



Д. С. Лисовенко, Н. М. Осипенко, А. В. Ченцов, Е. И. Шифрин

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ В РАБОТАХ Р.В. ГОЛЬДШТЕЙНА

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена член-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Российской Федерации Р.В. Гольдштейну. В настоящей библиографической заметке приводятся биографические сведения об этом крупном ученом, который хорошо известен в России и за рубежом. Представлены сведения о его вкладе в развитие механики деформирования и разрушения.

Ключевые слова: механика разрушения.

DOI: 10.37972/chgpu.2020.44.2.001

УДК: 539.374

1. Введение

Р.В. Гольдштейн (1940–2017 гг.) — выдающийся российский ученый, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Государственной премии РФ в области науки — ученый широкого профиля в области механики деформируемого твердого тела и ее приложений в технике и технологии. Ему принадлежит ряд фундаментальных результатов в теории упругости, механике прочности и разрушения, механике контактного взаимодействия, нано-, микро- и мезомеханике материалов, механике льда и ледяного покрова.

© Лисовенко Д. С., Осипенко Н. М., Ченцов А. В., Шифрин Е. И., 2020

Лисовенко Дмитрий Сергеевич

e-mail: lisovenk@ipmnet.ru, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

Осипенко Николай Михайлович

e-mail: osipnm@mail.ru, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

Ченцов Александр Викторович

e-mail: chentsov@ipmnet.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

Шифрин Ефим Ильич

e-mail: shifrin@ipmnet.ru, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

Поступила 20.03.2020

Р.В. Гольдштейн родился 7 мая 1940 г. в городе Москве. Интерес к математике и механике проявился у Р.В. Гольдштейна в школьные годы. Этому способствовали занятия в математическом кружке при МГУ им. М.В. Ломоносова. Руководила кружком группа студентов механико-математического факультета во главе с В.И. Арнольдом.

Р.В. Гольдштейн окончил с отличием в 1962 г. механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова (с 3-го курса получал стипендию им. Н.Е. Жуковского). После окончания в 1965 г. аспирантуры в Институте механики АН СССР был приглашен во вновь созданный Институт проблем механики АН СССР (ныне — Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН), где и проработал более 50 лет (с 1988 г. руководителем созданной им Лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций). Его кандидатская диссертация была посвящена исследованию поверхностных волн и связанных с ними резонансных явлений в упругих телах (научные руководители — Г.И. Баренблатт и Р.Л. Салганик), докторская диссертация — развитию механики разрушения крупногабаритных конструкций.

Р.В. Гольдштейн и его коллеги успешно применяли результаты своих фундаментальных исследований для решения прикладных задач. Непосредственное участие в интерпретации натуральных наблюдений и результатов экспериментов при постановке задач и широта охвата проблем механики в работах Р.В. Гольдштейна позволили ему с коллегами получить значимые результаты при решении задач, относящихся к промышленности, транспорту и медицине.

К такой деятельности, в частности, относится участие в экспедиции на ледоколах в составе группы сотрудников ИПМех РАН в 1981 г., вызванной назревшими вопросами механики ледяного покрова при организации зимней навигации по Северному морскому пути. На основе анализа проведенных наблюдений и экспериментов было предложено объяснение явлений, вызванных напряженным состоянием зимнего ледяного покрова при движении ледокола, разработаны основы методики моделирования этих явлений. Они также были полезны при решении крупномасштабных задач механики разрушения ледяного покрова при взаимодействии с ледоколом и сооружениями на шельфе арктических морей в условиях сжатия льдов, что нашло отражение в ряде публикаций, патентов и нормативных документов. Другой пример относится к постановке и анализу результатов полномасштабного эксперимента, моделирующего механику начальной фазы Чернобыльской аварии, проведенного с группой сотрудников под эгидой МАГАТЭ, что позволило уточнить причины и сценарий развития разрушения реактора.

Работы Р.В. Гольдштейна получили широкое международное признание, он был избран почетным членом (1993 г.) и почетным Вице-Президентом (2011 г.) Международного Конгресса по разрушению, почетным членом (2010 г.), членом Исполнительного Комитета Европейского общества по прочности конструкций (1996–2012 гг.), действительным членом (2009 г.) и членом Научного Комитета Отделения инженерных наук (2010–2013 гг.) Европейской Академии наук, членом Европейской Академии наук и искусств (2011 г.), действительным членом Американской Ассоциации содействия развитию науки (2012 г.), членом Исполнительного Комитета Американского Общества по экспериментальной механике (2014 г.). Заслуги Р.В. Гольдштейна в области механики разрушения, на Международных Конференциях по Разрушению (ICF) были отмечены золотыми медалями Гриффитса (2013 г.) и Ирвина (2017 г.) и избранием в руководящие органы ICF.

Р.В. Гольдштейн был ответственным секретарем редколлегии журнала "Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела", членом редколлегии журналов "Вычислительная механика сплошных сред", "Физическая мезомеханика", "Деформация и разрушение материалов", "Письма о материалах", международных журналов "Int. J. of Fracture", "Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures". В качестве научного редактора он подготовил более 20 книг и специальных выпусков международных журналов.

Большое внимание Р.В. Гольдштейн уделял подготовке молодых ученых, будучи более 30 лет профессором (по совместительству) в "МАТИ"- Российском государственном технологическом университете им. К.Э. Циолковского (с 2015 г. присоединен к Московскому авиационному институту (НИУ)), был руководителем филиала кафедры "Физика" при ИПМех РАН и руководителем от ИПМех РАН Научно-образовательного Центра "Механика и ее приложения в технике и технологии". Им создана одна из ведущих научных школ РФ в области механики прочности и разрушения. 19 его учеников стали кандидатами наук и 5 — докторами наук. Ниже приведен краткий обзор работ Р.В. Гольдштейна по основным обозначенным направлениям и их приложениям.

2. Динамическая теория упругости

Исследованы и объяснены резонансные явления, связанные с переходом через рэлеевскую скорость в задачах о движении нагрузок и штампов по границе упругого полупространства (полуплоскости), а также при распространении трещин хрупкого разрушения.

Суть резонансных явлений поясним на примере стационарного движения со скоростью V нормальной нагрузки по границе полуплоскости.

Решение задачи показывает, что если скорость стационарного движения нагрузки совпадает со скоростью распространения поверхностной волны Рэлея ($v = c_R$), то напряжения и смещения в любой точке полупространства становятся бесконечными. При переходе через рэлеевскую скорость меняются знаки напряжений и смещений во всех точках полупространства. В частности, при дорэлеевской скорости ($v < c_R$) поверхность полуплоскости прогибается под нагрузкой, а на сверхрэлеевских $c_R < v < c_2$ (c_2 - скорость поперечных волн, картина обратная и поверхность выпучивается под нагрузкой).

Для того, чтобы разобраться в причинах и механизмах описанных явлений была решена аналитически нестационарная задача о движении с постоянной скоростью нагрузки, приложенной к границе полуплоскости в некоторый момент времени $t = 0$, и рассмотрен процесс установления стационарного решения [1]. Анализ показал, что при рэлеевской скорости движения нагрузки напряжения в окрестности, движущейся вместе с нагрузкой, возрастают пропорциональные времени t . Следовательно, движение в окрестности нагрузки никогда не станет установившимся, что и отражает факт несуществования стационарного решения при рэлеевской скорости перемещения нагрузки.

Ситуация вполне аналогична резонансу в обычной колебательной системе с одной степенью свободы. Нарастание амплитуды напряжений пропорционально времени связано с совпадением скорости движения источника возмущений со скоростью распространения собственных волн упругого полупространства - поверхностных волн Рэлея.

Изменение знака смещений при переходе через рэлеевскую скорость в стационарном решении аналогично сдвигу фазы колебаний на 180° по отношению к фазе возмущающей силы при переходе через резонансную частоту в системе с одной степенью свободы. Качественное объяснение смены знака смещений в следующем. При сверхрэлеевской скорости движения нагрузки ее передний край догоняет вызванное им же в предыдущий момент поднятие поверхности впереди нагрузки.

Скорость поверхностных волн оказывается критической - теоретически предельной скоростью распространения трещины в изотропной однородной упругой среде. Этот факт был установлен рядом исследователей в конце 50-х — начале 60-х годов (Е. Yoffe, Г.И. Баренблатт и Г.П. Черепанов, J.W. Craggs).

Более сложные проявления резонансных эффектов связаны с распространением трещин в кусочно-однородных телах по границам соединения упругих материалов с различными упругими свойствами [2, 3]. В этом случае есть несколько критических скоростей, совпадающих со скоростями поверхностных волн, которые могут распространяться вдоль границ соединения материалов при различных условиях их контакта. Один из таких типов волн был найден в [3] - это поверхностные волны в телах, когда на линии соединения отсутствует взаимное проскальзывание тел, но возможно их взаимное смещение по нормали к границе (односторонние ограничения). Интересно, что при движении трещины по границе полностью соединенных тел (на границе непрерывны и напряжения, и смещения) критическими оказываются как скорости поверхностных волн Стоунли, отвечающих этому типу граничных условий, так и поверхностных волн, соответствующих упомянутому типу граничных условий и граничным условиям налегания с возможным проскальзыванием, а также скорости рэлеевских волн для каждого из соединенных материалов.

3. Механика хрупкого и квазихрупкого разрушения

3.1. Методы построения условий хрупкого и квазихрупкого разрушения элементов конструкций с трещинами при статических и медленно меняющихся нагрузках

В [4] получены оценки коэффициента интенсивности напряжений на контуре плоской трещины нормального разрыва. Доказано, что в точке касания контуров двух плоских трещин коэффициент интенсивности объемлемой трещины не превосходит коэффициента интенсивности напряжений объемлющей ее трещины. Этот результат в ряде случаев помогает оценить степень опасности трещиноподобного дефекта, имеющего в плане произвольную, достаточно сложную форму, не прибегая к решению соответствующей задачи теории упругости, а используя известный набор решений. В частности, можно использовать аналитические решения для трещин канонической формы и форм, получающихся из канонических путем преобразования инверсии [5]. Этот результат в дальнейшем был обобщен на класс псевдодифференциальных уравнений порядка не выше второго [6]. Помимо локальных характеристик решения, таких как коэффициенты интенсивности напряжений, при анализе напряженного состояния упругих тел с трещинами большую роль играют и некоторые интегральные характеристики. Например, компоненты объема трещины входят в выражение для дальнего поля. Кроме того, они важны в случаях, когда имеется приток газа или жидкости в трещину. Оценкам интегральных характеристик решения как для трещин нормального, так и произвольного разрыва посвящены работы [7–10]. Совокупность результатов по оценкам локальных и интегральных характеристик решения задач о трещинах вошла в монографию [11].

Разработаны численно-аналитические методы граничных интегральных уравнений и граничных функционалов для решения пространственных задач теории упругости о трещинах (в том числе и с учетом возможного взаимодействия поверхностей трещин, а также расположения трещин на границах раздела в кусочно-однородных телах) [12–18].

Построены интегральные уравнения задачи об упругом включении и получены аналитические решения в случае включения канонической формы, в том числе, когда в нем происходят фазовые превращения [19, 20]. Было выполнено несколько работ по идентификации полостей или включений шаровой формы с помощью переопределенных данных на внешней границе упругого тела [21, 22].

3.2. Модели и методы расчета хрупкого и квазихрупкого разрушения материалов с учетом их структуры, в частности, пористой, слоистой, волокнистой

Разработаны модели и методы расчета хрупкого и квазихрупкого разрушения материалов с учетом их структуры, в частности, пористой, слоистой, волокнистой.

Развиты модели упорядоченного разрушения, в рамках которых описан ряд закономерностей формирования иерархии упорядоченных систем трещин и трещиноподобных дефектов, в том числе формирования эшелонов трещин (систем параллельных трещин, центры которых расположены на некоторой прямой или кривой) в пористой среде при сжатии [23, 24], в конструкционных сталях при наводороживании [25, 26], в слоистой среде при растяжении и сдвиге [27].

Разработаны модели и методы расчета зарождения и развития трещин-отслоений по границам соединения в слоистых элементах конструкций, получающих все большее распространение в технике.

Развит метод решения осесимметричных задач о трещинах на границах соединения в слоистой среде [13]. Численное моделирование, выполненное для среды, состоящей из двух полупространств, соединенных промежуточным упругим слоем, позволило обнаружить эффект, присущий именно слоистой среде: в случае, когда слой из мало-сжимаемого материала находится между много более жесткими средами, существует диапазон размеров трещин, в котором их развитие происходит устойчиво. Показано, что существует резкая зависимость между толщиной слоев композиционного материала и величиной критического размера трещины. Эту зависимость можно учесть при подборе толщин слоев в композитах.

В последнее время весьма актуальны проблемы оценки условий возникновения и развития отслоений тонких покрытий. В связи с этим был выполнен [18] асимптотический анализ пространственной задачи о трещине-отслоении в двухслойной упругой пластине. В результате удалось сформулировать инженерный метод моделирования отслоений покрытия как пластинок со специальными условиями закрепления, что существенно упрощает расчеты критических параметров отслоений.

Разработана модель трещины на границе соединения, учитывающая наличие нелинейно деформируемых связей в промежуточном адгезионном слое [28, 29]. Модель позволяет описывать как стадию зарождения дефекта, так и стадию его роста.

В модели не используется предположение о малости концевых областей трещин, где действуют связи, в сравнении с длиной трещины, поэтому модель применима и для описания коротких трещин. Выполненные расчеты для соединений полимер-полимер позволили получить зависимость адгезионной трещиностойкости от индекса полимеризации (длины полимерных молекул) [30].

Выполнено моделирование формирования структур разрушения в условиях многоосного сжатия, в том числе с большой долей всестороннего сжатия, когда образуются трещиноподобные вытянутые поперек оси максимального сжатия дефекты-трещины сжатия, рост которых сопровождается сопряженными процессами компактирования материала в концевой области трещины сжатия и выносом его в полости трещины [31–33].

Проведены экспериментальные исследования и моделирование формирования и эволюции эшелона трещин отрыва в окрестности магистрального продольного сдвига при хрупком разрушении. Показано, что развитие структур разрушения при продольном сдвиге происходит посредством иерархического изменения характерного масштаба процесса-многократного перехода к более крупным элементам структуры разрушения (когда из исходного эшелона выделяется периодическая система трещин большего размера, а также происходит периодическое слияние этих трещин в процессе их роста с образованием более крупных — формируется эшелон следующего масштаба) [34, 35]. Влияние взаимодействия процессов деформирования и разрушения, происходящих в различных масштабах, на формирование упорядоченных систем нарушений рассмотрено в работе [36].

3.3. Критерии искривления траектории трещины

Разработаны критерии и выполнено моделирование искривления траекторий роста трещин при хрупком и квазихрупком разрушении. Предложен критерий искривления и роста трещины произвольного разрыва в изотропном теле, когда на ее контуре отличны от нуля коэффициенты интенсивности напряжений, связанных с отрывом, с поперечным и продольным сдвигами [37]. Методом внешних и внутренних разложений дано обоснование критерия локальной симметрии при искривлении трещин в отсутствие продольного сдвига и предложено обобщение этого критерия для ситуации общего положения, когда наряду с отрывом имеются поперечный и продольный сдвиг. Выполнено численное моделирование методом сингулярных интегральных уравнений траекторий криволинейных трещин в условиях плоской деформации и плоского напряженного состояния [38]. Изучено влияние упругой анизотропии материала на искривление трещины, моделируемой тонким эллиптическим отверстием, в условиях одно- и двухосного нагружения и получены условия ее искривления [39–42]. Закономерности преломления траектории трещины при пересечении ею границы раздела (поверхности, где имеет место трение) исследованы экспериментально [43] и теоретически [44]. Построена модель процесса и получены оценки параметров геометрии комбинированного отрывно-сдвигового разрушения, согласующиеся с данными эксперимента, а также найдены условия его инициирования и развития.

4. Механика пластического разрушения

Разработаны методы оценки и моделирования условий пластического разрушения при статическом нагружении элементов конструкций с трещинами.

Развит полуэмпирический способ описания пластического разрушения при статическом нагружении конструкционных материалов типа сталей низкой и средней прочности. Его основу составляют методика косвенного определения трещиностойкости по результатам испытаний малых образцов с трещиной и методика построения условий роста трещин в крупногабаритных конструкциях в результате натуральных экспериментов и моделирования. Обе методики опираются на соображения подобия и используют резкую температурную зависимость прочностных свойств и трещиностойкости указанных материалов [45, 46].

Оказывается, что условия разрушения крупногабаритной конструкции из стали низкой и средней прочности (например, сосуда давления) можно смоделировать, проводя испытание его геометрически подобной уменьшенной модели при соответственно пониженной температуре.

Для построения численно-аналитических оценок условий пластического разрушения развит метод верхней и нижней оценок, опирающийся на установленный вариационный принцип в теории жесткопластических течений с образованием трещин отрыва [47].

Исследования в области механики разрушения позволили предложить структурно-континуальный подход для описания катастрофического разрушения иерархических сложных технических систем [48]. В рамках подхода разработан принцип распределения защитных ресурсов по структурным уровням системы с целью предотвращения ее катастрофического разрушения [49].

5. Механика льда и ледяного покрова

Развит подход к описанию разрушения льда и ледяного покрова, в том числе при взаимодействии с ледоколами и ледостойкими конструкциями [50, 51]. Сформулирована модель формирования тороса при сжатии ледяного покрова и введена качественная мера сопротивления материала развитию тороса – торосостойкость. Дана классификация по параметрам механики разрушения основных форм разрушения ледяного покрова ледоколом с учетом ледового сжатия, позволяющая рассчитывать ледовое сопротивление. Предложены тактические приемы работы ледоколов в сжатых льдах, включая приемы проводки судов и освобождения их от ледового сжатия. В качестве примера можно отметить, что ледокол может освободить судно от ледового сжатия, сделав определенный дугообразный канал, отходящий от судна.

Разработаны модели формирования наблюдаемых по данным космического мониторинга крупномасштабных структур ледяного покрова [52].

Выполнены (2003–2015 гг.) моделирование и расчеты ледовых нагрузок на ледостойкие конструкции для глубоководных районов континентального шельфа. Предложены модели процессов разрушения крупногабаритных ледовых массивов при взаимодействии с инженерными сооружениями. Модели учитывают возможности инициирования в ледовых массивах магистральных разрывов и контактного разрушения льда при большой площади контакта [53]. Модель контактного разрушения предусматривает возможность перемещения очага локального разрушения по поверхности контакта, наблюдаемого в экспериментах в условиях опытового ледового бассейна. Разработаны критерии подобия для физического моделирования природных процессов разрушения льда в зоне контактного взаимодействия с учетом механических и физических процессов различной природы (движения твердого тела в жидкости, разрушения льда, экструзии частиц разрушенного льда в области контакта) [54]. Разработана модель процесса развития берегового навала льдов на мелководье. Предложен механизм и сформулированы критерии реализации навала.

Предсказано теоретически существование краевых волн, распространяющихся вдоль кромки ледяного покрова и экспоненциально затухающих в поперечном направлении вдоль его поверхности [55, 56]. Подобные волны были впоследствии обнаружены экспериментально в ходе полевых исследований американскими учеными.

6. Результаты по нано- и микромеханике, нано- и микроэлектронике

С начала 1990х годов Р.В. Гольдштейном вместе с учениками и коллегами получен ряд фундаментальных результатов в области нано- и микромеханики и прочности

материалов и изделий. В первую очередь, эти исследования были направлены на решение проблем обеспечения прочности и долговечности изделий микро- и субмикроэлектроники. Разработаны модели и выполнено моделирование процессов деградации многоуровневых межсоединений (проводящих дорожек) изделий микро- и субмикроэлектроники вследствие действия механических нагрузок и электромиграции [57]. Получены оценки долговечности межсоединений. Для изделий масштаба чипа, изготовленных по методу перевернутого кристалла, осуществлено моделирование условий разрушения при термомеханическом нагружении [58]. Результаты этих исследований подытожены в обзорной работе [59]. Выполнено моделирование условий, приводящих к формированию упрочненных геттерированных зон в пластинах-подложках кремния. Выполнено моделирование эволюции морфологии поверхности SiGe квантовых точек на подложке Si (001) при осаждении покрывающего слоя кремния при различных температурах роста [60–62]. На основе анализа напряженно-деформированного состояния получены условия перехода квантовая точка-квантовое кольцо. Результаты моделирования использованы для качественного объяснения явлений, наблюдаемых экспериментально при гетероэпитаксиальном росте: трансформация квантовых точек в квантовые кольца, образование вертикальных массивов, так называемых, нанолинз. Выполнено моделирование механического поведения современных металл-оксид-полупроводник полевых транзисторов, имеющих кремний-германиевый исток/сток и канал и выращенных на подложках различных ориентаций. Выполнено моделирование роста кислородосодержащих преципитатов в кристаллах кремния [63]. Предложен энергетический критерий потери сферичности преципитатами в процессе их роста. Показано, что процесс потери сферичности как когерентными, так и некогерентными преципитатами управляется единым безразмерным комплексом. Предложена модель процесса химико-механического полирования – одного из основных технологических процессов современной нано- и микроэлектроники [64, 65]. Модель учитывает сопряженные процессы диффузии активной рабочей жидкости в поверхностный слой и механического воздействия полировальника и частиц, содержащихся в рабочей жидкости на характеристики полирования. Получены соотношения, обобщающие эмпирический закон Престона и выражающие взаимосвязь скорости полирования и механической нагрузки с учетом перечисленных факторов. Выполнен анализ химико-механического полирования вольфрама с учетом зарождения и развития очагов осаждения окисной пленки. Показано, что скоростное полирование связано с удалением указанных очагов, что подтверждается сравнением с известными экспериментальными данными.

Начиная с 2003 г. выполнен ряд работ по моделированию прочности и процессов разрушения наноматериалов и наноструктурных объектов [66, 67]. Разработаны дискретно-континуальные механические модели деформирования нанотрубок, систем нанотрубок, графеновых плоскостей и их совокупностей. Предложены алгоритмы, реализованные в виде программ, для моделирования процессов деформирования и образования дефектов структуры нанотрубок. Исследованы задачи изгиба и потери устойчивости при изгибе на моделях однослойных нанотрубок и системы слоев гексагональной структуры. Разработаны схемы и прототипы устройств для проведения механических испытаний нано- и микромасштабных образцов. Выполнено моделирование испытаний нанотрубок на разрыв и определены предельные деформации. Разработан метод оценки влияния промежуточного слоя, образующегося вокруг наночастиц в нанокompозите, на эффективные деформационные характеристики этого

композита [68]. Предложена обобщенная модель атомистической трещины и найдены условия применимости континуального подхода теории трещин для описания условий роста трещин наномасштаба [69, 70]. Этот цикл работ подытожен в работе [71].

Предложено кинетическое уравнение, описывающее эволюцию размера зерна материала в процессах интенсивной пластической деформации, приводящих, в частности, к получению наномасштабной структуры; при этом учтена зависимость скорости изменения размера зерна от скорости вращения бесконечно малого объема материала относительно главных осей тензора напряжений [72]. Выполнен сравнительный анализ поведения жесткопластических решений в окрестности поверхностей максимального трения и в процессе равноканальной экструзии. Определена мера вращения элементарных материальных объемов относительно главных осей тензора напряжений, входящая в предложенное кинетическое уравнение для размера зерна и показано, что эта мера принимает одно и то же численное значение в двух рассмотренных процессах. Эти результаты составляют основу для развития метода предсказания формирования слоя интенсивных пластических деформаций в окрестности поверхностей трения в процессах обработки материалов давлением. Предложен подход к описанию влияния масштабного фактора на толщину пограничного слоя с сильно измененными свойствами вблизи поверхностей контакта рабочего тела и инструмента (поверхностей трения) [73, 74]. Подход опирается на предположение о том, что толщина пограничного слоя определяется скоростью деформаций и расстоянием, пройденным материальной точкой вдоль поверхности трения.

Выполнены исследования эффектов поверхностной упругости и поверхностных остаточных напряжений при деформировании различных тел с наноструктурными элементами [75, 76]. С учетом поверхностной упругости и поверхностных остаточных напряжений дано обобщение аналитического решения задачи о деформации материала внутри и вне шарового включения в упругой среде, при однородных собственных деформациях внутри включения и заданных напряжениях вдали от него (обобщенная задача Эшелби). Выявлен масштабный эффект на нанометровых масштабах (зависимость деформаций от диаметра включений). Показано, что при определенных условиях (для ряда кубических кристаллов) влияние остаточных напряжений превосходит эффект поверхностной упругости. Выполнено дискретно-континуальное моделирование композитов с нанонаполнителями. Разработана модель трехфазного композита с упругой анизотропией.

Группа под руководством и при участии Р.В. Гольдштейна и В.А. Городцова, Д.С. Лисовенко выполнила исследования по механике материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона (ауксетиков), весьма перспективных для использования в технике и медицине [77–81]. В частности, среди кристаллов различных сингоний выделены кристаллы, обладающие ауксетическими свойствами. Изучены эффекты, проявляющиеся при деформировании нано- и микротрубок из таких материалов. Показано, что ауксетичность может сохраняться и исчезать при сворачивании ауксетика в трубку. Возможно и появление ауксетичности у трубки из неауксетика. Выявлены линейный прямой и обратный эффекты Пойнтинга, имеющие место для нано- и микротрубок из кубических, тетрагональных и орторомбических кристаллов (кручение трубок сопровождается их растяжением (сжатием) и обратно – кручение сопровождается растяжением трубок).

7. Основные прикладные результаты

Результаты фундаментальных исследований успешно применены для решения прикладных задач. Начиная с 1960-х годов Р.В. Гольдштейн принимал участие, а с 1975 г. по 1990 г. являлся и научным руководителем от ИПМех РАН комплексной работы, выполнявшейся в области специальной техники по решению Директивных органов. В результате этих исследований разработаны и утверждены в 1989 г. соответствующими ведомствами нормы дефектности для ответственных изделий из композитных полимерных материалов.

Другое направление прикладных исследований - разработка методов оценки ресурса и безопасности оборудования для транспортировки, подготовки и переработки углеводородного сырья, содержащего сероводород (научный рук. работ со стороны ИПМех РАН). Эти работы проводятся с 1976 г. совместно с предприятиями Минхимнефтемаша СССР, Мингазпрома СССР (ныне ПАО ОАО «ГАЗПРОМ»). В результате этих работ создан «Временный регламент технического освидетельствования трубопроводов и оборудования установок комплексной подготовки газа Оренбургского газоконденсатного месторождения».

В 2013–2015 гг. в работах совместных с ФГУП ЦАГИ предложена (совместно с Е.И. Шифриным и П.С. Шушпанниковым) методика оценки остаточной прочности панели из углерод-углеродного композита при наличии в ней ударных повреждений.

С 2003 г. под руководством Р.В. Гольдштейна и при его непосредственном участии в интересах ОАО «ГАЗПРОМ» (ныне ПАО «ГАЗПРОМ») проводятся работы по моделированию и расчету ледовых нагрузок на ледостойкие конструкции применительно к освоению месторождений углеводородного сырья в зоне шельфа Арктических морей. Разработанный в совместных исследованиях с ООО «Газпром ВНИИГАЗ» расчетный случай возможного поворота заякоренных ледостойких платформ при взаимодействии с ледовым полем сейчас нашел отражение в подготовленном ООО «Газпром ВНИИГАЗ» Проекте Стандарта по расчету ледовых нагрузок на ледостойкие конструкции в зоне Арктического шельфа.

С 2003 г. совместно с сотрудниками проведены работы по биомедицинской механике в тесном контакте с МНТК «Микрохирургия глаза». В частности, совместно с сотрудниками МНТК разработана и в 1986 г. защищена авторским свидетельством конструкция опорных элементов интракапсулярного искусственного хрусталика глаза. Многие годы хрусталик с опорными элементами предложенной конструкции успешно используется в оперативной практике.

8. Заключение

Научные работы Р.В. Гольдштейна внесли существенный вклад развитие механики деформирования и разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гольдштейн Р. В. Волны Релея и резонансные явления в упругих телах // ПММ. 1965. Т. 29, № 3. С. 516–525.
- [2] Гольдштейн Р. В. О стационарном движении трещины по прямолинейной границе соединения двух упругих материалов // Изв. АН СССР. МТТ. 1966. № 5. С. 93–102.
- [3] Гольдштейн Р. В. О поверхностных волнах в соединенных упругих материалах и их связи с распространением трещин // ПММ. 1967. Т. 31, № 3. С. 468–475.
- [4] Гольдштейн Р. В., Ентов В. М. Вариационные оценки для коэффициента интенсивности напряжений на контуре плоской трещины нормального разрыва // Изв. АН СССР. МТТ. 1975. № 3. С. 59–64.
- [5] Goldstein R. V. Three-dimensional elasticity problems related to cracks: exact solution by inversion transformation // Theoretical and applied fracture mechanics. 1986. Т. 5, № 3. С. 143–149.

- [6] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. Теоремы сравнения для некоторого класса псевдодифференциальных уравнений и их приложения // Доклады АН СССР. 1982. Т. 262, № 5. С. 1113–1116.
- [7] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. Изопериметрические неравенства и оценки некоторых интегральных характеристик решения пространственной задачи теории упругости для тела с плоскими трещинами нормального разрыва // Изв. АН СССР. МТТ. 1980. № 2. С. 68–79.
- [8] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. Некоторые энергетические методы построения оценок в пространственных задачах теории упругости о плоских трещинах произвольного разрыва // Изв. АН СССР. МТТ. 1981. № 4. С. 61–76.
- [9] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. Плоская трещина произвольного разрыва в ограниченном упругом теле // ПММ. 1982. № 3. С. 472–481.
- [10] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. Оценки и приближенные формулы в задаче теории упругости о плоской трещине нормального разрыва // Изв. АН СССР. МТТ. 1983. № 1. С. 120–127.
- [11] Гольдштейн Р. В., Ентов В. М. Качественные методы в механике сплошных сред. Москва: Наука, 1989. 224 с.
- [12] Гольдштейн Р. В. Плоская трещина произвольного разрыва в упругой среде // Изв. АН СССР. МТТ. 1979. № 3. С. 111–126.
- [13] Вайншельбаум В. М., Гольдштейн Р. В. Осесимметричная задача о трещине на границе раздела слоев в многослойной среде // Изв. АН СССР. МТТ. 1976. № 2. С. 130–143.
- [14] Гольдштейн Р. В., Спектор А. А. Вариационный метод исследования пространственных смешанных задач о плоском разрезе в упругой среде при наличии проскальзывания и сцепления его поверхностей // ПММ. 1983. Т. 47, № 2. С. 276–285.
- [15] Гольдштейн Р. В., Житников Ю. В. Равновесие полостей и трещин-разрезов с областями налегания и раскрытия в упругой среде // ПММ. 1986. Т. 50, № 5. С. 826–834.
- [16] Гольдштейн Р. В., Житников Ю. В. Анализ равновесия плоской трещины с учетом образования в областях налегания зон скольжения и сцепления при сложном нагружении // Изв. АН СССР. МТТ. 1987. № 2. С. 141–148.
- [17] Бирюков А. П., Гольдштейн Р. В., Григорьев А. Г. Осесимметричная задача об отслаивании при наличии ограничений на смещения // Изв. АН СССР. МТТ. 1991. № 5. С. 100–108.
- [18] Гольдштейн Р. В., Коновалов М. Б. асимптотический анализ пространственной задачи о трещине-расслоении в двухслойной пластине // Изв. АН. МТТ. 1996. № 3. С. 62–71.
- [19] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. Интегральные уравнения задачи об упругом включении. Полное аналитическое решение задачи об эллиптическом включении // Изв. РАН. МТТ. 2004. № 1. С. 50–76.
- [20] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. Напряженное состояние в упругом пространстве, определяемое фазовыми превращениями во включении // Изв. РАН. МТТ. 2005. № 5. С. 48–64.
- [21] Goldstein R. V., Shifrin E. I., Shushpannikov P. S. Application of invariant integrals to the problems of defect identification // Int. J. Fract. 2007. Vol. 147, no. 1–4. P. 45–54.
- [22] Goldstein R. V., Shifrin E. I., Shushpannikov P. S. Application of invariant integrals to elastostatic inverse problems // Comptes Rendus Mecanique. 2008. Т. 336, № 1-2. С. 108–117.
- [23] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Разрушение и формирование структуры // Доклады АН СССР. 1978. Т. 240, № 4. С. 829–832.
- [24] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Структуры в процессах разрушения // Изв. АН. МТТ. 1999. № 5. С. 49–71.
- [25] Гольдштейн Р. В., Морозова Т. М., Павловский Б. Р. Модель возникновения структур разрушения в сталях при наводороживании // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 4. С. 131–138.
- [26] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Модель разрушения трубопроводной стали при наводороживании // Физ.-хим. мех. мат. 1996. № 3. С. 25–33.
- [27] Гольдштейн Р. В., Капцов А. В. Формирование структур разрушения слабо взаимодействующими трещинами // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 4. С. 173–182.
- [28] Goldstein R. V., Perelmuter M. N. Modeling of bonding at the interface crack // Int. J. Fract. 1999. Vol. 99, no. 1–2. P. 53–79.
- [29] Гольдштейн Р. В., Перельмутер М. Н. О кинетике формирования и роста трещин на границе соединения материалов // Изв. РАН. МТТ. 2012. № 4. С. 32–49.

- [30] Гольдштейн Р. В., Бакиров В. Ф. Модель трещины - расслоения с областями пластического течения и разупрочнения вблизи вершины на границе соединения двух материалов. Москва: Институт проблем механики РАН. Препринт № 638, 1999. 38 с.
- [31] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. О модели разрушения структурированной среды в условиях сжатия // Изв. РАН. МТТ. 2010. № 6. С. 86–97.
- [32] Goldstein R. V., Osipenko N. M. About brittle fracture in the vicinity of filled pores // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2010. Vol. 22. P. 555–569.
- [33] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Структуры разрушения в условиях интенсивного сжатия. В сб.: Проблемы механики деформированного твердого тела и горных пород. Москва: Физматлит, 2006. С. 152–166.
- [34] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Поэтапное развитие структуры разрушения в окрестности фронта трещины продольного сдвига // ДАН. 2012. Т. 445, № 2. С. 164–167.
- [35] Goldstein R. V., Osipenko N. M. Development of multiple ordered fracture in an elastic homogeneous, structured and layered medium // FFEMS. 2014. Vol. 37, no. 12. P. 1292–1305.
- [36] Goldstein R. V. Scale interaction and ordering effects at fracture // Procedia IUTAM. 2014. Vol. 10, no. 1–2. P. 180–192.
- [37] Goldstein R. V., Salganik R. L. Brittle fracture of solids with arbitrary cracks // Int. J. Fract. 1974. Vol. 10, no. 4. P. 507–523.
- [38] Гольдштейн Р. В., Савова Л. Н. Об определении раскрытия и коэффициентов интенсивности напряжений для гладкой криволинейной трещины в упругой плоскости // Изв. АН СССР. МТТ. 1972. № 2. С. 69–78.
- [39] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. О возможной неустойчивости прямолинейного пути трещины в ортотропной плоскости в условиях одноосного нормального растяжения // Изв. РАН. МТТ. 2007. № 3. С. 33–45.
- [40] Гольдштейн Р. В., Шифрин Е. И. О возможности искривления трещины нормального разрыва в анизотропной плоскости // Изв. РАН. МТТ. 2006. № 6. С. 173 – 184.
- [41] Goldstein R. V., Shifrin E. I. Dependence of a crack growth path on the elastic moduli of an anisotropic solid // Int. J. Fract. 2008. Vol. 150, no. 1-2. P. 157–180.
- [42] Goldstein R. V., Shifrin E. I. Conditions for Mode I crack deviation in orthotropic plane subjected to biaxial loading // International Journal of Engineering Science. 2012. № 5. С. 36–47.
- [43] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Иницирование разрушения на контакте при сдвиге // Изв. РАН. МТТ. 2013. № 4. С. 72–79.
- [44] Goldstein R. V., Galybin A. N., Ustinov K. V. Fracture development on a weak interface near a wedge // J. Mech. Mater. Struct. 2015. Vol. 10, no. 3. P. 265–282.
- [45] Goldstein R. V., Vainshelbaum V. M. Material scale length as a measure of fracture toughness in fracture mechanics of plastic materials // Int. J. Fract. 1978. Vol. 14, no. 2. P. 185–201.
- [46] Температурная зависимость трещиностойкости стали 15ХСНД и некоторые особенности ее разрушения / Р. В. Гольдштейн, Б. М. Овсянников, Н. И. Волгина [и др.] // Проблемы прочности. 1982. № 1. С. 79–83.
- [47] Гольдштейн Р. В., Александров С. Е. О вариационном принципе в теории жесткопластических течений с образованием разрывов // ДАН. 1995. Т. 342, № 4. С. 484–486.
- [48] Гольдштейн Р. В. О структурно-континуальном подходе в механике катастрофического разрушения сложных технических систем // ДАН. 1993. Т. 330, № 1. С. 45–47.
- [49] Гольдштейн Р. В., Онищенко Д. А. Принцип избирательности масштабов защиты иерархических технических систем для предотвращения их катастрофического разрушения // ДАН. 1996. Т. 346, № 2. С. 185–187.
- [50] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения льда // «Механика и физика льда». Серия «Прочность и вязко-упругопластичность». Москва: Наука, 1983. С. 65–94.
- [51] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. О локализованном хрупком разрушении тонких тел с трещиноподобными дефектами при сжатии со стеснением // Изв. АН СССР. МТТ. 1987. № 5. С. 158–167.
- [52] Goldstein R. V., Osipenko N. M., Lepparanta M. Classification of large-scale sea-ice structures based on remote sensing imagery // Int. J. Fract. 2000. Vol. 36, no. 1–2. P. 95–109.

- [53] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. О модели разрушения льда при большой площади контакта // Изв. РАН. МТТ. 2011. № 1. С. 137–153.
- [54] Goldstein R. V., Osipenko N. M. Fracture mechanics in modeling of icebreaking capability of ship // J. Cold Regions Eng. 1993. Vol. 7, no. 2. P. 33–44.
- [55] Гольдштейн Р. В., Марченко А. В., Семенов А. Ю. Краевые волны в жидкости под упругой пластиной с трещиной // ДАН. 1994. Т. 339, № 3. С. 331–334.
- [56] Goldstein R. V., Marchenko A. V. Edge waves in the fluid beneath an elastic sheet with linear nonhomogeneity // Surfaces waves in anisotropic and laminated bodies and defects detection / Ed. by R. V. Goldstein, G. A. Maugin. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. P. 143–157.
- [57] Modeling electromigration and the void nucleation in thin-film interconnects of integrated circuits / R. V. Goldstein, M. E. Sarychev, D. B. Shirabaikin et al. // Int. J. Fract. 2001. Vol. 109, no. 1. P. 91–121.
- [58] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Модель разрушения соединительного элемента при термодинамических нагрузках (пример анализа) // Труды ФТИАН. 2001. Т. 17. С. 97–107.
- [59] Валиев К. А., Гольдштейн Р. В., Махвиладзе Т. М. Некоторые вопросы прочности и разрушения компонент микро- и субмикронэлектроники // Труды ФТИАН. 2005. Т. 18. С. 379–397.
- [60] SiGe quantum rings by ultra-high vacuum chemical vapor deposition / C.-H. Lee, C. M. Lin, C. W. Liu et al. // ECS Transactions. 2008. Vol. 16, no. 10. P. 799–805.
- [61] Strain relaxation during formation of Ge nanolens stacks / H. T. Chang, W. Y. Chen, R. V. Goldstein et al. // Electrochem. Solid-State Lett. 2010. Vol. 13, no. 5. P. K43–K45.
- [62] A compact analytic model of the strain field induced by through silicon vias / S.-R. Jan, T.-P. Chou, C.-Y. Yeh et al. // TED. 2012. Vol. 59, no. 3. P. 777–782.
- [63] Экспериментально-теоретическое исследование процесса формирования системы кислородосодержащий преципитат – дислокационные петли в кремнии / Р. В. Гольдштейн, М. В. Меженный, М. Г. Мильвидский [и др.] // ФТТ. 2010. Т. 53, № 3. С. 493–503.
- [64] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Химико-механическое полирование. Модель локального взаимодействия // Вестник ПГТУ. Механика. 2011. № 3. С. 43–57.
- [65] Goldstein R. V., Osipenko N. M. Some mechanical models of chemical-mechanical polishing processes // Key Engineering Materials. 2013. Vol. 528. P. 33–44.
- [66] Гольдштейн Р. В., Ченцов А. В. Дискретно-континуальная модель нанотрубки // Изв. РАН. МТТ. 2005. № 4. С. 57–74.
- [67] Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М., Ченцов А. В. К определению прочности наноразмерных объектов // Изв. РАН. МТТ. 2008. № 3. С. 164–181.
- [68] Гольдштейн Р. В., Устинов К. Б. Учет влияния промежуточной фазы на эффективные свойства дисперсных композитов // Математические модели и методы механики сплошных сред: Сборник научных трудов к 60-летию А.А. Буренина. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2007.
- [69] Гольдштейн Р. В., Шаталов Г. А. Хрупкое разрушение в одномерной модели атомистической трещины // Изв. АН. МТТ. 2003. № 3. С. 135–147.
- [70] Гольдштейн Р. В., Шаталов Г. А. Моделирование процессов разрушения в рамках обобщенной модели атомистической трещины нормального отрыва // Изв. РАН. МТТ. 2006. № 4. С. 151–164.
- [71] Гольдштейн Р. В., Морозов Н. Ф. Механика деформирования и разрушения наноматериалов и нанотехнологии // Физ. мезомеханика. 2007. Т. 10, № 5. С. 17–30.
- [72] Goldstein R. V., Alexandrov S. E. A new evolution equation for average grain size in processes of severe plastic deformation // J. Eng. Math. 2013. Vol. 78, no. 1. P. 67–81.
- [73] Гольдштейн Р. В., Александров С. Е. О подобии эволюции размера зерна вблизи поверхностей трения и в процессе равноканальной экструзии // ДАН. 2007. Т. 450, № 2. С. 162–165.
- [74] Гольдштейн Р. В., Александров С. Е. К построению определяющих уравнений в тонком слое материала вблизи поверхностей трения в процессах обработки материалов давлением // ДАН. 2015. Т. 460, № 3. С. 283–285.
- [75] Goldstein R. V., Gorodtsov V. A., Ustinov K. B. On the modeling of surface and interface elastic effects in case of eigenstrains // Surface Effects and Solid Mechanics, Advanced Structured Materials. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2013. Vol. 30. P. 167–180.
- [76] Моделирование изменения механических свойств полиуретановых эластомеров при модифицировании углеродными нанотрубками / Э. Р. Бадамшина, Р. В. Гольдштейн, Ю. А. Ольхов [и др.] // Физ. Мезомеханика. 2012. Т. 15, № 3. С. 5–10.

- [77] Гольдштейн Р. В., Городцов В. А., Лисовенко Д. С. Об отрицательности коэффициента Пуассона для анизотропных материалов // ДАН. 2009. Т. 429, № 5. С. 614–616.
- [78] Гольдштейн Р. В., Городцов В. А., Лисовенко Д. С. Ауксетическая механика кристаллических материалов // Изв. РАН. МТТ. 2010. № 4. С. 43–62.
- [79] Отрицательный коэффициент Пуассона для кубических кристаллов и нано/микротрубок / Р. В. Гольдштейн, В. А. Городцов, Д. С. Лисовенко [и др.] // Физ. Мезомех. 2013. Т. 16, № 6. С. 13–31.
- [80] Гольдштейн Р. В., Городцов В. А., Лисовенко Д. С. Эффект Пойнтинга для цилиндрически-анизотропных нано/микротрубок // Физ. Мезомех. 2016. Т. 19, № 1. С. 5–14.
- [81] Auxeticity in nano/microtubes produced from orthorhombic crystals / R. V. Goldstein, V. A. Gorodtsov, D. S. Lisovenko et al. // Smart Mater. Struct. 2016. Vol. 25, no. 5. p. 054006.

D. S. Lisovenko, N. M. Osipenko, A. V. Chentsov, E. I. Shifrin

MECHANICS OF DEFORMATION AND FRACTURE IN PAPERS BY R. V. GOLDSTEIN

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

Abstract. The paper is devoted to corresponding member of RAS, PhD, professor, honored scientist of Russian Federation R. V. Goldstein. In this bibliographic note the information about this worldwide well-known scientist is given. Information on his contribution to the development of deformation and fracture mechanics is given.

Keywords: fracture mechanics.

Lisovenko Dmitry Sergeevich, Dr. Sci. Phys. & Math., Head of Laboratory, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia.

Osipenko Nikolai Mikhailovich, Cand. Techn. Sci., Senior Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia.

Chentsov Alexander Viktorovich, Cand. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia, Россия.

Shifrin Efim Ilyich, Dr. Sci. Phys. & Math., Head of Laboratory, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia.