

3. Снижение прочностных характеристик трубных сталей, вызванных повышенным содержанием водорода, может быть одной из причин разрушения МГ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповалов В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1982. 232 с.
2. Гельд П.В., Рябов Р.А., Кодес Е.С. Водород и несовершенства структуры металла. М.: Металлургия, 1979. 221 с.
3. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. // Механика разрушения и прочность материалов. Т. 1. Основы механики разрушения материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 488 с.

4. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
5. Бурнышев И.Н., Глухов Н.А., Махнев Е.С., Мостовой А.В., Седелев Ю.А. Некоторые материаловедческие аспекты безопасности магистральных газопроводов / Вторая Международная конференция «Безопасность трубопроводов»: Сб. докл. 28–31 авг., 1997. Секция 3. М., 1997. С. 7-13.
6. Асадуллин М.З., Бурнышев И.Н., Глухов Н.А., Махнев Е.С., Михеев Г.М., Седелев Ю.А., Хасанов Р.Н. Новые представления о причинах разрушения магистральных газопроводов / Первый Международный конгресс «Новые высокие технологии для нефтегазовой промышленности и энергетики будущего»: Сб. науч. тр. 4–6 июля, 1996. Т. 1. Тюмень, 1996. С. 160-163.

УДК 548.571; 548.4

### **IN SITU ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКИХ, СТОХАСТИЧЕСКИХ И САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ (Краткий обзор последних работ сотрудников кафедры теоретической и экспериментальной физики ТГУ им. Г.Р. Державина)**

© Ю.И. Головин

Россия, Тамбов, Государственный университет, E-mail: ygolovin@inbox.ru

Golovin Y.I. *In situ* researches of fast dynamic, stochastic and self-organized phenomena in the system of structural defects of solids (A brief survey of papers made recently by the personnel of the department of theoretical and experimental physics of Tambov State University). The article reviews recent papers published by researchers of the department of theoretical and experimental physics of Tambov State University. This work is devoted to *in situ* study of fast dynamic, stochastic and self-organized phenomena in solids during crystallisation, plastic flow and fracture.

Одним из препятствий к созданию всеобъемлющих, полных теорий структурозависимых свойств реальных твердых тел (в частности, прочностных, пластических, магнитных, электрических, оптических), является недостаток информации о динамике элементарных быстропротекающих процессов в системе структурных дефектов, их взаимной обусловленности, степени скоррелированности и условиях самоорганизации на всех иерархических уровнях структуры. Во многих случаях (например, при пластической деформации в условиях действия магнитных полей, сосредоточенной нагрузки, образования мелкодисперсных ячеистых, блочных структур, полос локализованного сдвига, пространственной и временной неустойчивости пластического течения с переходом в режим самоорганизующейся критичности) остаются плохо известными не только динамические характеристики отдельных стадий, но и их полный набор и тем более, как правило, очень разветвленные сценарии чередования этих стадий. В последние несколько лет в связи с исследованиями разнообразных магнитоэластических эффектов в магнитоупорядоченных твердых телах (диамагнитных металлических, ионных и молекулярных кристаллах, полимерах, полупроводниках и др.) выяснилось, что для понимания природы их магниточувствительности необходимо учитывать помимо координатной части волновой функции электронов еще и спиновую динамику с характерными временами  $\sim 10^{-11}$ – $10^{-8}$  с. Очерченный

круг проблем требует расширения сферы *in situ* исследований динамики широкого спектра дефектов в область нано- и пикосекундных времен с одновременным сохранением высокого пространственного разрешения и резким увеличением информативности и быстродействия применяемых методик.

Стандартных комплексов оборудования для проведения подобных исследований нет ни в одной лаборатории мира. Силами сотрудников кафедры ТЭФ ТГУ разработано несколько уникальных методик и создана соответствующая быстродействующая аппаратура для *in situ* исследований быстропротекающих индивидуальных и коллективных явлений на различных иерархических уровнях структуры – спиновом, атомном, кластерном, дислокационном, мезоскопическом и макроскопическом. Эта работа проводится в рамках трех научных направлений, развиваемых на кафедре:

1. Спин-зависимые процессы в структурных дефектах магнитоупорядоченных твердых тел и их магниточувствительные свойства (руководители: профессор Ю.И. Головин и доцент Р.Б. Моргунов).

2. Быстропротекающие самоорганизующиеся явления в процессах неравновесной кристаллизации, пластической деформации и разрушения кристаллов (руководители: профессор Ю.И. Головин и доцент А.А. Шибков).

3. Динамическая микро- и нанотвердость и ее физическая природа (руководители: профессор Ю.И. Головин, доценты В.И. Иволгин и А.И. Тюрин).

Все три темы в течение нескольких лет поддерживаются грантами РФФИ, а первая – и рядом других: программами «Фуллерены», «Интеграция», «Университеты России», фонда Дж. Сороса и др.

По первому из названных направлений в течение последних пяти лет получены следующие принципиально важные результаты:

1. Обнаружен ряд новых эффектов действия и последствия слабых (в энергетическом смысле, см. п. 2) магнитных полей (МП) на пластические, оптические и электрические свойства магнитоупорядоченных твердых тел: ионных, ионно-ковалентных и молекулярных кристаллов, а также полимеров.

2. Установлено, что кажущееся парадоксальным сильное влияние МП на структуру и свойства реальных кристаллов в условиях, когда  $\mu B \ll kT$  ( $\mu$  – магнетон Бора,  $B$  – индукция МП,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура) обусловлено наличием в кристалле термодинамически неравновесных дефектов и их комплексов. МП, снимая запреты на протекание запрещенных по спину химических реакций между структурными дефектами, играет лишь роль катализатора медленно идущих релаксационных процессов.

3. Выяснено, что МП может влиять на структуру дефектов только на короткоживущей ( $\sim 10^{-10} - 10^{-8}$  с) возбужденной стадии их эволюции, когда спиновая подсистема практически изолирована от решетки (т. е. время жизни магниточувствительных состояний существенно меньше времени спин-решеточной релаксации). Установлено, что такое возбуждение может создаваться термическими флуктуациями, внешними и внутренними электрическими и механическими полями, освещением и др.

4. Обнаружен ряд перекрестных фотомагнито-пластических эффектов в ионных кристаллах, что подтверждает представление об электронно-спиновой природе магнитопластичности.

5. Установлено, что отклик на действие МП в виде изменения пластических характеристик является следствием многостадийного процесса, в котором лишь одна стадия – спиновая конверсия – является магниточувствительной и не всегда лимитирующей конечный выход.

6. Измерениями подвижности индивидуальных дислокаций и скорости макропластического течения в скрещенных постоянном и микроволновом МП обнаружены эффекты резонансного разупрочнения ионных кристаллов с примесью Са и Еи на частотах, совпадающих с ЭПР-овскими для  $g$ -факторов, приблизительно равных 2, 4, 6. Это прямо указывает на спиновую конверсию с изменением мультиплетности состояния взаимодействующих в процессе деформации структурных дефектов. Чувствительность такой ЭПР-спектроскопии к мгновенному значению концентрации парамагнитных центров в образце на 8–10 порядков величины превосходит достигнутую в стандартных ЭПР-спектрометрах, регистрирующих поглощение мощности высокочастотной электромагнитной волны вследствие резонанса. С другой стороны, экспериментально показано, что парамагнитный резонанс позволяет добиться существенного изменения пластичности ионных кристаллов при комнатной температуре в постоянном магнитном поле с индукцией всего несколько мТл.

7. Совокупность полученных экспериментальных данных позволила построить схематическую мо-

дель влияния МП на структуру дефектов и пластические характеристики кристаллов, учитывающую различные возможные сценарии смены стадий, а так же вероятность и характерные времена каждой из них.

Основные результаты этой многолетней программы отражены в [1–37] и доложены на ряде международных конференций в Москве, Санкт-Петербурге, Цюрихе, Страсбурге, Иерусалиме, Лионе. Помимо принципиальной значимости для физики, они могут быть интересны и в прикладном отношении как физическая основа различных технологий стабилизации свойств полупроводниковых приборов без отжига, пластификационные материалы при обработке давлением. Рассмотренные ситуации, ясно определенные физически, а также данные, полученные на хорошо изученных в других отношениях материалах, могут рассматриваться как модельные по отношению к поведению более сложных систем в МП, например, биологических и геологических. Природа большинства известных биомагнитных эффектов до сих пор не ясна, хотя в настоящее время нет сомнений в их реальности. Земная кора постоянно находится в условиях действия механических напряжений, повышенной температуры, а также постоянных и переменных МП, и ее динамика (подвижка плит, землетрясения и т. п.) не в последнюю очередь может зависеть от параметров геомагнитного поля.

Работы по второму направлению ведутся в нескольких научных лабораториях кафедры, но наиболее активно – в лаборатории физики льда. В широком и ранее не исследованном диапазоне переохлаждений  $\Delta T$  воды и слабых водных электролитов, перекрывающем практически весь диапазон гетерогенного зарождения твердой фазы ( $0,1 < \Delta T < 30$  К), здесь *in situ* исследуется кинетика фазового перехода вода – лед и зависимость морфологии образующихся кристаллов от величины  $\Delta T$ . Выявлено несколько морфологических кинетических переходов между образующимися структурами роста, построена морфологическая диаграмма в функции  $\Delta T$ , определена фрактальная размерность дендритов в каждой области этой диаграммы и функциональная зависимость скорости роста кристаллов льда от  $\Delta T$ .

В полосе частот  $0,1 \sim 10^3$  Гц обнаружено радиоизлучение, параметры которого тесно связаны с кинетикой и морфологией растущих кристаллов. Установлено, что источником этого излучения являются, главным образом, пространственно-временные флуктуации фронта кристаллизации, на котором формируется двойной электрический слой с разностью потенциалов до нескольких сотен вольт (в зависимости от скорости фронта, типа и концентрации примеси). Выявлены корреляции между параметрами этого радиоизлучения и особенностями роста дендритов льда различной морфологии, которые позволяют по одному электромагнитному сигналу определять степень переохлаждения воды, тип образующейся структуры, скорость фронта кристаллизации, долю твердой фазы в пробе и т. д.

В процессе механических испытаний и лазерного пробоя различных неметаллических кристаллов (в том числе ионных, ионно-ковалентных, льда) обнаружена связь между параметрами нестабильности пластического течения (динамикой отдельных событий на мезоскопическом уровне, а также амплитудно-временными характеристиками их больших последовательностей) и амплитудно-частотными характеристиками электро-

магнитного излучения в диапазоне частот 1 Гц – 10 МГц, которое сопровождается образованием и движением дефектов по кристаллу. Бесконтактность, широкополосность, репрезентативность по отношению к объему образца и высокое временное разрешение (до  $\sim 10^{-9}$  с) метода электромагнитной эмиссии выгодно отличают его от широко известного метода акустической эмиссии, что позволило выявить и исследовать отдельные фазы в динамике образования изолированных полос скольжения, их взаимодействия друг с другом и поверхностью кристалла, идентифицировать стадии макропластического течения, различать процессы пластического течения и трещинообразования без оптического или акустического контакта с образцом и др.

Несмотря на различие в природе процессов кристаллизации, пластической деформации и разрушения, разработанными на кафедре быстродействующими *in situ* методами удается найти некие общие свойства сильно неравновесных систем и исследовать их динамику, как на уровне отдельных элементарных событий, так и в условиях коллективного поведения, самоорганизации. Полученные результаты обладают новизной и принципиальной значимостью для физики реальных твердых тел, а также могут быть использованы на практике для создания средств мониторинга окружающей среды, прогнозирования катастрофических природных и техногенных явлений, ледовой разведки в полярных широтах и др. Основные результаты этих работ опубликованы в [38–54].

Работы по третьему направлению ведутся в лаборатории динамики микро- и наноконтактного взаимодействия твердых тел. Контактное взаимодействие твердых тел при любой степени шероховатости (или гладкости) их поверхностей происходит первоначально в небольшом числе точек, воспринимающих всю нагрузку. При этом в микрообластях с характерными размерами  $< 1$  мкм развиваются гигантские напряжения, сопоставимые с модулем Юнга, и относительные деформации в десятки процентов даже в таких хрупких материалах как карбиды или бориды тугоплавких металлов. Ввиду крайней малости локально сформированной области, скорости относительной деформации (даже при невысоких скоростях абсолютного перемещения  $< 1$  м/с) достигают значений  $10^6$  с $^{-1}$ , характерных для деформации детонирующим взрывчатым веществом. Таковы условия при сухом трении одного тела по поверхности другого, при механическом шлифовании, абразивном износе, при накоплении повреждений в результате соударения пылинок с поверхностью движущихся транспортных средств (в том числе и космических), при тонком помоле в различных мельницах и в активаторах механохимических реакций, в вершине быстро растущей квазихрупкой трещины и во многих других ситуациях. Быстропротекающие процессы, которые происходят при этом в тонких приповерхностных слоях, определяют служебные свойства изделия, его долговечность, химическую и каталитическую активность поверхности, ее эмиссионную способность и др., но информация о них очень ограничена.

С помощью существующих методик (например, наноиндентирования) можно исследовать квазистатические свойства приповерхностных слоев, но они мало чем могут помочь в анализе природы динамического поведения материала в микро- и нанобъемах.

Нами предложены новые принципы исследования быстропротекающих процессов в микроконтактах,

разработаны компьютеризированные динамические нанотестеры, сочетающие высокое пространственное разрешение (1–10 нм) с рекордно высоким временным разрешением (50 мкс). С помощью этих методов получены уникальные сведения об атомарных механизмах деформации в микроконтактах в различных кристаллических и аморфных материалах. Высокое разрешение во времени позволило впервые показать, что процесс динамического микроконтактного взаимодействия не автомоделен, а протекает в несколько существенно различающихся по динамике и механизмам, последовательно сменяющих друг друга стадий. После первой, чисто упругой стадии внедрения индентора во всех исследованных материалах происходило «забивание» атомов в междоузлия и деформация осуществлялась за счет движения сначала одиночных межузельных атомов, а затем их небольших групп – малоатомных кластеров. На этих стадиях, занимавших менее 10 мс, образовывается отпечаток с объемом от 30 до 100 % (в зависимости от природы материала) от окончательно устанавливающегося при длительном нагружении. И лишь при продолжительности контакта более 10 мс становилась заметной работа традиционных дислокационных механизмов пластической деформации (если они вообще могли иметь место в данном материале при температуре испытания).

Полученные данные позволили количественно определить долю деформации, реализующуюся по тому или иному механизму, их вклад в формирование свойства «твердость» при различных условиях микроконтактного взаимодействия. Эти результаты имеют принципиально важное значение для углубления понимания природы приповерхностной прочности, пластичности, стойкости к износу, механостимулированных твердофазных химических реакций и многого другого.

Не менее интересны и обнаруженные в лаборатории быстропротекающие электрофизические явления, обусловленные зарождением и движением структурных дефектов атомарного масштаба в зоне микроконтакта, несущие информацию о динамике и природе микроструктурных процессов и зачастую играющие если не решающую, то очень важную роль в поведении тонких приповерхностных слоев плохо проводящих материалов. Основные результаты работы в этом направлении опубликованы в [55–64].

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

### Магнитопластические эффекты:

1. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магнитная память дислокаций в монокристаллах NaCl // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1993. Т. 58. № 3. С. 189-192.
2. Головин Ю.И., Казакова О.Л., Моргунов Р.Б. Подвижность дислокаций в монокристаллах NaCl в постоянном магнитном поле // Физика твердого тела. 1993. Т. 35. № 5. С. 1384-1386.
3. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние постоянного магнитного поля на скорость макропластического течения ионных кристаллов // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1995. Т. 61. № 7. С. 583-586.
4. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние отжига в постоянном магнитном поле на подвижность дислокаций в монокристаллах NaCl // Физика твердого тела. 1995. Т. 37. № 4. С. 1239-1241.
5. Golovin Yu.I., Morgunov R.B., Tyutyunnik A.V. The influence of permanent magnetic and alternative electric fields on the dislocation dynamics in ionic crystals // Physica Status Solidi(b). 1995. V. 189. № 1. P. 75-80.
6. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние постоянного магнитного поля на подвижность дислокаций в монокристаллах NaCl // Физика твердого тела. 1995. Т. 37. № 5. С. 1352-1361.

7. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Тютюнник А.В. Исследование *in situ* динамики дислокаций в монокристаллах NaCl, обработанных постоянным магнитным полем // Изв. РАН. Сер. физическая. 1995. Т. 59. № 10. С. 3-7.
8. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е., Карякин А.М. Релаксационные явления при пластическом деформировании ионных кристаллов в постоянном магнитном поле // Изв. РАН. Сер. физическая. 1996. Т. 60. № 9. С. 173-178.
9. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е., Головин Д.Ю. Долгоживущие состояния дефектов структуры в монокристаллах NaCl, индуцированные импульсным магнитным полем // Физика твердого тела. 1996. Т. 38. № 10. С. 3047-3049.
10. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. О роли обменных сил в формировании пластических свойств диамагнитных кристаллов // Доклады АН. 1997. Т. 354. № 5. С. 632-634.
11. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магнитопластические эффекты в кристаллах // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61. № 5. С. 850-859.
12. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. Кинетические особенности движения дислокаций в ионных кристаллах, стимулированного импульсом магнитного поля // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61. № 5. С. 965-971.
13. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магниточувствительные реакции в ионных кристаллах в процессе их пластического деформирования // Изв. РАН. Сер. химическая. 1997. Т. 46. № 4. С. 739-744.
14. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е. *In situ* исследование влияния магнитного поля на подвижность дислокаций в деформируемых монокристаллах KCl:Ca // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 4. С. 630-633.
15. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е., Киперман В.А., Лопатин Д.В. Дислокационное зондирование состояния дефектов решетки, возбужденных импульсом магнитного поля в ионных кристаллах // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 4. С. 634-639.
16. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. Влияние постоянно магнитного поля на преодоление дислокациями короткодействующих препятствий в монокристаллах LiF // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 3. С. 495-496.
17. Golovin Yu.I., Morgunov R.B., Lopatin D.V. and Baskakov A.A. Influence of a Strong Magnetic Field Pulse on NaCl Crystal Microhardness // Physica Status Solidi (a). 1997. V. 160. R3-R4.
18. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Бадьлевич М.В., Шмурак С.З. Оптическое гашение магнитопластического эффекта в кристаллах NaCl // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 8. С. 1389-1391.
19. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е. Термодинамические и кинетические аспекты разупрочнения ионных кристаллов импульсным магнитным полем // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 11. С. 2157-2159.
20. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. Роль внутренних механических напряжений в магнитостимулированной подвижности дислокаций // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 3. С. 586-590.
21. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е., Иволгин В.И. Фото-возбуждение магниточувствительных точечных дефектов в ионных кристаллах // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 5. С. 845-849.
22. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Шмурак С.З. Оптическое возбуждение магниточувствительных центров в ионных кристаллах // Доклады Академии наук. 1998. Т. 355. № 3. С. 299-303.
23. Golovin Yu.I., Morgunov R.B. Mechanochemical reactions between defects of crystalline structure and the effect of magnetic field on these reactions kinetics // Chemistry Reviews. 1998. V. 23. Pt. 2, P. 23-58.
24. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Ликсутин С.Ю. Влияние импульса сильного магнитного поля на механические свойства полиметакрилата // Высокомолекулярные соединения. 1998. Т. 40. № 2. С. 63-65.
25. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Дмитриевский А.А., Шмурак С.З. Влияние света на магнитостимулированную релаксацию напряжений в ионных кристаллах // Изв. РАН. Сер. физическая. 1998. Т. 62. № 7. С. 1296-1302.
26. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Лопатин Д.В., Баскаков А.А. Влияние импульсного магнитного поля до 30 Тл на подвижность дислокаций в монокристаллах NaCl // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 6. С. 1090-1094.
27. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е., Жуликов С.Е., Дмитриевский А.А. Электронный парамагнитный резонанс в подсистеме структурных дефектов как фактор пластификации кристаллов NaCl // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1998. Т. 68. № 5. С. 400-405.
28. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Лопатин Д.В., Баскаков А.А., Еегеньев Я.Е. Обратимые и необратимые изменения пластических свойств кристаллов NaCl, вызванные действием магнитного поля // Физика твердого тела. 1998. Т. 40. № 11. С. 2065-2068.
29. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Тюрин А.И., Иволгин В.И. Магнитный резонанс в короткоживущих комплексах структурных дефектов в монокристаллах NaCl // Доклады Академии наук. 1998. Т. 361. № 3. С. 352-354.
30. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние слабого магнитного поля на состояние структурных дефектов и пластичность ионных кристаллов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1999. Т. 115. № 2. С. 605-624.
31. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Баскаков А.А., Бадьлевич М.В., Шмурак С.З. Влияние магнитного поля на пластичность, фото- и электролюминесценцию монокристаллов ZnS // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1999. Т. 69. № 2. С. 114-118.
32. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е., Жуликов С.Е., Лопатин Д.В. Релаксационные процессы, стимулированные слабым магнитным полем в подсистеме точечных дефектов в ионных кристаллах // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 2. С. 885-889.
33. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е., Дмитриевский А.А. Радиочастотные спектры парамагнитного резонанса, детектируемые по смещению дислокаций в монокристаллах NaCl // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. № 10. С. 1779-1784.
34. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Баскаков А.А., Шмурак С.З. Влияние магнитного поля на интенсивность электролюминесценции монокристаллов ZnS // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. № 11. С. 1944-1947.
35. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Ликсутин С.Ю. Термодинамические и кинетические аспекты влияния импульсного магнитного поля на микротвердость полиметакрилата // Высокомолекулярные соединения (серия А). 2000. Т. 42. № 2. С. 277-281.
36. Осипьян Ю.А., Головин Ю.И., Лопатин Д.В., Моргунов Р.Б., Николаев Р.К., Шмурак С.З. Влияние импульсного магнитного поля на микротвердость монокристаллов Se<sub>60</sub> // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1999. Т. 69. № 2. С. 110-113.
37. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Пластичность ионных кристаллов в условиях ЭПР // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2000. Т. 116. № 6. С. 3-14.

#### Электромагнитное излучение. Самоорганизация

38. Головин Ю.И., Дьячек Т.П., Усков В.И., Шибков А.А. Электромагнитное излучение деформируемых щелочногалоидных кристаллов // Физика твердого тела. 1985. Т. 27. № 2. С. 555-557.
39. Головин Ю.И., Дьячек Т.П., Орлов В.И., Тялин Ю.И. Нестационарное электрическое поле быстрой трещины скола в монокристаллах LiF // Физика твердого тела. 1985. Т. 27. № 4. С. 1110-1115.
40. Головин Ю.И., Шибков А.А. Скачкообразная дислокационная поляризация монокристаллов LiF, деформируемых одиночным скольжением // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 5. С. 1206-1210.
41. Головин Ю.И., Шибков А.А. Быстропротекающие электрические процессы и динамика дислокаций в пластически деформируемых щелочногалоидных кристаллах // Физика твердого тела. 1986. Т. 28. № 11. С. 3492-3498.
42. Головин Ю.И., Орлов В.И. Электрический шум и динамика дислокаций в монокристаллах KCl:Ca, деформируемых одиночным скольжением // Физика твердого тела. 1988. Т. 30. № 8. С. 2489-2493.
43. Головин Ю.И., Шибков А.А. Динамика скоплений заряженных дислокаций // Физика твердого тела. 1988. Т. 30. № 8. С. 2557-2561.
44. Головин Ю.И., Горбунов А.В., Шибков А.А. Динамика и электрическое поле дефектов при лазерном повреждении поверхности // Физика твердого тела. 1988. Т. 30. № 7. С. 1931-1937.
45. Головин Ю.И., Шибков А.А. Динамика дислокационной поляризации ионного кристалла на уровне отдельных полос скольжения // Кристаллография. 1990. Т. 35. № 2. С. 440-445.
46. Головин Ю.И., Киперман В.А., Красиков В.А. Электрический шум в процессе пластической деформации поликристаллической меди // Физика металлов и материаловедение. 1988. Т. 65. № 1. С. 202-204.
47. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А., Татарко М.А., Комбаров В.А., Малинин А.П. Радиоизлучение при кристаллизации и разрушении льда // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61. № 5. С. 913-918.
48. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А., Татарко М.А. Исследование взаимосвязи структурных особенностей кристаллизующегося льда с параметрами спектра электромагнитной эмиссии в диапазоне 20-10<sup>4</sup> Гц // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 5. С. 924-929.
49. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А., Королев А.А., Майоров А.В. Электромагнитная и акустическая эмиссия при взрывной кристаллизации переохлажденной капли воды // Конденсированные среды и межфазные границы. 1999. Т. 1. № 3. С. 193-195.
50. Головин Ю.И., Шибков А.А., Шишкина О.В. Морфогенез новой структуры поликристаллического льда после микрондентирования

- ния в области предплавильных температур // Конденсированные среды и межфазные границы. 1999. Т. 1. № 4. С. 261-263.
51. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А., Татарко М.А. Взаимосвязь электромагнитной эмиссии с кинетикой роста поликристаллического льда // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 4. С. 717-721.
  52. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А., Татарко М.А. Исследование кинетики спонтанной кристаллизации и электризации тонкой пленки переохлажденной воды // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 6. С. 1115-1117.
  53. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А. *In situ* исследование кинетики кристаллизации диэлектриков новым быстродействующим электромагнитным методом // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 1999. № 4. С. 20-25.
  54. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А., Королев А.А., Власов А.А. Пространственно-временная самоорганизация мезоскопической структуры в условиях неравновесного роста льда и сопутствующие электромагнитные явления // Конденсированные среды и межфазные границы. 1999. Т. 1. № 2. С. 111-117.
- Динамическое микро- и наноиндентирование**
55. Головин Ю.И., Тюрин А.И. О межзерновых механизмах пластического течения на начальной стадии погружения индентора при микроиндентировании // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1994. Т. 60. № 10. С. 722-726.
  56. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика начальной стадии микроиндентирования ионных кристаллов // Изв. РАН. Сер. физическая. 1995. Т. 59. № 10. С. 49-54.
  57. Головин Ю.И., Тюрин А.И. О динамике и микромеханизмах начальной стадии погружения индентора при микроиндентировании кристаллов // Физика твердого тела. 1995. Т. 37. № 5. С. 1562-1565.
  58. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика и микромеханизмы ранних стадий внедрения жесткого индентора при микроиндентировании ионных кристаллов // Кристаллография. 1995. Т. 40. № 5. С. 47-51.
  59. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Определение эффективного модуля Юнга в микрообъеме методом динамического индентирования // Физика твердого тела. 1996. Т. 38. № 4. С. 1301-1303.
  60. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика и микромеханизмы деформирования ионных кристаллов при импульсном микроиндентировании // Физика твердого тела. 1996. Т. 38. № 6. С. 1812-1819.
  61. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И. Динамика формирования отпечатка в дислокационной розетке при импульсном микроиндентировании ионных кристаллов // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 2. С. 318-319.
  62. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И. Определение время зависимых пластических свойств твердых тел посредством динамического наноиндентирования // Письма в журнал технической физики. 1997. Т. 23. В 23. С. 15-19.
  63. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Бенгус В.З., Иволгин В.И., Коренков В.В. Динамическая твердость аморфных сплавов // Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 88. № 6. С. 103-107.
  64. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Иволгин В.И., Коренков В.В. Новые принципы, техника и результаты исследования динамических характеристик твердых тел в микрообъемах // Журнал технической физики. 2000. Т. 70. № 5. С. 82-91.

УДК 669.539.382.2

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОМ СОСТОЯНИИ

© Л.Б. Зуев, И.М. Полетика, В.В. Ткаченко, В.Е. Громов

*Россия, Томск, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН*

Zuyev L.B., Poletika I.M., Tkachenko V.V., Gromov V.E. Ultra-sound control of mechanical properties of steel in structural non-homogeneous conditions. In the article, the correlation dependencies among speed of ultra-sound, hardness and toughness in steel 09G2C are investigated.

Скорость ультразвука в металлах связана с их структурой и свойствами и с этой точки зрения является перспективной в качестве информативного параметра для неразрушающего метода контроля, например, сталей и сплавов в состоянии поставки. Одним из таких материалов является стальной листовой прокат, для которого степень неоднородности свойств может достигать опасных значений.

В работе было проведено специальное изучение корреляционных зависимостей между скоростью ультразвука  $V_R$ , твердостью HV и ударной вязкостью Kv в горячекатаной стали 09Г2С (толщина листа 10 мм). Ударную вязкость определяли по ГОСТу 9454-78, измеряли твердость по Виккерсу, структуру оценивали металлографически. Скорость ультразвука измеряли методом автоциркуляции импульсов на приборе ИСП-12, разработанном в [1]. Структурное состояние стали и ее механические свойства искусственно варьировали путем изменения температуры конца прокатки на толстолистовом стане от 830 до 950° С.

Как показало исследование механических свойств стали, при растяжении (табл. 1) с ростом  $T_{кп}$  растет

относительное удлинение  $\delta$ . Предел прочности практически не меняется, а предел текучести несколько уменьшается. Порог хладноломкости сдвигается в сторону более высоких температур. Такое изменение свойств соответствует изменению размера ферритного зерна. С увеличением температуры конца прокатки средний размер зерна возрастает, принимая значения ~8 мкм ( $T_{кп} = 830^\circ \text{C}$ ); ~8,6 мкм ( $T_{кп} = 880^\circ \text{C}$ ) и ~9,5 мкм ( $T_{кп} = 950^\circ \text{C}$ ). Наблюдаемая зависимость от размера зерна согласуется с известным уравнением Холла – Петча и с соотношениями [2], отражающими связь  $T_{хл}$  с  $d_{эф}$ .

Таблица 1

Механические свойства стали 09Г2С в зависимости от температуры конца прокатки

$T_{кп}$ , °С	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$KV^{(20)}$ , МДж/м <sup>2</sup>	$T_{хл}^{50}$ , °С
830	33,91	549,9	345,4	1,22	-(15...25)
880	35,40	536,6	351,4	1,94	-(15...25)
950	37,22	539,9	328,7	0,81	-(5...10)