

УДК 621.172.2:531.781

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДЕТАЛЯХ¹

© Н. А. Махутов, И. А. Разумовский²

Статья поступила 12 октября 2016 г.

Приведен краткий обзор методов исследования остаточных технологических напряжений (ОН) в элементах конструкций и образцах. Указаны возможности и области эффективного применения неразрушающих методов анализа ОН. Особое место уделено разрушающим экспериментально-расчетным методам исследования двухмерных и трехмерных неоднородных полей ОН в пространственных конструкциях, основанным на интерпретации экспериментальных данных как обратной задачи теории упругости. Для получения требуемых в этом случае значительных массивов экспериментальной информации, представляющих собой деформационные отклики, обусловленные созданием в исследуемом объекте разрезов различной конфигурации, рекомендуется применять оптико-цифровые методы регистрации полей перемещений.

Ключевые слова: остаточные напряжения; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов; электронная цифровая спекл-интерферометрия; механика деформируемого твердого тела.

Неотъемлемой составляющей комплексного исследования, связанного с оценкой прочности и остаточного ресурса высоконагруженных конструкций современной техники, работающих в экстремальных условиях, является анализ остаточных технологических напряжений [1, 3]. Вместе с тем решение этой задачи — одна из наиболее сложных проблем механики деформируемого твердого тела, предполагающая анализ

физико-механических процессов и структурных преобразований, происходящих в материале при разнообразных механических и тепловых воздействиях. К настоящему времени разработаны различные методические подходы, позволяющие решать типовые задачи исследования остаточных напряжений (ОН) в большинстве практических случаев. Эффективность применения того или иного метода зависит от типа напряженно деформированного состояния (НДС), геометрии исследуемого объекта, характера распределения ОН, свойств материала и ряда других факторов.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект 14-19-00776.

² Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; e-mail: murza45@gmail.com

Методы исследования ОН можно разделить на две основные группы: расчетные (аналитические и численные) и экспериментальные.

Экспериментальные методы исследования ОН принято разделять на две группы: неразрушающие и разрушающие.

Неразрушающие методы

Неразрушающие методы, основанные на измерении изменений различных физических параметров под влиянием механических напряжений, имеют определенные преимущества перед разрушающими, так как их применение не требует разрезки исследуемого объекта. Однако такие методы позволяют либо оценивать уровень ОН в тонком поверхностном слое материала (рентгеновский метод, метод поверхностных акустических волн Релея, токовихревой резистивный электроконтактный, магнитный и ряд других методов [4 – 8]), либо получать некоторые интегральные оценки средних по толщине детали ОН (ультразвуковой метод, метод акустоупругости [4, 9, 10]).

В последние годы достаточно активно развивается метод дифракции нейтронов. В отличие от метода рентгеновской дифракции [4, 5], открывающего возможность определения ОН только в тонком поверхностном слое металла (для металлов — 5 – 20 мкм), высокая проникающая способность тепловых нейтронов открывает возможность измерения остаточных напряжений до глубин нескольких сантиметров. В основе методики лежат измерения смещения сдвига брегговских дифракционных пиков от положений, соответствующих параметрам кристаллической решетки недеформированного материала [11], что позволяет определить изменения межплоскостных расстояний, обусловленных внутренними напряжениями. В последние годы метод находит практическое применение для исследования ОН в пространственных элементах конструкций. Поскольку уровень деформаций, обусловленных ОН, как правило, имеет порядок 10^{-3} – 10^{-4} , то для их измерений используют нейтронный дифрактометр высокого разрешения. Абсолютная погрешность измерения ОН в стальных элементах конструкций составляет 20 – 40 МПа.

На рис. 1 приведены полученные [12] методом дифракции нейтронов результаты исследования ОН в образце, вырезанном из натурного биметаллического материала корпуса реактора ВВЭР-1000. Размеры призматического образца: 45 × 100 × 100 мм, толщина 45 мм (включая размер наплавки 8 мм). Из рис. 1 следует хорошее соответствие результатов экспериментов данным, полученным на основе расчетов методом конечного элемента (МКЭ). Этот пример показывает, что метод дифракции нейтронов открывает большие возможности для экспериментальной оценки внутренних напряжений в пространственных элементах конструкций.

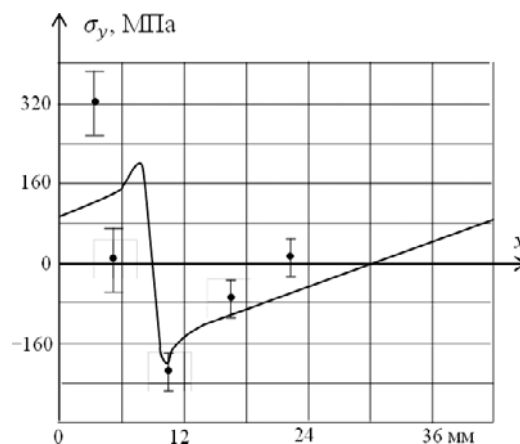


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений по толщине образца: ● — методом дифракции нейтронов; — — расчет МКЭ

С другой стороны, метод дифракции нейтронов, являясь практически безальтернативным неразрушающим методом определения неоднородных ОН, локализованных на удалении от поверхности деталей, имеет весьма ограниченную область практического применения. Это связано не только с уникальностью оборудования (в первую очередь источника нейтронного облучения) и, соответственно, крайне высокими затратами, но и с возможностью проведения исследований только в «лабораторных» условиях и на образцах весьма ограниченных размеров.

С развитием вычислительной техники и появлением современных программных комплексов для расчета НДС на основе метода конечных элементов (МКЭ) численные методы стали успешно использоваться для моделирования сложных (с точки зрения описания процессов образования ОН) технологий изготовления элементов конструкций. К настоящему времени разработаны подходы и соответствующие компьютерные программы, позволяющие моделировать процессы формирования ОН, возникающих при отливке, сварке, термообработке и других технологиях изготовления деталей [13 – 16 и др.]. Вместе с тем для успешного применения численных методов необходимо, с одной стороны, построение математической модели, позволяющей адекватно описать механические, физико-химические, тепловые и другие процессы, происходящие в материале, а с другой — знание закономерностей изменения параметров, описывающих характеристики и структуру материала в течение всего процесса формирования ОН. С учетом этого при разработке методик и программ для расчета ОН, помимо оценки корректности постановок соответствующих задач механики и устойчивости алгоритмов их решения, всегда требуется экспериментальная проверка точности получаемых результатов.

Разрушающие методы

В практике исследования ОН в элементах конструкций современной техники наиболее широкое

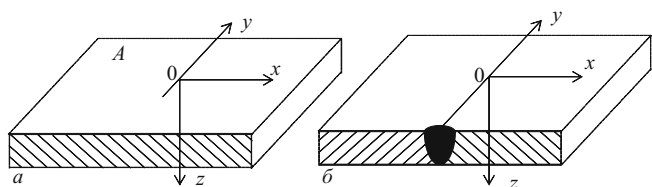


Рис. 2. Поля остаточных напряжений в плитах: а — $s_{xy}(z)$; б — $s_{xy}(xz)$

применение нашли так называемые разрушающие методы. Процедура исследования остаточных напряжений разрушающими методами состоит из следующих этапов: а) экспериментальная регистрация исходного НДС исследуемой детали; б) создание выреза — индикатора ОН (или разрезка детали), что приводит к снятию ОН на «освобождаемых» поверхностях; в) регистрация параметров, характеризующих НДС исследуемого объекта после разрезки; г) обработка результатов эксперимента с целью определения ОН.

Характеристики распределения ОН и конфигурации объекта определяют конкретные особенности того или иного разрушающего метода, обусловленные методикой расчета ОН (этап «г») на основе экспериментально полученной информации о деформированном состоянии исследуемого объекта после разрезки (этапа «в»).

Типы полей остаточных напряжений

Введем декартовы координаты x, y, z , где плоскость $z = 0$ является свободной поверхностью исследуемой детали A ($A \in z \leq 0$) (рис. 2, а). Остаточные напряжения в общем случае их трехмерного распределения будут характеризоваться тензором $s_{ij}(x, y, z)$, где $i, j = x, y, z$. Укажем несколько основных типов полей ОН.

1. $s_{ij}(x, y, z) = s_{ij}(z)$, т.е. ОН не зависят от координат x и y и изменяются только по глубине детали; при этом, как правило, $s_{xx}(z) \neq s_{yy}(z)$. (Отметим, что указанная задача относится к классу плоских задач.) К этому типу относятся задачи исследования ОН в стержнях и пластинах (плитах).

2. $s_{ij}(r, \theta, z) = s_{ij}(r)$, где $i, j = r, \theta, z$ — цилиндрические координаты, — одномерное осесимметричное распределение ОН. К этому типу относятся задачи исследования ОН в тонкостенных кольцах и трубах, толстостенных трубах и дисках.

3. $s_{ij}(x, y) = s_{ij}(x, y)$ — распределение ОН на поверхности деталей плоских и пространственных деталей, когда они не изменяются (или мало изменяются) по толщине детали, причем изменениями ОН вдоль координат x и y можно пренебречь. К этому классу, как правило, можно отнести задачи исследования остаточных технологических напряжений в точках поверхности массивных деталей, расположенных на удалении от зон концентрации напряжений.

4. $s_{ij}(x, y, z) = s_{ij}(x, z)$ — двумерное распределение ОН, не зависящее от координаты y . Примером такого

поля является распределение ОН в сварном стыковом шве двух плит (рис. 2, б).

5. Трехмерное распределение ОН. Решение задач этого типа в общем случае НДС вызывает значительные, а иногда и непреодолимые методические сложности. С другой стороны, подавляющее большинство реальных практических задач анализа ОН связано с более простым распределением ОН, как правило, относящимся к сечениям симметрии детали, где качественные особенности напряженного состояния *a priori* известны.

Методы исследования одномерных распределений ОН

Для решения «одномерных» задач исследования ОН, соответствующих типам 1 и 2, как правило, используют методы «последовательного стачивания» (последлойной разрезки). Особенности их практического использования применительно к анализу ОН в элементах конструкций различного типа (стержни, пластины, кольца, трубы и др.) изложены в монографиях [3, 4, 17]. Отметим лишь одно важное обстоятельство. Для определения ОН как функции z для задачи 1 или функции r для задачи 2 по данным экспериментально зарегистрированных изменений деформационного отклика (в терминах деформаций ε_{ij} или перемещений u_i) на каждом шаге Δz (или Δr) необходимо вычислять производную $\Delta \varepsilon_{ij}/\Delta z$ (или $\Delta u_i/\Delta z$). Учитывая, что изменения деформаций (или перемещений) находят с определенной погрешностью (в первую очередь погрешностью эксперимента), следует создать такие условия проведения эксперимента, которые обеспечат определение измеряемых параметров с точностью, необходимой для последующего расчета остаточных напряжений с требуемой достоверностью. Отметим, что величины приращений измеряемых параметров зависят от трех факторов: уровня искомых остаточных напряжений; шага стачивания; коэффициента влияния, характеризующего связь между ОН и изменением измеряемых деформаций или перемещений.

Эти обстоятельства необходимо учитывать при использовании методов последовательного стачивания для решения практических задач. Погрешность результатов следует оценивать в процессе проведения исследования с учетом получаемых результатов. При этом во многих случаях для обеспечения требуемой для практики точности могут потребоваться специальные приемы математической обработки результатов.

Для решения задач типа 3 в плоских деталях, а также на поверхности пространственных элементов конструкций широко применяют метод сверления малого отверстия [18–22]. Заметим, что поверхность исследуемого объекта не обязательно должна быть плоской, достаточно чтобы ОН незначительно изменялись при $0 \leq z \leq d$ (d — диаметр отверстия). В настоящее время метод сверления отверстия, как правило, используют при выполнении следующих ограничений

на характер распределения ОН в исследуемой зоне детали: $r \leq 2,5d$ и $0 \leq z \leq d$ (рис. 2, а), поле остаточных напряжений однородно, т.е. $s_{ij}(x, y, z) = \text{const}$. Очевидно, что метод может применяться для исследования двумерных распределений ОН на поверхностях деталей $s_{ij}(x, y, z) = s_{ij}(x, y)$ путем определения ОН в серии точек поверхности детали, расположенных на расстояниях не менее $5d$ друг от друга.

Для регистрации деформационного отклика, возникающего с зоне отверстия — индикатора ОН, используют различные методы и приборы: электротензодатчики, в том числе изготавливаемые в виде специальных розеток [18], фотоупругие покрытия, голографическую [20] и электронную цифровую спекл-интерферометрию (ЭЦИ) [21, 22]. Метод ЭЦИ, обеспечивающий возможность регистрации значительных массивов экспериментальной информации в виде полей перемещений непосредственно в цифровом виде, следует признать наиболее перспективным. Его активно используют только для исследований ОН как в лабораторных, так и в натурных условиях [23]. В последнем случае для получения информации о деформационном отклике широко применяют метод корреляции цифровых изображений [24].

Методы исследования двумерных полей ОН

Методы исследования двумерных распределений ОН типа $s_{ij}(x, y, z) = s_{ij}(x, z)$ были разработаны относительно недавно. Заметим, что рассмотренные методы решения применимы только для анализа плоского напряженного состояния (когда размер детали в направлении z существенно меньше ее размеров в двух других направлениях).

В случае, когда в исследуемом объекте имеет место плоская деформация, исследования также проводят на плоском образце малой толщины, вырезанном перпендикулярно оси z (см. рис. 2, б). При этом вначале оценивают отношение между ОН, действующими в направлениях x и z ($s_{xx}^{\text{ОН}}$ и $s_{zz}^{\text{ОН}}$). Для решения этой задачи можно использовать, например, метод сверления отверстия. Если $s_{xx}^{\text{ОН}}$ и $s_{zz}^{\text{ОН}}$ являются величинами одного порядка, то ОН в плоском образце будут определяться двумя составляющими: искомого поля остаточных напряжений и «дополнительного» НДС, обусловленного снятием ОН, имевшего место на освобождаемых поверхностях образца $z = \text{const}$. Один из возможных подходов к решению задачи, основанный на расчете «дополнительного» поля ОН на основе МКЭ (с учетом результатов исследований на плоском образце), изложен в работе [25].

В общем случае задача определения ОН $s_{ij}(x, y, z) = s_{ij}(x, z)$ может быть поставлена следующим образом. Проводят разрезку исследуемого объекта по некоторой линии, вследствие чего в нем возникает дополнительное НДС. Это (дополнительное) поле напряжений, деформаций или перемещений

регистрируют с использованием экспериментальных методов. На основе математической обработки данных эксперимента с применением аналитических или численных методов определяют ОН, снятые на контуре выреза. Указанные выше этапы заложены в основу всех разрушающих методов определения ОН. Существенным отличием рассматриваемых ниже методик является предположение о произвольном распределении ОН. В такой постановке, впервые рассмотренной в работе [26], задача определения ОН относится к классу обратных задач, характерной особенностью которых является некорректность, проявляющаяся в том, что близким (в пределах погрешности эксперимента) распределениям регистрируемых экспериментальными методами параметров могут соответствовать существенно различные распределения ОН по линии разреза [27, 28]. Соответствующие подходы к исследованию ОН основаны на постановке задачи анализа ОН как обратной задачи теории упругости и сводятся к решениям интегральных уравнений типа Вольтерра или Фредгольма. Практическая реализация таких подходов связана с математической обработкой значительного объема экспериментальной информации, что требует применения интерференционно-оптических методов в качестве способа регистрации деформационного отклика, обусловленного разрезкой детали.

При использовании метода интегрального уравнения Вольтерра [26] в плоской детали произвольной формы, где имеется поле ОН, дискретными шагами наращивают прорезь; на каждом шаге проводят измерения некоторого параметра напряженного состояния в характерной точке, позволяющей следить за продвижением вершины прорези (рис. 3, а). Зависимость между остаточными напряжениями $s_y(\xi)$ и определяемым экспериментально изменением параметра НДС вдоль линии разреза $\mu(z)$ может быть представлена в виде интегрального уравнения Вольтерра 1-го рода

$$\int_0^z B(z, \xi) \sigma_{xx}(\xi) d\xi = \mu(z), \quad 0 \leq \xi \leq z \leq L, \quad (1)$$

где L — максимальная длина прорези. Ядро оператора $B(z, \xi)$ соответствует значениям $\mu(z)$ в точке z от δ -воздействия в точке ξ , а областью его определения является треугольник, т.е. при $\xi > z$ получаем $B(z, \xi) = 0$.

При практическом использовании метода интегрального уравнения Вольтерра в процессе подготовки эксперимента на основе численного моделирования определяют величину шага наращивания прорези. Отсюда следует необходимость предварительной обработки исходной экспериментальной информации и построения по дискретным данным некоторых непрерывных и дифференцируемых аналогов в пределах ошибок, сопоставимых с ошибками эксперимента. При выборе схем обработки исходных данных преимущество имеют методы регуляризации по Тихонову. Однако несмотря на открывающиеся возможности

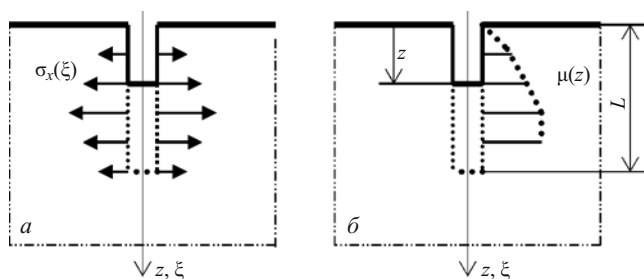


Рис. 3. Схема метода интегрального уравнения Вольтерра: а — напряжения на «освобождаемом контуре» $\sigma_{xx}(\xi) = -s_{xx}(\xi)$; б — измеряемые параметры напряженного состояния $\mu(z)$

решения задач об определении ОН самого общего вида, сложность и трудоемкость изложенного подхода ограничивают его применение для решения практических задач.

Метод наращиваемой трещины, предложенный в работе [29] для исследования двумерных полей ОН во внутренних областях тонких пластин, можно интерпретировать как частный случай рассмотренного выше общего подхода. Здесь в качестве прорези, на берегах которой освобождаются остаточные напряжения, рассматривают математический разрез (трещину), а в качестве экспериментально определяемых параметров НДС $\mu(x)$ — распределения коэффициентов интенсивности напряжений нормального отрыва и поперечного сдвига — $K_I(x)$ и $K_{II}(x)$. При такой постановке для ряда краевых задач основное уравнение приводится к интегральному уравнению Вольтерра 1-го рода с ядром Абеля, что позволяет получить их замкнутые аналитические решения. В результате устойчивая процедура расчета ОН на основе данных эксперимента становится достаточно простой. В то же время процесс экспериментального исследования является более трудоемким, так как для получения функции параметра напряженного состояния требуется на каждом шаге определять величины K_I и K_{II} . Для определения КИН в трещинах — индикаторах ОН целесообразно использовать оптико-интерференционные методы в сочетании с современными методами математической обработки экспериментальной информации [30]. В работе [31] получены соотношения, позволяющие распространить метод наращиваемой трещины для исследования ОН в приповерхностных зонах плоских деталей, включая кусочно-однородные полосы (метод краевой трещины). Связь между остаточными напряжениями $s_{xx}(z)$, $s_z(z)$ и экспериментально полученными при последовательном увеличении длины краевой трещины (рис. 4, а) зависимостями K_I и K_{II} может быть найдена на основе аналитического решения задачи о КИН в краевой трещине в полубесконечной пластине, на берегах которой действуют произвольно распределенные нагрузки $\sigma_{xx}(z) = -s_{xx}(z)$ и $\tau_{xy}(x) = -s_{xy}(x)$:

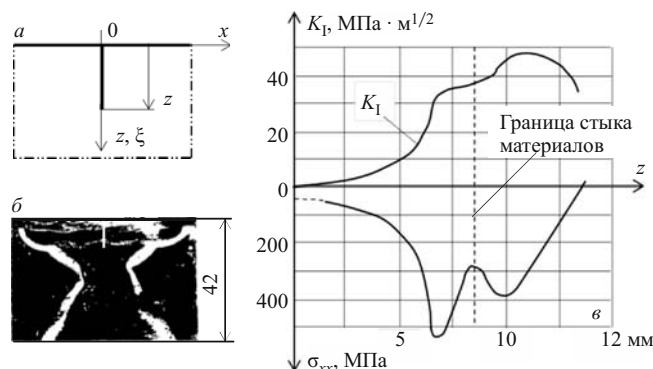


Рис. 4. Схема метода исследования ОН в зоне сварного стыкового шва в натурном образце биметаллического материала корпуса реактора АСТ (а), фотография поверхности образца в зоне сварного стыка (б), а также зависимость $K_I(z)$ и эпюры распределения ОН $s_{xx}(z)$ (в)

$$\sigma_{xx} = -s_y(z) = -\frac{d}{dz} \int_0^z \frac{\tau \Psi_1(\xi)}{\sqrt{z^2 - \xi^2}} d\tau - \int_0^a [\Psi_1(u) m(z, u)] du, \quad (2)$$

$$m(z, u) = \int_0^\infty \alpha u (1 - az) e^{-\alpha x} n(\alpha u) d\alpha,$$

$$n(\alpha u) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (1 - au \sin \varphi) e^{-au \sin \varphi} d\varphi.$$

Эти выражения являются основными расчетными соотношениями метода наращиваемой трещины. Из них следует корректность постановки задачи расчета остаточных напряжений на основе данных эксперимента, что, в свою очередь, обеспечивает устойчивость расчета остаточных напряжений к погрешностям результатов эксперимента.

Метод нашел эффективное применение для исследования ОН в конструкциях современной техники [25, 27, 32]. Пример его применения для исследования ОН в зоне сварного стыкового шва в натурном образце биметаллического материала корпуса реактора АСТ приведен на рис. 4, б, в. Плакировку (из материала 08X18H10T) наносили на основной материал (10XH1M) путем сварки взрывом по штатной технологии. Технология изготовления крупногабаритных элементов из такого материала предусматривает сварку встык биметаллических элементов. Исследовали ОН в зоне сварки (стыковом сечении).

Поскольку трещина — индикатор ОН является очень высоким «концентратором» напряжений, методу присуща более высокая по сравнению с методом сверления отверстия чувствительность (не говоря уже о других подходах, предусматривающих разрезку детали). Шаги наращивания трещины могут быть весьма малыми (менее 1,0 мм), что обеспечивает возмож-

ность определения остаточных напряжений в зонах их высоких градиентов. Таким образом, различные модификации метода последовательно наращиваемого разреза в сочетании с оптико-интерференционными цифровыми методами экспериментальной регистрации деформационных откликов и современными программными средствами для решения обратных задач следует признать наиболее перспективным подходом к решению двумерных задач анализа неоднородных полей ОН [27, 28, 33].

Методы исследования полей ОН в пространственных деталях

Рассмотрим методы исследования неоднородных полей ОН в пространственных объектах, представляющие собой определенное развитие методов сверления отверстия и последовательно наращиваемого выреза. Они базируются на методическом подходе к определению параметров НДС (остаточных напряжений), основанном на оценке соответствия больших массивов экспериментальных данных и результатов численного решения серии модельных задач МКЭ для текущих значений указанных параметров (искомых ОН) [34, 35]. Учитывая возможности решения краевых задач механики деформируемого твердого тела на основе МКЭ, такого рода подходы, в отличие от традиционных методов, не имеют принципиальных ограничений на геометрию и механические характеристики исследуемой детали, а также распределение $s_{ij}(x, y, z)$. Искомые значения остаточных напряжений P_q в заданных точках k определяются из решения задачи минимизации целевой функции, комплексно отражающей различие между экспериментально полученными данными $\bar{e}_k$ и их расчетными значениями e_k . При этом e_k находятся путем решения серии прямых задач при текущих значениях искомых параметров P_q с использованием ПК ANSYS, а процедура поиска минимума целевой функции базируется на методе деформируемых симплекс-элементов (метод Нелдера – Мида), реализованном в ПК MATLAB. В качестве целевой функции I принимаются среднеквадратическое, максимальное отклонения расчетных значений перемещений e_k от экспериментальных данных $\bar{e}_k$, а также функции специального вида [35]. Одним из важнейших элементов метода является создание так называемого банка откликов, представляющего собой совокупность данных, отражающих взаимосвязь между e_k и P_q , которая устанавливается на основе результатов предварительно и многократно решенной краевой задачи при различных значениях параметров P_q . Такой подход обеспечивает относительно быструю сходимость процедуры поиска параметров состояния на основе минимизации целевой функции I .

Последовательно углубляемое круговое отверстие — индикатор ОН. Перспективным направлением [34, 35] является развитие метода сверления отверстия применительно к анализу неоднородных по

глубине детали полей ОН. Возможности метода сверления отверстия в его классическом варианте рассмотрены в обзоре [36], где на основе анализа многочисленных публикаций делается вывод о перспективности применения метода интегрального уравнения (1) для интерпретации данных, получаемых при сверлении последовательно углубляемого кругового отверстия. Вместе с тем этот метод имеет существенные ограничения, связанные с тем, что функция, связывающая ОН и регистрируемые на поверхности детали параметры деформационного отклика, является быстросходящейся. Поэтому такой подход может использоваться только для оценки распределения ОН на весьма малую глубину $L < 2\rho$ (ρ — радиус отверстия — индикатора ОН). В многочисленных публикациях (см., например [28]) показано, что при $L/\rho > 2$ дальнейшее углубление отверстия не вызывает изменения поля деформаций на поверхности исследуемой детали. Возможности применения метода сверления отверстия для анализа неоднородных полей по глубине детали ОН показаны в работе [37], где с целью получения деформационного отклика на поверхности с высокой точностью на каждом новом шаге углубления отверстия ΔL увеличивается величина его радиуса ρ . На основе результатов численных экспериментов показано, что такой подход в совокупности с методологией и программой, указанными в [34, 35], позволяет определить высокоградиентное распределение ОН (вплоть до возникающего на стыке разнородных материалов) по глубине пространственного объекта. При этом относительная погрешность ОН при достаточном объеме экспериментальной информации (получаемой интерференционно-оптическими методами) лежит в пределах диапазона разброса данных экспериментов (как правило, около 10 %).

Последовательно углубляемый дисковый разрез — индикатор ОН. Методика представляет собой развитие метода последовательно наращиваемого разреза применительно к исследованиям пространственных объектов, геометрия которых имеет две плоскости симметрии — xz и yz . Рассматривается практически важная задача, когда остаточные напряжения $s_{ij}(i, j = x, y, z)$ произвольным образом зависят от координаты z и не изменяются вдоль координат x и y . При этом распределение ОН вдоль координат x и y могут отличаться друг от друга. В исследуемом объекте, в плоскости xz , создается дисковый разрез-трещина, ширина которого $t \rightarrow 0$, а глубина h последовательно увеличивается, что приводит к снятию остаточных напряжений $s_{yy}(z)$ на поверхностях разреза ($s_{xy} = 0$) (рис. 5).

На каждом шаге углубления разреза Δh_n производится регистрация деформационного отклика — полей перемещений точек поверхности полупространства, обусловленных снятием остаточных ОН. На основе полученной таким образом информации рассчитывается искомое поле ОН. Для регистрации полей

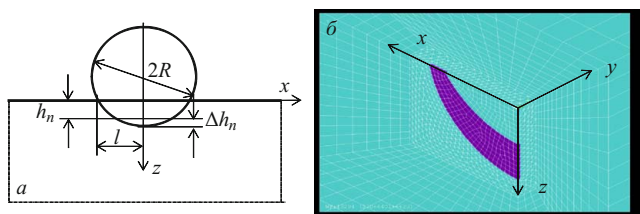


Рис. 5. Схема метода последовательно углубляемой дисковой трещины — индикатора остаточных напряжений (а) и пример конечно-элементного разбиения зоны выреза (б)

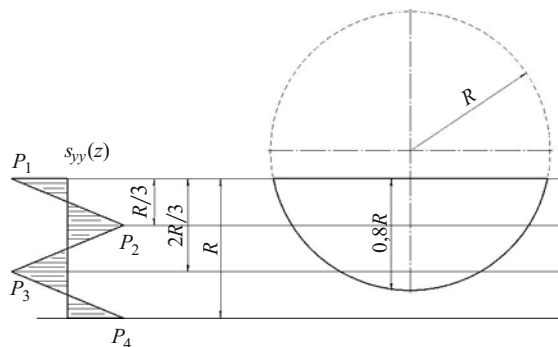


Рис. 6. Схема распределения ОН в модельной задаче

перемещений при проведении натурных экспериментов предполагается использование оптико-интерференционных методов (методов ЭЦСИ, цифровой голографии или корреляции цифровых изображений [30]).

Искомое распределение ОН аппроксимируется кусочно-линейной функцией, т.е. остаточные напряжения на n -м приращении глубины разреза Δh_n , расположенного на глубине h_n , определяются выражением

$$s_{yy}(z) = s_{yy}(h_{n-1}) + b_n z. \quad (1)$$

В работе [38] на основе численного моделирования рассмотрены примеры решений типовых модельных задач исследования ОН, которые позволяют оценить влияние погрешности экспериментов, объема и выбора зоны локализации экспериментальных данных на точность получаемых результатов.

В качестве модельного рассматривалось сложное кусочно-линейное распределение остаточных напряжений $s_y(z)$, $0 \leq z \leq 0,8R$ (рис. 6), которое может быть описано четырьмя параметрами P_j , $j = 1, 2, 3, 4$. Форма выреза соответствовала тонкому диску, при этом отношение ширины выреза к его радиусу $t/R = 0,05$.

Исходной информацией, используемой для оценки точности методики, являлись значения двух компонент вектора перемещений поверхности детали ($z = 0$): вдоль оси z — $w(x, y)$ и вдоль оси y — $v(x, y)$. Используемые для расчетов указанных перемещений искомых параметров точки равномерно располагались в окрестности выреза на линиях равных перемещений, количество используемых точек ~ 60 . При расчетах модельных задач принималось, что случайная

относительная погрешность измеряемых величин $\delta_e = 10\%$.

Поскольку на практике не представляется возможным иметь достоверную информацию о положении точек излома эпюры распределения ОН, во всех расчетах модельных задач выполнялось условие, что глубина дискового выреза не совпадает с глубиной расположения точки излома эпюры $s_{yy}(z)$.

Результаты численных экспериментов показывают, что указанный подход и соответствующая программа позволяют проводить исследования сложных неоднородных распределений по глубине детали с погрешностью, по крайней мере не превышающей относительную погрешность измерений деформационных откликов.

После определения распределения ОН $s_{yy}(z)$ аналогичным образом находится $s_{xx}(z)$. Заметим, что это исследование можно выполнить на той же самой детали, в которой уже имеется дисковый разрез в плоскости zx , выполненный при исследовании напряжений $s_{yy}(z)$.

На основе анализа публикаций в области методов исследования остаточных напряжений можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее перспективным подходом к решению задач анализа остаточных напряжений следует признать использование методов и соответствующих программ для численного моделирования сложных нелинейных физико-механических процессов формирования полей ОН, возникающих при изготовлении элемента конструкции, а также их изменения под действием силовых и температурных нагрузок, имеющих место в процессе эксплуатации конструкции (а также воздействий других типов).

С другой стороны, для оценки корректности постановок соответствующих задач механики и устойчивости алгоритмов их решения, а также влияния возможных погрешностей используемых в расчетах физико-механических характеристик материалов всегда требуется экспериментальная проверка точности получаемых результатов.

2. Среди неразрушающих методов исследования ОН следует выделить метод дифракции нейтронов, позволяющий исследовать неоднородные распределения напряжений по глубине детали. Однако область его практического применения весьма ограничена вследствие уникальности необходимого оборудования и крайне высоких затрат.

Другие неразрушающие методы с каждым годом находят все более широкое применение в практике, однако их использование ограничивается возможностью исследования только поверхностных ОН, а также оценки интегральных оценок средних по толщине детали напряжений.

3. Разрушающие методы исследования ОН позволяют решать широкий круг задач для конструкций, отличающихся геометрическими характеристиками

и характером распределения ОН. В дополнение к известным методикам исследования ОН в типовых элементах конструкций (стержнях, пластинах, трубах, дисках, на поверхностях пространственных элементов) в последние годы разработаны методические подходы, открывающие возможности решения трехмерных распределений ОН в деталях произвольной конфигурации. В основе этих подходов лежит решение задачи анализа ОН как обратной задачи механики деформируемого тела. При этом наиболее перспективным методом следует признать определение искомых параметров задачи (величин ОН) на основе анализа соответствия больших массивов экспериментальных данных (характеризующих деформационные отклики, имеющие место при разрезке детали) и результатов численного решения серии модельных задач МКЭ для текущих значений указанных параметров (т.е. искомых ОН).

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
2. Residual stress and its effect on fatigue and fracture / Ed. A. G. Youtsos. Proc. of a Special Symposium held within — ECF16. Alexandroupolis, Greece: 2006. — 234 p.
3. Буркин С. П., Шимов Г. В., Андриюкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2015. — 248 с.
4. Schajer G. S. Practical Residual Stress Measurement Methods. — Wiley, 2013. — 328 p.
5. Fitzpatrick M. E., Fry A. T., Holdway P., Kandil F. A., Shackleton J., Suominen L. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction. Issue 2. Measurement Good Practice Guide N. 52. Manchester Materials Science Centre, 2005. — 68 p.
6. Stewart D. M., Stevens K. J., Kaiser A. B. Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel / Original Res. Art. Curr. Appl. Physics. 2004. N 4(2–4). P. 308–311.
7. Ilker Yelbay H., Ibrahim Cam, Hakan Gur C. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique / NDT&E International. 2010. Vol. 43. P. 29–33.
8. Estefen S. F., Gurova T., Castello X., Leontiev A. Surface residual stress evaluation in double electrode butt welded steel plates / Mater. Design. 2010. Vol. 31(3). P. 1622–1627.
9. Никитина Н. Е. Акустопругость. Опыт практического применения. — Н. Новгород: ТАЛАН, 2005. — 208 с.
10. Marquette Ya. M., Belahcene F., Lu J. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods / Mater. Sci. Engin. 2004. Vol. 382(1–2). P. 257–264.
11. Бокучава Г. Д., Балагуров А. М., Сумин В. В., Папушкин И. В. Нейтронный Фурье-дифрактометр ФСД для исследования остаточных напряжений в материалах и промышленных изделиях / Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 11. С. 9–21.
12. Сумин В. В., Шеверев С. Г., Schneider R., Wimpory R., Балагуров А. М. Результаты измерения остаточных деформаций в корпусе реактора ВВЭР-1000 / Физика твердого тела. 2010. Т. 52. Вып. 5. С. 930–933.
13. Kostylev V. I., Margolin B. Z. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels / Int. J. Pres. Ves. Piping. 2000. Vol. 77. P. 723–735.
14. Murugan N., Narayan R. Finite element simulation of residual stresses and their measurement by contour method / Mater. Design. 2009. Vol. 30. N 6. P. 2067–2071.
15. Mi G., Li C., Gao Z., Zhao D., Niu J. Finite element analysis of welding residual stress of aluminum plates under different butt joint parameters / Engin. Rev. 2014. Vol. 3. P. 161–166.
16. Покровский А. М. Расчет остаточных напряжений в биметаллических прокатных валах после термической обработки / Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. Спецвыпуск № 6. Современные проблемы прикладной механики, динамики и прочности машин. С. 186–196.
17. Биргер И. А. Остаточные напряжения. — М.: Машгиз, 1963. — 233 с.
18. E837–89. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. 1989.
19. Одинцев И. Н., Щепинов В. П., Щиқанов А. Ю. Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия / Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 106–111.
20. Shokriekh M. M., Ghasemi A. R. Simulation of central hole drilling process for measurement of residual stresses in isotropic, orthotropic, and laminated composite plates / J. Composite. Mater. 2007. Vol. 41. N 4. P. 435–452.
21. Одинцев И. И., Апальков А. А., Разумовский И. А. Метод измерения остаточных напряжений в массивных элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. № 2. С. 45–49.
22. Schajer G. S., Steinzig M. Full-Field Calculation of Hole-Drilling Residual Stresses from ESPI Data / Exp. Mech. 2005. Vol. 45. N 6. P. 526–532.
23. Махутов Н. А., Разумовский И. А., Коссов В. С., Апальков А. А., Одинцев И. Н. Исследование остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натурных условиях / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 5. С. 47–52.
24. Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. — Univ. of South Carolina, 2009. — 364 p.
25. Разумовский И. А., Хвостов С. М. Методология исследования остаточных напряжений в биметаллических обечайках корпусов / Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС. 2010. Вып. 14. С. 155–162.
26. Дверес М. Н., Фомин А. В. Методы определения остаточных напряжений / Машиноведение. 1985. № 5. С. 23–31.
27. Razumovsky I. A., Medvedev M. V., Fomin A. V. Methods for investigations inhomogeneous residual stresses fields / book: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel / Ed. G. Totten, M. Howes, T. Unoue. — ASM International, 2002. P. 125–138.
28. Prime M. B., Hill M. R. Uncertainty, model error, and order selection for series-expanded, residual-stress inverse solutions / ASME J. Engin. Mater. Technol. 2006. Vol. 128. P. 175–185.
29. Vaidyanathan S., Finnie I. Determination of Residual Stresses from Stress Intensity Factor Measurements / J. Basic Engin. 1971. Vol. 93. P. 242–246.
30. Rasumovsky I. A. Interference-optical Methods of Solid Mechanics. Series: Foundations of Engineering Mechanics. — Springer, 2011. — 270 p.
31. Кулиев В. Д., Разумовский И. А. К проблеме определения остаточных напряжений в биметаллах / ДАН СССР. 1990. Т. 315. № 3. С. 561–565.
32. Обеспечение ресурса и живучести водо-водяных энергетических реакторов / Под ред. Н. А. Махутова и М. М. Гаденина. — М.: Наука, 2009. — 342 с.
33. Prime M. B. Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method / Appl. Mech. Rev. 1999. Vol. 52. N 2. P. 75–96.
34. Разумовский И. А., Чернятин А. С. Методология и программа для определения параметров напряженно-деформированного состояния на основе обработки экспериментальных данных / Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 4. С. 35–42.
35. Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. Methodology and Software Package for Assessment of Stress-Strain State Parameters of Full-Scale Structures and Its Application to a Study of Loading Level, Defect Rate, and Residual Stress Level in Elements of NPP Equipment / Strength Mater. 2013. N 4. P. 506–511.
36. Schajer G. S. Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurements / Proc. of the XIth Int. Congr. and Exposition. 2008. June 2–5, 2008. — Orlando: Society for Experimental Mechanics Inc., 2008.
37. Разумовский И. А., Чернятин А. С. Экспериментально-расчетный метод исследования остаточных напряжений в двухслойных элементах конструкций способом сверления отверстия / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 4. С. 101–109.
38. Чернятин А. С., Разумовский И. А. Последовательно углубляемый дисковый разрез — индикатор остаточных напряжений в про-

странственных телах / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С. 93 – 102.

REFERENCES

- Makhutov N. A. Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Durability and safety: basic and applied research]. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
- Residual stress and its effect on fatigue and fracture/Ed. A. G. Youtsos. Proc. of a Special Symposium held within — ECF16. Alexandroupolis, Greece: 2006. — 234 p.
- Burkin S. P., Shimov G. V., Andryukova E. A. Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii [Residual stresses in the metal production]. — Yekaterinburg: Izd. Ural. Univ., 2015. — 248 p. [in Russian].
- Schajer G. S. Practical Residual Stress Measurement Methods. — Wiley, 2013. — 328 p.
- Fitzpatrick M. E., Fry A. T., Holdway P., Kandil F. A., Shackleton J., Suominen L. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction. Issue 2. Measurement Good Practice Guide N. 52. Manchester Materials Science Centre, 2005. — 68 p.
- Stewart D. M., Stevens K. J., Kaiser A. B. Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel / Original Res. Art. Curr. Appl. Physics. 2004. N 4(2–4). P. 308 – 311.
- Ilker Yelbay H., Ibrahim Cam, Hakan Gur C. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique / NDT&E International. 2010. Vol. 43. P. 29 – 33.
- Estefen S. F., Gurova T., Castello X., Leontiev A. Surface residual stress evaluation in double electrode butt welded steel plates / Mater. Design. 2010. Vol. 31(3). P. 1622 – 1627.
- Nikitina N. E. Akustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya [Acoustoelasticity. Practical experience]. — N. Novgorod: TALAM, 2005. — 208 p. [in Russian].
- Marquette Ya. M., Belahcene F., Lu J. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods / Mater. Sci. Engin. 2004. Vol. 382(1–2). P. 257 – 264.
- Bokuchava G. D., Balagurov A. M., Sumin V. V., Papushkin I. V. Neitronnyi Fur'e-difraktometr FSD dlya issledovaniya ostatochnykh napryazhenii v materialakh i promyshlennykh izdeliyakh [Fourier neutron diffractometer FSD for the study of residual stresses in materials and industrial products] / Poverkhn. Rentgen. Sinkhrotr. Neitron. Issled. 2010. N 11. P. 9 – 21 [in Russian].
- Sumin V. V., Sheverev S. G., Schneider R., Wimpory R., Balagurov A. M. Rezul'taty izmereniya ostatochnykh deformatsii v korpusse reaktora VVER-1000 [The results of the measurement of residual strain in reactor vessel VVER-1000] / Fiz. Tverdogo Tela. 2010. Vol. 52. Issue 5. P. 930 – 933 [in Russian].
- Kostylev V. I., Margolin B. Z. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels / Int. J. Pres. Ves. Piping. 2000. Vol. 77. P. 723 – 735.
- Murugan N., Narayan R. Finite element simulation of residual stresses and their measurement by contour method / Mater. Design. 2009. Vol. 30. N 6. P. 2067 – 2071.
- Mi G., Li C., Gao Z., Zhao D., Niu J. Finite element analysis of welding residual stress of aluminum plates under different butt joint parameters / Engin. Rev. 2014. Vol. 3. P. 161 – 166.
- Pokrovskii A. M. Raschet ostatochnykh napryazhenii v bimetallicheskiykh prokatnykh valkakh posle termicheskoi obrabotki [Calculation of residual stresses in the metal rolling rolls after heat treatment] / Vestnik MG TU im. N. É. Bauman. Ser. Mashinostr. 2012. Special issue 6. Sovremennyye problemy prikladnoi mekhaniki, dinamiki i prochnosti mashin [Recent developments in applied mechanics, dynamics and strength of machines]. P. 186 – 196 [in Russian].
- Birger I. A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. — Moscow: Mashgiz, 1963. — 233 p. [in Russian].
- E837–89. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. 1989.
- Odintsev I. N., Shchepinov V. P., Shchikanov A. Yu. Primenenie golograficheskoi interferometrii dlya izmereniya ostatochnykh napryazhenii metodom zondiruyushchego otverstiya [Application of holographic interferometry for the measurement of residual stresses by the hole drilling method] / Zh. Tekhn. Fiz. 2003. Vol. 73. Issue 11. P. 106 – 111 [in Russian].
- Shokriekh M. M., Ghasemi A. R. Simulation of central hole drilling process for measurement of residual stresses in isotropic, orthotropic, and laminated composite plates / J. Composite. Mater. 2007. Vol. 41. N 4. P. 435 – 452.
- Odintsev I. I., Apal'kov A. A., Razumovskii I. A. Metod izmereniya ostatochnykh napryazhenii v massivnykh élementakh konstruksii s ispol'zovaniem élektronnoi spekl-interferometrii [The method of residual stresses measurement in massive members with the use of electron speckle interferometry] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2003. Vol. 69. N 2. P. 45 – 49 [in Russian].
- Schajer G. S., Steinzig M. Full-Field Calculation of Hole-Drilling Residual Stresses from ESPI Data / Exp. Mech. 2005. Vol. 45. N 6. P. 526 – 532.
- Makhutov N. A., Razumovskii I. A., Kossov V. S., Apal'kov A. A., Odintsev I. N. Issledovanie ostatochnykh napryazhenii s primeneniem élektronnoi tsifrovoi spekl-interferometrii v naturnykh usloviyakh [Study of residual stresses using electron digital speckle interferometry in full-scale conditions] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2008. Vol. 74. N 5. P. 47 – 52 [in Russian].
- Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. — Univ. of South Carolina, 2009. — 364 p.
- Razumovskii I. A., Khvostov S. M. Metodologiya issledovaniya ostatochnykh napryazhenii v bimetallicheskiykh obechaikakh korpusov [Research methodology of residual stresses in the bimetal shell casings] / Vopr. Atom. Nauki Tekhn. Ser. Obesp. Bezopasn. AES. 2010. Issue 14. P. 155 – 162 [in Russian].
- Dveres M. N., Fomin A. V. Metody opredeleniya ostatochnykh napryazhenii [Methods for determination of residual stresses] / Mashinovedenie. 1985. N 5. P. 23 – 31 [in Russian].
- Razumovsky I. A., Medvedev M. V., Fomin A. V. Methods for investigations inhomogeneous residual stresses fields / book: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel / Ed. G. Totten, M. Howes, T. Unoue. — ASM International, 2002. P. 125 – 138.
- Prime M. B., Hill M. R. Uncertainty, model error, and order selection for series-expanded, residual-stress inverse solutions / ASME J. Engin. Mater. Technol. 2006. Vol. 128. P. 175 – 185.
- Vaidyanathan S., Finnie I. Determination of Residual Stresses from Stress Intensity Factor Measurements / J. Basic Engin. 1971. Vol. 93. P. 242 – 246.
- Rasumovsky I. A. Interference-optical Methods of Solid Mechanics. Series: Foundations of Engineering Mechanics. — Springer, 2011. — 270 p.
- Kuliev V. D., Razumovskii I. A. K probleme opredeleniya ostatochnykh napryazhenii v bimetalakh [Determination of residual stresses in bimetal] / Dokl. AN SSSR. 1990. Vol. 315. N 3. P. 561 – 565 [in Russian].
- Makhutov N. A., Gadenin M. M. (Eds.) Obespechenie resursa i zhivuchesti vodo-vodyanykh énergeticheskikh reaktorov [Providing resource and survivability VVER]. — Moscow: Nauka, 2009. — 342 p. [in Russian].
- Prime M. B. Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method / Appl. Mech. Rev. 1999. Vol. 52. N 2. P. 75 – 96.
- Razumovskii I. A., Chernyatin A. S. Metodologiya i programma dlya opredeleniya parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na osnove obrabotki éksperimental'nykh dannykh [The methodology and program for the parameters of the stress-strain state determining on the basis of experimental data] / Mashinostr. Inzh. Obraz. 2009. N 4. P. 35 – 42 [in Russian].
- Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. Methodology and Software Package for Assessment of Stress-Strain State Parameters of Full-Scale Structures and Its Application to a Study of Loading Level, Defect Rate, and Residual Stress Level in Elements of NPP Equipment / Strength Mater. 2013. N 4. P. 506 – 511.
- Schajer G. S. Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurements/ Proc. of the XIth Int. Congr. and Exposition. 2008. June 2 – 5, 2008. — Orlando: Society for Experimental Mechanics Inc., 2008.
- Razumovsky I. A., Chernyatin A. S. Experimentally-settlement method for studying residual stresses in the two-layer construction elements by way of drilling / J. Mach. Manufact. Reliability. 2011. Vol. 40. N 4. P. 101 – 109.
- Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. A Sequentially Deepened Disc Cut as an Indicator of Residual Stresses in Spatial Bodies / J. Mach. Manufact. Reliability. 2015. Vol. 44. N 5. P. 471 – 478.