распределение источников и амплитуд начальных возмущений приводит к зарождению и развитию нерегулярного паттерна, характерного для промежуточной стадии пластического течения.

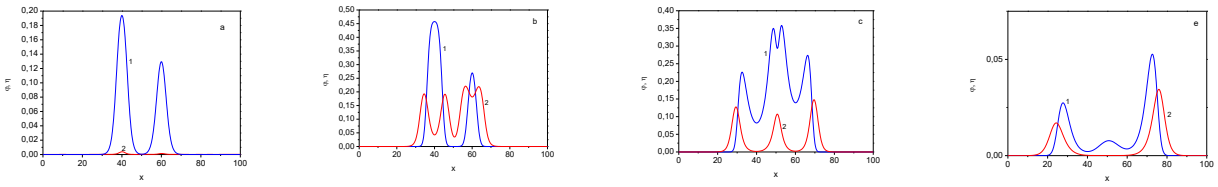


Рисунок – Распределение переменных φ (кривые 1), η (кривые 2) в моменты безразмерного времени t=1 (a), 3 (b), 5 (c), 7 (d), 9 (e). Буквы в скобках – номер рисунка. Переменные φ η – динамические параметры порядка, описывающие структурные изменения на двух мезоскопических уровнях пластического течения, различающихся характерной длиной и характерным временем структурных изменений

Авторы: д.ф.-м.н. Зуев Л.Б., д.ф.-м.н. Хон Ю.А.

Опубликовано:

1. Zuev L.B., Khon Y.A. Plastic Flow as Spatiotemporal Structure Formation. Part I. Qualitative and Quantitative Patterns // Physical Mesomechanics. – 2022. – V. 25. – P. 103-110

2. Khon Y.A., Zuev L.B. Plastic Flow as Spatiotemporal Structure Formation. Part II. Two-Level Description// Physical Mesomechanics. – 2022. – V. 25. – P. 111-107.

3. Khon Y.A. Formation of irregular pattern of localized plasticity at the stage of transition from linear to the stage of parabolic hardening// Izvestiya vuzov. Fizika. – 2022. – N. 3. – P. 140-145.

4. Khon Y.A. Theoretical and real strength of crystals: physical reasons for the difference// Izvestiya vuzov. Fizika. – 2022. – N. 8. – P. 76-80.

Тема FWRW -2021-0011

Управление зеренной структурой и механическими свойствами титанового сплава при электронно-лучевом аддитивном производстве с добавлением меди

Впервые продемонстрирован способ электронно-лучевого аддитивного производства с одновременной подачей двух проволок сплавов титана (ВТ6) и меди (М1) с формированием трех типов зеренной структуры первичных β-зерен. Экспериментальные данные показывают возможность управления зеренной структурой и механическими свойствами сплава для разработки конкретных изделий, в частности изготовления шар-баллонов высокого давления. Установлено, что с увеличением концентрации меди от 0,6 вес. % до 9,7 вес. % происходит измельчение первичного β-зерна и осуществляется переход от столбчатой структуры к столбчато-равноосной и полностью равноосной структуре со средним размером равноосных зерен 700±20 мкм. При концентрации 6 вес. % Cu и 9,7 вес. % Cu происходит повышение значений предела прочности на 47 % и 76 % соответственно, но значения относительного удлинения для этих образцов минимальны и не превышают 1-3 %. Испытания на одноосное сжатие показали, что с увеличением концентрации меди наблюдается увеличение значений предела текучести, при этом для всех образцов, вырезанных в разных направлениях печати, наблюдается отсутствие анизотропии.

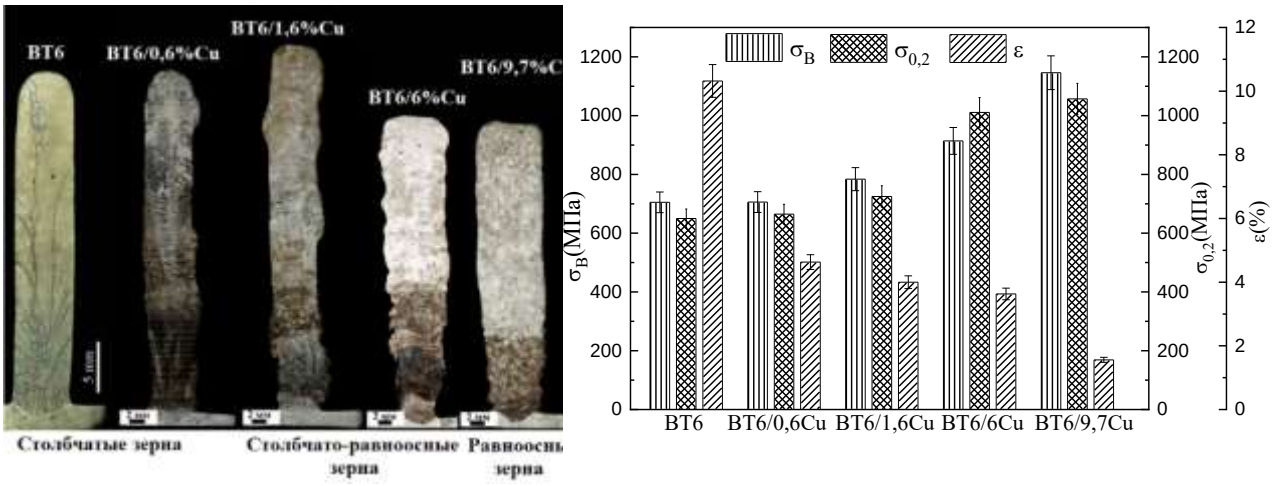


Рисунок – Макроструктура аддитивно полученного титанового сплава ВТ6 и ВТ6/Cu, механические характеристики ВТ6/Cu при испытаниях на статическое растяжение

Авторы: к.ф.-м.н. А.П. Зыкова, А.В. Николаева, к.т.н. А.В. Воронцов, к.т.н. А.В. Чумаевский, к.т.н. С.Ю. Никонов, к.ф.-м.н. Е.Н. Москвичев, Д.А. Гурьянов, д.т.н. Н.Л. Савченко, д.т.н. Е.А. Колубаев, д.т.н. С.Ю. Тарасов.

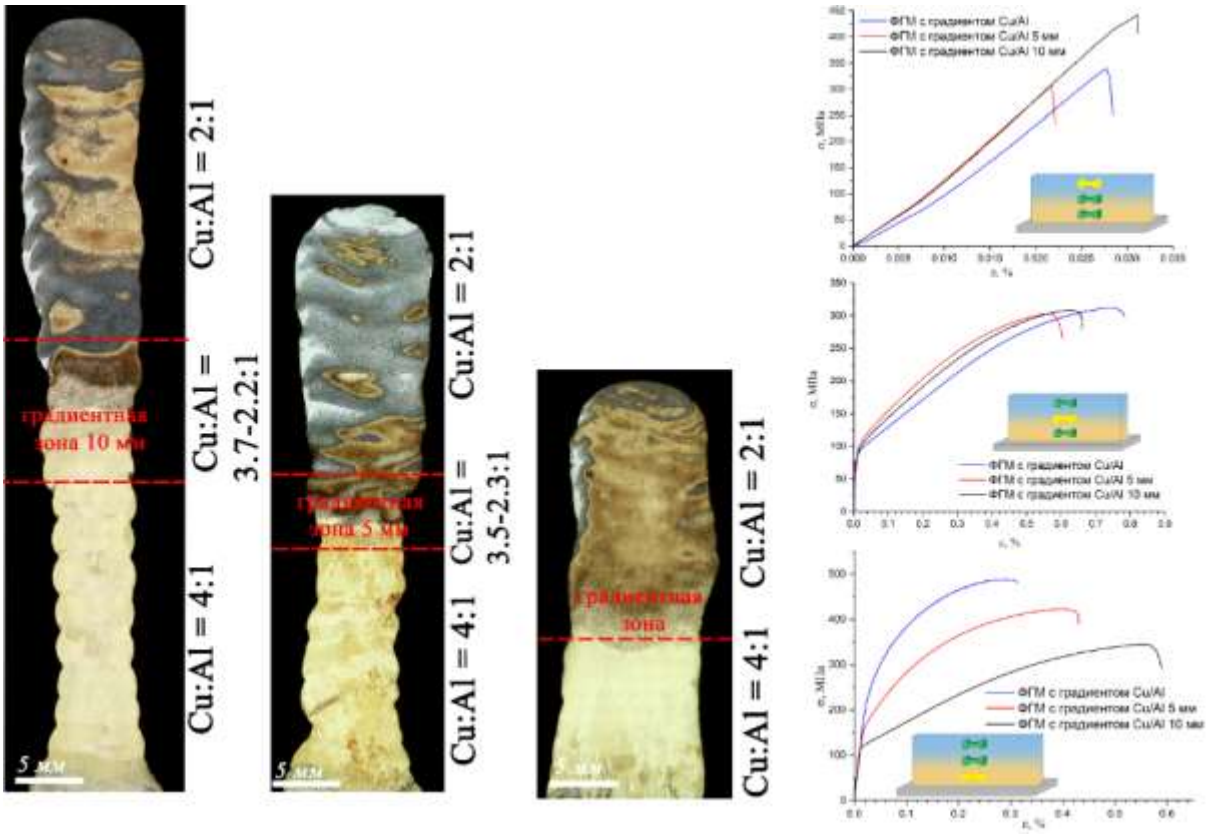
Опубликовано:

А.П. Зыкова, А.В. Николаева, А.В. Воронцов, А.В. Чумаевский, С.Ю. Никонов, Е.Н. Москвичев, Д.А. Гурьянов, Н.Л. Савченко, Е.А. Колубаев, С.Ю. Тарасов. Влияние концентрации меди на эволюцию зеренной структуры сплава Ti-6Al-4V при электронно-лучевом аддитивном производстве // Физическая мезомеханика. – 2022. – № 6. (в печати).

Тема FWRW -2021-0012

Влияние протяженности градиентной зоны функционально-градиентного изделия системы Cu/Al на структурно-фазовое состояние и механические свойства

Формирование функционально-градиентных материалов (ФГМ) Cu/Al методом электронно-лучевого аддитивного производства сопряжено с образованием ряда неоднородностей и дефектов в структуре. Основными препятствиями для получения структурно-однородных и бездефектных структур ФГМ на поверхности медной основы заключаются в различии коэффициентов термического расширения меди и алюминия на границе с образованием интерметаллидов, растрескиваний и расслоений. Впервые методом электронно-лучевой аддитивной технологии были получены бездефектные функционально-градиентные материалы Cu/Al с различной шириной градиентной зоны. Показан способ получения ФГМ, для получения которого использовалась одновременная подача двух проволок с изменением соотношения объемных долей меди и алюминия по мере выращивания материала. Показано, что градиентная зона ФГМ Cu/Al состоит из фаз α-Cu, Cu_4Al, Cu_3Al и Cu_9Al_4. Установлено, что ширина градиентной зоны влияет на объемную долю интерметаллидных фаз Cu_xAl_y, которые в свою очередь определяют величину относительного удлинения при постоянном значении предела прочности (305±10 МПа). Показано, что верхняя часть ФГМ Cu/Al, состоящая из 67 об.% Cu и 33 об.% Al, демонстрирует резкое падение механических свойств, что вероятно связано с образованием фазы Cu_9Al_4, объемная доля которой преобладает по сравнению с другими интерметаллидными фазами системы Cu_xAl_y.



Авторы: А.О. Панфилов, к.ф.-м.н. А.П. Зыкова, к.т.н. А.В. Чумаевский, к.т.н. А.В. Воронцов, к.ф.-м.н. С.Ю. Никонов, д.т.н. Е.А. Колубаев.

Опубликовано: А.О. Панфилов, А.П. Зыкова, А.В. Чумаевский, А.В. Воронцов, С.Ю. Никонов, Е.А. Колубаев. Влияние протяженности градиентной зоны функционально-градиентного изделия системы Cu/Al на структурно-фазовое состояние и механические свойства // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2022. – № 4. (в печати).

Тема FWRW -2021-0012