

ПОЛЕЗНЫЕ И ОПАСНЫЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев

Герман Николаевич Чернышев, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель лаборатории упругих тел Института проблем механики РАН. Руководитель проекта 01-01-00093.

Александр Леонидович Попов, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник того же института. Руководитель проекта 00-01-00071.

Виктор Михайлович Козинцев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института.

Ut tensio sic vis.*

Роберт Гук

Пожалуй, не найти человека, не использующего в своем лексиконе термин «напряжения», подразумевая под ним самые разнообразные психофизико-биологические проявления. Здесь мы ограничимся рассказом лишь об одном, но достаточно важном виде напряжений из области механики: остаточных, или предварительных, напряжениях. Эти напряжения могут быть одной из главных причин техногенных аварий и разрушений, надежных на первый взгляд конструкций в технике и в быту, и, тем не менее, ни один стандарт не устанавливает предельно допустимых значений для таких напряжений. Не существует и нормативных документов по учету остаточных напряжений при проектных прочностных расчетах конструкций.

Предварительными, или остаточными, называют обычно напряжения, существующие в конструкции или природном теле при отсутствии внешних силовых, тепловых и других воздействий. Называют их также собственными, внутренними, технологическими напряжениями. В технике для обозначения остаточных напряжений используют названия процессов, приводящих к их образованию: сварочные напряжения, закалочные напряжения и т.д. Такое разнообразие в названиях не вредит существу дела, а иногда даже лучше характеризует сущность рассматриваемого явления.

Предварительные напряжения играют значительную роль в природе и технике. Человек издавна научился пользоваться их полезными свойствами. Примером может служить бочка из деревянных досок, стянутая обручами.

* Каково растяжение, такова и сила.

Созданные бондарем предварительные натяжения в обручах удерживают ее в рабочем состоянии. Освободи обручи от предварительных напряжений — и бочка потеряет свои функциональные свойства.

Остаточные напряжения важны в струнах музыкальных инструментов, в тетиве спортивного лука, в спицах велосипедных колес, в болтах и гайках, которыми притягиваются крышки к резервуарам с высоким давлением, в длиннопролетных мостах, в закаленных стеклах транспортных средств, в строительных конструкциях и т.д. Они практически всегда возникают в процессах литья,ковки, прокатки, сварки, термообработки и др., а также при жестком соединении разных материалов. Остаточные напряжения есть в керамике, стекле и полимерах, в изделиях электронной промышленности, энергетического и транспортного машиностроения. Умелое применение внутреннего напряженного состояния в материалах и конструкциях может дать большие выгоды их создателям.

В природе также немало примеров предварительных напряжений: они обеспечивают устойчивость деревьев к ветровым нагрузкам, «законсервированы» в костях людей и животных, в коре деревьев и плодов и т.д. Благодаря эволюции внутреннего напряженного состояния, конструкции растений и организмов животных близки к совершенным. Разгрузи организмы животных от внутренних напряжений мышц, сосудов — и они перестанут функционировать.

К сожалению, отрицательную роль остаточные напряжения играют чаще, чем хотелось бы. В технике достаточно примеров разрушений, вызванных большими технологическими напряжениями. Одни из наиболее частых со значительными экологическими последствиями — это разрушения трубопроводов, в которых образуются трещины длиной иногда до нескольких десятков километров. Внезапные разрушения строительных конструкций, появление и развитие трещин на лобовых стеклах автомобилей, дорогостоящих заготовках крупногабаритных зеркал телескопов, хрустальной посуде, саморазрушение огнеупорных блоков для стенок стекловаренных печей, лежащих в спокойном состоянии на складе... Многие из нас могли бы продолжить этот перечень. В сущности такие дорого стоящие разрушения и породили научное направление по изучению остаточных технологических напряжений и способов их регулирования.

Это направление механики деформируемого твердого тела в настоящее время активно развивается. Первоочередная задача — разработка методов измерения остаточных напряжений. Именно из-за отсутствия удобных и быстрых способов измерений решение проблемы остаточных напряжений отстает от аналогичной — для напряженных состояний под действием активных нагрузок. Однако в последние десятилетия в результате усилий ученых России, Украины, США, Германии, Англии, Венгрии и других стран положение с измерительными ме-

тодами и средствами существенно улучшилось и началось активное экспериментальное изучение таких напряженных состояний. Но многое еще не сделано: для получения общих выводов о влиянии остаточных напряжений на прочность конструкций предстоит исследовать напряжения в очень большом объеме материалов и изделий. Необходимо аттестовать технологические операции по тому напряженному состоянию, какое они вносят в готовое изделие, уметь оценивать значение этого состояния и находить способы управления технологическими процессами и вызываемыми ими напряжениями для улучшения качества изделий и надежности их работы.

В научной литературе имеется богатейший научный багаж, посвященный исследованиям всевозможных напряженно-деформированных состояний твердых тел, созданных приложенными к ним нагрузками, температурными полями, взаимодействиями с другими телами и т.д. Чем же проблема предварительных напряженных состояний отличается от проблемы обычных напряжений? Почему ее нужно выделять как особую? Ответ на эти вопросы дает сама жизнь. Разработчики умеют хорошо рассчитывать конструкцию на прочность. Однако при расследовании причин некоторых аварий приходится сталкиваться с такой ситуацией: при измерении остаточных напряжений обнаруживалось, что эти напряжения до статочно велики, а в документах на разрушившееся изделие утверждалось, что в данном месте напряжения равны нулю. Технологические процессы изготовления создали в изделии значительные предварительные напряжения, о которых никто не подозревал. И подобные ситуации на практике весьма нередки. Ясно, что необходимы рабочие методы, которые позволяли бы определять такие напряжения в телах после всех процессов изготовления, чтобы снизить вероятность аварий.

В монографии [1] подробно изложен разработанный и применяемый автором голографический метод измерения напряжений. Почему был выбран именно этот метод измерений? В начале 1970х годов академик А.Ю. Ишлинский предложил коллективу ученых, в который входили и авторы, заняться исследованиями предварительных напряжений в сварных соединениях. В это время уже существовало достаточно много методов измерения таких напряжений, описание которых можно найти в уже ставшей классической монографии И.А. Биргера [2] и в более поздних публикациях. Наиболее распространенным для определения предварительных напряжений являлся (да и сейчас является) тензометрический метод в сочетании с методом отверстий. Он состоит в следующем: в некоторых точках окрестности специально созданного отверстия тензодатчиками измеряют деформации возмущенного напряженно-деформированного состояния и по этим измерениям по специальной методике восстанавливают остаточные напряжения, существовавшие в этих точках до создания отверстия.

Можно было бы взять за основу данный метод измерения. Однако тщательное изучение его показало, что проводить эффективное исследование в этом случае будет сложно, так как осуществить в полном объеме необходимые многочисленные измерения вряд ли удастся. Все-таки метод достаточно дорогой и требует много времени на проведение каждого измерения.

Хороши неразрушающие, так называемые физические методы измерения: рентгеновский, акустический, магнитошумовой и др. [3, 4]. Но оказалось, что область применения этих методов довольно сильно ограничена. Например, рентгеновский метод непригоден для закаленного стекла, а магнитошумовой — для нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и других немагнитных материалов.

Таким образом, после анализа различных методов измерения авторы пришли к заключению, что способ проявления предварительных напряжений маленькими несквозными отверстиями (лунками) вполне приемлем, а метод измерения параметров возмущенного напряженно-деформированного состояния следует усовершенствовать. В те годы бурно развивалась голография и голографические способы измерения. Было решено взять за основу голографическую интерферометрию: с ее помощью измерять перемещения в зоне отверстий и по результатам измерений восстанавливать предварительные напряжения. За более чем 20-летнюю исследовательскую работу авторы убедились, что выбор был правильный.

Метод оказался удобным, эффективным, быстрым и интересным в работе. Суть его в следующем. Исследуемый участок поверхности тела освещается лазерным лучом. Другая часть этого луча, предварительно расщепленного полупрозрачным зеркалом, направляется на фотопластинку, на которую направляется и луч, отраженный от тела. Вследствие наложения этих лучей на фотопластинку записывается голограмма освещенного участка тела. При освещении голограммы возникает видимое изображение поверхности тела, которое можно рассматривать под разными углами как реальное тело.

После записи этой голограммы создается возмущение поверхности тела путем, например, высверливания малой лунки, что позволяет проявиться остаточным напряжениям: изъятие малого объема приводит к локальным упругим перемещениям, пропорциональным остаточным напряжениям. Голограмма возмущенной таким образом поверхности тела записывается на ту же фотопластинку. В результате наложения двух голограмм и последующего их одновременного восстановления при освещении фотопластинки упругие перемещения в окрестности лунки проявляются в виде системы интерференционных полос, которые в нашем случае соответствуют линиям уровня, т.е. линиям постоянных перемещений (рис.1).

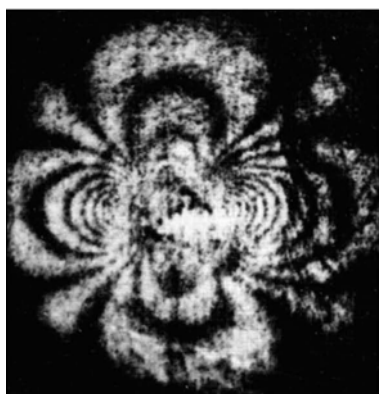


Рис.1. Интерферометрические линии уровня упругих перемещений поверхности тела с остаточными напряжениями в окрестности зондирующей лунки.

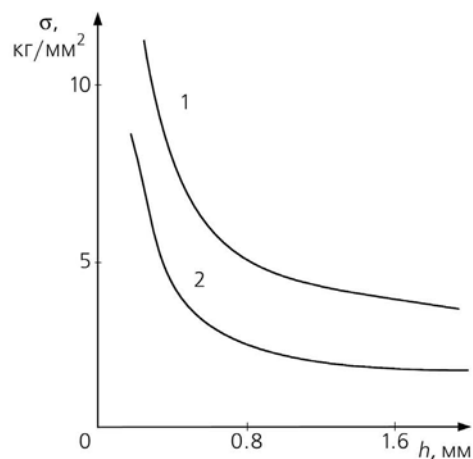


Рис.2. Графики цены полосы (напряжение σ в зависимости от глубины зондирующей лунки h): 1 — при измерениях только по черным полосам; 2 — при измерениях как по черным, так и по белым полосам.

Картина полос наглядна и проста для расшифровки: оси симметрии интерференционной картины совпадают с осями главных напряжений, а перемещения в разных точках окрестности отверстия определяются числом полос. Величина напряжений определяется числом интерференционных полос, при чем цена полосы зависит от упругих свойств материала, т.е. от модуля Юнга, и от диаметра и глубины лунки. Она определяется по графикам (рис.2), рассчитанным на основании решения трехмерной задачи теории упругости. Формула для определения остаточного напряжения σ вдоль выбранного направления на интерференционной картине имеет вид

$$\sigma = \left(\frac{A}{h} + B \right) \frac{D_0}{D} \frac{E}{E_{Al}} N,$$

где E и $E_{Al} = 70$ ГПа — соответственно модули упругости исследуемого материала и алюминия (который используется в качестве эталонного материала), h и D — глубина и диаметр лунки, $D_0 = 2$ мм — эталонный диаметр лунки, N — число полос на интерферограмме, $A = 20$ МПа·мм и $B = 25$ МПа — аппроксимирующие константы. Объем необходимых вычислений для получения значений напряжений очень мал, и они могут быть выполнены оператором непосредственно сразу же при получении и наблюдении интерференционной картины. При этом в отличие от тензометрирования, где измерения выполняются для отдельных точек, данный метод регистрирует линии уровня перемещений по всей области поверхности тела в окрестности зондирующей лунки, что позволяет визуально определять направления главных напряжений и делать качественные выводы о свойствах напряжений еще до подсчета числовых значений соответствующих величин.

Можно привести пример: трубопровод лежит на грунте, и по каким-то причинам произошла подвижка грунта. Возникает вопрос: создалось ли в трубопроводе опасное напряженное состояние? Обычным тензометрированием измерить напряжения в этом случае не удастся, если тензодатчики не были установлены до подвижки грунта. Но можно применить интерферометрический метод, разработанный для измерения предварительных напряжений. Таких примеров из практики можно привести много.

Подобные возможности обеспечивают в принципе также и методы фотоупругости, но, в отличие от них, лазерно-интерферометрический метод, реализованный в данной системе, — бесконтактный, более точный и несравненно менее трудоемкий в расчете на одно измерение.

На основе проведенных исследований было создано несколько видов портативных голографических систем для измерения напряжений под общим названием ЛИМОН — лазерно-интерферометрический метод определения напряжений, и с помощью этих систем выполнена большая работа по измерению остаточных напряжений в различных технических объектах. Накопленный опыт использовался при создании каждой следующей измерительной системы.

С появлением компактной компьютерной техники развитие измерительных систем пошло по линии лазерно-компьютерной интерферометрии, которая обладает серьезными положительными свойствами: создание и запись интерферограммы выполняется непосредственно в ЭВМ, т.е. не требуется проводить фото работы, что существенно облегчает и сокращает измерения.

С использованием лазерно-компьютерной интерферометрии была создана система нового поколения для измерения напряжений в упругих телах и конструкциях — ЛИМОН-ТВ, в которой объединены идеи и методы голографической интерферометрии, разработанные ранее для анализа остаточных напряжений, с преимуществами современной компьютерной техники. Кроме исследования напряжений эта система позволяет решать и другие задачи: о местах приложения и величинах нагрузок, действующих на упругое тело, о напряжениях в тонких пленках и связях их механических характеристик с напряжениями, о распределенных и локальных неоднородностях структуры тела, о микротрещинах и внутренних расслоениях, об отслоениях покрытий и деформационных предпосылках их возникновения и т.д.

Переносная малогабаритная измерительная система изготавливается из доступных комплектующих. В ее состав входят блок интерферометра и компьютерный блок. Блок интерферометра (вес для различных вариантов компоновки около 2 кг, габариты в пределах $120 \times 250 \times 220$ мм³) состоит из опорноустойчивой конструкции и корпуса, в котором монтируется полупроводниковый лазер с длиной волны 640 нм и мощностью излучения 10 мВт, техническая видеокамера с высокой чувствительностью (0.1 люкс) и разрешением 570.400 те-

левизионных линий и другие элементы оптической схемы: направляющие зеркала, коллиматор, полупрозрачное делительное зеркало и диффузно рассеивающая пластина, формирующие опорный и предметный световые пучки.

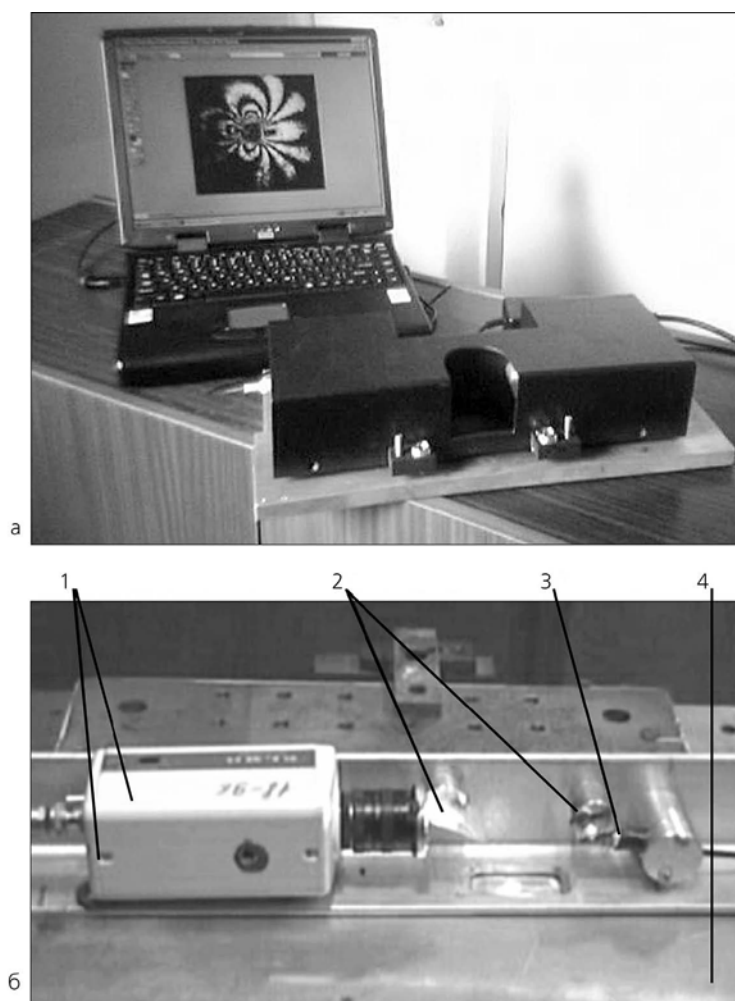


Рис.3. Компьютерный интерферометр ЛИМОН-ТВ: а — общий вид; б — оптическая схема: 1 — видеокамера, 2 — система деления лучей из двух полупрозрачных зеркал и матового стекла, 3 — полупроводниковый лазер, 4 — объект измерений.

Компьютерный блок в мобильном варианте состоит из переносной ЭВМ, имеющей видеовход для подключения обычной видеокамеры. При отсутствии видеовхода в качестве аналого-цифрового преобразователя может быть использовано внешнее устройство типа Cap View, подсоединяемое к ЭВМ через USB-порт. На рис.3 показаны общий вид компьютерного интерферометра ЛИМОН-ТВ (а) и один из вариантов компоновки оптической схемы прибора (б).

Для обработки записанных изображений с целью получения первичной разностной интерферограммы и улучшения ее контрастности используется специально разработанная программа LIMON-EXPRESS либо графический редактор Adobe Photoshop (версия 4.0 и выше). Программа LIMON-EXPRESS применяется также для расчета оста точных напряжений.

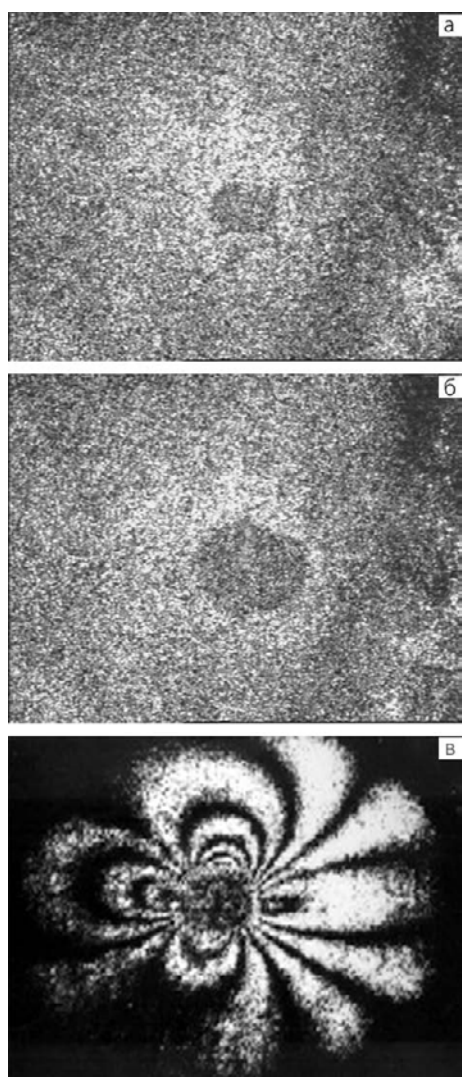


Рис.4. Создание интерференционной картины: а, б — изображения исследуемого участка поверхности объекта до и после высверливания зондирующей лунки, в — интерференционная картина, полученная поточечным вычитанием яркостей изображения а из б.

Исходные изображения формируются компьютером в виде точечных матриц максимально достижимых размеров (насколько позволяют возможности видеокамеры и видеокарты) с оцифрованными градациями яркости каждой точки. Первичная обработка состоит в применении алгоритма поточечного вычитания яркостей исходных изображений, снятых до и после внесения возмущения, в результате чего формируется результирующая интерферограмма, отражающая перемещения поверхности тела в окрестности возмущения. На рис.4 представлены этапы создания интерференционной картины.

Одним из первых случаев исследования авторами остаточных напряжений было выявление причин разрушений латунных сепараторов подшипников, приведших к авариям железнодорожных вагонов. Измерения показали, что в сепараторе имелись большие для латуни остаточные напряжения порядка 180 МПа, которые вместе с добавленными к ним рабочими напряжениями приводили к разрушению сепараторов и, как следствие, к авариям. Оказалось, что одна из партий сепараторов не прошла термообработку для снятия остаточных напряжений, наведенных в процессе изготовления. Пришлось установить, на каких вагонах были подшипники с такими сепараторами, и заменить их.

Другим примером эффективного применения данной системы явилась отработка технологии электронно-лучевой сварки и локальной термической обработки образцов разного сечения (плоских, тавровых, цилиндрических, сферических) из высокопрочных сталей разных марок и титановых сплавов. Это исследование проводилось при содействии Авиационного научно-технического комплекса им. А.Н. Туполева. В сотрудничестве с Конструкторским бюро им. С.А. Лавочкина была усовершенствована технология сварки и режимов термической обработки сварных соединений ряда алюминиевых сплавов, а также выполнена экспертная работа по установлению причин саморазрушения корпуса одного из космических аппаратов во время хранения.

Совместно с ГАЗПРОМом было организовано исследование остаточных напряжений в нефти и газопроводах, где эти факторы в сочетании с другими не благоприятными условиями могут привести к авариям, выбросам транспортируемых продуктов и загрязнению среды. Так, на нефтепроводе Холмогоры—Клин в районе р. Чусовая была зафиксирована авария — утечка нефти через трещину в корпусе нефтеотсечки (корпус клиновой нефтеотсечки — это штамповочно-сварная конструкция из стали 20). Вырезанная из нефтепровода отсечка была доставлена на испытательный полигон ВНИИГАЗ. Сквозная трещина в угловом сварном соединении корпуса проходила по околошовной зоне вблизи линии сплавления. В предположении, что трещина инициирована сварочными остаточными напряжениями, было решено провести измерения в шве и околошовной зоне. После сварки корпус должен был проходить термическую обработку для уменьшения сварочных напряжений. Контроль уровня остаточных напряжений предусмотрен не был, так как предполагалось, что термообработка снимает их полностью.

Измерения проводились на симметрично расположенном сварном шве, по условиям изготовления и эксплуатации аналогичном разрушенному. Было установлено наличие растягивающих напряжений, направленных вдоль шва, порядка 200 МПа (что близко к пределу текучести материала — 250 МПа) на линии сплавления и спадающих при удалении от нее. Эти напряжения в совокупности с активными напряжениями, возникшими по условиям эксплуатации, явились причиной разрушения. Оказалось, что заводская термообработка если и проводилась, то не уменьшила уровень исходных сварочных напряжений.

Авторы участвовали в установлении причин возникновения трещины в коллекторе парогенератора — высоконагруженного элемента первого контура АЭС. Корпус коллектора — это толстостенная труба, в середине которой находится перфорированная область — большое количество сквозных отверстий, расположенных в определенном порядке близко друг к другу.

Измерения проводились как в зоне перфорации, так и вне ее. Вне области перфорации напряжений не было, тогда, как внутри нее напряжения растяжения достигали 150 МПа, что превышает половину предела текучести материала кол лектора — стали 20. Такой уровень остаточных напряжений с точки зрения надежности и запаса прочности не может считаться малым, и им нельзя пренебрегать при расчете конструкции. Эти значительные технологические напряжения, возникшие во время сверления отверстий, в сумме с активными напряжениями при эксплуатации коллектора привели к разрушению его корпуса, но они не учитывались в расчетных схемах, которыми пользовались разработчики [5]. Другого убедительного объяснения причин разрушения практически всех коллекторов данной конструкции предложено не было.

Общий вывод о причинах вышеперечисленных и подобных им аварий состоял в том, что остаточными напряжениями фактически пренебрегали: при создании парогенераторов АЭС они не учитывались при расчете, а в случае с корпусом нефтеотсечки требование снижения остаточных напряжений не было обеспечено соответствующими контрольными приборами.

Здесь описан ряд исследованных фактов отрицательного влияния остаточных напряжений, но существует много примеров их положительных проявлений, о некоторых из которых уже говорилось в начале статьи. Следует упомянуть также о создании предварительных напряжений в железобетонных и мостовых конструкциях, об упрочнении деталей наведением напряжений в их поверхностном слое различными способами — с помощью закалки, обработки дробью и роликами. Все это указывает на важность изучения остаточных напряжений в природе и технике.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. *Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах.* М., 1996.
- 2 Биргер И.А. *Остаточные напряжения.* М., 1963.
- 3 Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев Н.А. *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений.* Киев, 1981.
- 4 *Экспериментальная механика: В 2 кн. / Пер. с англ.; Под ред. А. Кобаяси.* М., 1990.
- 5 Федоров Л.В., Титов В.Ф., Рассохин Н.Г. *Парогенераторы атомных электростанций.* М., 1992.