

УДК 539.3

МЕТОД ОТВЕРСТИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ© 2021 г. А. Л. Попов^{1,*}, В. М. Козинцев¹, Д. А. Челюбеев¹, А. Л. Левитин¹¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

*e-mail: popov@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 26.08.2020 г.

После доработки 11.11.2020 г.

Принята к публикации 20.11.2020 г.

Во всех промышленно развитых странах активно ведутся исследования остаточных напряжений и их влияния на прочность материалов и конструкций. Потребность в таких исследованиях в значительной степени обусловлена тем обстоятельством, что многие технические разрушения и техногенные катастрофы происходят из-за высокого уровня остаточных технологических напряжений. Для диагностики остаточных напряжений применяются разные физические и механические методы. Методы, основанные на различных физических принципах, не влияют на прочность объекта измерения, т.е. могут считаться неразрушающими, если не принимать во внимание изменение состояния поверхности объекта во время подготовки к измерениям. Но между измеряемыми величинами и искомыми напряжениями действуют сложные соотношения с параметрами, которые часто зависят от ряда трудно учитываемых факторов. Механические методы являются разрушающими или частично разрушающими. Остаточные напряжения рассчитывают по деформациям или перемещениям, возникающим при разгрузке объекта или его частей, используя уравнения теории упругости; для обработки измерений требуется знать только базовые механические свойства материала. Из числа механических методов метод отверстия — наиболее применяемый: он является мало повреждающим, достаточно универсальным — форма и материал объектов могут быть самые разные, методически и материально обеспечен — утверждены стандарты измерений, разработано оборудование, технология измерений и методика обработки результатов.

В статье представлена история развития метода отверстия, вклад отечественных и зарубежных ученых в его становление, даны примеры конкретных измерений остаточных напряжений с помощью этого метода в лабораторных и производственных условиях с акцентом на отечественную технологию измерений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, диагностика, метод отверстия

DOI: 10.31857/S0032823521010069

Введение. Остаточными называют напряжения, остающиеся в конструкции или в ее отдельных элементах после снятия всех внешних воздействий. Остаточные напряжения возникают тогда, когда внешние воздействия создают в теле не только упругую, но и необратимую пластическую деформации. В технике для обозначения остаточных напряжений используют также названия технологических процессов, после которых они проявляются: сварочные напряжения, закалочные напряжения, деформационные, напряжения правки или отделки продукции [1–4].

Остаточные напряжения практически всегда возникают при изготовлении любых изделий из любых материалов: металлов, керамики, стекла, полимеров и композитов, строительных материалов, при изготовлении элементов конструкций и изделий в це-



Рис. 1. Взрыв газопровода в Москве 10 мая 2009 г.

лом. Эти напряжения часто называют технологическими, так как они возникают вследствие разного рода технологий изготовления, среди которых можно указать литье, сварку, ковку, прокатку, термообработку, точение и т.д. Многолетние исследования авторов данной статьи в области остаточных напряжений и сведения из научной литературы подтверждают, что эти напряжения обнаруживаются после подавляющего большинства технологических операций. Даже травление — операция без силового или значительного теплового воздействия, не оставляющая пластических деформаций — создает малые остаточные напряжения вследствие перепада химического состава в поверхностном слое и образования тонких окисных пленок с механическими свойствами, отличающимися от свойств материала подложки [4].

Имеется 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, сопровождающиеся взрывами и пожарами [5]. На рис. 1 приведена фотография одного из таких событий — взрыва и горения газопровода в Москве 10 мая 2009 г.

Наличие остаточных напряжений способно вызвать внезапные разрушения крупных резервуаров [6], саморазрушение огнеупорных блоков для обкладки ванн стекловаренных печей [7], закаленного стекла [8], коробление (искажение формы) изделий во время их обработки и эксплуатации, которое появляется в результате изгибающей и скручивающей деформации в металле при нарушении равновесия внутренних сил и моментов, наблюдающееся даже при продолжительном вылеживании изделий без применения [9–12], влияет на свойства выращиваемых кристаллов, в частности, является причиной их аномальной двухосности, недопустимой в поляризационной опти-

ке, оптических линиях связи и т.д. [13, 14], снижает разрешение оптических элементов, особенно крупных линз телескопов, из-за эффекта фотоупругости, т.е. появления в стекле эффекта двойного лучепреломления даже от малых напряжений, и локального изменения коэффициента преломления [15, 16]. Существенна роль остаточных напряжений в растрескивании металлов из-за коррозии, хрупком разрушении, понижении пределов упругости и усталости материала. Вредное действие остаточных напряжений сказывается и в повышении общей химической активности металла. Особенно вредно усиление межкристаллитной коррозии под действием растягивающих остаточных напряжений [17–22].

Значительные остаточные напряжения могут возникать после механической обработки – точения, фрезерования, шлифования и др. [23]. Особенность таких напряжений состоит в том, что они действуют практически только в тонких поверхностных слоях деталей. Однако, как показывает опыт эксплуатации, остаточные напряжения в поверхностном слое могут существенно повлиять на прочность всей детали, особенно при действии переменных напряжений, способствуя ее усталостному разрушению, так как усталостная трещина, как правило, зарождается на поверхности изделия [22, 24–26].

Возможной причиной Чернобыльской катастрофы называют влияние на работоспособность конструкции реактора остаточных напряжений в циркониевых трубках тепловыделяющих элементов [27]. Утверждают, что завод-изготовитель внес изменения в процесс термомеханической обработки, не согласовав эти изменения с потребителем. В результате часть трубок в процессе эксплуатации разрушилась, вызвав аварию [28, 29]. Авторы данной статьи участвовали в техническом расследовании причин образования трещины в корпусе коллектора парогенератора Армянской АЭС, приведшей к утечке радиоактивных веществ; было установлено, что причиной возникновения трещины в коллекторе являлись остаточные напряжения, не принятые во внимание при расчете коллектора на прочность [2, 30, 31].

Возможно не только вредное, но и благоприятное влияние остаточных напряжений на изделия, способное повысить их статическую и усталостную прочность. Поверхность изделий, как правило, является наиболее “слабой” зоной, поэтому любая обработка, которая приводит к возникновению и росту поверхностных сжимающих напряжений, положительно сказывается на эксплуатационных свойствах изделий [32]. Наиболее характерный пример – закаленные стекла транспортных средств. Закалка стекла создает в нем поверхностные сжимающие напряжения, которые закрывают микротрещины, всегда присутствующие на поверхности стекла, не дают им развиваться и разрушать хрупкое стекло [33]. В итоге, прочность стекла возрастает в несколько раз и в случае разрушения запасенная энергия остаточных напряжений способствует дроблению стекла на мелкие безопасные осколки, а не на большие фрагменты как у обычного стекла, подобные кинжалам по виду и остроте. Аналогично действует пластическая деформация поверхности металлических объектов: закрываются трещинки – инициаторы разрушений и прочность возрастает [34].

Различают термические и фазовые (структурные) внутренние напряжения, которые возникают соответственно в результате термического сжатия или расширения и фазовых превращений в твердом состоянии при наличии в теле градиента температур. Внутренние напряжения могут возникнуть практически при любой обработке, причем одна технологическая операция может привести к созданию разных по своему происхождению остаточных напряжений: термических, фазовых и напряжений от неоднородной пластической деформации. Например, если горячедеформированный сплав охлаждается ускоренно и в нем протекают фазовые превращения. При литье, сварке и закалке возникают термические и фазовые напряжения. Различные по своему происхождению остаточные напряжения складываются и очень часто дают весьма сложные эпюры [35, 36].

В металлоизделиях, после завершения цикла обработки, под воздействием механических и тепловых нагрузок, зачастую наблюдается ползучесть, в результате которой происходит процесс релаксации (уменьшения) остаточных напряжений [37]. Этот процесс протекает интенсивно при повышенных температурах, но в некоторых случаях происходит и при нормальной температуре. Отметим следующее важное обстоятельство. Изменение напряженного состояния тела (например, вследствие релаксации остаточных напряжений) приводит к появлению дополнительных деформаций, которые, в свою очередь, могут привести к неблагоприятному перераспределению остаточных напряжений, что может вызвать появления трещин и внезапное хрупкое разрушение деталей как в процессе отжига, так при эксплуатации и даже при хранении [7, 37, 38].

При больших остаточных напряжениях разрушение часто происходит от незначительных по величине дополнительных нагрузок, особенно ударных. Так, например, трещины в металлических отливках могут возникать при очистке их пневматическим молотком и даже от неравномерного охлаждения зимой из-за добавления термических напряжений к остаточным: явление “сезонного растрескивания латуни” [21].

Крупные отливки из малопластичных алюминиевых сплавов через некоторое время после окончания литья могут разрушиться от случайных небольших сотрясений или ударов; высвобождающаяся при этих разрушениях упругая энергия иногда так велика, что бывали случаи, когда часть слитка весом в сотни килограммов отрывалась и отлетала на расстояние в несколько метров [27]. Другой пример: известны случаи, когда цельносварные суда из-за остаточных растягивающих напряжений разрушались под воздействием незначительных внешних факторов, например, от удара ломом при очистке палубы ото льда [38]. Наглядный пример разрушения такого типа приведен на рис. 2, где показана фотография балки из высокопрочной стали, которая спонтанно лопнула в цехе без нагрузки после того, как два ее конца были срезаны под углом; в результате перераспределения напряжений произошло разрушение вдоль продольной оси балки [39].

Перечень как вредного, так и полезного проявлений остаточных напряжений может быть продолжен. В сущности, все эти многообразные проявления и породили научное направление по изучению остаточных технологических напряжений и способов их регулирования [40].

1. История вопроса. Быстрое развитие промышленности, транспорта и военного дела в 18–19-м веках сопровождалось значительным ростом мощности и габаритов техники. Но крупные элементы больших машин и изделий иногда разрушались по непонятным причинам не только во время эксплуатации, но и при изготовлении и даже при хранении. Наиболее зримое и возможно первое документированное свидетельство вредного влияния остаточных напряжений запечатлено в Филадельфийском колоколе Свободы (рис. 3). Он был отлит в 1751 г. для созыва жителей города на оглашение Декларации независимости, однако треснул во время первого же звона [41].

Это и другие подобные разрушения вызвали повышенное внимание к качеству изделий из металла и заготовок для них. Была осознана проблема несоответствия расчетной прочности и реального поведения изделий из чугуна и стали, несмотря на то, что в то время уже были достаточно хорошо определены механические свойства применяемых металлов — пределы прочности и текучести, относительные удлинения и сужение, твердость, коррозионная стойкость и др.

Особенно напряженная ситуация возникла в военном деле. Мощные паровые двигатели способствовали появлению броненосцев — тяжелых военных кораблей, защищенных навешенными броневыми плитами и практически неуязвимых для существовавшей артиллерии. В ответ стали срочно увеличивать калибр пушек. И здесь явственно ощутились проблемы, связанные с габаритами. Наблюдался значительный разброс

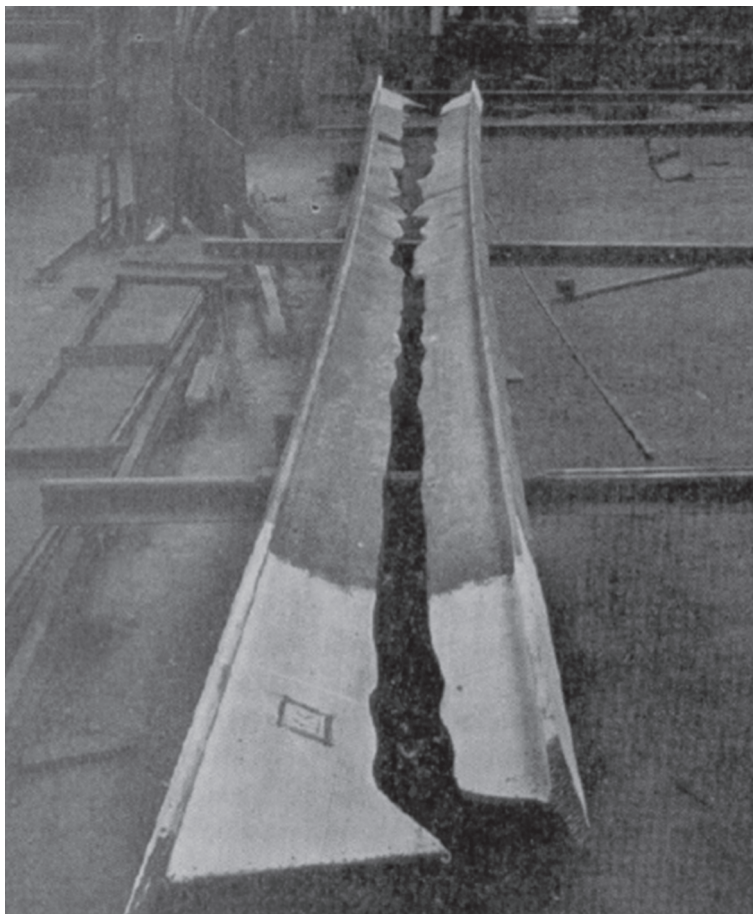


Рис. 2. Двутапровая балка, расколотая остаточными напряжениями после резки под углом концов балки [39].

стойкости стволов одной конструкции: от двух—трех тысяч до всего лишь нескольких десятков испытательных выстрелов, и даже разрывы стволов при первых выстрелах.

Возникло предположение, что реальные характеристики крупных объектов зависят не только от свойств металла, но также от режимов изготовления и обработки, начиная от тепловых режимов плавления и розлива литейных металлов, режима охлаждения отливки и последующей тепловой и механической обработки заготовки. Вначале было усилено внимание к применяемым металлам, затем — к конструкции ствола: разрабатывалась сложная наружная и внутренняя геометрия, предлагались составные многотрубные стволы, усиление ствола кольцами, навивкой проволокой. Эта работа иногда давала полезный результат, а иногда и вредный: например — усиление ствола накладными кольцами понижало его стойкость. Последующее теоретическое рассмотрение этого случая распределения напряжений подтвердило наблюдаемый неблагоприятный эффект.

Впоследствии внимание перешло на технологию изготовления и режимы обработки стволов, начиная от скорости исходной литейной плавки и тепловых режимов литья, охлаждения иковки, до операций термической и механической обработки.



Рис. 3. Трещина в колоколе Свободы.

Первые исследования в этих направлениях велись на основе интуиции и “здорового смысла”. Яркий пример такого поиска — работа американского инженера-артиллериста Т.Д. Родмана, который разработал новую методику литья чугунных артиллерийских стволов, позволявшую делать прочные и надежные пушки очень крупных калибров — вплоть до 20 дюймов [42]. Он опытным путем установил, что если отливать полную заготовку и при этом охлаждать ее изнутри, то ствол получается гораздо прочнее из-за более равномерной кристаллической структуры металла и, как впоследствии было установлено, — напряжений сжатия в поверхностном слое канала ствола. В результате ресурс ствола увеличивался в 2–2.5 раза.

Однако, в целом, проблема масштабных разрушений в промышленности и транспорте оставалась актуальной. Ведь разрушались не только стволы орудий, но и заготовки для снарядов во время обработки и хранения, разрушались многие крупные изделия: габаритные отливки, части мощных двигателей — коленчатые валы, штоки, цилиндры и трубы, корпуса кораблей.

Начало общему систематическому научному изучению остаточных напряжений положил русский военный инженер-металловед Н.В. Калакуцкий (1831–1889). Его целью было создание теории возникновения и методики измерения остаточных (внутренних натуральных — по его терминологии) напряжений, а также разработка метода их расчета.

На основе собственных экспериментов и используя уже существовавшие практические наработки Родмана и других авторов, был впервые объяснен механизм образования остаточных напряжений, разработана методика количественного определения их

в оружейных стволах, снарядных корпусах и в листовом металле, указаны способы удаления вредных и создания полезных остаточных напряжений [43, 44].

В исследованиях Н.В. Калакуцкого из объекта (ствол пушки) вырезались кольца и промерялись изменения размеров кольца после вырезки. По изменению диаметра вырезанного кольца рассчитывалось “давление” (т.е. напряжение), действовавшее в металле до вырезки, полагая, что остаточные напряжения проявляют себя через изменение геометрических размеров частей изделия при его разделении на части.

Метод колец был усовершенствован [45] и получил название метода разрезки колец. Усовершенствование заключалось в разрезке вырезанного кольца вдоль образующей и замере изменения диаметра и формы кольца в результате разрезки. Параллельно, в начале 1930-х годов, был разработан струнный метод измерения деформаций [46], позволивший впервые измерить величину горного давления в туннелях.

Другим, получившим широкое распространение, вариантом разрушающего метода определения остаточных напряжений в толстостенных трубах был метод [47]. В соответствии с ним выполняется послойная обточка или расточка трубы с измерениями окружной и осевой деформаций образца. На основании полученных данных строятся графики зависимости поперечных и продольных деформаций от величины площади сечения удаляемого слоя. Далее по формулам осесимметричной упругости определяются напряжения, вызывающие такие деформации.

Было проведено [48] сравнение методов [44–47]. Показано, что точность определения напряжений по методу [45] более высока, поскольку измеряемые деформации в этом случае значительно больше, чем при определении напряжений по методам [44, 47].

Работы Н.В. Калакуцкого стали основой и других методов исследования остаточных напряжений, заключающихся в замере деформаций образцов, происходящих при их разрушении. Более подробно о применяемых разрушающих методах определения остаточных напряжений изложено в монографии [2].

2. Метод отверстия и его развитие. Метод отверстия, предложенный Й. Матаром в 1932 г. [49], со временем превратился в наиболее удобный и эффективный слабоповреждающий метод определения остаточных напряжений [39, 50, 51]. Он имеет преимущества высокой точности, надежности и оперативности, стандартизуемости процедур испытаний и удобной практической реализации. Повреждение, внесенное в образец, локализуется в небольшом несквозном отверстии и часто допустимо или ремонтпригодно.

Метод отверстия включает в себя три основных аспекта: 1) Создание зондирующего отверстия в интересующей области тела с напряжениями, 2) Измерение деформаций, либо перемещений на контуре и в окрестности отверстия, высвобождаемых под действием существующих в теле напряжений и 3) Вычисление соответствующих остаточных напряжений. Все три аспекта метода отверстия значительно развились впоследствии.

В исходной реализации метода отверстия Матаром был сделан принципиальный шаг в переходе от специально изготовленных образцов, применявшихся в разрушающих методах определения остаточных напряжений и становящихся непригодными после проведения испытаний, к измерению в деталях и элементах конструкций с внесением в них повреждений настолько малых, что деталь могла быть использована снова. Однако, несмотря на стремление уменьшить повреждение от зондирующего воздействия, в установке [49] применялось сверло диаметром 12 мм, по нынешним меркам — весьма внушительным. Это было сделано для обеспечения необходимой базы измерений на диаметре отверстия при превращении его из круглого в эллиптическое. Общий вид экспериментальной установки [49] представлен на рис. 4.

Важно отметить, что Матар не ограничился созданием опытного образца своей установки, а выполнил на ней ряд важных экспериментов в напряженных балках и сварных соединениях. Использованное им для калибровки измерительного устрой-

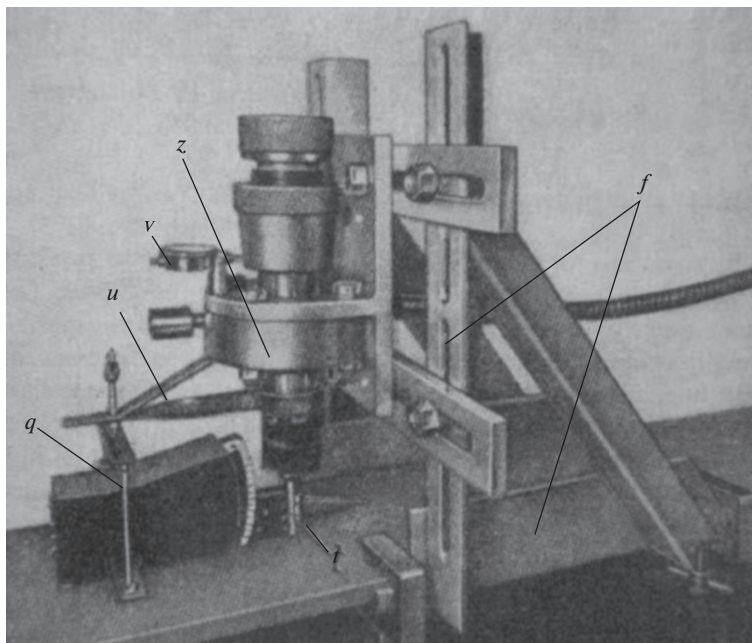


Рис. 4. Испытательная установка Матара [49]: z — дрель со сверлом t , q — трехточечный экстензометр, v — оптический датчик глубины отверстия, u, f — крепления экстензометра и установки.

ства решение задачи Кирша [52], является и в настоящее время одним из важнейших верифицирующих тестов методик и устройств, основанных на создании отверстий в напряженном теле. Результаты, полученные [49] по распределению напряжений в сварных соединениях, а именно, — что напряжения при различных методах сварки плавлением близки к пределу текучести — получили подтверждение в дальнейших работах многих последователей. Также на уровне российского [53] и американского [54] стандартов закреплено, выдвинутое Матаром, утверждение о том, что пропорциональность напряжений измеряемым удлинениям сохраняется лишь до тех пор, пока напряжения составляют менее 40% от предела текучести, что объясняется высокой концентрацией напряжений на краю отверстия [52, 55, 56].

Полезными для практики являются и результаты, показывающие, что в образце значительной толщины напряжения, которые высвобождаются при сверлении зондирующего отверстия, начиная с некоторой глубины, не оказывают заметного влияния на деформацию поверхности тела. Из этого следует, что для определения напряжений в толстых деталях не обязательно просверливать сквозные отверстия. Испытания показали, что достаточна глубина отверстий в 1.5–2 диаметра.

После скоропостижной смерти Матара в 1933 г. использованный им механический экстензометр был признан основным фактором, ограничивающим точность и надежность измерений остаточных напряжений в методе сверления отверстия, так как он имел большую измерительную базу — 60 мм, и соответственно, усреднял напряжения на этой базе; для его крепления требовались посадочные резьбовые отверстия на исследуемом изделии и, главное, — вибрации во время операций сверления делали его показания неустойчивыми и нерегулярными. Вследствие этого, делались попытки использования других способов регистрации деформаций в окрестности зондирующего отверстия. Так, например, был рассмотрен [57] рентгенографический метод, состоя-

щий в сравнительном анализе рентгенограмм окрестности отверстия в теле с напряжениями и без напряжений. Ограниченность его применения состояла в том, что надо было иметь два идентичных образца, один из которых с напряжениями, а другой — без напряжений.

Для измерения деформаций в окрестности отверстия был применен струнный метод измерения деформаций [58]. При этом использовались сразу два струнных “тенсометра”, устанавливаемых в направлениях главных остаточных напряжений (осевых и окружных) на образцах бочек валков горячей прокатки, часть из которых в производственных условиях разрушалась по причине наличия больших остаточных напряжений. Было также построено решение задачи Кирша в перемещениях, на основе которого в последующей работе [59] были выведены теоретические соотношения, позволяющие определить по замеренным в трех направлениях деформациям на поверхности образца главные остаточные напряжения при заранее неизвестных их величинах и ориентации. Выбранные направления расположения датчиков, два из которых перпендикулярны друг другу, а третий — под углом 45° между ними, явились прообразом одного из наиболее распространенных типов современных розеток тензодатчиков [54].

Изобретение в 1939 г. тензометрического датчика электрического сопротивления [60] позволило существенно улучшить качество измерения деформаций. В 1950 году [61] для измерений деформаций при сверлении отверстий было введено использование тензодатчиков, что значительно повысило точность и надежность измерений и позволило использовать отверстия меньшего размера. Годом раньше [62], а затем, в [63] и [64] предложен метод столбиков в сочетании с тензометрированием деформаций. В этом методе вокруг тензодатчика, предварительно наклеенного на поверхность тела с напряжениями, делается кольцевая проточка определенной глубины, после чего производится измерение деформаций на торце образовавшегося столбика. Преимуществом метода кольцевой проточки является отсутствие концентрации напряжений на столбике, т.е. возможность определения более высоких остаточных напряжений в рамках линейной теории упругости, чем при сверлении отверстия. Тем не менее, метод сверления отверстий остался наиболее часто используемой процедурой из-за простоты его применения и меньшего повреждения образца. На рис. 5 схематично показаны оба метода с тензорозетками из трех датчиков.

В теоретически завершенном виде связь измеряемых остаточных напряжений с данными по деформациям, снимаемым с розетки тензодатчиков при сквозном отверстии, представлена в [2]. В случае несквозного отверстия эта связь была установлена эмпирически с помощью растягивающей установки [65] и в дальнейшем стандартизирована [54].

Широкое внедрение вычислительной техники и расчетных методов в 1970–1980-х годах не осталось без внимания исследователей в области остаточных напряжений. Как средство анализа деформаций при сверлении зондирующего отверстия в теле с напряжениями стали использоваться конечно-элементные расчеты, которые обеспечили большую гибкость в выборе формы образца, материалов и экспериментальной процедуры, чем было бы возможно при использовании только аналитических или экспериментальных методов [66].

Следует отметить и недостатки измерения деформаций в окрестности зондирующего отверстия с помощью тензорозетки. Зондирующее отверстие оказывает локализованное воздействие на напряженно-деформированное состояние тела. Деформация, возникающая при сверлении отверстия, быстро убывает от кромки отверстия [52]. Тензорозетка не захватывает самых значительных деформаций, так как всегда должен быть промежуток между кромкой отверстия и тензодатчиком: требуется предохранить тензодатчик от повреждения сверлом и стружкой; нужен допуск, связанный с несовпадением центров отверстия и тензорозетки и отклонением формы отверстия от идеальной окружности. Вследствие этого, тензорозетка реагирует только на часть возни-

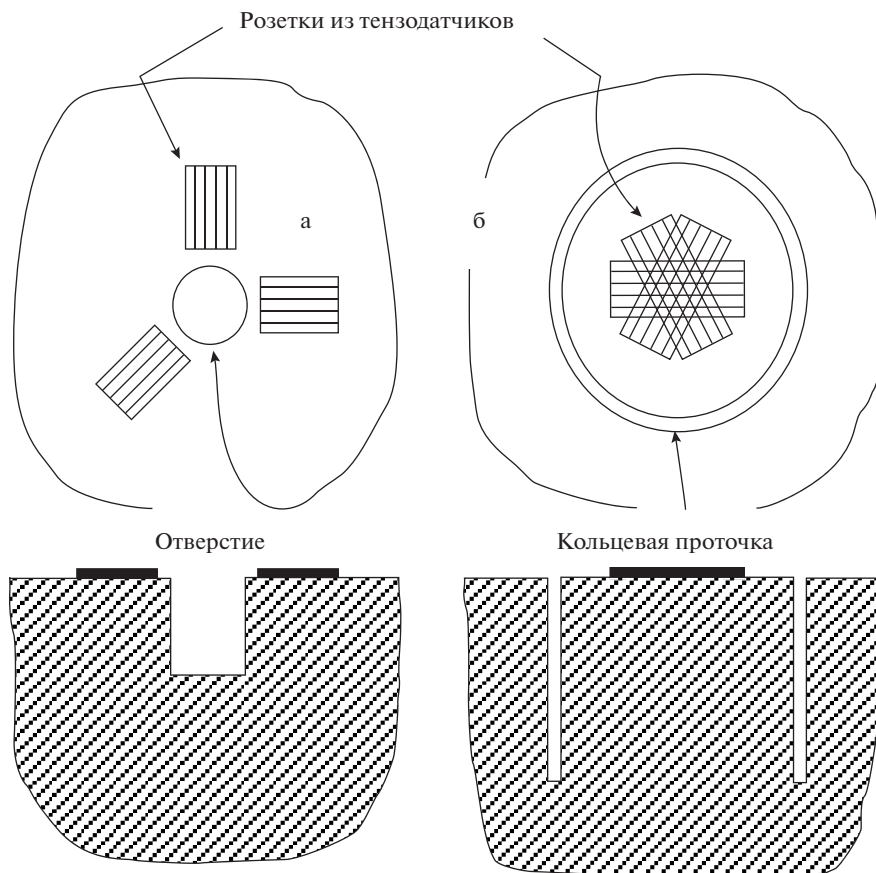


Рис. 5. Схемы зондирующего отверстия (а) и кольцевой проточки (б) с розетками тензодатчиков.

кающих деформаций, тем самым снижая чувствительность метода. Еще одним источником погрешности является усреднение деформации по длине базы датчика. Погрешность вносится и нагревом датчиков в процессе сверления. Работа с тензорозеткой не имеет наглядности, так как величина и направление напряжений вычисляются обработкой показаний тензорозетки.

С изобретением голографии [67] и лазера [68] голографическая интерферометрия становится полноценным конкурентом тензометрической розетке в измерениях малых деформаций и перемещений в окрестности зондирующего отверстия [69]. Начиная с 1980-х годов было разработано несколько оптических методов оценки остаточных напряжений методом сверления отверстия [3, 4, 70–75]. Эти методы имеют преимущество в предоставлении данных о полном поле перемещений в окрестности зондирующего отверстия, позволяющем сразу определять направление главных напряжений, в оперативности получаемых результатов, меньшей трудоемкости в подготовке к измерениям при сохранении той же точности определения остаточных напряжений, что и при тензометрическом съеме информации. На рис. 6 сравнивается локализованная информация, предоставляемая тензометрическими датчиками, с гораздо более богатой информацией, доступной при измерениях смещений в полном поле перемещений в окрестности отверстия.

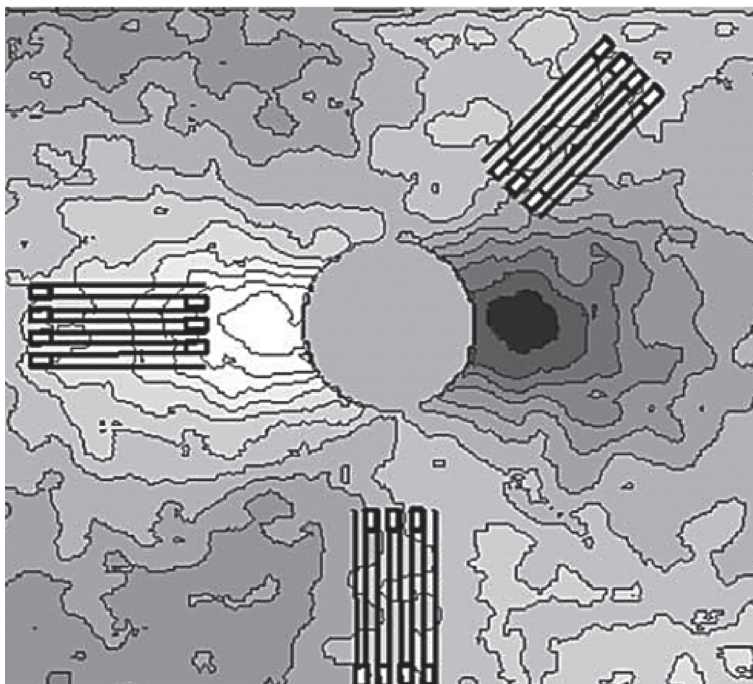


Рис. 6. Сравнение возможностей снятия информации с тензорозетки и с полного поля перемещений в окрестности отверстия [50].

Такие полнополюсные измерения обеспечивает голографическая интерферометрия [3, 4, 70], которая однако требует трудоемкой и аккуратной работы по записи и обработке голограмм. Электронная спекл-интерферометрия (ESPI) наиболее популярна в связи с тем, что использование ESPI менее трудоемко; спекл-интерферограмма получается на экране монитора компьютера непосредственно с видеокамеры путем вычитания спеклограмм поверхности образца в исходном и деформированном состояниях, в том числе — в режиме реального времени [71–76]. Важно отметить, что спекл-интерферометрия позволила применить интерферометрию к телам с геометрически произвольной поверхностью, которой обладает большинство технических объектов и деталей [71]. Измеряемой информацией в спекл-интерферометрии выступают пятнистые картины (спекл-структуры), возникающие в поле наблюдения при освещении пучком когерентного света диффузной поверхности. Пятна или спеклы случайного размера и яркости образуются в результате взаимной интерференции многих волн, идущих от разных центров рассеяния. Каждое пятнышко спеклограммы имеет определенный уровень яркости, который в восьмибитной градации принимает значение от 0 (черный) до 255 (белый). При микроизменении положения наблюдаемого участка поверхности или любого его фрагмента изменяются яркости пятнышек, принадлежащих одному и тем же координатам спеклограммы [72]. Рассматривая спеклограммы исходного и измененного состояний поверхности как яркостные матрицы одинакового размера и производя вычитание по модулю одной из другой, получают спекл-интерферограмму смещений поверхности. При этом перемещения, кратные половине длины волны используемого лазера ($\lambda/2$), в которых модули интенсивностей совпадают, формируют темные полосы интерферограммы, а промежуточные значений переме-

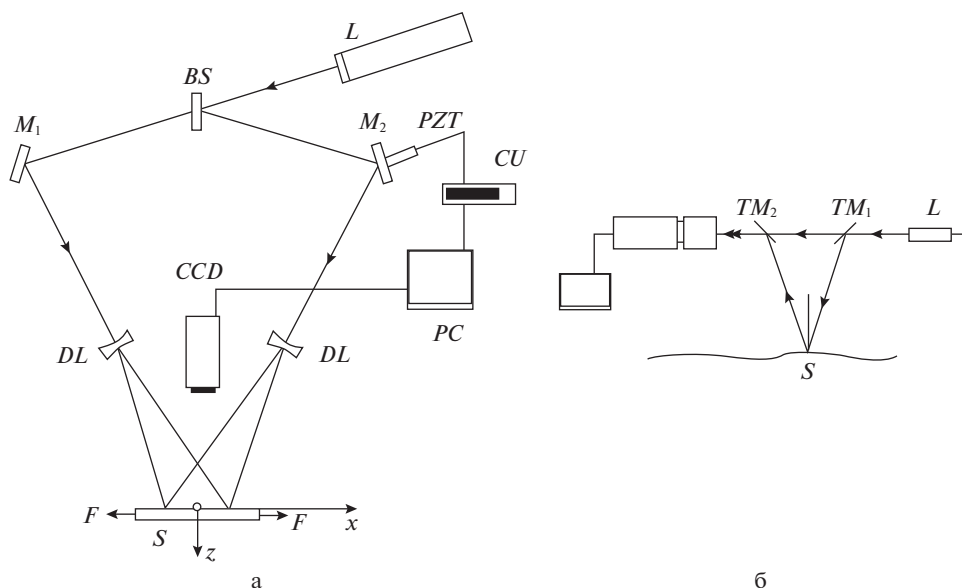


Рис. 7. Оптические схемы интерферометров ESPI для регистрации плоскостной (а) [74] и нормальной (б) компонент смещений образца: *L* – лазер, *CCD* – видеокамера, *PC* – компьютер, *S* – образец, *TM*₁, *TM*₂ – полупрозрачные зеркала, *M*₁, *M*₂ – глухие зеркала, *BS* – расщепитель луча, *DL* – рассеивающая линза, *CU* – блок управления, *PZT* – пьезоэлектрический преобразователь.

щений – светлые полосы. Перемещения в выбранном направлении определяются умножением числа темных или светлых полос в этом направлении на $\lambda/2$.

В зависимости от используемой оптической схемы возможны измерения в плоскости поверхности образца (тангенциальные смещения) [73], по нормали к поверхности с регистрацией нормальных перемещений [74, 75] или под некоторым углом к поверхности [76]. Важной особенностью ESPI является регистрация перемещений поверхности образца без прикрепления дифракционной решетки, необходимой при измерениях муаровым методом [77, 78]. Это позволяет быстро проводить измерения и использовать ESPI в качестве компактного и мобильного инструмента контроля качества. Измерения тангенциальных компонент смещений используются при определении остаточных напряжений в стандарте ASTM [54], а – нормальных – в ГОСТ [53].

На рис. 7 показаны оптические схемы интерферометров ESPI, применяемых для регистрации одной из тангенциальных рис. 7,а [74] и нормальной рис. 7,б компонент смещений образца в окрестности отверстия. Следует отметить, что измерение нормальной компоненты смещения при определении напряжений имеет ряд преимуществ перед измерениями тангенциальных компонент: 1) более простая оптическая схема интерферометра (видно из сопоставлений рис. 7,а и б), 2) простое обеспечение максимальной теоретической чувствительности метода применением освещения объекта практически по нормали к его поверхности, в то время как добиться максимальной теоретической чувствительности в интерферометрическом методе измерения плоскостных деформаций достаточно сложно [79]: освещенность образца снижается при увеличении угла падения лучей на объект свыше 60° от нормали; чувствительность же пропорциональна синусу этого угла.

На рис. 8 показаны стадии формирования электронной спекл-интерферограммы при регистрации нормальных смещений в окрестности зондирующего отверстия на

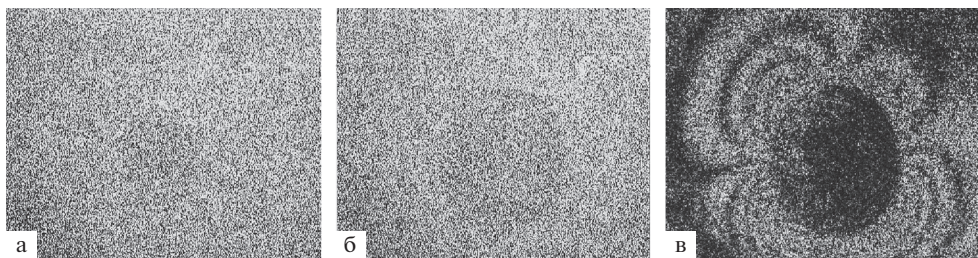


Рис. 8. Стадии формирования спекл-интерферограммы: исходные состояния до (а) и после сверления отверстия (б), спекл-интерферограмма, полученная поточечным вычитанием матриц исходных состояний (в).

сварном шве: спеклограмма исходного состояния с надсверленным отверстием рис. 8, а, спеклограмма после сверления отверстия рис. 8,б, спекл-интерферограмма, полученная поточечным вычитанием матриц исходных состояний, отображающая линии уровня нормальных смещений в окрестности отверстия рис. 8,в.

Еще одним преимуществом измерения нормальной компоненты перемещения является определение направлений главных напряжений непосредственно по интерференционной картине, тогда как при измерениях по тангенциальным компонентам определяется перемещение только по одной из осей, необязательно совпадающей с направлением главного напряжения; нахождение главных направлений оказывается при этом нетривиальной задачей. Если же направления главных остаточных напряжений заранее известны, то показатели точности их определения по тангенциальным смещениям выше, чем по нормальным, т.к. нормальные смещения происходят в основном из-за эффекта Пуассона и их величина поэтому значительно меньше, чем у плоскостных смещений. Наилучших результатов удастся добиться комбинацией внеплоскостных и плоскостных измерений [74].

Для расчетно-теоретического обоснования измерений остаточных напряжений по нормальным перемещениям окрестности отверстия используются результаты численного решения трехмерной задачи теории упругости о полупространстве с несквозным цилиндро-коническим отверстием [3, 75]. Считается, что полупространство находится под действием самоуравновешенного двухосного поля напряжений σ_x , σ_y параллельных его границе. Распределение напряжений по глубине в пределах глубины h цилиндрической части малого несквозного отверстия, принимается в виде

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_x^0 \\ \sigma_y^0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \sigma_x^1 \\ \sigma_y^1 \end{Bmatrix} \left(1 - 2 \frac{z}{h}\right),$$

где первое слагаемое характеризует постоянную компоненту, а второе — переменную, — самоуравновешенную по глубине отверстия (рис. 9).

Решение трехмерной задачи о растягиваемом полупространстве с несквозным отверстием без упрощения весьма времяемкое даже на современных серверах. Поэтому, имея в виду, что оно должно быть подобно решению задачи Кирша в плане изменения по окружной координате θ , может быть выполнено отделение этой координаты и сведение трехмерной задачи к двум двумерным: осесимметричной и задачи, компоненты решения которой меняются по угловой координате по законам $\cos 2\theta$ и $\sin 2\theta$. На рис. 10 показаны конечно-элементная сетка в осесимметричном случае (цифрами 1–4 отмечены участки с разным сгущением сетки в разрезе цилиндрической системы координат в пределах расчетной области r_1 , $-z_1$, r_0 — радиус цилиндрической части от-

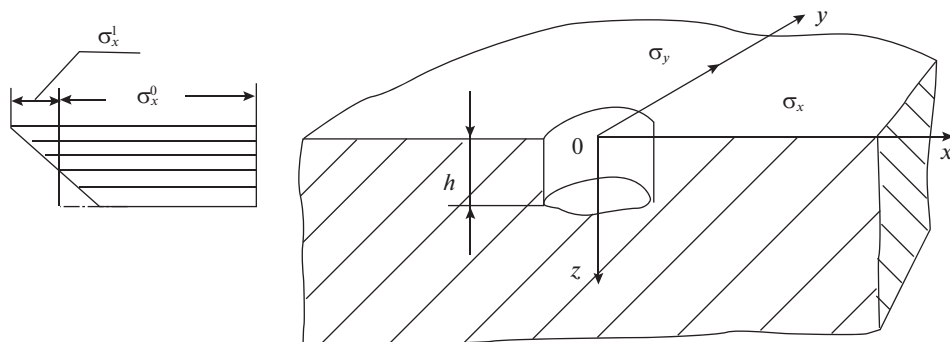


Рис. 9. Схема полупространства с зондирующим отверстием и исходным распределением напряжений.

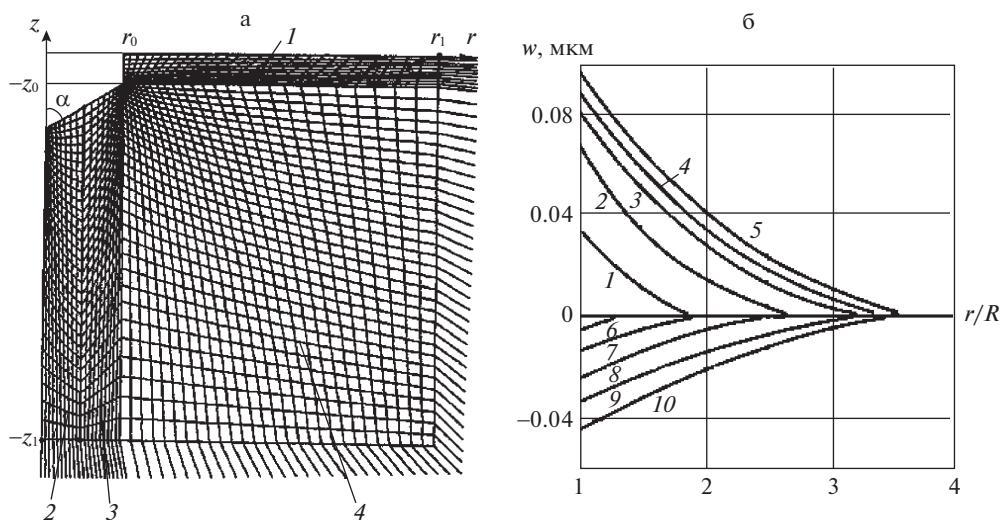


Рис. 10. Численное решение [3] трехмерной задачи о несквозном цилиндро-коническом отверстии при постоянном распределении напряжений по глубине: (а) — конечно-элементная сетка в окрестности отверстия; (б) — графики нормальных перемещений поверхности полупространства из алюминия при глубинах отверстия от $0.4R$ до $2R$ с шагом $0.4R$; кривые 1–5 — по направлению действия нагрузки $\sigma_x^0 = 10$ МПа, $\sigma_y^0 = 0$; кривые 6–10 — в перпендикулярном направлении.

верстия, z_0 — ее глубина), а также графики получающихся нормальных перемещений при тестовой нагрузке в 10 МПа [3].

Как видно из рис. 10, б, при малом несквозном отверстии уровни нормальных перемещений в его окрестности существенно выше по направлению действующих напряжений, чем в перпендикулярном направлении, что выделяет направление нагружения. С углублением отверстия, это различие постепенно снижается. Одновременно снижается вклад в перемещение поверхности образца от следующих ступеней заглубления отверстия.

В практике измерений вместо набора кривых, показанных на рис. 10, б, удобнее пользоваться экспресс-методикой, основанной на одной калибровочной кривой. Для

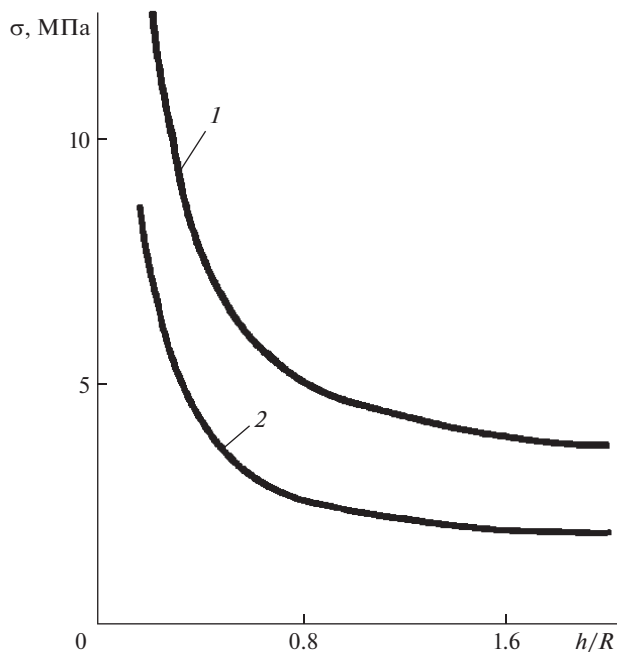


Рис. 11. Зависимости цены полосы σ от безразмерной глубины h/R отверстия для алюминия: 1 – учет темных интерференционных полос, 2 – учет и темных и светлых полос [3].

этого находится “цена полосы”: исходное напряжение на каждом шаге сверления делится на перемещение края отверстия в выбранном направлении, выраженное в числе темных или светлых полос интерферограммы, накопленных на предыдущих шагах с учетом последнего шага сверления [3, 4, 75].

На рис. 11 представлена зависимость “цены полосы” σ в МПа от безразмерной глубины h/R отверстия радиусом $R = 1$ мм для тестового материала с модулем упругости 70 ГПа. Цифрой 1 отмечен график, когда в расчет принимаются только темные полосы, цифрой 2 – темные и светлые полосы; в этом случае цена полосы в два раза меньше.

Аналогично строится график цены полосы, если определение остаточных напряжений проводится при помощи касательной компоненты вектора перемещений.

Обобщение результатов, полученных для тестового материала, на другой материал с модулем упругости E_1 , радиусом R_1 и глубиной отверстия h_1 дается формулой [75]:

$$\sigma = \left(\frac{a}{h_1} + b \right) \frac{R E_1}{R_1 E} N, \quad (2.1)$$

где σ – величина главного остаточного напряжения, N – число темных полос на интерферограмме. Значения калибровочных констант a и b в гиперболической аппроксимации кривой 1 на рис. 11 равны: $a = 20$ МПа·мм, $b = 25$ МПа.

Дальнейшим обобщением формулы (2.1) является формула [80]:

$$\sigma = \left(\frac{a}{h_1} + b \right) \frac{R E_1}{R_1 E} \frac{v}{v_1} \frac{\lambda_1}{\lambda} \frac{N}{\cos \alpha}, \quad (2.2)$$

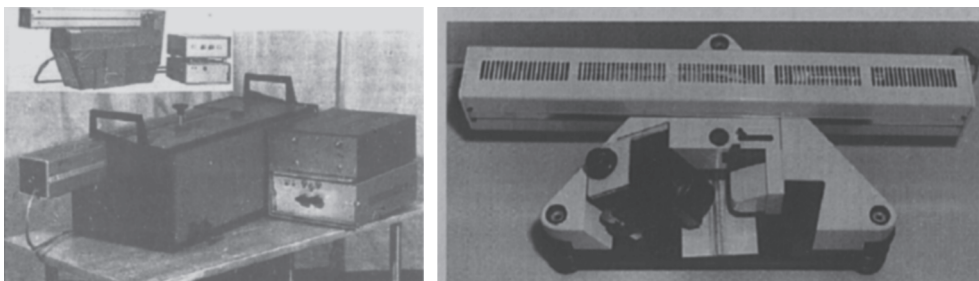


Рис. 12. Переносные приборы для измерения остаточных напряжений на гелий-неоновом лазере (1985 и 1994 гг.).

в которой учтено возможное отклонение коэффициента Пуассона ν_1 испытываемого материала от тестового значения, а также то, что формула (2.1) получена для оптической схемы Майкельсона при освещении тела лазером с длиной волны $\lambda = 0.633$ мкм. При освещении другим, например, лазером с длиной волны $\lambda_1 = 0.532$ мкм одному и тому же уровню подъема поверхности будет соответствовать большее число полос интерферограммы, что учитывается в (2.2) дополнительным множителем λ_1/λ . В случае оптической схемы, изображенной на рис. 7,б, для которой направление освещения отклонено от нормали к поверхности тела на угол α добавляется множитель $1/\cos(\alpha)$.

3. Опыт измерения остаточных напряжений методом отверстий в сварных соединениях. В связи с тем, что остаточные напряжения представляют собой прежде всего техническую проблему, для их измерений потребовалась разработка приборов, работающих не только в лабораторных, но и в производственных и полевых условиях. В этих целях было создано несколько модификаций портативных переносных измерительных систем под общим названием “ЛИМОН” (Лазерный Интерферометрический Метод Определения Напряжений). Часть из них, содержащая в качестве источников излучения гелий-неоновый лазер, представлена на рис. 12 [3, 4].

С этими приборами в производственных условиях был выполнен ряд исследований, результаты которых существенно повлияли на технические характеристики изделий. Остановимся на некоторых из них.

Измерения остаточных напряжений в сферических сосудах высокого давления. Сосуды высокого давления в форме сферических оболочек широко применяются в промышленности. Особое внимание привлекают сосуды с высоким значением энергетического показателя PV ($\text{м}^3 \text{ кгс/см}^2$) $> 10^7$ Дж при минимальном весе. Титановые сплавы перспективны как базовый материал для таких сосудов. Однако после изготовления и завершения испытаний опытной партии сосудов с объемом порядка 1000 л, рассчитанных на рабочее давление более 300 кгс/см^2 , выполненных штамповочно-сварной технологией из титанового сплава ВТ6ч, отмечались разрушения серийно изготовленных изделий [3]. При исследовании причин разрушений были измерены остаточные напряжения в осколках этих сосудов, а затем — и в не разрушившихся изделиях. Но эти измерения не прояснили ситуацию. Тогда было принято решение о проведении измерений остаточных напряжений после каждой операции изготовления сосуда: сварки, локальной и общей термической обработки, подварки дефектов, механической обработки. Выяснилось, что введенный в первоначальную технологическую цепочку общий вакуумный печной отжиг, несмотря на то, что он полностью снимал остаточные напряжения, также влиял на механические свойства материала: малые отклонения режима при проведении термообработки, неизбежные в серийном производстве, вызывали нежелательное наводораживание титана, что резко снижало

эксплуатационные характеристики изделия, особенно при циклической нагрузке. Поэтому вместо общего печного отжига была предложена локальная тепловая обработка, при которой нагревалась только зона шва — наиболее напряженная часть сосуда. Сравнение эпюр остаточных напряжений после сварки и после локальной термической обработки показало, что эта термообработка не снимала полностью остаточные напряжения, а только снижала их до безопасного уровня, перераспределяя энергию напряжений на больший объем. В итоге технология изготовления сосудов была значительно удешевлена, а качество изделий повышено.

Измерения остаточных напряжений в сварных трубопроводах АЭС. Объект для измерения остаточных напряжений был определен исходя из реальных задач, сложившихся в условиях монтажа технологического оборудования АЭС, когда возникли осложнения при сварке стыков трубопровода [4]. Несмотря на соблюдение технологии сварки и термообработки, имелась достаточно большая статистика образования трещин длиной от 5 до 400 мм в сварных соединениях как на стадии монтажа, так и в процессе эксплуатации. Проблема повышения качества и надежности работы трубопровода встала настолько остро, что было решено ввести в программу исследования качества сварных соединений такой параметр, как уровень и распределение остаточных напряжений. По этой программе методом отверстия проведены замеры остаточных напряжений в лабораторных условиях на образцах, изготовленных по той же технологии сварки и термообработки, что и реальные конструкции, а затем, — в условиях монтажа на рабочих объектах. Обнаружено, что уже на первом этапе технологического процесса при выполнении корневого шва создаются значительные остаточные напряжения, а последующие этапы не приводят к их существенному снижению. Выяснилось, что особую опасность представляли соединения типа “труба—колесо”, где уровень напряжений достигал 350 МПа. Установлено также, что, принятая в технологическом цикле, термообработка, состоящая в отпуске при 620°C в течение 2-х часов, не приводила к снижению напряжений в сварном соединении.

Полученные результаты позволили отработать технологию монтажной сварки трубопроводов, ликвидировав образование трещин в сварных соединениях. Было отмечено, что вносимый в исследуемую конструкцию в процессе измерения дефект — отверстие диаметром 2 и глубиной 1 мм — соизмерим с величиной допустимых дефектов. Поэтому в данной работе примененный метод измерения был признан неразрушающим.

Измерения остаточных напряжений в корпусе коллектора парогенератора АЭС. Еще одним примером измерений остаточных напряжений в производственных условиях были измерения в корпусе коллектора парогенератора (толстостенная труба с поясом из множества отверстий). Высверливание единичного отверстия в толстостенной трубе не влияет на ее жесткость и прочность, перфорация множественными отверстиями высокой плотностью наводит большое поле напряжений, вызывающее деформации и иногда разрушения. Именно в вершине неперфорированного клина и была обнаружена трещина на работающем парогенераторе.

Измерения методом отверстий остаточных напряжений, выполненные на новом корпусе парогенератора, показали, что в окрестности клина имеются значительные растягивающие напряжения порядка 200 МПа, наведенные операциями сверления. Сложившись с активными напряжениями от температурных перепадов при эксплуатации коллектора, они могли способствовать развитию микротрещин, образовавшихся при взрывной опрессовке трубок, что в итоге привело к трещине в корпусе парогенератора [4]. Фотография с участием одного из авторов процесса измерений остаточных напряжений в корпусе парогенератора приведена на рис. 13; цифрой 1 обозначен лазерный интерферометр.

На основе полученных результатов измерений и теоретических оценок на следующих поколениях парогенераторов технология запрессовки трубок взрывом была заме-

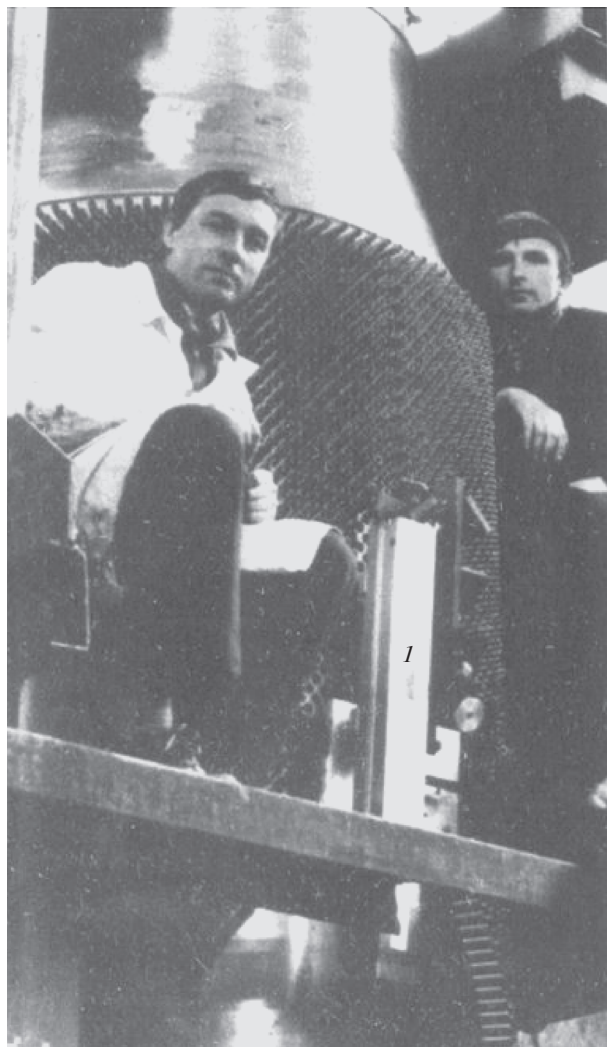


Рис. 13. Измерения остаточных напряжений в корпусе парогенератора ПГВ–1000; *I* – лазерный интерферометр.

нена гидровальцовкой, обеспечивающей недопущения образования микротрещин в их окрестности [81].

Приведенные примеры показывают важность знания остаточных напряжений, наводимых технологическими процессами и снабжения этими знаниями создателей ответственных конструкций, чтобы эти напряжения были учтены в расчетных схемах и при необходимости были приняты меры по их уменьшению.

Большое количество выполненных измерений в лабораторных и производственных условиях способствовало совершенствованию технологии измерений и регистрирующей аппаратуры. Один из вариантов мобильного спекл-интерферометра для измерения остаточных напряжений представлен на рис. 14. В нем используются современ-



Рис. 14. Мобильный спекл-интерферометр для измерения остаточных напряжений (2000 г.).

ные комплектующие: компактный лазер и видеокамера, позволившие снизить массу измерительной части прибора до 2 кг.

С помощью этого прибора проводились измерения остаточных напряжений в промышленных условиях на разных конструкциях. На рис. 15,а показан рабочий момент измерений в спиральном сварном шве трубы газопровода большого диаметра. Многочисленные зондирующие отверстия в окрестности шва на внешней поверхности этой трубы показаны на рис. 15,б; для повышения контрастности интерферограмм поверхность объекта вблизи мест сверления отверстия покрывалась диффузно отражающей краской [82]. Одним из преимуществ спирального шва перед кольцевым является то, что главные остаточные напряжения располагаются под углом к направлению прокатки ленты, что повышает работоспособность металла [83].

На рис. 16 показаны характерные интерферограммы, полученные в разных местах сварных соединений на трубе и вырезках из трубы [84]: интерферограмма на рис. 16,а отображает двухосное напряженное состояние с главными напряжениями, примерно одинаковыми по величине, но противоположными по знаку; на рис. 16,б — двухосное напряженное состояние с большим градиентом по одному направлению; на рис. 16,в — напряженное состояние, близкое к одноосному, а на рис. 16,г — равноосное напряженное состояние.

По результатам измерений на наружной и внутренней поверхностях трубы и образцов были построены эпюры напряжений. На рис. 17,а показаны эпюры напряжений на наружной поверхности трубы поперек спирального шва (центр шва соответствует началу координат). Линией с треугольными маркерами отмечено распределение продольных приповерхностных напряжений, параллельных оси шва, — с квадратными маркерами — напряжений, перпендикулярных оси шва. Как видно из этих эпюр, продольные напряжения у поверхности шва заметно отличаются от напряжений в глубине наплавленного материала, которые отображены штриховой линией (в области $r = 0$, $\sigma = 200\text{--}250$ МПа).

На рис. 17,б представлены эпюры напряжений по окружности наружной поверхности трубы вдали от ее торца (на расстоянии одного диаметра трубы). Распределение

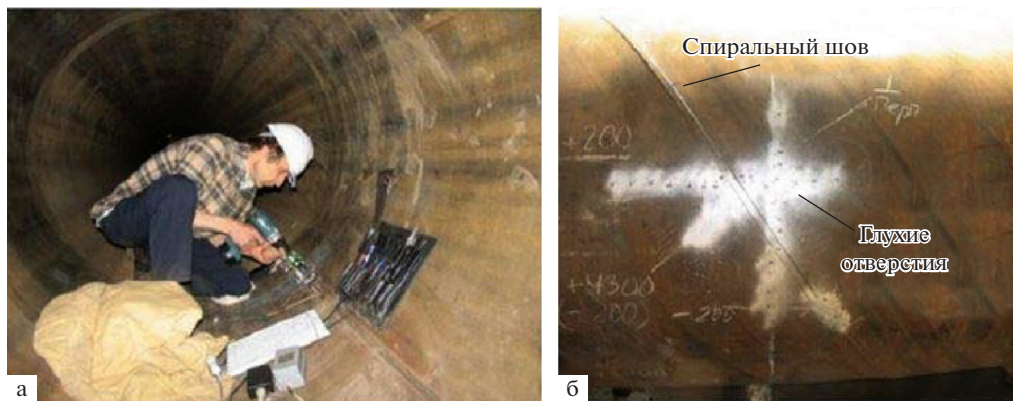


Рис. 15. Измерение остаточных напряжений в зоне сварного шва на газовой трубе большого диаметра: (а) — сверление внутри трубы, (б) — зондирующие отверстия на наружной поверхности трубы вблизи спирального шва.

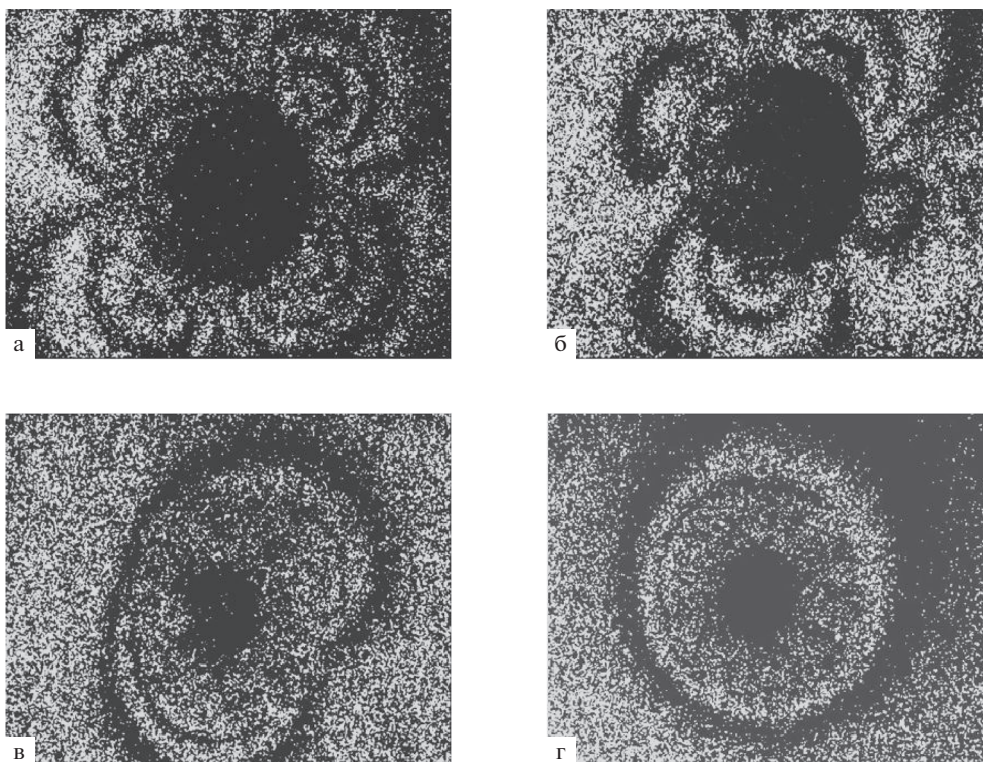


Рис. 16. Характерные интерферограммы [84].

приповерхностных напряжений σ_1 , ориентированных вдоль образующей, показано с внешней стороны, а напряжений σ_2 , действующих в окружном направлении — внутри круговой линии, отображающей окружность трубы.

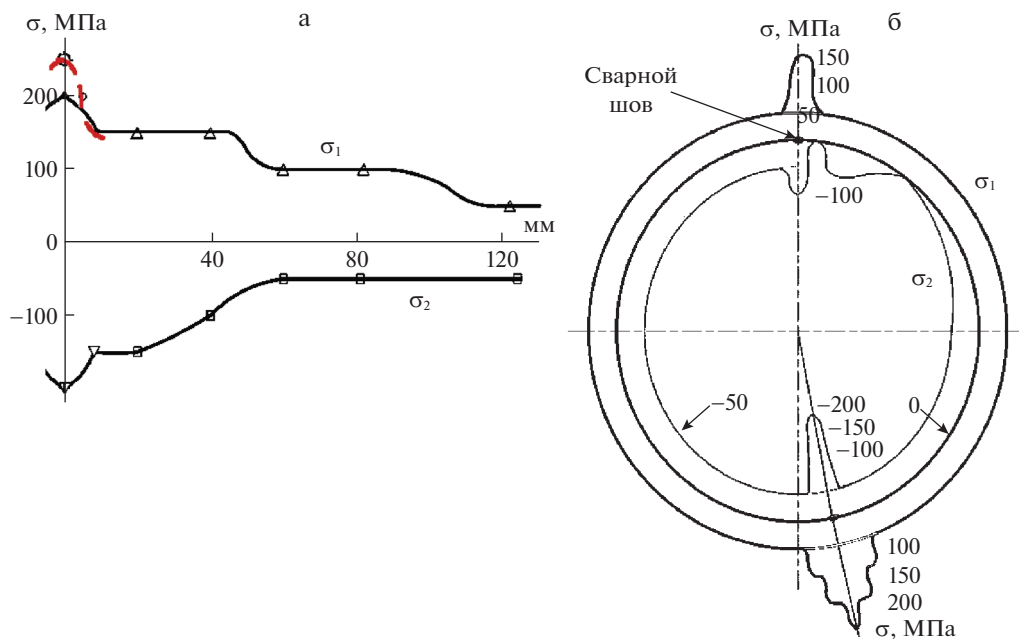


Рис. 17. Эпюры напряжений [84] (а) на наружной поверхности трубы поперек спирального шва (сплошные линии — приповерхностные напряжения, штриховые красные линии — напряжения в глубине наплавленного материала), (б) по окружности наружной поверхности трубы вдали от ее торца (σ_1 в зоне $\sigma > 0$, σ_2 в зоне $\sigma < 0$).

Из приведенных зависимостей видно, что распределения остаточных напряжений вдоль швов и по окружности трубы имеют всплески в узких зонах — на шве и в ближайшей зоне термовлияния. Уровень растягивающих и сжимающих напряжений на наружной поверхности в спиральном и в стыковом шве (на его несрезанной выпуклости), а также в ближайшей зоне термовлияния на расстояниях до 15 мм от линии сплавления составляет 150–200 МПа и плавно снижается до уровня 0–50 МПа по мере удаления от шва. На срезанной выпуклости шва уровень растягивающих напряжений достигает 250 МПа. Главные растягивающие напряжения на швах и в зоне термовлияния направлены вдоль их осей, а главные сжимающие — перпендикулярно этим осям. При удалении от швов ориентация главных напряжений меняется случайным образом.

Характер распределения напряжений в швах и по окружности на внутренней поверхности труб и образцов такой же, как на наружной, но максимальный уровень напряжений составляет не более 150 МПа.

В целом по окружности наружной поверхности отмечены в среднем более высокие растягивающие, а внутренней — сжимающие напряжения. Установлено также, что применяемая в рамках технологического процесса термическая обработка, предназначенная в основном для придания материалу заданных механических характеристик, практически не влияла на уровень остаточных напряжений и их распределение.

Заключение. Проблема остаточных напряжений сопровождает развитие техники и производства с момента их зарождения и не теряет актуальности в настоящее время. Для диагностики остаточных напряжений применяются разнообразные неразрушающие и в разной степени повреждающие методы. Среди них выделяется слабopовреждающий метод зондирующего отверстия, для которого отработаны различные мето-

дики регистрации высвобождаемых в окрестности отверстия малых перемещений и деформаций.

В работе представлен обзор истории развития механических разрушающих методов диагностики остаточных напряжений, применявшихся до изобретенного Матаром слабopовреждающего метода отверстия. Подробно изложены особенности этого метода, прежде всего в плане регистрации деформаций и перемещений в окрестности зондирующего отверстия. Проанализированы два основных способа регистрации – с помощью тензометрии и лазерной интерферометрии. Представлено расчетно-теоретическое обоснование методики измерений остаточных напряжений по нормальным перемещениям окрестности отверстия на основе численного решения трехмерной задачи теории упругости об одноосевом растяжении полупространства с цилиндро-коническим несквозным отверстием, которая используется в нескольких поколениях лазерно-интерферометрических измерительных систем, созданных как для лабораторных исследований, так и в мобильных вариантах для измерений остаточных напряжений в производственных и полевых условиях. Рассмотрены примеры конкретных измерений остаточных напряжений с помощью этого метода в лабораторных и заводских условиях. Итогом этих измерений становилось во многих случаях совершенствование технологии изготовления и повышение качества выпускаемой продукции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-18-50142.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витман Ф.Ф. Остаточные напряжения. М.; Л.: ГТТИ, 1933. 64 с.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. 232 с.
3. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. и др. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Физматлит, 1996. 240 с.
4. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Антонов А.А. и др. Технологические напряжения в сварных соединениях. М.: МГОУ, 2004. 254 с.
5. Макаров Г.И. Протяженные разрушения магистральных газопроводов. М.: Академия, 2002. 208 с.
6. Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров. М.: Недра, 1995. 253 с.
7. Рыбалкин П.Т., Иванов С.Д., Чернышев Г.Н. Термическая обработка электроплавленных огнеупоров. М.: Металлургия, 1986. 190 с.
8. Витман Ф.Ф., Дмитриева Т.Г., Пух В.П. Остаточные напряжения в стеклах, закаленных в жидкостях // ФТТ. 1962. Т. 4. № 8. С. 2151–2159.
9. Кривко А.И. Влияние релаксаций напряжений на коробление деталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 1978. № 2. С. 32–36.
10. Быков В.Г., Салтыков М.А., Горбунов М.Н. Причины необратимых формoизменений тонкостенных вкладышей и пути повышения надежности подшипников высоконагруженных дизелей // Двигателестроение. 1980. № 6. С. 54–57.
11. Букатый С.А., Дмитриев В.А., Папшев Д.Д. Влияние технологических остаточных напряжений на деформации тонкостенных кольцевых деталей // Вестн. машиностр. 1984. № 6. С. 40–44.
12. Вивденко Ю.Н. Влияние наследственных и внесенных обработкой остаточных напряжений на коробление дисков ГТД // Авиац. промышл. 1988. № 2. С. 25–28.
13. Инденбом В.Л., Томиловский Г.Е. Измерение внутренних напряжений в кристаллах синтетического корунда // Кристаллография. 1958. Т. 3. № 4. С. 593–599.
14. Крымов В.М., Носов Ю.Г., Бахолдин С.И. и др. Остаточные напряжения в стержнях сапфира, выращиваемых способом Степанова // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 4. С. 727–732.
15. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 575 с.

16. Куряева Р.Г., Сурков Н.В. Изменение под давлением показателя преломления и плотности стекол системы $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2$, где $x = 2, 4$ // Геохимия. 2008. № 1. С. 100–103.
17. Гликман Л.А. Коррозионно-механическая прочность металлов. Л.; М.: Машгиз, 1955. 176 с.
18. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. М.: Металлургия, 1985. 192 с.
19. Петров Л.Н. Коррозия под напряжением. Киев: Вища школа, 1986. 142 с.
20. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. М.: Машиностроение, 1988. 290 с.
21. Бобылев А.В. Растрескивание медных сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1993. 352 с.
22. Троценко В.Т., Покровский В.В., Ярусевич В.Л. и др. Скорость роста усталостных трещин в полях остаточных напряжений сварных титановых соединений с различным содержанием охрупчивающих примесей // Пробл. прочн. 1990. № 11. С. 8–14.
23. Подзей А.В., Сулима А.М., Евстигнеев М.И. и др. Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
24. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений. Киев: Наук. думка, 1973. 216 с.
25. Труфяков В.И. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. Киев: Наук. думка, 1990. 256 с.
26. Прохоров Н.Н. Горячие трещины при сварке. М.: Машгиз, 1953. 220 с.
27. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 248 с.
28. Кузнецова Е.В., Мелехин Д.А., Елистратова Е.С., Виндокуров Д.В. Поведение оболочек тепловыделяющих элементов при эксплуатации с учетом остаточных напряжений // Прикл. матем. и вопросы управл. 2016. № 3. С. 23–34.
29. Кузнецова Е.В., Арташева А.А. Влияние эксплуатационных режимов и технологических остаточных напряжений на коррозионное растрескивание циркониевых оболочек, используемых в атомной энергетике // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2012. № 1. С. 51–61.
30. Пенэжко П. “Радиоактивный” прокурор // Инженер. 1990. № 12. С. 2–4.
31. Козинцев В.М., Пономарев И.И., Попов А.Л. и др. Технологические остаточные напряжения и аварии в парогазогенераторах АЭС // Тр. 4-й Всеросс. конф. “Новое в экологии и без-опасн. жизнедеят. 1999”. СПб.: БГТУ. 1999. Т. 1. С. 553–557.
32. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1980. 280 с.
33. Витман Ф.Ф., Богуславский И.А., Пух В.П. Упрочнение стекла // ФТТ. 1962. Т. 4. № 8. С. 2160–2168.
34. Богуславский И.А. Высокопрочные закаленные стекла. М.: Стройиздат, 1969. 208 с.
35. Кудрявцев И.В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности машин. М.: Машиноведение, 1969. 100 с.
36. Подстригач Я.С., Ломакин В.А., Коляно Ю.М. Термоупругость тел неоднородной структуры. М.: Наука, 1984. 368 с.
37. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение, 2005. 226 с.
38. Вологдин В.П. Деформации и напряжения при сварке судовых конструкций. М.: Оборонгиз, 1945. 149 с.
39. Steinzig M., Ponslet E. Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry: Part I // Exp. Tech. 2003. V. 27. № 3. P. 43–46.
40. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. 2002. № 10. С. 17–24.
41. De Bolla P. The Fourth of July and the Founding of America. Woodstock; New York: Overlook Press, 2008. 192 с.
42. Родман Т.Д. Отчет об отливке и проб, до 2450 обыкновенных выстрелов, двух 10-дюймовых орудий; одного отлитого сплошной болванкой и охлажденного снаружи, другого отлитого с готовым каналом и охлажденного изнутри, капитана Родмана // Горный ж. 1863. Кн. 07 (июль). С. 27–76.
43. Калакуцкий Н.В. Материалы изучения стальных орудий // Артиллер. ж. 1867. № 5. С. 784–817.

44. *Калакуцкий Н.В.* Исследование внутренних напряжений в чугунах и сталях. СПб.: тип. и хромолит. А. Траншель, 1888. 116 с.
45. *Давиденков Н.Н.* Избранные труды. Т. 2: Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. Киев: Изд. АН УССР, 1981. 655 с.
46. *Давиденков Н.Н.* Струнный метод измерения деформаций. Л.; М.: ГИТТЛ, 1933. 60 с.
47. *Sachs G.* Der Nachweis innerer Spannungen in Stangen und Rohren // *Zeitschr. für Metallkunde*. 1927. V. 19. S. 352–357.
48. *Соколов И.А., Уральский В.И.* Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 96 с.
49. *Mathar J.* Ermittlungen von Eigenspannungen durch Messung von Bohrloch-verformungen // *Arch. Eisenhüttenwes.* 1932. V. 6. № 6. P. 277–281.
50. *Schajer G.S.* Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // *Exp. Mech.* 2010. V. 50. № 2. P. 245–253.
51. *Huang X., Liu Z., Xie H.* Recent progress in residual stress measurement techniques // *Acta Mech. Solida Sin.* 2013. V. 26. № 6. P. 570–583.
52. *Kirsch G.* The theory of elasticity and the needs of the theory of strength // *J. Assoc. Ger. Eng.* 1898. V. 42. P. 797–807.
53. ГОСТ Р 52891–2007. Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009. 15 с.
54. ASTM E837-13 2013. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International. West Conshohocken (PA), 2013. 16 p.
55. *Савин Г.Н.* Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наук. думка, 1968. 496 с.
56. *Петерсен Р.* Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.
57. *Давиденков Н.Н., Цобкалло С.О.* Новый метод рентгенографического решения плоской задачи теории упругости // *ЖТФ*. 1941. Т. XI. Вып. 5. С. 389–397.
58. *Курносов Д.Г., Якутович М.В.* Метод измерения напряжений в пластинах и в поверхностном слое крупных изделий // *Заводская лабор.* 1939. Т. 8. № 10–11. С. 1148–1154.
59. *Курносов Д.Г., Якутович М.В.* Измерение остаточных напряжений методом высверливания отверстий // *Заводская лабор.* 1946. Т. 12. № 11–12. С. 960–987.
60. *Ruge A.C.* Strain Gauge. U.S. Pat. No. 2,350,972. June 6, 1944. Filed Sept. 16, 1939 / Cambridge, Mass. Patent Office. 5 p.
61. *Soete W., Vancrombrugge R.* An industrial method for the determination of residual stresses // *Proc. SESA*. 1950. V. 8. № 1. P. 17–28.
62. *Цобкалло С.О., Васильев Д.М.* Измерение остаточных напряжений путем вырезания столбика // *Заводская лабор.* 1949. Т. 15. № 2. С. 199–207.
63. *Milbradt K.P.* Ring method determination of residual stresses // *Proc. SESA*. 1951. V. 9. № 1. P. 63–74.
64. *Гликман Л.А., Писаревский М.М.* Измерение остаточных напряжений в поверхностном слое крупных изделий с помощью тензометрирования // *Заводская лабор.* 1951. Т. 17. № 1. С. 75–81.
65. *Rendler N.J., Vigness I.* Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses // *Exp. Mech.* 1966. V. 6. № 12. P. 577–586.
66. *Schajer G.S.* Application of finite element calculations to residual stress measurements // *J. Eng. Mater. Technol.* 1981. V. 103. № 2. P. 157–163.
67. *Gabor D.A.* New microscopic principle // *Nature*. 1948. V. 161. P. 777–778.
68. *Maiman T.H.* Stimulated optical radiation in ruby // *Nature*. 1960. V. 187. P. 493–494.
69. *Sharpe W.N.* The interferometric strain gage // *Exp. Mech.* 1968. V. 8. № 4. P. 164–170.
70. *Nelson D.V., McCrickard J.T.* Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and blind-hole drilling // *Exp. Mech.* 1986. V. 26. № 4. P. 371–378.
71. *Франсон М.* Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
72. *Рябухо В.П.* Спекл-интерферометрия // *СОЖ*. 2001. Т. 7. № 5. С. 102–109.
73. *Tjhung T., Li K.* Measurement of in-plane residual stresses varying with depth by the interferometric strain/slope rosette and incremental hole-drilling // *J. Eng. Mater. & Technol.* 2003. V. 125. № 2. P. 153–162.

74. Lin S.-T., Hsieh C.-T., Hu C.-P. Two holographic blind-hole methods for measuring residual stresses // *Exp. Mech.* 1994. V. 34. № 2. P. 141–147.
75. Goldstein R.V., Kozintsev V.M., Popov A.L. Using an electronic speckle interferometry for measurement of a stress-deformation state of elastic bodies and structures: Recent advances in mechanics / ed. by Gdoutos E.E. and Kounadis A.N. Athens: Springer, 2009. P. 191–206.
76. Diaz F.V., Kaufmann G.H., Galizzi G.E. Determination of residual stresses using hole drilling and digital speckle pattern interferometry with automated data analysis // *Opt. Lasers Eng.* 2000. V. 33. № 1. P. 39–48.
77. McDonach A., McKelvie J., MacKenzie P., Walker C.A. Improved moiré interferometry and applications in fracture mechanics, residual stresses and damaged composites // *Exp. Tech.* 1983. V. 7. № 6. P. 20–24.
78. Furgiuele F.M., Pagnotta L., Poggialini A. Measuring residual stresses by hole-drilling and coherent optics techniques: a numerical calibration // *J. Eng. Mater. Technol.* 1991. V. 113. № 1. P. 41–50.
79. Zhang J. Two-dimensional in-plane electronic speckle pattern interferometer and its application to residual stress determination // *Opt. Eng.* 1998. V. 37. № 8. P. 2402–2409.
80. Popov A.L., Kozintsev V.M., Levitin A.L. et al. Application of the probe hole method for diagnostics of shrinkage stresses in products of additive technologies / IUTAM Symp. on Mech. Design and Analysis for AM Technologies. Symp. materials / IPMech RAS Moscow, 2018. P. 66–68.
81. Стекольников В.В., Титов В.Ф. Причины повреждения коллекторов теплоносителя и меры повышения надежности парогенераторов ПГВ-1000 // *Атомная энергия.* 1991. Т. 71. Вып. 4. С. 312–320.
82. Гольдштейн Р.В., Попов А.Л., Козинцев В.М. и др. Исследование остаточных напряжений методом электронной спекл-интерферометрии / *Актуальн. пробл. механ.: механ. деформ. тверд. тела. Сб. тр. М.: Наука, 2009. С. 479–494.*
83. Вайншток С.М. (ред.) Трубопроводный транспорт нефти. Т. 1. М.: ООО “Недра-Бизнес-центр”, 2002. 407 с.
84. Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Попов А.Л. и др. Спекл-интерферометрическое исследование остаточных напряжений в сварных соединениях труб, изготовленных по разным технологиям // *Космонавтика и ракетостроение.* 2009. № 1(54). С. 94–102.

Hole Method in Residual Stress Diagnostics

A. L. Popov^{a, #}, V. M. Kozintsev^a, D. A. Chelyubeev^a, and A. L. Levitin^a

^a *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: popov@ipmnet.ru*

Research on residual stresses and their influence on the strength of materials and structures is being actively doing in all industrialized countries. The such research is a need to largely due to the fact that many technical failures and man-made disasters occur due to a high level of residual technological stresses. Various physical and mechanical methods are used to diagnose residual stresses. Methods based on various physical principles do not affect the strength of the measurement object, i.e. they can be considered non-destructive if you do not take into account changes in the surface state of the object during preparation for measurements. However, there are complex relationships between the measured values and the desired stresses with parameters that often depend on a number of factors that are difficult to take into account. Mechanical methods are destructive or partially destructive. Residual stresses are calculated from deformations or displacements that occur when an object or its parts are unloaded, using the equations of elasticity theory; to process measurements, we only need to know the basic mechanical properties of the material. The hole method is the most widely used among the mechanical methods: it is not very damaging, it is quite universal as the shape and material of objects can be very different, it is methodically and materially provided as measurement standards are approved, equipment, measurement technology and methods of processing results are developed.

The article presents the history of the development of the hole method, the contribution of domestic and international scientists to its development, and gives examples of specific mea-

measurements of residual stresses using this method in laboratory and production conditions with an emphasis on domestic measurement technology.

Keywords: residual stresses, diagnostics, hole-drilling method

REFERENCES

1. *Vitman F.F.* Residual Stresses (Ostatochnyye napryazheniya). Moscow; Leningrad: GTTI, 1933. 64 p. (in Russian)
2. *Birger I.A.* Residual Stresses (Ostatochnyye napryazheniya). Moscow: Mashinostroenie, 1963. 232 p. (in Russian)
3. *Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M. et al.* Residual Stresses in Deformable Solids (Ostatochnyye napryazheniya v deformiruyemykh tverdykh telakh). Moscow: Fizmatlit, 1996. 240 p. (in Russian)
4. *Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M. et al.* Technological Stresses in Welded Joints (Tekhnologicheskiye napryazheniya v svarnykh soyedineniyakh). Moscow: MGOU, 2004. 254 p. (in Russian)
5. *Makarov G.I.* Extended Destruction of Main Gas Pipelines (Protyazhennyye razrusheniya magistral'nykh gazoprovodov). Moscow: Academy, 2002. 208 p. (in Russian)
6. *Rozenshtein I.M.* Accidents and Reliability of Steel Tanks (Avarii i nadezhnost' stal'nykh rezervuarov). Moscow: Nedra, 1995. 253 p. (in Russian)
7. *Rybalkin P.T., Ivanov S.D., Chernyshev G.N.* Heat Treatment of Electrofused Refractories (Termicheskaya obrabotka elektroplavlennykh ogneporov). Moscow: Metallurgy, 1986. 190 p. (in Russian)
8. *Vitman F.F., Dmitrieva T.G., Pooh V.P.* Residual stresses in glass tempered in liquids // *Phys. Solid State*, 1962, vol. 4, no. 8, pp. 2151–2159.
9. *Krivko A.I.* Effect of stress relaxations on part warping // *Metal Sci.&Heat Treatment*, 1978, vol. 20, no. 2, pp. 32–36.
10. *Bykov V.G., Saltykov M.A., Gorbunov M.N.* Causes of irreversible deformation of thin-walled bushings and ways to improve the reliability of bearings in highly loaded diesel engines // *Engine Building*, 1980, no. 6, pp. 54–57. (in Russian)
11. *Bukatiy S.A., Dmitriev V.A., Papshev D.D.* Influence of technological residual stresses on deformations of thin-walled ring parts // *Russ. Engng. Res.*, 1984, vol. 4, no. 6, pp. 40–44.
12. *Vivdenko Yu.N.* Influence of hereditary and processed residual stresses on the warp age of GTE disks // *Aviation Industry*. 1988, no. 2, pp. 25–28. (in Russian)
13. *Indenbom V.L., Tomilovsky G.E.* Measurement of internal stresses in synthetic corundum crystals // *Sov. Phys. Crystall.*, 1958, vol. 3, no. 4, pp. 593–599.
14. *Krymov V.M., Nosov Yu.G., Bakholdin S.I. et al.* Residual stresses in sapphire rods grown by the Stepanov method // *Phys. Solid State*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 746–751.
15. *Aleksandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh.* Polarization-optical Methods of Deformable Body Mechanics (Polarizatsionno-opticheskiye metody mekhaniki deformiruyemogo tela). Moscow: Nauka, 1973. 575 p. (in Russian)
16. *Kuryaeva R.G., Surkov N.V.* Change under pressure of the refractive index and density of glasses of the $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2$ system, where $x = 2, 4$ // *Geochem. Intern.*, 2008, vol. 46, no. 1, pp. 92–95.
17. *Glikman L.A.* Corrosion-mechanical Strength of Metals (Korrozionno-mekhanicheskaya prochnost' metallov). Leningrad, Moscow: Mashgiz, 1955. 176 p. (in Russian)
18. *Archakov Yu.I.* Hydrogen Corrosion of Steel (Vodorodnaya korroziya stali). Moscow: Metallurgy, 1985. 192 p. (in Russian)
19. *Petrov L.N.* Stress Corrosion (Korroziya pod napryazheniyem). Kiev: High School, 1986. 142 p. (in Russian)
20. *Steklov O.I.* Resistance of Materials and Structures to Stress Corrosion (Stoykost' materialov i konstruktsey k korrozii pod napryazheniyem). Moscow: Mashinostroenie, 1988. 290 p. (in Russian)
21. *Bobylev A.V.* Cracking of Copper Alloys: a Handbook (Rastreskivaniye mednykh splavov: spravochnik). Moscow: Metallurgy, 1993. 352 p. (in Russian)

22. *Troshchenko V.T., Pokrovsky V.V., Yarusevich V.L., Mikhailov V.I.* Growth rate of fatigue cracks in residual stress fields of welded titanium joints with different content of embrittling impurities // *Strength of Mater.*, 1990, vol. 22, no. 11, pp. 1562–1569.
23. *Podzey A.V., Sulima A.M., Evstigneev M.I., Serebryannikov G.Z.* Technological Residual Stresses (Tekhnologicheskiye ostatochnyye napryazheniya). Moscow: Mashinostroenie, 1973. 216 p. (in Russian)
24. *Trufiyakov V.I.* Fatigue of Welded Joints. (Uсталost' svarnykh soyedineniy) Kiev: Naukova Dumka, 1973. 216 p. (in Russian)
25. *Trufiyakov V.I.* Strength of Welded Joints at Variable Loads (Prochnost' svarnykh soyedineniy pri peremennykh nagruzkakh). Kiev: Naukova Dumka, 1990. 256 p. (in Russian)
26. *Prokhorov N.N.* Hot Welding Cracks (Goryachiye treshchiny pri svarke). Moscow: Mashgiz, 1953. 220 p. (in Russian)
27. *Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A.* Residual Stresses in Metal Products (Ostatokhnyye napryazheniya v metalloproduktii). Ekaterinburg: Ural Univ., 2015. 248 p. (in Russian)
28. *Kuznetsova E.V., Melekhin D.A., Elistratova E.S., Vindokurov D.V.* Behavior of covers of the heat-locating elements at operation taking into account residual stresses // *Appl. Math. & Control Issues*, 2016, no. 3, pp. 23–34.
29. *Kuznetsova E.V., Artashova A.A.* The influence of operational modes and technological residual stresses on corrosion cracking of zirconium covers are used in atomic engineering // *Bull. Perm Nat. Res. Polytech. Univ. Mechanics*, 2012, no. 1, pp. 51–61.
30. *Penezhko P.* “Radioactive” prosecutor // *Engineer*, 1990, no. 12, pp. 2–4. (in Russian)
31. *Kozintsev V.M., Ponomarev I.I., Popov A.L., Chernyshev G.N.* Technological residual stresses and accidents in steam and gas generators of nuclear power plants // *Proc. 4th All-Russian scientific-practical conference with international participation “New in Ecology and Life Safety 1999”*. SPb.: BSTU, 1999. Vol. 1. C. 553–557. (in Russian)
32. *Alekhin V.P.* Physics of Strength and Plasticity of Surface Layers of Materials (Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloyev materialov). Moscow: Nauka, 1980. 280 p. (in Russian)
33. *Vitman F.F., Boguslavsky I.A., Pooh V.P.* Glass hardening // *Phys. Solid State*, 1962, vol. 4, no. 8, pp. 2160–2168.
34. *Boguslavsky I.A.* High Strength Tempered Glass (Vysokoprochnyye zakalennyye stekla). Moscow: Stroyizdat, 1969. 208 p. (in Russian)
35. *Kudryavtsev I.V.* Surface Hardening for Increased Strength and Durability of Machines (Poverkhnostnyy naklep dlya povysheniya prochnosti i dolgovechnosti mashin). Moscow: Mashinovedenie, 1969. 100 p. (in Russian)
36. *Podstrigac Ya.S., Lomakin V.A., Kolyano Yu.M.* Thermoelasticity of Bodies of Inhomogeneous Structure (Termouprugost' tel neodnorodnoy struktury). Moscow: Nauka, 1984. 368 p. (in Russian)
37. *Radchenko V.P., Saushkin M.N.* Creep and Relaxation of Residual Stresses in Hardened Structures (Polzuchest' i relaksatsiya ostatokhnykh napryazheniy v uprochnennykh konstruktsiyakh). Moscow: Mashinostroenie, 2005. 226 p. (in Russian)
38. *Vologdin V.P.* Deformations and Stresses During Welding of Ship Structures (Deformatsii i napryazheniya pri svarke sudovykh konstruktсий). Moscow: Oborongiz, 1945. 149 p. (in Russian)
39. *Steinzig M., Ponslet E.* Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry: Part I // *Exp. Tech.*, 2003, vol. 27, no. 3, pp. 43–46.
40. *Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M.* Useful and dangerous residual stresses // *Nature*, 2002, no. 10, pp. 17–24. (in Russian)
41. *De Bolla P.* The Fourth of July and the Founding of America. Woodstock; N.Y.: Overlook Press, 2008. 192 c.
42. *Rodman T.D.* Casting and sampling report, up to 2450 ordinary shots, two 10 inch guns; one cast with a solid block and cooled outside, the other cast with a finished channel and cooled from the inside, captain Rodman // *Mining Mag.*, 1863. Book. 07 (July). pp. 27–76. (in Russian)
43. *Kalakutskiy N.V.* Materials of the study of steel tools // *Artillery Mag.*, 1867, no. 5, pp. 784–817. (in Russian)
44. *Kalakutskiy N.V.* Study of Internal Stresses in Cast Iron and Steel. (Issledovaniye vnutrennykh napryazheniy v chugune i stali) SPb: a type. and chromolite. A. Tranchelle, 1888. 116 p. (in Russian)

45. *Davidenkov N.N.* Selected Works. Vol. 2: Mechanical Properties of Materials and Methods for Measuring Deformations. (Izbrannyye trudy. T. 2: Mekhanicheskiye svoystva materialov i metody izmereniya deformatsiy) Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1981. 655 p. (in Russian)
46. *Davidenkov N.N.* String Method for Measuring Deformations (Strunnyy metod izmereniya deformatsiy). Leningrad; Moscow: GITTL, 1933. 60 p. (in Russian)
47. *Sachs G.* Der Nachweis innerer Spannungen in Stangen und Rohren // Zeitschr. für Metallkunde, 1927, vol. 19, s. 352–357.
48. *Sokolov I.A., Uralsky V.I.* Residual Stresses and Quality of Metal Products (Ostatochnyye napryazheniya i kachestvo metalloproduktov). Moscow: Metallurgy, 1981. 96 p. (in Russian)
49. *Mathar J.* Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes // Trans ASME, 1934, vol. 56, no. 4, pp. 249–254.
50. *Schajer G.S.* Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // Exp. Mech., 2010, vol. 50, no. 2, pp. 245–253.
51. *Huang X., Liu Z., Xie H.* Recent progress in residual stress measurement techniques // Acta Mech. Solida Sin., 2013, vol. 26, no. 6, pp. 570–583.
52. *Kirsch G.* The theory of elasticity and the needs of the theory of strength // J. Assoc. Ger. Eng., 1898, vol. 42, pp. 797–807.
53. GOST R 52891-2007. Control of Residual Technological Stresses by Laser Interferometrical Method. General Requirements. (GOST R 52891-2007. Moscow: Standartinform, 2009. 15 p. (in Russian))
54. ASTM E837-13 2013. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International. West Conshohocken (PA), 2013. 16 p.
55. *Savin G.N.* Distribution of Stresses Around Holes (Raspredeleniye napryazheniy okolo otverstiy). Kiev: Naukova Dumka, 1968. 496 p. (in Russian)
56. *Peterson R.E.* Stress Concentration Factors. N.Y.: Wiley, 1974. 420 p.
57. *Davidenkov N.N., Sobkhallo S.O.* A new method for X-ray solution of the plane problem of the theory of elasticity // Techn. Phys., 1941, vol. XI, no. 5, pp. 389–397.
58. *Kurnosov D.G., Yakutovich M.V.* Method for measuring stresses in plates and in the surface layer of large products // Factory Lab., 1939, vol. 8, no. 10–11, pp. 1148–1154. (in Russian)
59. *Kurnosov D.G., Yakutovich M.V.* Measurement of residual stresses by the hole-drilling method // Factory Lab., 1946, vol. 12, no. 11–12, pp. 960–987. (in Russian)
60. *Ruge A.C.* Strain Gauge. U.S. Pat. No. 2,350,972. June 6, 1944. Filed Sept. 16, 1939 / Cambridge, Mass. Patent Office. 5 p.
61. *Soete W., Vancrombrugge R.* An industrial method for the determination of residual stresses // Proc. SESA, 1950, vol. 8, no. 1, pp. 17–28.
62. *Sobkhallo S.O., Vasiliev D.M.* Measurement of residual stresses by cutting a column // Factory Lab., 1949, vol. 15, no. 2, pp. 199–207. (in Russian)
63. *Milbradt K.P.* Ring method determination of residual stresses // Proc. SESA, 1951, vol. 9, no. 1, pp. 63–74.
64. *Glikman L.A., Pisarevsky M.M.* Measurement of residual stresses in the surface layer of large products using strain gauge // Factory Lab., 1951, vol. 17, no. 1, pp. 75–81. (in Russian)
65. *Rendler N.J., Vigness I.* Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses // Exp. Mech., 1966, vol. 6, no. 12, pp. 577–586.
66. *Schajer G.S.* Application of finite element calculations to residual stress measurements // J. Eng. Mater. Technol., 1981, vol. 103, no. 2, pp. 157–163.
67. *Gabor D.A.* New microscopic principle // Nature, 1948, vol. 161, pp. 777–778.
68. *Maiman T.H.* Stimulated optical radiation in ruby // Nature, 1960, vol. 187, pp. 493–494.
69. *Sharpe W.N.* The interferometric strain gage // Exp. Mech., 1968, vol. 8, no. 4, pp. 164–170.
70. *Nelson D.V., McCrickerd J.T.* Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and blind-hole drilling // Exp. Mech., 1986, vol. 26, no. 4, pp. 371–378.
71. *Françon M.* La granularité laser (speckle) et ses applications en optique. Paris: Masson, 1977. 132 p.
72. *Ryabukho V.P.* Speckle interferometry // SEJ, 2001, vol. 7, no. 5, pp. 102–109. (in Russian)
73. *Tjhung T., Li K.* Measurement of in-plane residual stresses varying with depth by the interferometric strain/slope rosette and incremental hole-drilling // J. Eng. Mater. & Technol., 2003, vol. 125, no. 2, pp. 153–162.

74. Lin S.-T., Hsieh C.-T., Hu C.-P. Two holographic blind-hole methods for measuring residual stresses // *Exp. Mech.*, 1994, vol. 34, no. 2, pp. 141–147.
75. Goldstein R.V., Kozintsev V.M., Popov A.L. Using an electronic speckle interferometry for measurement of a stress-deformation state of elastic bodies and structures: Recent advances in mechanics / ed. by Gdoutos E.E. and Kounadis A.N. Athens: Springer, 2009, pp. 191–206.
76. Diaz F.V., Kaufmann G.H., Galizzi G.E. Determination of residual stresses using hole drilling and digital speckle pattern interferometry with automated data analysis // *Opt. Lasers Eng.*, 2000, vol. 33, no. 1, pp. 39–48.
77. McDonach A., McKelvie J., MacKenzie P., Walker C.A. Improved moiré interferometry and applications in fracture mechanics, residual stresses and damaged composites // *Exp. Tech.*, 1983, vol. 7, no. 6, pp. 20–24.
78. Furgiuele F.M., Pagnotta L., Poggialini A. Measuring residual stresses by hole-drilling and coherent optics techniques: a numerical calibration // *J. Eng. Mater. Technol.*, 1991, vol. 113, no. 1, pp. 41–50.
79. Zhang J. Two-dimensional in-plane electronic speckle pattern interferometer and its application to residual stress determination // *Opt. Eng.*, 1998, vol. 37, no. 8, pp. 2402–2409.
80. Popov A.L., Kozintsev V.M., Levitin A.L. et al. Application of the probe hole method for diagnostics of shrinkage stresses in products of additive technologies / IUTAM Symp. on Mech. design and analysis for AM technologies. Symp. materials / IPMech RAS Moscow, 2018. pp. 66–68.
81. Stekolnikov V.V., Titov V.F. Causes of damage to coolant collectors and measures to improve the reliability of SGG-1000 steam generators // *Sov. Atomic Energy*, 1991, vol. 71, no. 4, pp. 312–320.
82. Goldstein R.V., Popov A.L., Kozintsev V.M., Chelyubeev D.A. Investigation of Residual Stresses by Electronic Speckle Interferometry / *Actual Problems of Mechanics: Mechanics of a Deformable Solid*. Moscow: Nauka, 2009. pp. 479–494. (in Russian)
83. Vainshtok S.M. (ed.) Pipeline Transport of Oil. Vol. 1. (Truboprovodnyy transport nefi) / Moscow: OOO “Nedra-Biznestsentr”, 2002. 407 p. (in Russian)
84. Goldstein R.V., Kozintsev V.M., Popov A.L. et al. Speckle-interferometric study of residual stresses in welded joints of pipes manufactured using different technologies // *Cosmon.&Rocket Sci.*, 2009, no. 1(54), pp. 94–102. (in Russian)