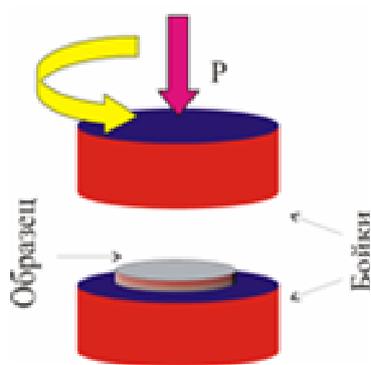
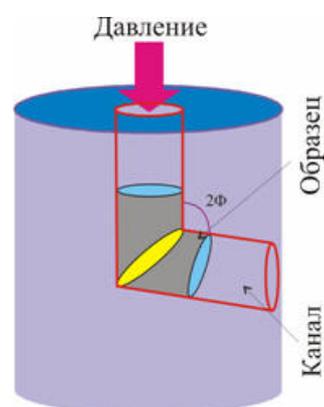


Важнейшие научные результаты, полученные в лаборатории 04 «Наноматериалы и нанотехнологии»

1. Деформационные методы получения объемных наноматериалов. Инициировано новое научное направление в физическом материаловедении, связанное с деформационными методами получения наноструктурных металлов и сплавов (интенсивная пластическая деформация (ИПД)), получившее мировое признание и широкое распространение. Получены приоритетные результаты, продемонстрировавшие существенное изменение ряда свойств материалов (характеристик прочности, пластичности и сверхпластичности, теплоемкости, коэффициента теплового расширения, электрических, электронно-эмиссионных и магнитных свойств, коэффициента диффузии, упругих модулей, температуры Дебая и др.) в результате деформационного наноструктурирования. Выяснена природа свойств наноструктурных материалов, связанная с особой, неравновесной структурой границ зерен, формирующейся внесенными в процессе пластической деформации дефектами, построены структурные модели наноматериалов.



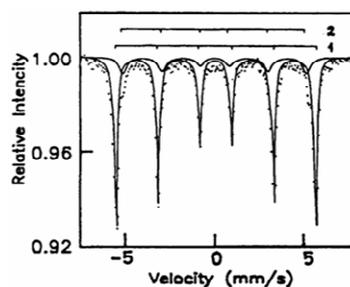
Метод кручения под квазигидростатическим давлением (КГД)



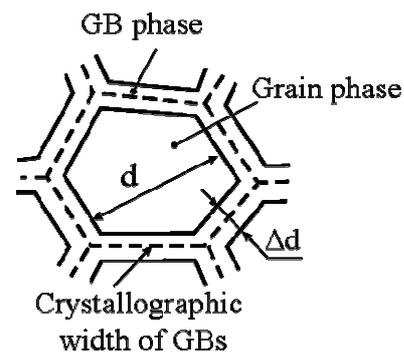
Метод равноканального углового прессования (РКУП)



Электронномикроскопическое изображение структуры нанокристаллического Fe



Мессбауеровский спектр нанокристаллического железа



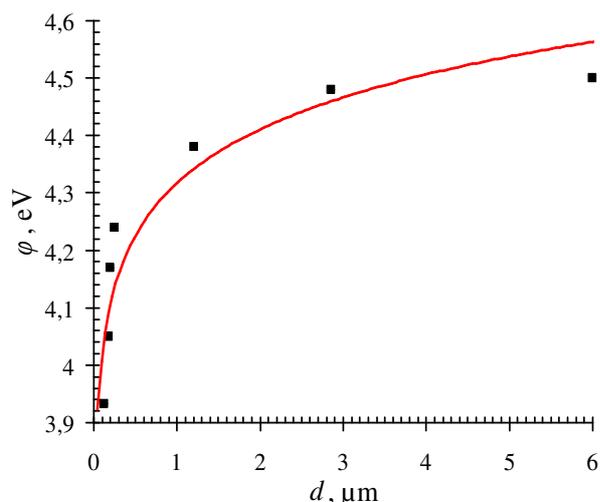
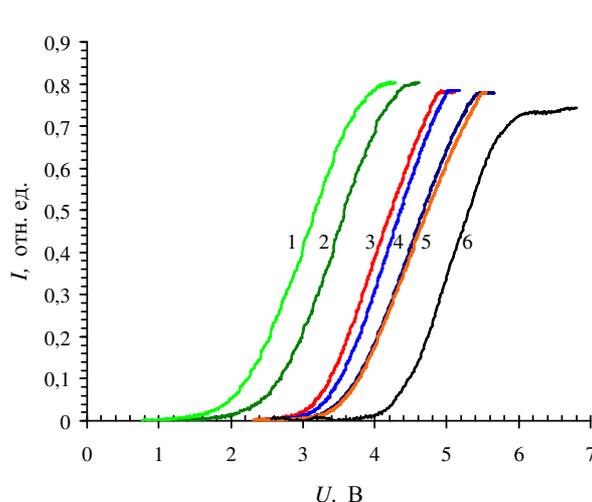
Структурная модель нанокристаллического металла

Литература

1. Валиев Р.З., Корзников А.В., Мулюков Р.Р. Структура и свойства металлических материалов с субмикроструктурной структурой // Физика металлов и материаловедение.- 1992.- № 4.-№2, С. 70-86.

- Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and properties of ultra fine-grained materials produced by severe plastic deformation // *Materials Science and Engineering*.- 1993.- V. A168.- P.141-148.
- Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 279 с.
- Мулюков Р.Р. Развитие принципов получения и исследование объемных наноструктурных материалов в ИПСМ РАН // *Российские нанотехнологии*. 2007. Т.2, №7-8. С. 38-53.

2. Работа выхода электрона наноматериалов. Исследованиями эмиссионных свойств наноструктурных Ni, W, Cu и алюминиевого сплава Al+6%Mg установлено, что уменьшение размера зерен до наноразмерного уровня снижает работу выхода электрона.



Работа выхода электрона металлов, измеренная методом Андерсона: 1 – Al+6%Mg ($d=100$ nm), 2 – Al+6%Mg ($d=2$ μ m), 3 – Ni ($d=150$ nm), 4 – Cu ($d=200$ nm), 5 – Cu ($d=10$ μ m), Ni ($d=5$ μ m), 6 – Pt

Зависимость работы выхода электрона от размера зерен в Ni

Уменьшение работы выхода электрона при создании нанокристаллической структуры составляет 0.8 эВ для W, 0.6 эВ для Ni, 0.3 эВ для Cu и 0.4 эВ для сплава Al+6%Mg.

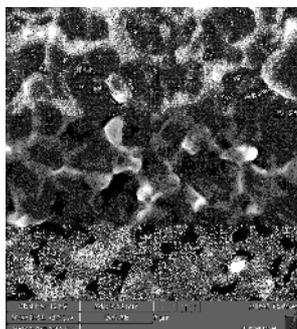
Литература

- Хисамов Р.Х., Сафаров И.М., Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М. Влияние границ зерен на работу выхода электрона нанокристаллического никеля. // *ФТТ*. - 2013. - Т.55. - В.1. - С. 3-6.
- Хисамов Р.Х., Юмагузин Ю.М., Мулюков Р.Р., Назаров К.С., Салимов И.М., Сафаров И.М., Зубаиров Л.Р. Влияние нанокристаллической структуры на ионно-электронную эмиссию сплава Al+6%Mg. // *Письма ЖТФ*. - 2013. - Т.39. - В.5. - С.76-81.
- И.Р. Набиуллин, А.Н. Лачинов, Р.Х. Хисамов, Р.Р. Мулюков. Оценка параметров потенциального барьера на границе металл/полимер в ходе возврата структуры нанокристаллического никеля // *ФТТ*. - 2012. - Т.54. - В.3. - С.422-426.
- Хисамов Р.Х., Сафаров И.М., Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М., Зубаиров Л.Р., Назаров К.С. Влияние формирования нанокристаллической структуры на работу выхода электрона и ионно-электронную эмиссию никеля. // *ЖТФ*. - 2011. - Т.81. - В.11. - С.122-124.

5. Mulyukov R.R. Influence of nanocrystalline structure on work function of tungsten // JVST B. - 2006. - V.24/ - № 2. - P. 1061-1066.
6. Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М. Работа выхода электронов из нанокристаллического вольфрама // ДАН. - 2004. - Т. 399. - №6. - С.760-761.

3. Катодолюминисцентная лампа с холодным катодом из наноструктурного металла.

Методом ионно-лучевого распыления на поверхности нанокристаллического никеля получена острейшая структура с существенно более высокой плотностью острий, чем при использовании крупнокристаллического никеля. Из нанокристаллического никеля изготовлен металлический планарный полевой эмиссионный катод с высокой плотностью острий на поверхности. С площади катода около 28 мм^2 был получен ток 110 мкА при потенциале $1,5 \text{ кВ}$. Создана рабочая модель энергоэффективной катодолюминисцентной лампы с катодом, изготовленным из полученного деформационным методом нанокристаллического материала.



Острейший рельеф на поверхности наноматериала

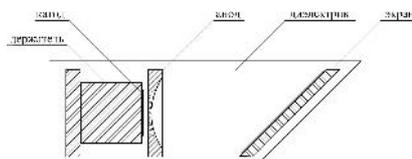


Схема катодолюминисцентной лампы



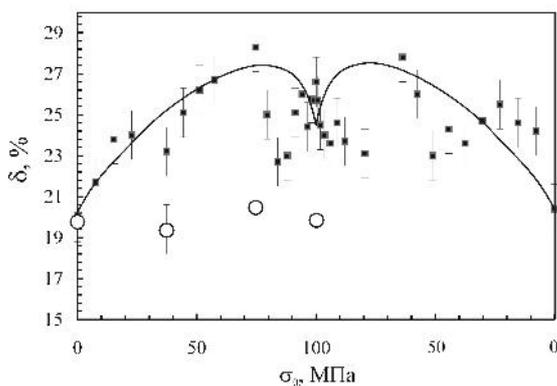
Рабочая модель катодолюминисцентной лампы

Литература

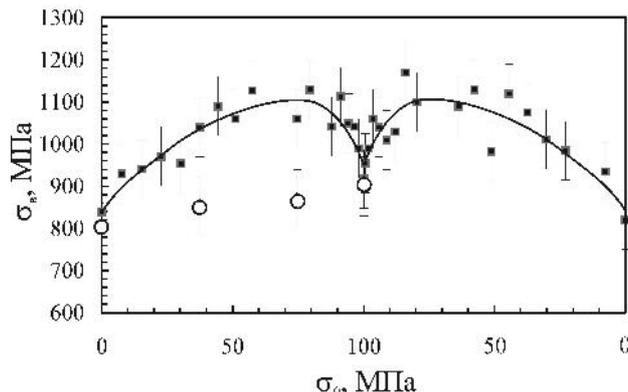
1. Назаров К.С., Хисамов Р.Х., Юмагузин Ю.М., Мулюков Р.Р. Формирование многоострийного рельефа на поверхности наноструктурного никеля и полевая электронная эмиссия с него. // Письма в ЖТФ. - 2015. - Т. 41. - В. 11. - С. 16-22.
2. Хисамов Р.Х., Юмагузин Ю.М., Мулюков Р.Р., Назаров К.С., Салимов И.М., Сафаров И.М., Зубаиров Л.Р. Влияние нанокристаллической структуры на ионно-электронную эмиссию сплава $\text{Al}+6\%\text{Mg}$. // Письма ЖТФ. - 2013. - Т. 39. - В. 5. - С. 76-81.
3. Хисамов Р.Х., Сафаров И.М., Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М., Зубаиров Л.Р., Назаров К.С. Влияние формирования нанокристаллической структуры на работу выхода электрона и ионно-электронную эмиссию никеля. // ЖТФ. - 2011.- Т. 81. - № 11. - С. 122-124.

5. Высокопрочные постоянные магниты. Путем деформации цилиндрических образцов сплава Fe-22\%Cr-15\%Co методом комбинированного нагружения, имеющего компоненты растяжения и кручения, в условиях сверхпластичности сформирована градиентная микроструктуры с мелкими зёрнами в периферии и крупными в центре, что обеспечивает повышение прочностных характеристик образца при сохранении магнитных свойств. Методом сварки давлением с использованием никелевой прослойки получено твердофазное соединение магнитотвердого сплава $25\text{X}15\text{K}$ и Стали 3, обладающее высокой прочностью на отрыв. Полученные результаты могут быть использованы при разработке крупногабаритных магнитных роторов, способных работать при высоких скоростях вращения.

6. Ультразвуковая обработка УМЗ материалов. Исследованиями воздействия ультразвука на ультрамелкозернистый (УМЗ) никель, полученный методами КГД и РКУП, установлено, что ультразвуковая обработка (УЗО) приводит к релаксации неравновесной структуры УМЗ материалов, повышению термической стабильности их микроструктуры и одновременному повышению пластичности и прочностных характеристик. Указанные эффекты зависят от амплитуды ультразвука. Существует оптимальная амплитуда УЗО, при которой достигается максимальное повышение механических характеристик. Эффект подобен воздействию отжига, но происходит в существенно более короткие интервалы времени (десятки секунд), что позволяет рассматривать УЗО как перспективный метод улучшения механических свойств ультрамелкозернистых материалов.



Зависимость удлинения УМЗ Ni до разрушения от амплитуды УЗО

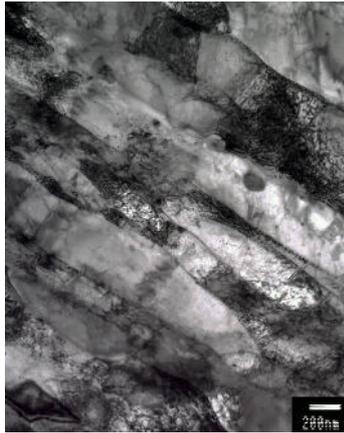


Зависимость предела прочности УМЗ Ni от амплитуды УЗО

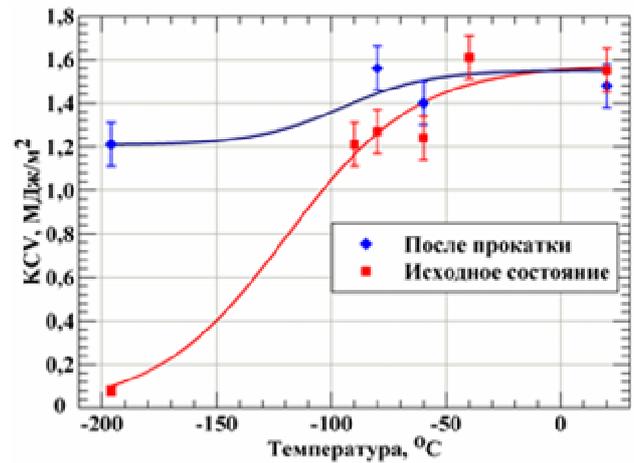
Литература

1. Samigullina A.A., Nazarov A.A., Mulyukov R.R., Tsarenko Yu.V., Rubanik V.V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing // *Reviews on Advanced Materials Science*. - 2014. - V. 39. - P. 14-34.
2. Назаров А.А., Самигуллина А.А., Мулюков Р.Р., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. Изменение микроструктуры и механических свойств наноматериалов при ультразвуковом волновом воздействии // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. - 2014. - № 2. - С. 77-84.
3. Самигуллина А.А., Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Мухаметгалина А.А., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. Повышение ударной вязкости ультрамелкозернистого никеля после ультразвуковой обработки // *Письма о материалах*. - 2014. - Т. 4. - № 1. - С. 52-54.
4. Назарова А.А., Мулюков Р.Р., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Назаров А.А. Влияние ультразвуковых колебаний на структуру и свойства ультрамелкозернистого никеля // *ФММ*. - 2010. - Т.110. - № 6. - С. 600-607.

7. Хладостойкие низкоуглеродистые стали. Исследованиями установлено, что формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в низкоуглеродистой стали 05Г2МФБ приводит к повышению хладостойкости и прочностных свойств по сравнению с мелкозернистой (МЗ) структурой при сохранении требуемой пластичности. Показано, что в стали с УМЗ структурой значение ударной вязкости при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше в 15 раз, чем в исходном МЗ состоянии. В УМЗ состоянии общая работа разрушения при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ повышается за счет увеличения работы распространения трещины по сравнению с исходным МЗ состоянием.



Микроструктура стали 05Г2МФБ после теплой прокатки



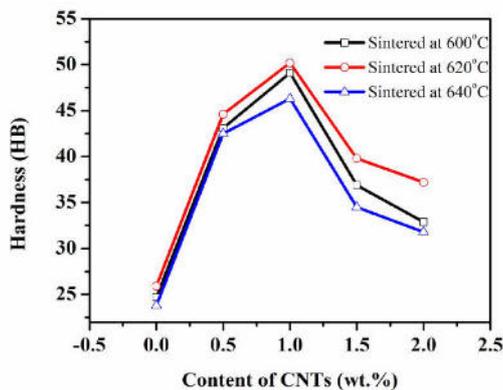
Температурная зависимость ударной вязкости KCV стали 05Г2МФБ

Литература

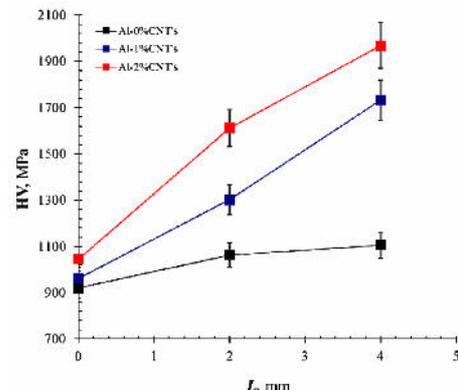
Сергеев С.Н., Сафаров И.М., Корзников А.В., Галеев Р.М., Гладковский С.В., Двойников Д.А.. Влияние теплой прокатки на структуру и механические свойства низкоуглеродистой трубной стали // Письма о материалах. - 2015. - Т. 5. - № 1. - С. 48-51.

8. Металломатричные композиты, армированный углеродными нанотрубками. С

помощью метода деформации кручением под квазигидростатическим давлением (КГД) из смеси порошков металлов и углеродных нанотрубок (УНТ) получены образцы композитов Al-УНТ и Cu-УНТ. В полученных материалах размер зерен значительно меньше, чем после ИПД кручением чистых металлов, что позволяет комбинировать зернограничное и композитное упрочнение и получить материал повышенной прочности. Во всем исследованном интервале концентрации УНТ (от 0 масс. % до 4 масс. % в Cu-УНТ и от 0 масс. % до 2 масс. % в Al-УНТ) микротвердость композитов, полученных КГД, растет с концентрацией УНТ, тогда как при компактировании методом горячего изостатического прессования (ГИП) микротвердость достигает максимума, но потом начинает убывать из-за высокой пористости. При этом сохраняются возможности дальнейшего повышения характеристик композитов за счет более однородного распределения УНТ.



а



б

Изменение микротвердости композита Al-УНТ с ростом концентрации УНТ; (а) после ГИП при разных температурах; (б) после ИПД методом КГД; ввиду неоднородной деформации при кручении, микротвердость растет с увеличением расстояния L точки измерения от центра образца, имеющего форму диска.

Литература

1. Phuong D.D., Trinh P.V., An N.V., Luan N.V., Minh P.N., Khisamov R.Kh., Nazarov K.S., Zubairov L.R., Mulyukov R.R., Nazarov A.A. Effects of carbon nanotube content and annealing temperature on the hardness of CNT reinforced aluminum nanocomposites processed by the high pressure torsion technique // J. Alloys Comp. - 2014. - V. 613. - P.68 - 73.
2. Хисамов Р.Х., Назаров К.С., Зубаиров Л.Р., Назаров А.А., Мулюков Р.Р., Сафаров И.М., Сергеев С.Н., Мусабилов И.И., Фуонг Д.Д., Чин П.В., Луан Н.В., Мин П.Н., Хуан Н.К. Армированные углеродными нанотрубками композиты с медной матрицей, полученные интенсивной пластической деформацией // Физика твердого тела. - 2015. - Т. 57. - № 6. - С.1185-1191.
3. Хисамов Р.Х., Назаров К.С., Сергеев С.Н., Кабилов Р.Р., Мулюков Р.Р., Назаров А.А. Микроструктура и микротвердость металломатричных композитов с углеродными нанотрубками, полученные интенсивной пластической деформацией // Письма о материалах. - 2015. - Т. 5. - № 2. - С.119-123.

9. Высокопрочная мартенситная сталь с высокими магнитными характеристиками.

Разработана технология обработки высокопрочной, мартенситностареющей, коррозионностойкой стали, обеспечивающий получение высоких механических характеристик и магнитных свойств. Наиболее перспективной областью применения данной стали является использование их в качестве материалов для изготовления приводных дисков роторов гистерезисных двигателей центрифуг. Изготовлены опытные партии изделий и проведено промышленное опробование.

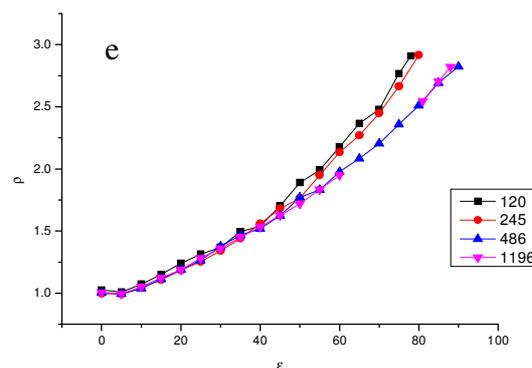
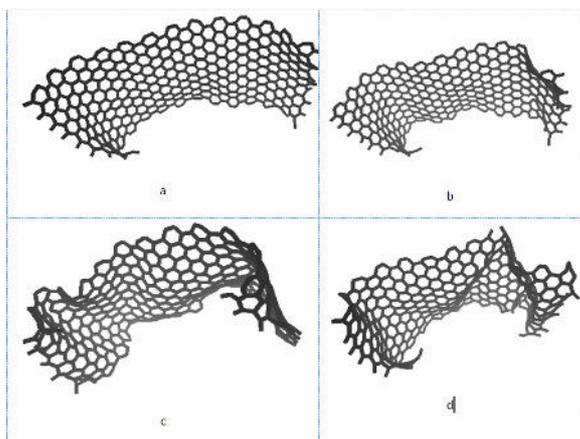
Использование предлагаемого нами способа обработки позволило увеличить прочностные характеристики по сравнению со стандартной обработкой на 10-15%, и повысить КПД двигателей на 5-10%, при этом время разгона до номинальной частоты вращения уменьшилось на 42%, динамическая мощность при разгоне увеличилась на 40%, максимальная мощность на валу в номинальном режиме – на 38% при тех же напряжениях питания, что и используемые в настоящее время.

Предел прочности σ_b , МПа	2000-2200	
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	1900-2050	
Относительное удлинение, δ , %	3-5	
Твердость, HRC	53-57	
Коэрцитивная сила H_c , кА/м	2,5-3,5	
Остаточная индукция B_r , не менее Тл	0,7-0,8	

Литература

1. Патент РФ 2391413 С1 «Способ термомеханической обработки заготовки из мартенситностареющей стали» / Мулюков Р.Р., Кабилов Р.Р. Баженов П.В., Козин В.В., Маранц Б.Д., Нурисламов А.Х., Мулюков Х.Я. // Бюлл. Изобр. №16 10.06.2010.

10. Объемные материалы на основе графена. Методом молекулярной динамики изучен объемный материал из смятого графена различной дисперсности. Установлено, что увеличение среднего размера структурного элемента приводит к повышению устойчивости материала к деформации в процессе гидростатического сжатия.



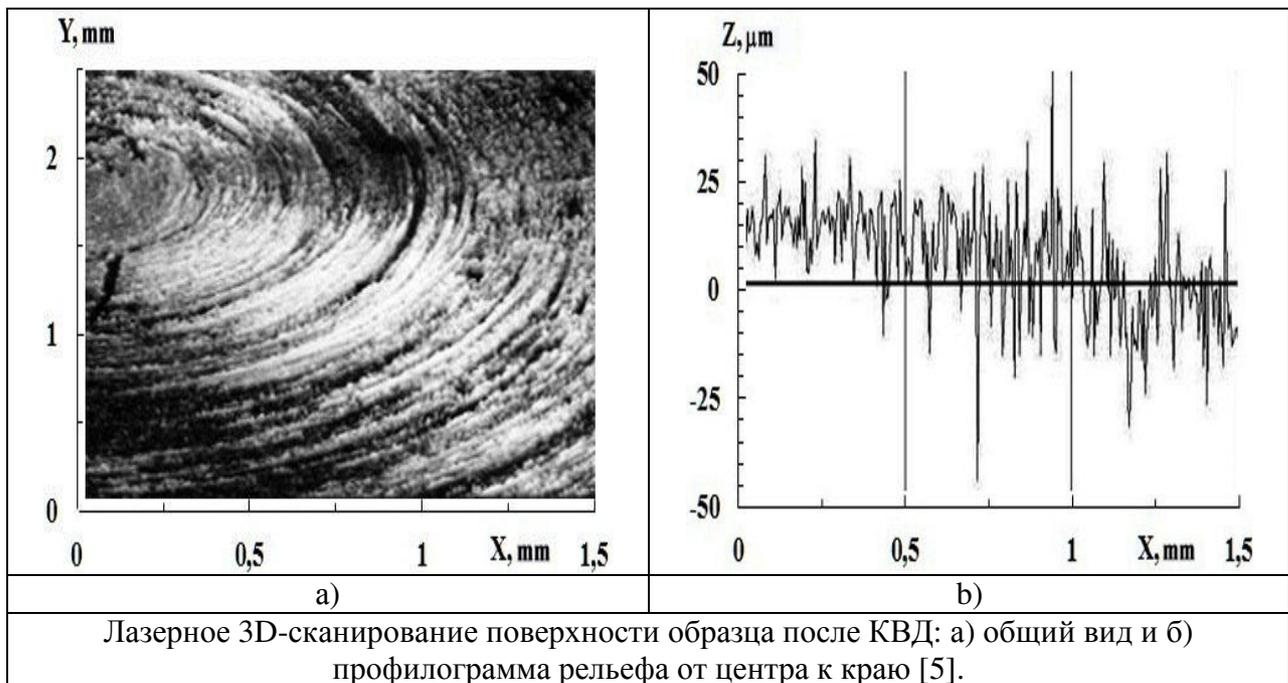
Деформационно-индуцированная трансформация структурной единицы объемного материала из смятого графена, содержащего 486 атомов, при деформации (a) $\epsilon=0$, (b) $\epsilon=25\%$, (c) $\epsilon=50\%$, (d) $\epsilon=75\%$ и зависимость плотности материала от степени приложенной деформации для объемного материала из смятого графена, содержащего 120, 245, 486 и 1120 атомов в структурной единице (e)

С помощью модели молекулярной цепи на плоскости получены возможные стационарные состояния графеновых нанолент, показана их устойчивость и рассчитана энергия как функция длины. Полученные результаты легко интерпретируются, имея в виду, что полученные конфигурации определяются равновесием между снижением энергии при образовании Ван-дер-Ваальсовых связей и ее повышением ввиду образования изгибных напряжений.

Литература

1. Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Влияние конфигурации ринклон на распределение энергии и упругой деформации в наноленте графена // Письма в ЖЭТФ. - 2014. Т. 100. - № 3.- С. 201–206.
2. Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Moving wrincklon in graphene nanoribbons // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2014. - V. 47. No. 34. - Art. 345307.
3. Баимова Ю.А., Мурзаев Р.Т., Дмитриев С.В. Механические свойства объемных углеродных наноматериалов // ФТТ. - 2014. - Т. 56. - № 10. - С. 1946-1952.
4. Korznikova E.A., Vaimova J.A., Dmitriev S.V., Korznikov A.V. and Mulyukov R.R. Mechanical behavior of crumpled sheet materials subjected to uniaxial compression // Rev. Adv. Mater. Sci. - 2014. - V. 39. - P. P.92-98.
5. Vaimova J.A., Korznikova E.A., Dmitriev S.V., Liu B. and Zhou K. Review on crumpled graphene: unique mechanical properties // Rev. Adv. Mater. Sci. - 2014. - V. 39. - P. 69-83.

11. Деформационный рельеф металлов. На основании сравнительного анализа интегральных дисперсий рельефа после КВД для бойка и образца установлено, что на мезо- и наноуровне отношение величин RS_a отличается ~ в 2 раза. Исследования образца с помощью сканирующей лазерной, оптической и электронной микроскопии выявили в структуре деформационной поверхности наличие аккомодационных поперечных полос деформации ортогональных направлениям сдвига.



Литература

1. Круглов А.А., Руденко О.А., Сисанбаев А.В. Температурная зависимость деформационного рельефа наноструктурного титанового сплава после сверхпластической формовки // Перспективные материалы (РИНЦ). 2011. № 12 (спец. выпуск). с. 258-261.
2. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Методика исследования фрактальной размерности деформационной поверхности стали // Заводская лаборатория. Диагностика материалов (РИНЦ). 2013. т. 79, № 7, ч. 1. с. 44-42.
3. Ахатова А.Ф., Саркеева А.А., Круглов А.А., Сисанбаев А.В., Александров И.В. 3D-анализ изломов титанового сплава втб после испытаний на ударный изгиб методом лазерной сканирующей микроскопии // Химическая физика и мезоскопия (РИНЦ). 2014. т. 16, № 1. с. 109-114.
4. Сисанбаев А.В., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Мухаметрахимов М.Х. 3D-контроль рельефа поверхности в полых гофрированных конструкциях из титановых сплавов после сверхпластической формовки // Химическая физика и мезоскопия (РИНЦ). 2015. т. 77, № 1, с. 117-120.
5. Sisanbaev A.V., Demchenko A.A., Demchenko M.V., Shalimova A.V., Zubairov L.R., Mulyukov R.R. Features of strain relief of the surface of the metal strip, obtained by the high pressure shear // Multifunctional materials and modeling (Web of Science). 2015. p. 229-236.