

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТЫ ЧЕЛЯБИНСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПРОЧНИСТОВ

О.Ф. Чернявский*

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Дано краткое описание созданных школой Д.А. Гохфельда новых научных направлений и их приложений в области анализа деформирования и разрушения материалов и конструкций при повторных (малоцикловых) воздействиях:

- прогрессирующего формоизменения при теплосменах;
- математической теории упругой и неупругой приспособляемости;
- малоциклового деформирования и разрушения хрупких (малопластичных) материалов и конструкций (в том числе – графитовых);
- сеток трещин в природных и техногенных объектах;
- дилатационных повторных воздействий внешней среды (водорода, природного газа и других);
- стабильных и нестабильных деформационных свойств сталей, сплавов и других материалов и их математического моделирования;
- неустойчивости процессов неупругого малоциклового деформирования;
- закономерностей деформирования и разрушения конструкций с циклически меняющейся структурой (в том числе – при замерзании и таянии рабочей среды).

Намечены перспективы развития исследований, связанные прежде всего с переходом от обеспечения безотказности к обеспечению безопасности, а также с расширением приложений.

Ключевые слова: малоцикловые воздействия, прочность, безопасность, разрушение.

*К столетию со дня рождения профессора
Давида Ароновича Гохфельда*

Основатель Челябинской научной школы прочнистов Д.А. Гохфельд был в 1941 году студентом Московского авиационного института. В первые дни войны ушел добровольцем на фронт, вскоре был тяжело ранен и после выздоровления настойчиво требовал возвращения в армию. Однако в октябре 1941 года, когда гитлеровские войска вплотную подошли к Москве, верховный главнокомандующий Сталин издал приказ о возвращении из армии в вузы студентов технических специальностей. Последующая учеба Д. Гохфельда, а затем работа инженером кафедры МАИ и аспирантом были неразрывно связаны с практической работой на заводах авиационных двигателей. Видимо, в этот период сформировались те основные принципы, которыми он руководствовался потом всю жизнь: высочайшая требовательность к себе и другим в работе («Все для фронта, все для победы!»), сочетавшаяся с глубоким уважением и доброжелательностью к коллегам; неразрывная связь научных исследований и их реального практического полезного применения; стремление решать крупные научные проблемы, взаимодействуя при этом с выдающимися учеными своей страны и мира.

Вторая половина сороковых годов прошлого века ознаменована началом революции в науке о прочности: переходом от расчетов по допускаемым напряжениям к расчетам по предельным состояниям конструкций. Необходимость такого перехода была обусловлена началом массового строительства многоэтажных зданий и развитием реактивной авиации. Защищенная в 1947 году

* Автор – один из учеников Д.А. Гохфельда, соавтор ряда его крупнейших публикаций и ответственный исполнитель (помощник научного руководителя) наиболее значительных прикладных работ.

Регалии и персоналии

кандидатская диссертация аспиранта Д.А. Гохфельда, посвященная расчету разрушающих оборотов дисков газовых и паровых турбин при однократном нагружении, была первым в мире расчетом по предельному состоянию в машиностроении. Аналогичные исследования появились в США только через три года. Первым оппонентом на защите этой диссертации был академик С.В. Серенсен – крупнейший в СССР специалист по прочности в машиностроении. Теоретической основой работы была теория предельного равновесия, созданная выдающимся специалистом по железобетону А.А. Гвоздевым. В 1948 году метод расчета дисков турбин, предложенный Д.А. Гохфельдом, был обобщен на случаи длительных нагружений (с учетом ползучести) академиком Ю.Н. Работновым и главным прочнистом Центрального института авиационных моторов И.А. Биргером. Сохранившиеся на много лет тесные связи с С.В. Серенсеном, Ю.Н. Работновым и И.А. Биргером играли потом очень большую роль в жизни научной школы, созданной Д.А. Гохфельдом.

Около 10 лет посвятил Д.А. Гохфельд созданию крупного дееспособного коллектива преподавателей, инженеров и научных сотрудников – кафедры сопротивления материалов ЧПИ. В начале шестидесятых годов этот коллектив приступил к активным действиям по реализации идей своего руководителя. Одной из первых работ было развитие метода расчета дисков турбин, предложенного им ранее. С появлением двухкаскадных двигателей стали применяться диски с развитой ступицей. Расчет по разрушающим оборотам давал для них ошибки не в запас прочности. К этому времени большинство пользователей забыло, что в этом расчете использовалось предположение о полном разрушении диска по диаметральному сечению. Первым понял этот недостаток и исправил его (быстро, точно и логично) автор метода. Но на этом его работа не закончилась. В отличие от множества любителей новых методик, не заботящихся об их практическом применении, Д.А. Гохфельд организовал работу по нормированию запасов прочности по предлагаемой новой методике. Для этого необходимо было рассчитать множество надежно работающих дисков и ряд разрушившихся конструкций и моделей, собрав для этого необходимые исходные данные. После выполнения этой работы и получения соответствующих рекомендаций ЦИАМ (по инициативе И.А. Биргера и И.В. Демьянушко) отменил расчеты дисков по допускаемому напряжению, оставив в качестве обязательных только расчеты по методике Д.А. Гохфельда. Тем же решением было фактически запрещено создавать с помощью этой методики равнопрочные диски, что было, по-видимому, одним из первых шагов перехода от обеспечения прочности к обеспечению безопасности. Можно отметить, что работы по нормированию запасов прочности дисков выполнялись в числе первых задач на первом гражданском промышленном компьютере на Южном Урале – ЭВМ «Минск-1» на ЧТЗ (где они тут же использовались при создании ГТД). С этого начиналась одна из традиций научной школы Д.А. Гохфельда: применения самых современных математических методов и вычислительных средств.

Параллельно с работами по дискам активно развивалось исследование влияния теплосмен на процессы деформирования и разрушения конструкций. Это направление, зародившееся в ответ на запросы металлургических заводов Южного Урала, быстро стало основным в работе всего коллектива. Традиционно считалось (а нередко даже сейчас считается), что нагревы и охлаждения не могут приводить к большим перемещениям, значительно превышающим αl (α – коэффициент линейного теплового расширения, t – температура, l – длина детали). Учитывалось, что α – малая величина, например, для сталей не выше $20 \cdot 10^{-6}$. Оборудование металлургических заводов, у которых требования к стабильности размеров и формы сравнительно невелики, дает множество примеров накопления – при отсутствии механических нагрузок – таких перемещений, которые в тысячи раз больше свободных тепловых. Заслугой Д.А. Гохфельда является то, что он первым предложил рассмотреть это явление с позиций одного малоизвестного тогда раздела механики: теории приспособляемости идеально упругопластических тел. Выполненный им с помощью этой теории анализ простейших стержневых конструкций позволил впервые выявить и понять механизмы деформирования и роль основных факторов при повторных, в частности термических воздействиях. Оказалось, что стадия приработки может значительно расширять область упругого деформирования конструкции. Эта область ограничивается началом двух стабильных процессов: знакопеременным течением и прогрессирующим накоплением остаточных перемещений. Важнейшим фактором, влияющим на эти процессы, является одновременность неупругого деформирования. Накопление перемещений (формоизменение) может при определенных условиях продолжаться вплоть до разрушения.

Ряд экспериментальных и расчетных работ, а также наблюдений на металлургических заводах, выполненных сотрудниками кафедры по указаниям Д.А. Гохфельда, полностью подтвердил эти выводы и позволил понять причины и механизмы формоизменения металлургического оборудования (корпусов плавильных печей, чаш шлаковозов, различных литейных форм). На этой основе были созданы методы анализа процессов малоциклового неизоотермического деформирования дисков турбин, камер сгорания ЖРД и ряда типовых элементов конструкций (пластин и оболочек). Основные результаты работ, выполненных на этом этапе, были опубликованы в первой монографии Д.А. Гохфельда [1]*.

Уже в этот период работы по прочности при теплосменах носили системный характер. Они включали экспериментальные и теоретические исследования сложных деформационных свойств материалов с созданием уникальных испытательных установок и новых математических моделей; исследования закономерностей деформирования и разрушения конструкций и разработку практических методов прогнозирования и обеспечения прочности с доведением их до применения в промышленности.

Следует отметить, что в этот период распространенной формой научной работы в стране были хорошо подготовленные встречи специалистов. Ежегодно проводились крупные научно-практические конференции по прочности двигателей (организаторы – предприятия МАП), совещания по тепловым напряжениям (Академия наук Украины). Регулярно собирались симпозиумы по малоцикловой усталости под эгидой ИМАШ, всесоюзные конференции по пластинкам и оболочкам и всесоюзные съезды по теоретической и прикладной механике. Эти встречи обеспечивали не только оперативный обмен информацией и развитие связей специалистов, но и в высшей степени квалифицированную и объективную оценку работы каждого докладчика. Давид Аронович не только сам делал на всех этих собраниях доклады, прекрасно показывавшие его талант исследователя, но и требовал от своих многочисленных учеников активного участия в научных конференциях. Он учил каждого из нас (индивидуально!) не только исследовательской работе, но и тому, как написать отчет и статью, как сделать доклад, как взаимодействовать с другими специалистами. Учил не только своим примером, но и совместной работой над текстом, проведением научных конференций кафедры, работой с выдающимися редакторами научных публикаций Н.А. Талицких и И.Н. Жестковой.

Результаты, полученные в шестидесятые годы, не только позволили понять главные закономерности процессов малоциклового деформирования при теплосменах, но и поставили ряд новых вопросов, ответы на которые требовали как экспериментальных, так и теоретических исследований. В связи с этим на кафедре сопротивления материалов ЧПИ, насчитывавшей в то время 33 преподавателя и более 20 инженеров и научных сотрудников, Д.А. Гохфельд создал пять отделов. Три из них вели работы по основному научному направлению – прочности конструкций, работающих в условиях теплосмен: экспериментальный отдел (руководитель К.М. Кононов), отдел свойств материалов и их моделирования (руководитель О.С. Садаков) и отдел предельных состояний конструкций (руководитель О.Ф. Чернявский). Два других отдела занимались проблемами динамики и прочности гусеничных машин (руководитель И.Я. Березин) и композитных конструкций (руководители В.А. Маковецкий, позднее С.Б. Сапожников). Каждый сотрудник был свободен в выборе научного направления и руководителя. Заведующий кафедрой, ученый секретарь и пять руководителей отделов составляли совершенно нестандартный орган управления – бюро кафедры. Все вопросы жизни кафедры вначале обсуждались на бюро, затем на общем собрании.

Структурирование кафедры (с созданием отделов) совпало по времени с событиями, сильно повлиявшими на дальнейшую работу молодой научной школы, созданной Д.А. Гохфельдом. По инициативе академика С.В. Серенсена кафедра была привлечена в начале семидесятых годов к созданию Норм прочности атомных реакторов. Это событие было крайне необычным и свидетельствовало о высокой оценке уже выполненных исследований и надеждах на их успешное продолжение. Из других вузов (в том числе лучших в стране – МВТУ им. Н.Э. Баумана, МИФИ, МФТИ, МГУ) к этой работе привлекались индивидуально отдельные известные специалисты.

* Здесь и далее даются ссылки только на крупные обобщающие публикации. Заинтересованный читатель может найти в них обширные перечни и критический разбор многочисленных публикаций как сотрудников школы Д.А. Гохфельда, так и других авторов.

Регалии и персоналии

Кафедра сопротивления материалов ЧПИ была единственным в СССР вузовским коллективом, не только привлеченным к этой работе, но и получившим задание разработать проект нового самостоятельного раздела Норм, посвященного прогрессирующему формоизменению элементов конструкций. Такой раздел был необходим, в частности, для создания новых высокотемпературных атомных реакторов для электростанций (бридеров), источников технологического тепла, энергетических установок космических аппаратов. Его выполнение требовало интенсивного развития как теоретической базы, так и расчетных методов. Для обеспечения реалистичности задач и апробации предлагаемых решений кафедра была привлечена к работам по созданию реактора на быстрых нейтронах БН-600, выполнявшихся под руководством академика Ф.М. Митенкова. Замечательной особенностью этого аппарата было отсутствие заметных механических нагрузок в высокотемпературной зоне. Все они были вынесены в холодную зону.

Теоретической базой раздела Норм стала развитая на кафедре математическая теория упругой и неупругой приспособляемости (стабилизации процессов малоциклового деформирования) [2]. Определение внешних воздействий, программ нагружения и свойств материалов, приводящих к реализации стабильного циклического деформирования разных типов, впервые формулировалось в виде задач математической теории оптимальных процессов и их частных форм вплоть до приближенных верхних и нижних оценок предельных нагрузок. Теоретические выводы проверялись лабораторными испытаниями оболочек и пластин при теплосменах. Расчетная схематизация деформационных свойств материалов при кратковременных и длительных повторных нагружениях базировалась на результатах испытаний, в том числе проведенных в лаборатории кафедры. Способы их схематизации отличались от принятых в английской и американской научных школах простотой и соответствием типу процесса. Работы по созданию и развитию этого нового раздела механики были высоко оценены академиком Ю.Н. Работновым, на семинарах кафедры которого в МГУ они регулярно докладывались и обсуждались.

Расчеты на прочность в то время базировались, как правило, на анализе только стационарных режимов работы конструкций. При теплосменах, как следовало из теоретических положений, решающую роль может играть неодновременность неупругого деформирования как в разных точках по объему, так и в одной и той же точке. Учет этой особенности требует достаточно полной информации о нестационарных режимах работы, в том числе о температурных полях. Расчет этих режимов и полей для реактора БН-600 выполнялся по заданию Ф.М. Митенкова большой группой специалистов КБ: физиков-теоретиков, тепловиков, гидравликов, конструкторов. С использованием полученной ими информации работники кафедры должны были решить две первоочередные задачи: выявить потенциально опасные (по формоизменению) внутрикорпусные детали и режимы работы реактора, а также оценить опасность накопления остаточных перемещений. Оказалось, что наиболее опасной является зона уровня жидкометаллического теплоносителя (натрия), перемещающаяся при изменениях тепловыделения. Потенциально опасной деталью оказался корпус центральной колонны – одного из основных органов управления аппаратом. Наиболее опасные режимы цикла – срабатывание быстрой аварийной защиты и стационарный режим. Системным и исключительно эффективным было использование результатов анализа, организованное Ф.М. Митенковым. Выводы, хорошо известные и согласованные с прочнистами КБ, были подробно доложены конструкторам, прибористам, будущим операторам реактора. Каждая из этих служб дала свои (неожиданные для прочнистов) рекомендации: новые конструкторские решения, изменения в системе контроля и управления, изменения в регламенте эксплуатации. Следствием стало, например, то, что за весь срок эксплуатации реактора (30 лет) число срабатываний БАЗ не превысило нескольких десятков вместо нескольких тысяч, планировавшихся на первых этапах проектирования. По-видимому, именно это, а не количественные оценки перемещений, привело к значительному повышению надежности и безопасности реактора. Еще одним (вторичным) эффектом было повышение качества и снижение стоимости испытаний макетов и моделей узлов.

После работ по БН-600 Челябинская школа прочнистов активно участвовала в проектировании ряда высокотемпературных реакторов с газовым теплоносителем и создании специальных разделов Норм прочности для них. В одном из таких нормативных документов впервые появилась фраза, явившаяся логическим (но не техническим) завершением перехода от расчетов по допускаемым напряжениям к анализу предельных состояний: «Допускаются любые неупругие

деформации и любые трещины (вплоть до фрагментации детали), если они не препятствуют продолжению нормальной эксплуатации».

Обобщением работ по формоизменению стал новый раздел Норм прочности [3]. Он создавался (как и все остальные разделы) при научном руководстве ИМАШ РАН (С.В. Серенсена и Н.А. Махутова), организационным руководством НИКИЭТ и включал фактически две части: описания общих закономерностей процесса прогрессирующего формоизменения и рекомендуемых методов расчетов условий его реализации. При создании Норм (опубликованных в 1989 г.) предполагалось, что они будут пересматриваться раз в пять лет. Эти Нормы, широко применяемые сейчас не только в атомной промышленности, но и во многих других отраслях машиностроения, не пересматривались ни разу. С развитием МКЭ рекомендованные в них неклассические вариационные методы расчетов на прогрессирующее формоизменение (как и расчеты других предельных состояний) безнадежно устарели. Однако общие закономерности формоизменения (роль остаточных напряжений, программ нагружения, свойств материала, концентраторов напряжений) не изменились.

Можно отметить, что параллельно с созданием отечественных Норм школа Д.А. Гохфельда активно участвовала в международном научном сотрудничестве как по созданию американских Норм прочности (регулярных крупных конференциях по строительной механике атомных реакторов), так и в обсуждениях более широких проблем термомеханики и термопрочности с ведущими специалистами Италии, Германии, Англии, Польши, Чехословакии. Ряд достижений зарубежных инженеров и ученых был использован при создании отечественных Норм. По заданию ЮНЕСКО Д.А. Гохфельдом был прочитан в Милане обширный курс лекций по теории приспособляемости. Когда крупное голландско-американское издательство Sijthoff & Noordhoff решило издать серию современных книг по механике, оно предложило принять в этом участие трем авторам от СССР: академиком Ю.Н. Работнову и Л.И. Седову и профессору Д.А. Гохфельду. Большая книга [4], написанная Д.А. Гохфельдом и (по его предложению) автором данной статьи, вышла в 1980 году и получила высокую оценку в ведущих технических журналах не только Западной Европы и США, но даже таких стран, как ЮАР и Новая Зеландия. Удивительно, но эта книга продолжает печататься и распространяться и сейчас.

Работы экспериментального отдела и отдела свойств материалов в этот период выходили за рамки реакторной тематики. Их основным направлением было исследование и моделирование влияния программ нагружения и ползучести на деформационные свойства сталей и сплавов при высокотемпературных малоцикловых нагружениях, прежде всего – при знакопеременном деформировании. Фундаментальные работы в этой области при несущественной ползучести были выполнены ранее в ИМАШ РАН под руководством С.В. Серенсена и Н.А. Махутова. Основным результатом работ Челябинской школы стали закономерности стабильного деформирования и структурные математические модели материалов. Эти модели приближенно (в рамках феноменологического подхода) отражали роль одного из материальных носителей памяти материалов: остаточных напряжений на мезоуровне (уровне структурных составляющих – зерен реальных сталей и сплавов). Итогом была посвящена монография Д.А. Гохфельда и О.С. Садакова [5]. На этой основе коллективом авторов был создан уникальный справочник по деформационным и прочностным свойствам 45 марок сталей и сплавов при малоцикловых нагружениях [6]. Он отличался от аналогов не только видом нагружения, но и полным описанием математических моделей процессов и их численных параметров.

Дальнейшее развитие работ Челябинской школы прочнистов привело к появлению нескольких новых направлений в науке о прочности. Первое из них – малоцикловое деформирование и разрушение хрупких и малопластичных материалов – было инициировано Ф.М. Митенковым. Он предложил заняться проблемой малоцикловых трещин в графитовых конструкциях. Графиты – углеродные материалы с рядом ценных прочностных свойств. Например, их прочность и пластичность растут (в отличие от сталей) до температур около 3000 °С. Это классические хрупкие материалы (разрушение при полной деформации около 0,2 %, практически линейная диаграмма деформирования). Считалось, что малоцикловая усталость для них принципиально невозможна. Однако эксплуатационники реакторов уверяли, что наблюдают малоцикловые трещины. Уже значительно позже мы узнали, что эта проблема обсуждалась на отраслевом совещании, где был сделан вывод, что пока она неразрешима. Это заключение не дошло до ЧПИ (другое ведомство!),

поэтому ученики Д.А. Гохфельда храбро взялись за ее решение. После довольно долгих и трудных поисков удалось создать весьма жесткую испытательную установку и высокотемпературный деформометр, способный достаточно точно измерять малые деформации. Серия высокотемпературных испытаний необлученных образцов привела к простому (как все нужное) выводу. Малая кривизна реальной диаграммы деформирования графита при повторных нагружениях приводит к образованию петли гистерезиса с весьма малой шириной. Отношение этой ширины к малому ресурсу пластичности графита оказывается таким же, как у пластичных сталей при малоцикловых разрушениях. В соответствии с фундаментальными исследованиями сталей и сплавов, проведенными в ИМАШ РАН, именно это отношение определяет число циклов до образования трещины. Таким образом, известные закономерности малоциклового усталости оказались полностью применимы к конструкционным графитам и другим хрупким и малопластичным материалам. Этот вывод был подтвержден в дальнейшем испытаниями облученных в реакторах образцов, проведенными совместно ЧПИ и Курчатовским институтом. Результаты экспериментальных исследований и разработки математических моделей малоциклового деформирования и разрушения графитовых материалов и конструкций опубликованы в монографии [7].

Работы по конструкционным графитам были последними, в которых еще принимал участие Д.А. Гохфельд. Тяжелая болезнь остановила его деятельность. Но созданная им научная школа продолжала существовать и работать, сохраняя традиции своего основателя и учителя.

Следующим новым научным направлением, созданным сотрудником этой школы, стал анализ сеток трещин в природных и техногенных объектах [8]. Такие системы трещин характерны для ряда горных пород (гранитов, базальтов), для такыров и ледяных образований. Они лимитируют работоспособность различных литейных форм, корпусов металлургического и химического оборудования, дорожных покрытий и ряда высокотемпературных атомных реакторов. Предшествовавшие исследования (в частности – американские) не продвинулись дальше классификации сеток по виду в плане. В монографии [8] впервые были выявлены законы их образования при однократных и повторных изменениях температуры, исследована кинетика развития трещин и их продвижения внутрь объекта, созданы методы прогнозирования поведения тел с сетками трещин с учетом не рассматривавшегося раньше предельного состояния – прогрессирующего выкрашивания поверхностного слоя. Впервые были выявлены закономерности повышения (!) долговечности термонапряженных конструкций вследствие развития сеток трещин. Проведенные расчеты доказали целесообразность искусственного создания сеток трещиноподобных надрезов поверхностного слоя при повторных тепловых ударах и позволили определить рациональные параметры таких сеток. Впервые это было сделано для одного из атомных реакторов с газовым теплоносителем и шаровыми ТВЭЛами. В дальнейшем аналогичные расчеты выполнялись для обоснования возможности работы сверхмощного термоядерного реактора для электростанций, проектировавшегося под руководством академика Б.В. Литвинова.

Еще одним новым направлением стало обобщение закономерностей термоциклического деформирования и разрушения материалов и конструкций на повторные дилатационные воздействия внешних сред – водорода, природного газа и многих других. Эти работы начались с проблемы, возникшей при эксплуатации установок для производства особо чистого водорода. Их основная рабочая часть представляла набор длинных палладиевых капилляров с толщиной стенки 0,1 мм. Палладиевая мембрана пропускает внутрь атомы водорода, задерживая все другие атомы внешней водородсодержащей среды. Свободный конец каждого капилляра был запаян, другой выходил в ресивер для сбора водорода. С увеличением длительности эксплуатации вместе с водородом в ресивер попадало все больше других элементов среды, загрязнявших продукт. Анализ показал, что проникновение водорода в металл сопровождается эффектами двух типов: необратимыми химическими и структурными изменениями, приводящими к хорошо известной водородной хрупкости, и обратимыми (при смене внешней среды) изменениями объема материала. У палладия насыщение водородом вызывает увеличение объема, способное достигать 15 % (чтобы получить такое нагревом, потребовалась бы температура около 10 000 °С). У магния (по литературным данным) – уменьшение объема, способное доходить до 50 %. При отсутствии водорода во внешней среде он быстро улетучивается из металла и восстанавливается первоначальный объем. Неравномерное насыщение водородом тонкой стенки капилляра и пайки приводило к образованию напряжений, подобно неравномерному нагреву. Повторение таких процессов приводит

к трещинам малоциклового усталости и разгерметизации капилляра. Способы предупреждения появления трещин очевидны: делайте капилляры *и*-образными (без пайки), а в уже имеющихся установках уменьшайте число циклов изменения среды.

Последующие наблюдения за работой печей для производства цемента и извести, а также исследования, проводившиеся Оренбургским диагностическим центром Газпрома и Оренбургским университетом, показали, что аналогичные обратимые значительные изменения объема и механических свойств материала могут быть вызваны проникновением в стали (на глубину до десятков миллиметров) кислорода, кальция, составляющих природного газа. Работоспособность и безопасность ряда конструкций не могут быть обеспечены без учета этих обратимых повторяющихся процессов.

Ряд работ этого периода в жизни Челябинской школы прочнистов публиковался в издававшемся совместно ЧПИ и МВТУ имени Н.Э. Баумана международном журнале *Dynamics, strength & wear-resistance of machines. (International E-journal)*. Вопросам, связанным с повышением малоциклового прочностного ресурса, была посвящена одна из глав коллективной монографии [9], подготовленной ИМАШ РАН под редакцией Н.А. Махутова к столетию со дня рождения С.В. Серенсена.

Две совершенно разные (по приложениям) задачи, с которыми заинтересованные организации обратились к Челябинской школе прочнистов, продемонстрировали необходимость анализа малоциклового деформирования и разрушения конструкций с переменной структурой. Рыбаки Камчатки были вынуждены прекращать лов и выполнять дорогостоящий ремонт в иностранных портах вследствие прогрессирующего формоизменения (раскатки) барабанов траловых лебедок. Трос длиной до нескольких километров наматывается на барабан с нагрузкой до десятков тонн. Пластическое обжатие барабана приводит к небольшому увеличению его длины и образованию в системе трос – барабан благоприятных остаточных напряжений. Следующий выпуск троса снимает эти напряжения, и процесс пластического деформирования повторяется. Рекомендация (на основе расчетов) была, как обычно, простой: делать барабаны из стали челябинских, а не западноевропейских заводов.

Не такой простой, но близкой по физическому смыслу, была решенная для газовиков задача о всплывании трубопроводов при повторных замерзаниях и таяниях грунта. Очевидно, что аналогичные задачи о деформировании конструкций и развитии трещин при повторных замерзаниях и таяниях рабочей среды характерны для ряда различных конструкций – от труб и трубопроводных систем до рельсов и плотин. Однако пока это направление не получило заметного развития, хотя еще академик С.В. Серенсен когда-то подчеркивал, что у нас самая холодная страна в мире, но большинство прочнистов озабочено высокими или низкими космическими, но не климатическими низкими температурами.

Начало XXI века соответствует интенсификации второй (за всю историю) революции в науке о прочности: переходу от обеспечения прочности (безотказности) конструкций к обеспечению безопасности. Этот переход обусловлен гигантским ростом размеров и сложности конструкций и систем (зданий и сооружений, транспортных средств, трубопроводных и энергосистем и других), их энергонасыщенности, экономических и социальных последствий отказов и катастроф. Челябинская научная школа прочнистов активно участвует в работах по безопасности. Как и раньше, она выполняет свою часть работы при научном руководстве института машиноведения РАН, его лидера Н.А. Махутова, первого прочниста России, выдающегося ученика и продолжателя работ С.В. Серенсена. Анализ рисков, являющийся основой обеспечения безопасности, требует информации о сценарии отказа: о разрушении не только самой детали, но и о реакции всех окружающих ее объектов. Механизм разрушения детали зависит от всей предшествующей истории. Он не рассматривался подробно в задачах предупреждения отказов (обеспечения прочности). Носителями памяти материала и конструкции являются изменения структуры и остаточные напряжения, перемещения и дефекты на трех уровнях: атомарном (микроуровне), структурных составляющих материала (мезоуровне) и всей детали (макроуровне). Современные компьютерные методы и средства анализа кинетики неупругого деформирования и разрушения теоретически позволяют рассчитать всю жизнь конструкции. Практическое решение этой задачи ограничено прежде всего недостаточностью исходных данных. В связи с этим работы Челябинской школы посвящены двум первоочередным задачам: изучению малоциклового деформационного поведения материалов вплоть до разрушения (включая не рассматривавшуюся ранее стадию предразрушения) и про-

Регалии и персоналии

должению создания иерархических систем расчетов на прочность при малоцикловых воздействиях (в которых каждая более высокая ступень соответствует повышению допускаемых нагрузок при усложнении исходных данных и методов расчета).

Изучение закономерностей памяти материалов начиналось еще в первых работах школы Д.А. Гохфельда, оно интенсивно продолжалось при изучении облученных графитов совместно с Курчатовским институтом. В последние годы оно впервые продолжается применительно к комбинированному деформированию [10], всегда непосредственно предшествующему разрушению. Впервые создана и апробирована методика испытаний. Опубликованы первые практически важные результаты определения деформационных свойств в зонах перехода от знакопеременного течения и прогрессирующего формоизменения к комбинированному деформированию.

Развитие иерархических систем расчетов на прочность соответствует одной из главных особенностей научных революций: они никогда не отменяют накопленных раньше знаний и методов, а лишь ставят им границы применимости. Это развитие, уже начавшееся в американских Нормах прочности, осуществляется в работах Челябинской школы по аналогии с живыми организмами. Конструкции, как и живые существа, рождаются, учатся, работают, стареют и умирают. При этом все материальные носители памяти непрерывно изменяются. Традиционные расчеты конструкций напоминают отдельные мгновенные фотографии непрерывно движущегося и меняющегося объекта. Только с учетом непрерывных изменений удалось построить теорию и методы расчета неустойчивых процессов малоциклового неупругого деформирования, определяющих границы высших ступеней иерархической системы расчетов. С этих же позиций рассмотрена связь расчетов на прочность и безопасность. Намечались пути и методы учета в анализе процессов малоциклового неупругого деформирования реальных допусков не только на геометрические характеристики конструкций, но и на свойства материала и внешние воздействия. Получение таких результатов стало возможным благодаря использованию самых современных и мощных пакетов МКЭ и постоянной связи с их разработчиками.

Одним из высших научных достижений в России за последние несколько десятилетий стала 51-томная энциклопедия «Безопасность России». Ее научные руководители сочли возможным включить в авторский коллектив ряда томов [11–27] сотрудников Челябинской научной школы, основанной в ЧПИ и продолжающей работу в ЮУрГУ при научном руководстве ИМАШ РАН и постоянном сотрудничестве с Уральским отделением РАН.

В заключение остается отметить, что все результаты работы этой школы были получены и использованы в связи с конкретными задачами предприятий. Однако их потенциальные возможности значительно шире. Они способны обеспечить создание ряда новых и повышение работоспособности действующих высокотемпературных конструкций энергетического, химического и металлургического оборудования. Их применение позволяет значительно повысить сейсмостойкость конструкций. Они позволяют повысить долговечность и безопасность конструкций в активных средах (водороде, природном газе и других) и при климатических низких температурах, создать новые экономичные технологии формоизменения заготовок и ремонта сложных конструкций. Перспективным является анализ повторного неупругого деформирования и разрушения с учетом реальных допусков на свойства материалов и условия работы. Реализацию этих возможностей сдерживает, по-видимому, прежде всего недостаточная информированность потребителей.

Литература

1. Гохфельд, Д.А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен / Д.А. Гохфельд. – М.: Машиностроение, 1970. – 259 с.
2. Гохфельд, Д.А. Несущая способность конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский. – М.: Машиностроение, 1979. – 263 с. – (Серия «Библиотека расчетчика»)
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с. – (Серия «Правила и нормы в атомной энергетике»)
4. Gokhfeld, D.A. Limit analysis of structures at thermal cycling / D.A. Gokhfeld, O.F. Cherniavsky. – Sijthoff & Noordhoff. Alphen aan den Rijn- The Netherlands, Rockville, Maryland, USA, 1980. – 537 p.

5. Гохфельд, Д.А. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.С. Садаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с. – (Серия «Библиотека расчетчика»)
6. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справ. / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов и др. – Екатеринбург, 1996. – 408 с.
7. Чернявский, А.О. Прочность графитовых материалов и конструкций при малоцикловом нагружении / А.О. Чернявский. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. – 147 с.
8. Чернявский, А.О. Сетки трещин в конструкциях и природных объектах / А.О. Чернявский. – М.: Машиностроение, 2010. – 103 с.
9. Научные основы повышения малоцикловой прочности / Н.А. Махутов, К.В. Фролов, М.М. Гаденин и др. – М.: Наука, 2006. – 623 с.
10. Малоцикловое деформирование и разрушение конструкций / А.В. Абрамов, М.М. Гаденин, Н.А. Махутов и др. // Справочник. Инженерный журнал: Приложение. – 2011. – № 11 (176). – С. 22.
11. Особенности упруго-пластического деформирования и разрушения сталей при сложных траекториях термомеханического нагружения / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, С.В. Европин и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2013. – № 1, т. 79. – С. 48–58.
12. Кинетика напряжений и деформаций в расчетах высокотемпературной прочности и долговечности реакторных конструкций / Ю.Г. Драгунов, С.В. Европин, М.М. Гаденин и др. // Атомная энергия. – 2015. – № 119 (3). – С. 145–155.
13. Чернявский, О.Ф. Предельные состояния дисков турбомашин при теплосменах высокой интенсивности / О.Ф. Чернявский // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 6. – С. 58–65.
14. Cherniavsky, A.O. Computational and experimental analysis of trawl winches barrels deformations / A.O. Cherniavsky, V.I. Solovyov // Engineering Failure Analysis – 2013. – № 28. – P. 160–165. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.10.007
15. Cherniavsky, A.O. Ratcheting analysis of “pipe – freezing soil” interaction / A.O. Cherniavsky // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – Vol. 153. – P. 97–100.
16. Rebyakov Yu.N. Properties of steels and chromium-nickel alloys under low-cycle combined deformation / Yu.N. Rebyakov, O.F. Cherniavsky, A.O. Cherniavsky // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 103. – P. 415–418. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2017.06.025
17. Tereshin, D.A. Theoretical basis and a finite element formula for the direct calculation of steady plastic states: book chapter / D.A. Tereshin, O.F. Cherniavsky // Direct Methods for Limit and Shakedown Analysis of Structures: Advanced Computational Algorithms and Material Modelling. – Springer publ. – 2015. – P. 81–104.
18. Чернявский, А.О. Использование численного моделирования накопления повреждений при планировании ремонтов / А.О. Чернявский // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 2. – С. 86–91.
19. Ballistic resistance modeling of aramid fabric with surface treatment / N.Y. Dolganina, A.V. Ignatova, A.A. Shabley, S.B. Sapozhnikov // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 965. – P. 185–194.
20. Sapozhnikov, S.B. Designing the Structure of a Pressure Vessel Wall Made of a Layered Composite Material with Nonproportional Changes in Stress Components / S.B. Sapozhnikov, M.Y. Semashko // Mechanics of Composite Materials. – 2018. – Vol. 54 (5). – P. 567–576.
21. Чернявский, А.О. Методика назначения предельной вероятности отказа / А.О. Чернявский, М.М. Шатов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 1. – С. 51–55.
22. Безопасность России. Основы анализа и регулирования безопасности / науч. рук. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2006. – 639 с.
23. Безопасность России. Безопасность гражданского и оборонного комплексов и управление рисками / науч. рук. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2006. – 751 с.
24. Безопасность России. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов / науч. рук. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2007. – 815 с.

Регалии и персоналии

25. *Безопасность России. Научно-методическая база анализа риска и безопасности / науч. рук. К.В. Фролов.* – М.: МГФ «Знание», 2007. – 857 с.

26. *Безопасность России. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / науч. рук. Н.А. Махутов.* – М.: МГОФ «Знание», 2015. – 600 с.

27. *Безопасность России. Научные основы техногенной безопасности / науч. рук. Н.А. Махутов.* – М.: МГОФ «Знание», 2015. – 936 с.

Чернявский Олег Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры технической механики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, заслуженный деятель науки и техники РФ, cherniavskiiof@susu.ru.

Поступила в редакцию 21 февраля 2019 г.

DOI: 10.14529/engin190207

CHELYABINSK SCIENTIFIC SCHOOL OF STRENGTH ENGINEERS: RESULTS AND PROSPECTS

O.F. Chernyavsky, cherniavskiiof@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper reviews new research areas created by D.A. Gokhfeld's school and their application to the analysis of deformation and fracture of materials and structures under repeated (low-cycle) loads:

- incremental collapse at thermal cycling;
- mathematical theory of elastic and inelastic shakedown;
- low-cycle deformation and fracture of brittle (low-plastic) materials and structures (including artificial graphite);
- crack patterns in natural and man-made objects;
- repeated dilatational effects of environment (hydrogen, natural gas, etc.);
- stable and unstable deformation properties of steels, alloys and other materials, and their mathematical modeling;
- instabilities of inelastic low-cycle deformation processes;
- peculiarities of deformation and fracture of structures with a cyclically changing structure (including freezing and melting of the environment).

The paper outlines prospects for the research development, which is primarily related to the transition from ensuring reliability to ensuring the safety of structures, as well as expanding applications.

Keywords: low-cycle effects, strength, safety, fracture.

References

1. Gokhfeld D.A. *Nesushchaya sposobnost' konstruktsiy v usloviyakh teplosmen* [Carrying Capacity of Structures under Thermal Cycles]. Moscow, Mechanical Engineering, 1970. 259 p.
2. Gokhfeld D.A., Chernyavsky O.F. *Nesushchaya sposobnost' konstruktsiy pri povtornykh nagruzheniyyakh* [Carrying Capacity of Structures under Repeated Loads]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 263 p.
3. *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok* [Standards for Calculating the Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 524 p.

4. Gokhfeld D.A., Cherniavsky O.F. *Limit Analysis of Structures at Thermal Cycling*. Sijthoff & Noordhoff. Alphen aan den Rijn. The Netherlands, Rockville, Maryland, USA, 1980. 537 p.
5. Gokhfeld D.A., Sadakov O.S. *Plastichnost' i polzuchest' elementov konstruksiy pri povtornykh nagruzheniyakh* [Plasticity and Creep of Structural Elements under Repeated Loads]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 256 p.
6. Gokhfeld D.A., Getsov L.B., Kononov K.M., Kulchikhin E.T., Rebyakov Yu.N., Sadakov O.S., Timashev S.A., Chepursky V.N. *Mekhanicheskiye svoystva staley i splavov pri nestatsionarnom nagruzhenii* [Mechanical Properties of Steels and Alloys Under Unsteady Loading]. Ekaterinburg, 1996. 408 p.
7. Chernyavsky A.O. *Prochnost' grafitovykh materialov i konstruksiy pri malotsiklovom nagruzhenii* [Strength of Graphite Materials and Structures under Low-Cycle Loading]. Chelyabinsk, 1997. 147 p.
8. Chernyavsky A.O. *Setki treshchin v konstruksiyakh i prirodnykh ob"yektakh* [Grids of Cracks in Structures and Natural Objects]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 103 p.
9. Makhutov N.A., Frolov K.V., Gadenin M.M. ... Chernyavsky A.O., Chernyavsky O.F. *Nauchnyye osnovy povysheniya malotsiklovoy prochnosti* [Scientific Basis for Increasing Low-Cycle Strength]. Moscow, Science Publ., 2006. 623 p.
10. Abramov A.V., Gadenin M.M., Makhutov N.A., Evropin S.V., Chernyavsky A.O., Chernyavsky O.F. [Low-cycle Deformation and Destruction of Structures]. *Reference book. Engineering Journal: Supplement to the journal*, November 2011, vol. 11 (176), p. 22. (In Russ.)
11. Gadenin M.M., Makhutov N.A., Evropin S.V., Rebyakov Yu.N., Cherniavsky O.F., Cherniavsky A.O. Specific Features of Elastoplastic Deformation and Fracture of Steels at Complicated. *Thermomechanical Stress Paths. Inorganic Materials*, December 2014, vol. 50, iss. 15, pp. 1495–1505. DOI: 10.1134/S0020168514150096
12. Dragunov Y.G., Evropin S.V., Gadenin M.M., Makhutov N.A., Chernyavskii O.F. Stress-strain Kinetics in Calculations of High-Temperature Strength and Longevity of Reactor Structures – 2016. *Atomic Energy*, no. 119 (3), pp. 177–189. DOI: 10.1007/s10512-015-0046-y
13. Cherniavsky O.F. [Limiting State of Turbomachine Disks under Conditions of High-Intensity Thermal Changes]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 6, pp. 508–514. (in Russ.)
14. Cherniavsky A.O., Solovyov V.I. Computational and Experimental Analysis of Trawl Winches Barrels Deformations. *Engineering Failure Analysis*, 2013, vol. 28, pp. 160–165. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.10.007
15. Cherniavsky A.O. [Ratcheting Analysis of “Pipe – Freezing Soil” Interaction]. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 153, pp. 97–100. (in Russ.)
16. Rebyakov Yu.N., Cherniavsky O.F., Cherniavsky A.O. Properties of Steels and Chromium-Nickel Alloys Under Low-Cycle Combined Deformation. *International Journal of Fatigue*, October 2017, vol. 103, pp. 415–418. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2017.06.025
17. Tereshin D.A., Cherniavsky O.F. Theoretical Basis and a Finite Element Formula for the Direct Calculation of Steady Plastic States: book chapter. *Direct Methods for Limit and Shakedown Analysis of Structures: Advanced Computational Algorithms and Material Modelling*. Springer International Publishing Switzerland, 2015, pp. 81–104.
18. Cherniavsky A.O. Repair Planning by Calculating the Damage Distribution. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, vol. 45, no. 2, pp. 168–172.
19. Dolganina N.Y., Ignatova A.V., Shabley A.A., Sapozhnikov S.B. Ballistic resistance modeling of aramid fabric with surface treatment. *Communications in Computer and Information Science*, 2019, vol. 965, pp. 185–194.
20. Sapozhnikov S.B., Semashko M.Y. Designing the Structure of a Pressure Vessel Wall Made of a Layered Composite Material with Nonproportional Changes in Stress Components. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, vol. 54 (5), pp. 567–576.
21. Cherniavsky A.O., Shatov M.M. [A Method of Assigning a Limit Probability of Failure]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, vol. 42 (1), pp. 41–44.

Регалии и персоналии

22. Frolov K.V. *Bezopasnost' Rossii. Osnovy analiza i regulirovaniya bezopasnosti*. [Security of Russia. Basics of Security Analysis and Regulation]. Moscow, MGF "Knowledge", 2006. 639 p.

23. Frolov K.V. *Bezopasnost' Rossii. Bezopasnost' grazhdanskogo i oboronnoogo kompleksov i upravleniye riskami*. [Security of Russia. Security of Civil and Defense Complexes and Risk Management]. Moscow, MGF "Knowledge", 2006. 751 p.

24. Frolov K.V. *Bezopasnost' Rossii. Prikladnyye voprosy analiza riskov kriticheski vazhnykh ob"yektov* [Security of Russia. Applied Questions of Risk Analysis of Critical Facilities]. Moscow, MGF "Knowledge", 2007. 815 p.

25. Frolov K.V. *Bezopasnost' Rossii. Nauchno-metodicheskaya baza analiza riska i bezopasnosti* [Security of Russia. Scientific and Methodological Base of Risk and Safety Analysis]. Moscow, MGF "Knowledge", 2007. 857 p.

26. Makhutov N.A. *Bezopasnost' Rossii. Upravleniye resursom ekspluatatsii vysokoriskovykh ob"yektov* [Security of Russia. Resource Management of High-Risk Facilities]. Moscow, MGOF "Knowledge", 2015. 600 p.

27. Makhutov N.A. *Bezopasnost' Rossii. Nauchnyye osnovy tekhnogennoy bezopasnosti* [Security of Russia. Scientific Basis of Technological Safety]. Moscow, MGOF "Knowledge", 2015. 936 p.

Received 21 February 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Чернявский, О.Ф. Результаты и перспективы работы челябинской научной школы прочнистов / О.Ф. Чернявский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 75–86. DOI: 10.14529/engin190207

FOR CITATION

Chernyavsky O.F. Chelyabinsk Scientific School of Strength Engineers: Results and Prospects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 75–86. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190207
