

Расчет и конструирование

УДК 539.3

ТЕОРИЯ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ (К 100-ЛЕТИЮ ЭТОГО РАЗДЕЛА МЕХАНИКИ И 50-ЛЕТИЮ ЕГО РАЗВИТИЯ В ЧПИ – ЧГТУ – ЮУРГУ)

О.Ф. Чернявский

Предложен обзор работ по приспособляемости конструкций, выполненных в России. Выделены основные отличия российской (прежде всего – челябинской) научной школы: дифференцированный подход к качественно различным процессам неупругого деформирования и эффективное практическое применение новых теоретических результатов. Приведен анализ ряда новых научных направлений механики малоциклового деформирования и разрушения, сформировавшихся на основе проведенных в ЮУрГУ исследований упругой и неупругой приспособляемости.

Ключевые слова: приспособляемость, прогрессирующее формоизменение, ползучесть, коробление, дилатационные воздействия.

Все нужное – просто, все сложное – не нужно.

И.А. Биргер

Теория приспособляемости – раздел механики деформируемых тел, посвященный стабильному деформированию и последующему разрушению конструкций при повторных малоцикловых внешних воздействиях. Поведение конструкции может считаться стабильным, когда влияние процессов упрочнения и разрушения примерно одинаково. На предшествующей и последующей стадиях работы преобладает какой-либо один из этих процессов: упрочнение при приработке и разупрочнение в условиях предразрушения. У большинства конструкций стабильная работа охватывает основную часть ресурса. Если же она непродолжительна, то знание ее параметров упрощает анализ. Стабилизация процесса циклического деформирования происходит в результате стабилизации деформационных свойств материала и конструкции, а также образования благоприятных остаточных напряжений на стадии приработки. Стабильное деформирование конструкции может быть упругим или неупругим (упругая или неупругая приспособляемость).

Обзорам состояния и истории теории приспособляемости до 1978 г. посвящено достаточно много работ [1–8]. Значительная часть исследований, выполненных в западной Европе до 2008 г., рассмотрена в книге [9]. В ближайшее время ожидается публикация основательного обзора одного из авторов этой книги профессора Д. Вейхерта (Аахен, Германия). Обзоры работ, опубликованных за последние 30 лет на русском языке, отсутствуют, а сами эти работы недостаточно известны специалистам в России и практически неизвестны в других странах. Поэтому данный обзор посвящен главным образом этим исследованиям. Он не претендует на полноту, рассматриваются лишь основные направления работ и возможности их практического применения.

Первый этап развития теории приспособляемости включал в себя создание общих теорем для определения тех предельных механических и тепловых воздействий, при которых стабильное циклическое деформирование идеально упруго-пластической конструкции является упругим (или неупругим). В основополагающих работах М. Казинчи (1914), Х. Блейха (1932), Е. Мелана (1936, 1938), Т. Койтера (1956), В. Прагера (1956, 1957) были сформулированы и доказаны соответствующие теоремы. Параллельно и независимо шло развитие теории предельного равновесия (А.А. Гвоздев, 1936, 1938) и математических методов решения неклассических вариационных задач (линейного, выпуклого и динамического программирования, математической теории оптимальных процессов). Лишь значительно позднее [7, 8] стало ясно, что основные теоремы о предельном равновесии и приспособляемости не требуют никаких специальных доказательств. Они

непосредственно следуют из общих соотношений теории пластичности в рамках задач определения максимальных или минимальных нагрузок, при которых процесс деформирования конструкции сохраняет заданные кинематические признаки. Упрощение системы ограничений вариационной задачи достигается при этом за счет исключения тех ограничений, которые не влияют на результат решения.

Общие теоремы о существовании стабильных циклов упругого и неупругого деформирования конструкций и единственности напряжений в них были сформулированы и доказаны в работе Фредерика и Армстронга [10]. Оригинальные красивые доказательства базировались только на двух предположениях: выполнении постулата Друкера (устойчивости процессов пластического деформирования и ползучести) и циклической стабильности деформационных свойств материала и конструкции. Кроме теорем существования и единственности в [10] было показано, что асимптотический процесс стабилизации является экспоненциальным. Отсюда был сделан вывод, что для получения характеристик стабильного цикла достаточно рассчитать несколько первых циклов при любом начальном состоянии конструкции. Последующая практика расчетов показала [8], что этот вывод справедлив лишь для ограниченного круга задач, главным образом – локального знакопеременного течения без ползучести. Показатели экспоненциального закона стабилизации меняются в процессе деформирования. При наличии медленного дрейфа границ пластических зон число циклов до практической стабилизации может не быть малым даже при малых различиях соседних циклов. Кроме того, деформационные свойства материала могут меняться в процессе стабилизации, что также влияет на его длительность.

По-видимому, до 1960 г. теория приспособляемости не находила практических применений. Известен ряд попыток расчетов на приспособляемость строительных конструкций с учетом повторных ветровых и снеговых нагрузок, но ни одна из них не привела к значимым практическим результатам: отличие от расчетов по предельному равновесию при однократном нагружении не превышало нескольких процентов. Поводом, вызвавшим изменение ситуации, явилась проблема коробления кессонов шахтной плавильной печи на одном из уральских заводов [2]. Кессон (охлаждаемая водой прямоугольная оребренная коробка длиной около 5 метров) испытывал неравномерный нагрев при несущественных механических нагрузках.

Накопленные прогибы превышали 1 метр (рис. 1). Приглашенные для анализа сотрудники Южно-Уральского университета после осмотра оставили у печей лаборанта для фиксации всех изменений. Изменений не было, прогибы не росли. Через неделю главный инженер завода поблагодарил исследователей, сказав, что ему ясны причины формоизменения (по-видимому, в присутствии контролера технология не нарушалась). Но для специалистов – механиков остался совершенно неясным процесс накопления таких остаточных перемещений, которые при отсутствии механических нагрузок в сотни раз превышали свободное тепловое расширение конструкции.

Д.А. Гохфельд, заведующий кафедрой сопротивления материалов Южно-Уральского университета, занимавшийся ранее предельным равновесием конструкций, в частности – дисков газовых турбин, попытался найти объяснение этого явления с помощью теории приспособляемости. Основные теоремы этой теории были хорошо развиты, но методы расчетов практически отсутствовали. Расчет кессона, непростой даже сейчас – спустя 50 лет, был тогда недоступен. Чтобы понять механизм накопления перемещений, Д.А. Гохфельдом, положившим начало



Рис. 1. Кессон и его поперечное сечение

Расчет и конструирование

работам челябинской научной школы, был выполнен анализ деформирования простейшей стержневой системы [1, 2]. Он отчетливо показал возможность непрекращающегося (с ростом числа циклов) накопления остаточных перемещений даже при теплосменах без механических нагрузок. Необходимыми условиями такого процесса оказались неодновременность (неизохронность) пластического деформирования в разных точках конструкции и достаточно высокий уровень температурных напряжений. Неизменность приращений остаточных перемещений за цикл (повторяемость процесса, приводящая к накоплению больших остаточных перемещений) обеспечивалась при этом замкнутостью цикла изменения остаточных напряжений, т. е. совместностью приращений остаточных деформаций и перемещений за цикл. Эти выводы были проверены экспериментально на макете стержневой системы и затем подтверждены наблюдениями [2–4] многочисленных элементов металлургического оборудования – чаш шлаковозов, корпусов различных печей, установок для полунепрерывной разливки стали, колосников обжиговых машин и др. (рис. 2). Для металлургического оборудования характерны сравнительно низкие требования к стабильности геометрических характеристик, поэтому наблюдаемые изменения здесь были особенно отчетливыми. Наряду с существенными остаточными перемещениями нередко наблюдались трещины малоциклового усталости, также связанные с неизохронным (но знакопеременным) пластическим деформированием за пределами упругой приспособляемости.

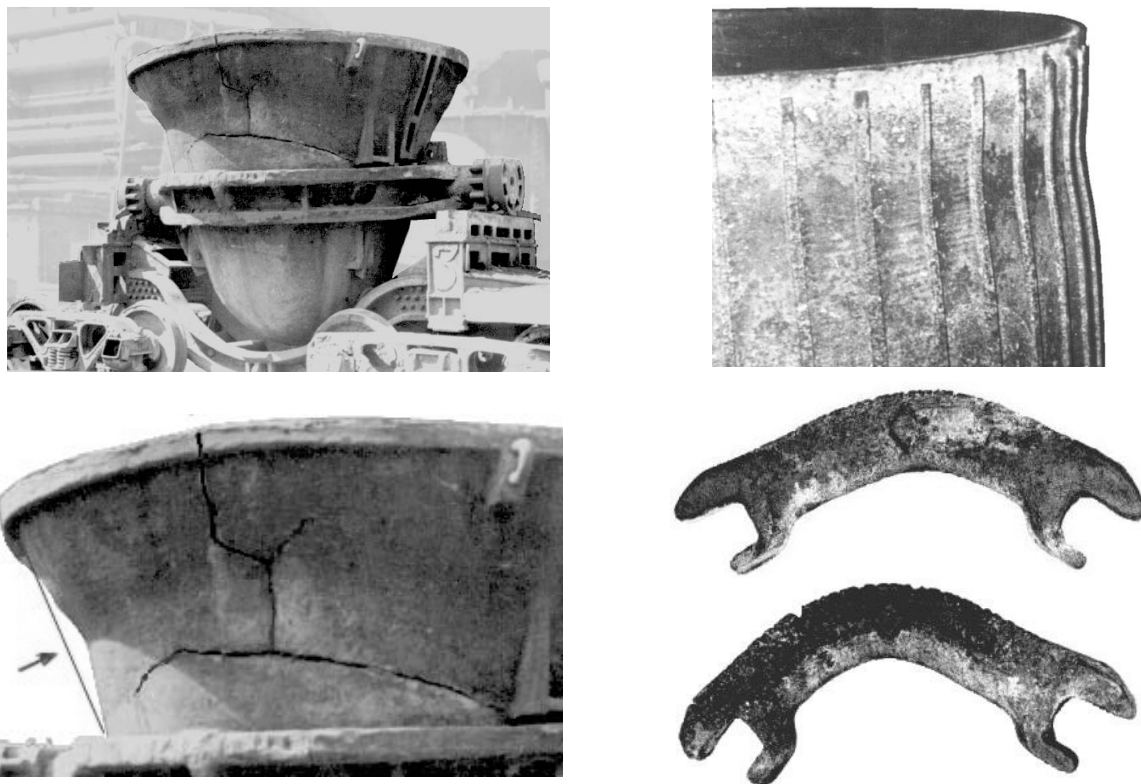


Рис. 2. Формоизменение металлургического оборудования

Эти исследования позволили обнаружить одну из перспективных областей инженерного использования теории приспособляемости: анализ не изучавшихся ранее процессов прогрессирующего с числом циклов накопления остаточных перемещений в условиях теплосмен. Вместе с тем эта теория оказалась полезной при определении условий реализации еще одного (уже широко изучавшегося ранее) предельного состояния конструкций – знакопеременного неупругого деформирования, приводящего к трещинам малоциклового усталости. Закономерности этих явлений были, естественно, общими как для тепловых, так и для механических воздействий, но накопление больших перемещений при термических воздействиях не удавалось понять и описать другими методами, в частности, упругопластическими расчетами однократного нагружения и расчетами по предельному равновесию. Однократное кинематическое нагружение не приводит к большим приращениям перемещений и не влияет на условия реализации предельного равновесия.

С другой стороны, практически значимые примеры прогрессирующего формоизменения при механических нагрузках и других внешних воздействиях еще не были обнаружены в этот период.

Выявление новых закономерностей стабильного малоциклового деформирования конструкций привело к необходимости существенного уточнения исходных данных для расчетов (условий работы конструкций, свойств материалов на нестационарных режимах) и методов расчетного анализа условий реализации упругой приспособляемости. Обзорам исследований свойств материалов при малоцикловых нагружениях посвящено множество работ. Отметим здесь лишь одно направление, непосредственно связанное с теорией приспособляемости. Известные модели Бесселинга, Мазинга, Афанасьева были развиты применительно к стабильному малоцикловому деформированию с ползучестью [11]; полученные при этом результаты позднее были обобщены в монографии [12] и инженерном справочнике [13], включавшем не только результаты испытаний материалов, но и параметры математических моделей. В этих работах стали и сплавы рассматривались как микронеоднородные конструкции, состоящие из элементов с идеальной пластичностью или ползучестью, т. е. по существу решалась задача анализа упругой и неупругой приспособляемости для отдельных микрообъемов. Дальнейшему развитию данного направления посвящены статьи [14–18]. Эти работы остались, по-видимому, недостаточно известными за пределами СССР и в современных пакетах МКЭ обычно используется аналогичная модель Шабоша, хуже согласующаяся с экспериментом.

Развитие расчетных методов решения задач упругой приспособляемости в СССР в 1965–1975 гг. базировалось на совершенствовании теоретической базы (отделении анализа изменений напряжений во времени от решения вариационной задачи, введения обобщенных переменных при расчетах тонкостенных конструкций) и использовании неклассических вариационных методов математического программирования и теории оптимальных процессов. Наряду с развитием методов расчета делались первые попытки анализа новых проблем – прогрессирующего коробления, контактных задач. Подробные обзоры этих работ приведены в [6, 7]. Принципиальным отличием работ школы Д.А. Гохфельда от других советских и западноевропейских исследований было и остается сейчас последовательное разделение анализа разных физических явлений: прогрессирующего формоизменения, знакопеременного течения и их комбинации. Именно оно позволило выполнить инженерный расчетный анализ прогрессирующего формоизменения [6, 7] многочисленных элементов металлургического оборудования, осевых и радиальных газовых турбин, лабораторных образцов, испытанных в условиях теплосмен (рис. 3) Итоги этого этапа развития подвел академик Ю.Н. Работнов. По его словам, «теория приспособляемости была раньше экзотической областью механики, которой занималось несколько чудаков. Теперь она стала самостоятельным равноправным разделом со своими приложениями, своими методами решения задач и своей теоретической базой» (из выступления на семинаре в МГУ). Хорошее соответствие расчетов и экспериментальных данных в сочетании с простым и понятным объяснением механизма накопления перемещений и его зависимости от ряда факторов доказали высокую практическую ценность теории приспособляемости и позволили перейти к более сложным и ответственным задачам обеспечения долговечности и безопасности энергетического оборудования.



Рис. 3. Лабораторные образцы после термоциклирования без механической нагрузки
(все температуры ниже 500 °С)

Создание электростанций с высокотемпературными атомными реакторами на быстрых нейтронах (БН-600 – третья очередь Белоярской электростанции, БН-800) потребовало детального анализа прогрессирующего формоизменения при теплосменах. В этих аппаратах реализовано эффективное техническое решение: в зоне высоких температур практически нет механических нагрузок, они действуют лишь там, где температуры близки к нормальным. При этом требования к стабильности размеров в горячей зоне достаточно велики – в отличие от металлургического оборудования. Традиционные представления и навыки инженеров, связанные с механическими нагрузками, оказались здесь не только бесполезными, но порой даже вредными. Опыт анализа приспособляемости позволил прежде всего выделить потенциально опасные элементы конструкции. Ими оказались детали, находящиеся в зоне подвижного уровня теплоносителя – натрия. Расчетным и экспериментальным исследованиям накопления остаточных перемещений в таких условиях был посвящен ряд работ [19–31]. Системное использование их результатов, основанное на понимании механизмов процессов, влияния различных факторов и последствий конструктивных, схемных и режимных решений, сделало реакторы этой серии одними из самых надежных и безопасных в мире. Описание применявшихся в этот период методов расчета условий приспособляемости было изложено в межотраслевых методических рекомендациях Госстандарта СССР [32, 33] и Нормам расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, последнее издание которых [34] даже сейчас широко используется в машиностроении. Эти работы базировались на общей теории упругой приспособляемости, применимой для конструкций любых форм при любых термомеханических воздействиях. Аналогичный материал в американском коде того времени для сосудов давления базировался лишь на частном случае цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением при теплосменах с изменением температуры только по толщине. Применение этих результатов для других конструкций могло приводить к ошибкам не в запас прочности.

Опыт анализа приспособляемости металлургического и энергетического оборудования был распространен на элементы газотурбинных двигателей [2, 6, 7, 35–40].

Одной из наиболее сложных и до сих пор не полностью решенных проблем анализа стабильного малоциклового деформирования конструкций является учет ползучести. В условиях знакопеременного течения необходимо учитывать возможность сильного взаимного влияния процессов кратковременного и длительного деформирования: значительное увеличение скоростей ползучести после пластической деформации другого знака, влияние циклического упрочнения и разупрочнения [12, 13]. В условиях прогрессирующего формоизменения свойства материала и роль ползучести оказываются совершенно другими, чем при знакопеременном течении. Варианты учета различных сторон этих явлений в задачах приспособляемости рассматривались в работах [6, 7, 8, 40–49]. Здесь при описании прогрессирующего формоизменения и знакопеременного течения – в отличие от работ английской школы (Понтера, Лекки, Уильямса) – принято, как и в родственной теории предельного равновесия, что реальные свойства материала характеризуются диаграммой деформирования в координатах напряжение – деформация. Эта диаграмма должна соответствовать реальным условиям работы конструкции: температуре, длительности, программе нагружения, среде, виду неупругого деформирования и т. д. С ошибкой, идущей в запас прочности, при прогрессирующем формоизменении можно принять в качестве такой диаграммы изохронную кривую ползучести. Она схематизируется в расчете диаграммой Прандтля и после этого используется обычная процедура расчета конструкции из идеально упругопластического материала. При таком подходе величина деформации ползучести не определяется (как и пластические деформации в классической задаче приспособляемости), но отчетливо выделяется роль ползучести в накоплении остаточных перемещений: в части конструкции накапливаются деформации ползучести на длительном стационарном режиме, а в другой части накапливаются пластические деформации на кратковременных переходных режимах. Повторяемость такого цикла обеспечивается совместностью приращений деформаций и перемещений за цикл. При этом прогрессирующее формоизменение оказывается возможным даже при однопараметрической нагрузке вследствие температурно-временной зависимости свойств материала [44].

При расчетах стабильного знакопеременного течения с ползучестью учет деформационного упрочнения материала обязателен при вычислении ширины петли гистерезиса, но при определении границы упругой приспособляемости оно оказывается, как правило, не столь существенным, влияя лишь на величину расчетного предела текучести. Влияние программы нагружения при

ползучести (различий ползучести и релаксации) также учитывается расчетным пределом текучести [8].

Предложенный метод учета ползучести в задачах приспособляемости обеспечил не только существенное уточнение оценок прочности при циклических воздействиях, но и информативные оценки роли переходных и стационарных режимов с возможностью обоснования, например, программ запуска и остановки теплонапряженных аппаратов [40]. В альтернативном методе, предложенном Понтером и соавторами, преимуществом является приближенная количественная оценка деформаций ползучести, но качественные особенности процесса менее отчетливы.

Носителями памяти конструкций об истории нагружения являются не только остаточные макронапряжения, но и трещины. В работах [50, 51] были сделаны первые попытки анализа благоприятной роли трещин в процессе адаптации конструкций к повторным механическим и тепловым воздействиям. В дальнейшем это привело к образованию самостоятельного направления исследований, связанного с сетками трещин (рис. 4) и специфическим (не рассматривавшемся ранее) предельным состоянием природных и техногенных объектов – прогрессирующим выкрашиванием поверхностного слоя [52]. Очевидно, что эта проблема актуальна прежде всего для конструкций из малопластичных материалов: конструкционных графитов, огнеупоров, инструментальных сталей и сплавов. Исследования приспособляемости конструкций обусловили значительный прогресс в изучении деформационных свойств и малоциклового усталости этих материалов [53]. С другой стороны, стал развиваться анализ кинетики специфического стабильного роста трещин при подвижных тепловых воздействиях [54]. В таких условиях скорости роста трещин могут в сотни раз превышать предсказанные формулой Пэриса. Искусственное создание определенной сетки трещин (надрезов) может приводить к прекращению роста трещин, упругой приспособляемости и значительному увеличению долговечности конструкции [52].



Рис. 4. Сетка трещин на поверхности изложницы

Ряд исследований упругой приспособляемости в СССР после 1975 года был посвящен оценке перемещений, накопленных на стадии приработки при образовании остаточных напряжений, обеспечивающих приспособляемость [55–57]. Не удалось найти примеров больших накопленных деформаций или перемещений, которые следовало бы учитывать при расчете ресурса. Однако не удалось и доказать, что их не может быть.

Другая группа работ была посвящена развитию строгих математических методов определения границ упругой приспособляемости применительно, главным образом, к задачам оптимального проектирования [58, 59]. Оптимизация температурных воздействий рассматривалась в работе [60]. В многофакторных реальных задачах возможности оптимального проектирования ограничиваются чаще недостаточностью исходных данных, но встречаются задачи, в которых даже небольшое ограниченное улучшение конструкции при массовом производстве оказывается полезным.

Небольшое число работ было посвящено стохастическим задачам [61]. Роль этих задач существенно возрастает в связи с ростом требований к обеспечению безопасности [62] и выявлением случаев малоциклового разрушения металлургического и энергетического оборудования при повторяющихся случайных воздействиях. Можно отметить, что в последующих работах западноевропейских исследователей это направление развивалось значительно активнее, чем в России [9].

Прогрессирующее формоизменение при действии только механических нагрузок оказалось одним из важных факторов, определяющих работоспособность элементов конструкций при подвижном контакте качения, в частности, железнодорожных рельсов и колес [7, 8, 63]. В рельсах оно проявляется в виде прогрессирующего сдвига тонкого поверхностного слоя в направлении движения с последующим дроблением этого слоя [63]. Такой механизм износа не рассматривался

раньше. В колесах локомотивов формоизменение проявляется в виде выдавливания металла перпендикулярно плоскости колеса и соответствующего уменьшения радиуса. В работах американских инженеров ранее рассматривалось прогрессирующее формоизменение покрытий автомобильных дорог, где механизм разрушения иной.

Развитие практических приложений теории приспособляемости невозможно без программных средств, реализующих метод конечных элементов. Эти средства должны быть совместимы с популярными пакетами для расчетов условных упругих напряжений и кинетики неупругого деформирования. В задачах расчета условий реализации знакопеременного течения эта проблема была решена для общего случая сложного напряженного состояния в работах [64–66]. Предложенная здесь процедура решения неклассической вариационной задачи не только совместима с существующими пакетами МКЭ, но и позволяет обнаружить те ситуации, в которых знакопеременное течение реализуется при размахе напряжений, существенно меньшем, чем два предела текучести. В таких случаях разработанная программа [64] исправляет идущие не в запас прочности ошибки существующих расчетных кодов (нормативных материалов).

Первые работы по применению МКЭ в задачах предельного равновесия, аналогичных задачам прогрессирующего формоизменения, были выполнены еще в середине шестидесятых годов [67]. Общие схемы расчета условий реализации прогрессирующего формоизменения (границы упругой приспособляемости и формоизменения) рассматривались в [68–70]. Однако коммерческие программы, совместимые с популярными пакетами МКЭ или встроенные в них, не были пока предложены российскими авторами. Для сравнения отметим, что в ряде работ итальянских, французских, немецких, английских исследователей [9] вычислительные и программные аспекты проблемы проработаны в последнее время значительно полнее, но недостаточное внимание к физической стороне задач (дифференциации анализа качественно различных процессов деформирования) в свою очередь ограничило практическую значимость результатов.

Дальнейшее развитие практических приложений анализа приспособляемости потребовало существенного расширения теоретической базы. Направления работ российских и зарубежных механиков оказались при этом заметно разными. Наибольшее внимание в зарубежных работах уделялось в последние десятилетия упругой приспособляемости конструкций из специфических материалов с неклассическими законами пластического деформирования (композитных, пористых и др.), геометрически нелинейным и контактным задачам, вычислительным методам анализа упругой приспособляемости [9]. Работы российских авторов были направлены на создание теории неупругой приспособляемости, анализ процессов малоциклового деформирования при дилатационных воздействиях активных сред (водорода, сероводорода и др.), анализ работы конструкций с переменной структурой и развитие новых технологических приложений теории (формоизменения и упрочнения деталей при их изготовлении и ремонте).

Использование водорода в энергетике и технологиях, природного газа с сернистыми и другими соединениями стимулировало обобщение теории на любые дилатационные воздействия и исследования свойств материалов при циклических воздействиях активных сред. Переход от обеспечения прочности к связанным технико-социально-экономическим задачам обеспечения безопасности и оценок риска, а также создание более нагруженных конструкций потребовали выхода за пределы упругой приспособляемости с решением трех групп новых задач: прямого (без прослеживания всей истории) расчета кинетики стабильного неупругого деформирования при заданных внешних воздействиях, расчета границ трех качественно различных процессов такого деформирования (знакопеременного течения, прогрессирующего формоизменения и их комбинации) и исследования деформационных и прочностных свойств материалов при комбинированном неупругом деформировании. Существенно возросла при этом роль анализа устойчивости процессов малоциклового неупругого деформирования, в том числе – прогрессирующего коробления конструкций. Возникла и быстро расширяется потребность в анализе упругой и неупругой приспособляемости конструкций с переменной структурой (появлением и исчезновением в каждом цикле некоторых твердых деформируемых элементов конструкции),

Теория неупругой приспособляемости базируется на теоремах о существовании и единственности стабильных циклов деформирования конструкций [10]. Ее начальному развитию была посвящена одна из глав книги [7]. Дальнейшее развитие этой теории базируется на популярном варианте теории пластичности с дополнительными напряжениями [8]. Этот вариант позволяет учитывать как трансляционное, так и изотропное упрочнение материала. Задача прямого расчета

кинетики стабильного деформирования конструкции может быть сформулирована в виде неклассической вариационной задачи, если одно из соотношений в описании замкнутого (стабильного) процесса деформирования заменить требованием минимизации специально подобранного функционала. Один из вариантов такого подхода рассматривался в работах [71–78]. Недостатком формулировки задачи является при этом необходимость одновременного рассмотрения в расчете ряда моментов времени цикла. Однако, как и в большинстве вариационных методов, погрешность определения интегральных характеристик (приращений и размахов неупругих деформаций за цикл) оказывается небольшой даже при больших ошибках локальных характеристик – скоростей деформаций. В итоге расчет не требует анализа большого числа моментов времени и может конкурировать с пошаговыми методами, особенно при медленной стабилизации поведения конструкции.

Другой вариант расчета кинетики деформирования в стабильных циклах рассматривался с использованием структурной модели среды [14].

Для определения условий реализации процессов циклического неупругого деформирования разных типов предложены новые теоремы [8, 78], аналогичные теоремам Мелана и Койтера. Как и теоремы об упругой приспособляемости, они могут быть получены из общей вариационной формулировки задачи расчета процесса с заданными кинематическими признаками, если из системы ограничений задачи исключить соотношения, не влияющие на результат расчета. Нижние границы областей реализации знакопеременного течения и прогрессирующего формоизменения соответствуют упругой приспособляемости и определяются теоремами Мелана и Койтера. Верхние границы этих областей соответствуют началу комбинированного неупругого деформирования, при котором отличны от нуля как приращения, так и амплитуды неупругих деформаций. Общие теоремы для их определения отличаются от теорем Мелана и Койтера только использованием напряжений в предшествующих областях деформирования вместо условно упругих, т. е. учетом переменных остаточных напряжений, обусловленных развитым знакопеременным течением или прогрессирующим формоизменением. Все неклассические вариационные задачи, рассмотренные в [7, 8, 71–78], не накладывают ограничений на характер внешних воздействий и позволяют учитывать влияние водородных, нейтронных и других сред.

Необходимые для анализа неупругой приспособляемости деформационные свойства материалов с учетом взаимного влияния циклических и статических повреждений практически не изучались раньше. Их экспериментальному определению и схематизации посвящены работы [79–84]. Результаты определения деформационных свойств материалов при циклических нагружениях в среде водорода рассматривались в работах [85–87].

Исследования приспособляемости конструкций в условиях дилатационных воздействий среды [87–91] были инициированы эксплуатацией установок для производства особо чистого водорода. Основной рабочий элемент этих установок – палладиевые мембраны в виде длинных капилляров, запаянных с одной стороны, а с другой присоединенных к ресиверу для сбора водорода. Водород из любой содержащей его среды проникает в капилляр, другие атомы остаются снаружи. После достаточно длительной наработки чистота производимого водорода в некоторых установках начинала падать. Анализ приспособляемости мембраны позволил выявить причину этого явления. Ею оказались трещины малоциклового усталости вблизи запаянного конца капилляра. Напряжения, вызывавшие их образование, являлись следствием неоднородного изменения объема металла при проникновении водорода в его кристаллическую решетку. При пусках и остановках диаметр тонкой стенки оболочки менялся значительно быстрее, чем диаметр сравнительно массивной пайки. Удельное увеличение объема вследствие водородной дилатации доходило в реальных условиях эксплуатации установки до 1,5 % (теоретический предел гораздо выше), а обусловленные им напряжения примерно в 100 раз превышали напряжения от давления среды и перепадов температуры [87, 89]. Механизм разрушения, вызванного самоуравновешенными водородными напряжениями, не отличался от изученных в теории приспособляемости механизмов циклического действия температурных напряжений. Для ликвидации дефектов здесь оказалось достаточно исключить пайку и сделать капилляр U-образным. Отметим, что в других металлах диффузия водорода может приводить не к увеличению, а к уменьшению объема, количественно значительно большему, чем у палладия.

Проблема неустойчивости процессов малоциклового неупругого деформирования привлекала внимание исследователей по крайней мере еще с середины пятидесятых годов [2]. В амери-

Расчет и конструирование

канском коде для сосудов давления уже в начале шестидесятых годов было включено ограничение на размеры зоны знакопеременного течения, предупреждавшее коробление оболочек. Ряд типичных примеров последствий неустойчивости циклического деформирования при теплосменах иллюстрирует рис. 5. Попытки решения проблемы на примере стержня [2, 7] указали на значительную роль неизохронности неупругого деформирования. Некоторое развитие эти работы получили в [66, 92, 93]. В большинстве случаев прогрессирующее коробление конструкций связано с комбинацией знакопеременного течения и прогрессирующего формоизменения. Общие теоремы о неупругой приспособляемости [8], как и теоремы Мелана и Койтера, не накладывают каких-либо ограничений на распределение приращений перемещений за цикл, оно может быть, например, несимметричным при симметричных внешних воздействиях. Таким образом, теоремы дают возможность определять условия начала прогрессирующего коробления. Более полное решение должно учитывать роль начальных и приобретенных при упругом деформировании несовершенств и энергетические характеристики бесчисленного множества возможных закритических продолжений процесса.

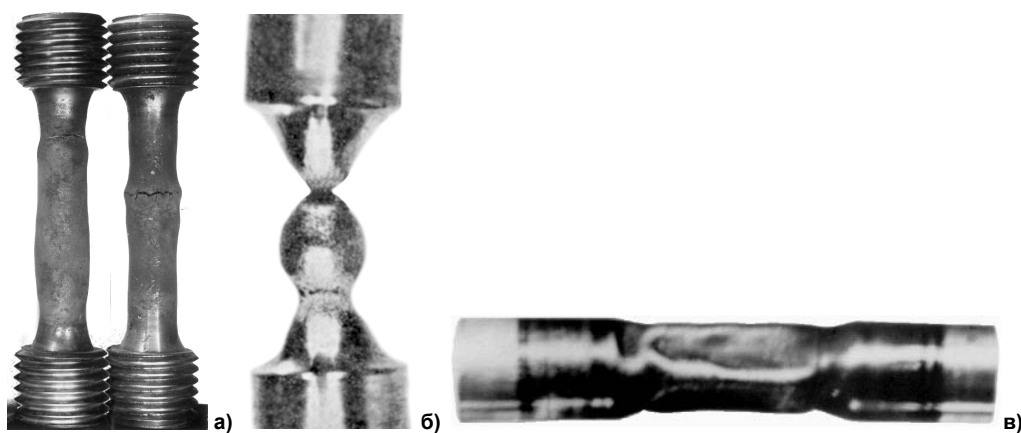


Рис. 5. Лабораторные образцы после термоциклирования: а, б – трубка и стержень с заделанными концами (образцы Коффина); в – труба после циклических проходов осесимметричной тепловой волны

В последнее время привлекают интерес задачи упругой и неупругой приспособляемости конструкций с переменной структурой. Одним из типичных примеров могут служить лебедки рыболовецких судов [94]. На цилиндрическую трубу (барабан лебедки) наматывается с большим натяжением до нескольких километров троса. Давление намотанных слоев приводит к пластическому уменьшению диаметра и увеличению длины барабана, но с уменьшением диаметра давление падает и накопленные за один цикл перемещения оказываются небольшими. Разматывание троса приводит к снятию благоприятных остаточных напряжений в системе и следующий цикл повторяет предыдущий. В итоге длина барабана возрастает настолько, что он упирается в соседние конструкции. Расчет параметров этого механизма разрушения [94] позволил выявить конструктивные и эксплуатационные меры, исключаяющие необходимость частых ремонтов лебедок и обеспечивающие надежный прогноз межремонтных периодов.

В заключение можно отметить, что наряду с обеспечением прочности и безопасности накопленный опыт анализа приспособляемости позволяет создавать ряд новых эффективных технологических процессов изготовления, упрочнения и ремонта конструкций. Уже первые работы по формоизменению при теплосменах [2] привели к созданию новых технологий равномерного уменьшения диаметра труб и образования кольцевых, спиральных и других гофров без использования механических нагрузок. В дальнейшем развитие этих способов фиксировалось как изобретения в государственном реестре изобретений СССР в 1981, 1987, 1989 и 1991 гг. Технологическим приложениям теории приспособляемости в задачах формоизменения, управления остаточными напряжениями, увеличения ресурса посвящены работы [95–98] и часть книги [48]. Тем не менее, необходимо отметить, что потенциальные возможности теории приспособляемости в создании новых технологий использованы пока недостаточно.

Литература

1. Гохфельд, Д.А. О возможности нарастания пластических деформаций в результате циклических температурных воздействий / Д.А. Гохфельд // *Расчеты на прочность: сб.* – М.: Машигиз, 1961. – Вып. 7.
2. Гохфельд, Д.А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен / Д.А. Гохфельд. – М.: Машиностроение, 1970. – 259 с.
3. Гохфельд, Д.А. Теория приспособляемости и накопление деформаций при теплосменах / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский // *Материалы Всесоюз. симп. по малоцикловой усталости при повышенных температурах.* – Челябинск, 1974. – Вып. 3. – С. 3–31.
4. Проблемы прочности термонапряженных конструкций / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, К.М. Кононов, О.С. Садаков. – М.: ВИНТИ, 1978. – Т. 12. – 194 с.
5. Гохфельд, Д.А. Приспособляемость упруго-пластических конструкций // *Проблемы теории пластичности и ползучести* / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский. – М.: Мир, 1979. – С. 7–53.
6. Гохфельд, Д.А. Несущая способность конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
7. Gokhfeld, D.A. Limit analysis of structures at thermal cycling / D.A. Gokhfeld, O.F. Cherniavsky. – *Alphen aan den Rijn (Netherlands); Rockville (USA): Sijthoff and Noordhoff. Int. Publ.*, 1980. – 577 с.
8. Малоцикловое деформирование и разрушение конструкций / А.О. Чернявский, О.Ф. Чернявский, А.В. Абрамов и др. // *Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал» № 11(176).* – М.: ООО «Издательский дом «Спектр», 2011. – 32 с.
9. Limit states of materials and structures. Direct methods / D. Weichert, A. Ponter (eds.). – Berlin; Heidelberg: Springer Science + Business Media, 2009. – 305 p.
10. Frederic, C.O. Convergent internal stress and steady cyclic states of stress / C.O. Frederic, P.J. Armstrong // *J. Strain Anal.* – 1966. – № 2.
11. Иванов, И.А. Построение модели конструкционного материала для описания особенностей его поведения при повышенной температуре / И.А. Иванов, О.С. Садаков // *Вопросы прочности и динамики конструкций: сб. науч. тр. ЧПИ.* – Челябинск, 1971. – № 92. – С. 13–22.
12. Гохфельд, Д.А. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.С. Садаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.
13. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справ. / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.
14. Related mathematical models for solids and structures deformation and failure processes under repeated loading / D.A. Gokhfeld, O.S. Sadakov, O.F. Cherniavsky // *Inelastic behavior of structures under variable loads.* – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publ., 1995. – С. 51–81.
15. Gokhfeld, D.A. Steady cyclic state of a structure: methods of its direct determination / D.A. Gokhfeld, O.S. Sadakov // *Inelastic behavior of structures under variable loads.* – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publ., 1995. – С. 449–461.
16. Гохфельд, Д.А. Семейство структурных моделей для описания деформирования и разрушения материалов различного типа / Д.А. Гохфельд, О.С. Садаков // *Динамика, прочность и износостойкость машин.* – 1995. – Вып. 1. – С. 9–15.
17. Садаков, О.С. Концепция микронеоднородности в реологии конструкций / О.С. Садаков, Д.А. Гохфельд // *Динамика, прочность и износостойкость машин.* – 1995. – Вып. 1. – С. 16–21.
18. Гохфельд, Д.А. Модификация деформационной теории. Принцип подобия при непропорциональном нагружении / Д.А. Гохфельд, О.С. Садаков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение».* – 2001. – № 6. – С. 16–21.
19. Гохфельд, Д.А. Накопление деформаций в оболочке в условиях теплосмен при несущей механической нагрузке / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, И.М. Плагов // *Теория оболочек и пластин: тр. IX Всесоюз. конф.* – Л.: Судостроение, 1975. – С. 312–315.
20. Гохфельд, Д.А. Приспособляемость перфорированных пластин / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, В.М. Кононов // *Труды X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин.* – Тбилиси: Мецниереба, 1975. – Т. 1. – С. 356–363.
21. Гохфельд, Д.А. Прогрессирующее разрушение оболочек / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский // *Пространственные конструкции зданий и сооружений.* – М.: Стройиздат, 1975. – Вып. 2. – С. 15–19.

22. Гохфельд, Д.А. Прогрессирующее формоизменение цилиндрических оболочек при циклических изменениях уровня теплоносителя / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, Э.Ф. Черняев // *Тепловые напряжения в элементах конструкций*. – Киев: Наукова думка, 1976. – Вып. 16. – С. 94–97.

23. Gokhfeld, D.A. On the steady cyclic stress analysis for elastic-plastic structures subjected to repeated actions of load and temperature / D.A. Gokhfeld, O.F. Cherniavsky // *Trans. of the 4th Intern. conf. of structural mechanics in reactor technology*. – Amsterdam; San-Francisco, 1977. – Vol. L. – С. 1–11.

24. Чернявский, О.Ф. Определение условий приспособляемости круглых перфорированных пластин при циклических механических и тепловых воздействиях / О.Ф. Чернявский, В.М. Кононов // *Тепловые напряжения в элементах конструкций*. – Киев: Наукова думка, 1977. – Вып. 17. – С. 53–57.

25. Чернявский, О.Ф. Прогрессирующее пластическое разрушение цилиндрических оболочек при различных скоростях погружения в жидкий теплоноситель / О.Ф. Чернявский, Э.Ф. Черняев, Ю.П. Амелькович // *Динамика и прочность конструкций: темат. сб. науч. тр. ЧПИ*. – Челябинск: ЧПИ, 1977. – № 201. – С. 15–21.

26. Кононов, Н.М. Прогрессирующее формоизменение перфорированных цилиндрических оболочек при действии подвижных температурных полей / Н.М. Кононов, А.В. Ильин, О.Ф. Чернявский // *Динамика и прочность конструкций: темат. сб. науч. тр. ЧПИ*. – Челябинск: ЧПИ, 1977. – № 201. – С. 9–15.

27. Гохфельд, Д.А. Накопление деформаций в перфорированных оболочках при повторных тепловых воздействиях / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, В.М. Кононов // *Труды XII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин*. – Ереван: Изд-во Ереван. ун-та, 1980. – Т. 2.

28. Анализ условий прогрессирующего формоизменения конструктивных элементов реакторов типа БН / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, Ю.П. Амелькович и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика и техника ядерных реакторов»*. – М.: Госкомитет по использованию атомной энергии. НИКИЭТ, 1982. – Вып. 6 (28). – С. 29–33.

29. Чернявский, О.Ф. Экспериментальное исследование прогрессирующего формоизменения и приспособляемости тонкостенных цилиндрических оболочек при теплосменах / О.Ф. Чернявский, А.В. Ильин, В.М. Кононов // *Проблемы прочности*. – 1983. – № 4. – С. 29–32.

30. Анализ условий реализации прогрессирующего разрушения внутрикорпусных элементов реактора / О.Ф. Чернявский, Д.А. Гохфельд, Ю.Н. Татарский, В.В. Жуков // *Прикладные проблемы прочности и пластичности: всесоюз. межвуз. сб.* – Горький: ГГУ, 1983. – С. 20–26.

31. Анализ прогрессирующего формоизменения элементов АЭС при повторных тепловых воздействиях / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, М.И. Егоров, Б.И. Денисов // *Машиноведение*. – 1984. – № 2. – С. 115–118.

32. Гохфельд, Д.А. Расчеты и испытания на прочность. Расчетные методы определения несущей способности и долговечности элементов машин и конструкций. Методы и алгоритмы расчета на приспособляемость и формоизменение. Ч. I: МР 38–82 / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, О.А. Шатская. – М.: Госстандарт СССР. ВНИИНМАШ, 1982. – 109 с.

33. Гохфельд, Д.А. Расчеты и испытания на прочность. Расчетные методы определения несущей способности и долговечности элементов машин и конструкций. Методы и алгоритмы расчета на приспособляемость и формоизменение. Диаграммы приспособляемости для типовых расчетных схем. Ч. II: МР 62–82 / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, О.А. Шатская. – М.: Госстандарт СССР. ВНИИНМАШ, 1982. – 72 с.

34. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

35. Гохфельд, Д.А. К расчету на прочность газовых турбин, работающих при многократных пусках / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский // *Вопросы прочности машиностроительных конструкций: сб. науч. тр. ЧПИ*. – Челябинск, 1968. – № 45. – С. 29–42.

36. Анализ переходных режимов и их влияние на прочность дисков осевых газовых турбин / Д.А. Гохфельд, И.Д. Никитина, О.Ф. Чернявский, Э.Ф. Черняев // *АН СССР. Комиссия по прочности двигателей. Научно-техническое совещание по проблемам прочности двигателей*, 1972. – С. 17–19.

37. Методы расчета термоциклической прочности дисков ГТУ / Л.Б. Гецов, О.Ф. Чернявский, Э.Ф. Черняев и др. // *Проблемы прочности*. – 1980. – № 9.

38. Прогрессирующее накопление деформаций в зонах концентрации напряжений дисков осевых газовых турбин / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, Э.Ф. Черняев и др. // Проблемы прочности. – 1982. – № 8. – С. 102–106.

39. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Расчетная оценка прочности дисков газовых турбин при наличии термоциклических нагрузок. Ч. 1: Методика расчетного определения запасов прочности дисков газовых турбин при термоциклических нагрузках: метод. рекомендации / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, О.Ф. Чернявский и др. – М.: Госстандарт СССР, 1985. – 106 с.

40. Гецов, Л.Б. Приспособляемость дисков судовых ГТД / Л.Б. Гецов, О.Ф. Чернявский, Д.А. Гохфельд // Науч.-техн. ведомости СПбГТУ. – 2003. – № 3 (33). – С. 177–182.

41. Анализ процесса прогрессирующего накопления односторонних деформаций при циклических тепловых воздействиях в условиях ползучести / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский, В.Н. Мадунин, О.С. Садаков // Проблемы прочности. – 1980. – № 9. – С. 8–12.

42. Чернявский, О.Ф. Приспособляемость высокотемпературных конструкций: теория, методы расчетов, приложения / О.Ф. Чернявский // Механика и прочность авиационных конструкций. Российская научно-техническая конференция: сб. докл. – Уфа: УГАТУ – УНЦ РАН, 2001. – С. 254–260.

43. Чернявский, О.Ф. Приспособляемость конструкций в условиях ползучести / О.Ф. Чернявский // Динамика, прочность и износостойкость машин. – 2001. – № 8. – С. 43–56.

44. Чернявский, О.Ф. Прогрессирующее накопление деформаций при малоцикловом действии однопараметрических тепловых напряжений / О.Ф. Чернявский // Динамика, прочность и износостойкость машин. – 2001. – № 8. – С. 37–42.

45. Чернявский, О.Ф. Приспособляемость и прогрессирующее формоизменение круглых пластин при термоциклировании / О.Ф. Чернявский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2001. – Вып. 1. – № 6. – С. 22–25.

46. Чернявский, О.Ф. Анализ предельных состояний конструкций в условиях интенсивной ползучести при малоцикловом нагружении / О.Ф. Чернявский // Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники. Раздел «Механика в машино- и приборостроении»: сб. тр. – М.: МГТУ, 2001.

47. Чернявский, О.Ф. Анализ предельных неупругих состояний конструкций при малоцикловом нагружении / О.Ф. Чернявский // Сборник трудов 2-й Конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM. – М., 2002. – С. 294–296.

48. Научные основы повышения малоциклового сопротивления / Н.А. Махутов, К.В. Фролов, М.М. Гаденин и др. – М.: Наука, 2006. – 623 с.

49. Чернявский, А.О. Механизмы разрушения элементов конструкций при теплосменах и условия их реализации / А.О. Чернявский, О.Ф. Чернявский // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 6. – С. 16–22.

50. Чернявский, О.Ф. Приспособляемость тел с трещинами / О.Ф. Чернявский, В.М. Кононов // IV Всесоюзный симпозиум «Малоцикловая усталость, механика разрушения, живучесть и материалоемкость конструкций»: тез. докл. и сообщ. – Краснодар; М.: АН СССР, 1983. – Вып. 1. – С. 63–65.

51. Чернявский, О.Ф. Приспособляемость тел с трещинами / О.Ф. Чернявский // I Конференция по механике Академий наук социалистических стран: сб. докл. – Прага; Братислава: АН ЧССР, 1987. – Т. IV. – С. 18–21.

52. Чернявский, А.О. Сетки трещин в конструкциях и природных объектах / А.О. Чернявский. – М.: Машиностроение, 2010. – 103 с.

53. Чернявский, А.О. Прочность графитовых материалов и конструкций при малоцикловом нагружении / А.О. Чернявский. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. – 147 с.

54. Данилов, В.Л. Развитие трещин под воздействием подвижных температурных полей / В.Л. Данилов, Д.А. Терешин, О.Ф. Чернявский // Динамика, прочность и износостойкость машин. – 1998. – № 4. – С. 68–72.

55. Икрин, В.А. Верхняя оценка деформаций, накопленных в процессе приспособляемости балок и плоских рам / В.А. Икрин // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – № 3. – С. 31–34.

56. Аткочюнас, Ю.Ю. Оценка прогибов в стадии приспособляемости / Ю.Ю. Аткочюнас // Инженерные вопросы прикладной механики. – Вильнюс, 1981. – С. 77–78.

57. Любаров, Б.И. Определение деформаций в балках в состоянии приспособляемости при подвижных и повторно-переменных нагрузках / Б.И. Любаров, И.Р. Довгард, И.К. Шабловская // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 1977. – № 5. – С. 39–42.
58. Почтман, Ю.М. Расчет и оптимальное проектирование конструкций с учетом приспособляемости / Ю.М. Почтман, З.И. Пятигорский. – М.: Наука, 1978. – 208 с.
59. Чирас, А.А. Математические модели анализа и оптимизации упругопластических систем / А.А. Чирас. – Вильнюс: Мокслас, 1982. – 112 с.
60. Оптимальное управление нестационарными тепловыми процессами в условиях приспособляемости / О.Ф. Чернявский, Ю.П. Амелькович, А.Р. Беляков, Э.Ф. Черняев // *Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузениях: сб. науч. тр. ЧПИ*. – Челябинск: ЧПИ, 1979. – № 236. – С. 16–25.
61. Stochastic shakedown problems for structures subjected to thermal stresses / O.F. Cherniavsky, D.A. Gokhfeld, A.V. Khudiakov, I.M. Plagov // *5th Intern. conference on thermal stresses*. – Rochester (USA), 1997.
62. Чернявский, О.Ф. Проблемы и перспективы расчетных оценок безопасности при малоцикловом деформировании конструкций / О.Ф. Чернявский, А.О. Чернявский // *Безопасность критических инфраструктур и территорий: материалы III Всерос. науч.-техн. конф.* – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 79–81.
63. Кузнецова, Н.Б. Кинетика накопления деформаций и повреждений при циклическом контакте качения / Н.Б. Кузнецова, А.О. Чернявский // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2009. – № 1. – С. 99–103.
64. Чернявский, О.Ф. Расчет на приспособляемость / О.Ф. Чернявский, А.О. Чернявский // *Компьютерные учебные программы и инновации*. – М.: Изд-во отраслевого фонда и программ ФГНУ «Государственный координационный центр информационных технологий» Федерального агентства по образованию, 2007. – № 2. – С. 7–12.
65. Условия существования знакопеременного неупругого деформирования при малоцикловом нагружении / М.М. Гаденин, Н.А. Махутов, О.Ф. Чернявский, А.О. Чернявский // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2008. – № 5. – С. 53–63.
66. Процессы малоциклового деформирования конструкций АЭС и методы их расчета / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, О.Ф. Чернявский и др. // *Атомная энергия* – 2009. – Т. 107, вып. 3. – С. 136–142.
67. Ржаницын, А.Р. Расчет оболочек методом предельного равновесия при помощи линейного программирования / А.Р. Ржаницын // *Труды VI Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок*. – Баку; М.: Наука, 1966. – С. 656–665.
68. Чернявский, О.Ф. Анализ предельных состояний идеально-пластических тел методом конечных элементов / О.Ф. Чернявский // *Международная конференция «Снежинск и наука – 2003. Современные проблемы атомной науки и техники»: сб. науч. тр.* – Снежинск: СГФТА, 2003. – С. 86–87.
69. Чернявский, О.Ф. Метод конечных элементов в задачах предельного равновесия и приспособляемости пластин и оболочек / О.Ф. Чернявский // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Физика. Химия»*. – 2003. – Вып. 4. – № 8 (24). – С. 107–111.
70. Чернявский, О.Ф. Анализ предельных неупругих состояний конструкций при малоцикловом нагружении / О.Ф. Чернявский // *Проблемы прикладной механики, динамики и прочности машин*. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 44–59.
71. Чернявский, О.Ф. Анализ стабилизированных циклов напряжений в идеально упругопластических конструкциях / О.Ф. Чернявский // *Динамика и прочность конструкций: темат. сб. науч. тр. ЧПИ*. – Челябинск, 1977. – № 201. – С. 3–9.
72. Чернявский, О.Ф. Расчет стабильных циклов напряжений и скоростей деформаций в цилиндрических оболочках / О.Ф. Чернявский, Ю.П. Амелькович // *Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузениях: сб. науч. тр. ЧПИ*. – Челябинск: ЧПИ, 1979. – № 236. – С. 26–33.
73. Чернявский, О.Ф. Расчет стабилизированных циклов напряжений с использованием структурной модели среды / О.Ф. Чернявский // *Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузениях: сб. науч. тр. ЧПИ*. – Челябинск, 1979. – № 236. – С. 34–39.
74. Чернявский, О.Ф. Неупругое деформирование цилиндрических оболочек в условиях тепломен / О.Ф. Чернявский, Ю.П. Амелькович // *Прикладная механика*. – 1982. – № 10. – С. 129–131.

75. Чернявский, О.Ф. Методы расчета стационарных циклов неупругого деформирования / О.Ф. Чернявский, Ю.П. Амелькович // Прочность машин, аппаратов при переменных нагрузках: темат. сб. науч. тр. – Челябинск, 1983. – С. 5–11.
76. Амелькович, Ю.П. Прямой анализ стационарных циклов пластического деформирования пластинок и оболочек при теплосменах / Ю.П. Амелькович, Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский // Труды XIV Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок. – Тбилиси: Тбилисский ун-т, 1988.
77. Чернявский, О.Ф. Стабильность предельных состояний конструкций при малоцикловых воздействиях / О.Ф. Чернявский // Междунар. научно-техн. конф. «Надежность машин и технологического оборудования». – Ростов н/Д., 1994. – С. 17–19.
78. Чернявский О.Ф. Теория неупругой приспособляемости. Основные теоремы / О.Ф. Чернявский // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Безопасность критических инфраструктур и территорий». – Екатеринбург, 2011. – С. 237–241.
79. Чернявский, О.Ф. Поведение сплавов при циклическом нагружении с заданным постепенным увеличением односторонней деформации / О.Ф. Чернявский, Ю.Н. Ребяков // Прочность машин, аппаратов при переменных нагрузках: темат. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – С. 42–45.
80. Чернявский, О.Ф. Деформационные циклические характеристики, используемые для прямого расчета стабильных циклов в конструкциях / О.Ф. Чернявский, Ю.Н. Ребяков // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках. – Челябинск: ЧПИ, 1989.
81. Gokhfeld, D.A. Related mathematical models for solids and structures deformation and failure processes under repeated loading / D.A. Gokhfeld, O.S. Sadakov, O.F. Cherniavsky // Inelastic behavior of structures under variable loads. – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publ., 1995. – С. 51–81.
82. Ребяков, Ю.Н. Деформационные и прочностные свойства сталей при малоцикловом комбинированном деформировании / Ю.Н. Ребяков, О.Ф. Чернявский // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й науч. конф. Секция естественных наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – С. 84–89.
83. Ребяков, Ю.Н. Деформационные свойства материалов при сочетании знакопеременного течения и формоизменения / Ю.Н. Ребяков, О.Ф. Чернявский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2012. – Вып. 6. – № 11 (270). – С. 47–52.
84. Особенности упругопластического 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. – Т. 79, № 1. – С. 48–58.
85. Чернявский, О.Ф. Деформирование и разрушение конструкционных сплавов в водородосодержащих средах / О.Ф. Чернявский, С.А. Тимашев, Ю.Н. Ребяков // Водородная обработка материалов: сб. информ. материалов I Междунар. конф. «ВОМ-95». – Донецк, 1995.
86. Ребяков, Ю.Н. Малоцикловое деформирование и разрушение материалов в газовых средах / Ю.Н. Ребяков, О.Ф. Чернявский // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Снежинск и наука – 2009». – Снежинск: Изд-во СГФТА, 2009. – С. 92–93.
87. Ребяков, Ю.Н. Деформирование и разрушение материалов и конструкций в условиях диффузии / Ю.Н. Ребяков, А.О. Чернявский, О.Ф. Чернявский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 15. – № 10 (186). – С. 4–16.
88. Gokhfeld, D.A. Shakedown of structures subjected to cyclic dilatation actions / D.A. Gokhfeld, O.F. Cherniavsky // Euromech Colloquium 298 on inelastic behavior of structures under variable loads, IPPT, PAN. – Warsaw, 1992.
89. Чернявский, О.Ф. Моделирование циклических неупругих деформаций в условиях водородной дилатации / О.Ф. Чернявский, В.Н. Мадудин // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках. – Челябинск, 1994.
90. Мадудин, В.Н. Моделирование неупругих деформаций в условиях водородной дилатации / В.Н. Мадудин, О.Ф. Чернявский // Водородная обработка материалов: сб. информ. материалов I Междунар. конф. «ВОМ-95». – Донецк, 1995. – Ч. I. – С. 23–24.
91. Чернявский, О.Ф. Анализ предельных состояний конструкций при дилатационных малоцикловых воздействиях / О.Ф. Чернявский // Динамика, прочность и износостойкость машин. 1995. – Вып. 1. – С. 3–8.

92. Чернявский, О.Ф. Устойчивость процессов прогрессирующего формоизменения при малоцикловом нагружении / О.Ф. Чернявский // Труды IX Конференции по прочности и пластичности. – Киев; М., 1996. – С. 108–109.

93. Чернявский, О.Ф. Устойчивость процессов прогрессирующего формоизменения при малоцикловом нагружении / О.Ф. Чернявский // Динамика, прочность и износостойкость машин. – 1998. – № 4. – С. 5–17.

94. Soloviev, V.I. Computational and experimental analysis of trawl winches barrels deformations / V.I. Soloviev, A.O. Cherniavsky // Engineering Failure Analysis. – 2013. – Vol. 28. – P. 160–165.

95. Изменение конструкции колосниковой решетки обжиговых конвейерных машин / Д.А. Гохфельд, И.М. Плагов, В.Г. Подойников, О.Ф. Чернявский // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузениях: темат. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1983. – № 171. – С. 83–84.

96. Чернявский, О.Ф. Управление остаточными напряжениями в сварном кольцевом шве при термообработке пиростовами / О.Ф. Чернявский, С.В. Серигов, Г.Б. Зальцман // Прочность машин при переменных нагрузениях: темат. сб. науч. тр. – Челябинск, 1991. – С. 3–7.

97. Чернявский, О.Ф. Термопластическое формоизменение / О.Ф. Чернявский, Г.Б. Зальцман // Листовая и горячая объемная штамповка: материалы семинара. – М., 1991. – С. 72–75.

98. Чернявский, О.Ф. Дилатационное формоизменение / О.Ф. Чернявский // Программа «Университеты России. Машиностроение, приборостроение, энергетика». – М.: Изд-во МГУ, 1995. – Т. I. – С. 99–103.

Чернявский Олег Федорович. Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск).

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Mechanical Engineering Industry”
2013, vol. 13, no. 2, pp. 4–18**

SHAKEDOWN THEORY AND ITS PRACTICAL APPLICATION (ON THE 100th ANNIVERSARY OF THIS SECTION OF MECHANICS AND THE 50th ANNIVERSARY OF ITS DEVELOPMENT IN CHPI – CHSTU – SUSU)

O.F. Chernyavsky, South Urals State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Review of research on shakedown of structures, made in Russia. The basic features of the Russian (first of all – Chelyabinsk) scientific school is emphasized: differentiated approach to qualitatively different processes of inelastic deformation and practical application of new theoretical results. A number of new research directions in mechanics of low cycle deformation and fracture are analyzed, concerning to researches of elastic and inelastic shakedown fulfilled in SUSU.

Keywords: shakedown, incremental collapse, creep, progressive buckling, dilatation actions.

Поступила в редакцию 12 апреля 2013 г.