

УДК 620.178.6

А.Д. Монахов¹, Н.О. Яковлев¹, В.В. Автаев¹, Е.А. Котова¹**РАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104

Представлен обзор методов определения остаточных напряжений. Рассмотрены методы расщепления и сегментирования, послойного удаления, пропила (разреза, податливости), профилирования, сверления отверстий (в том числе «глубокого» отверстия). Дается описание способов измерения деформации, применяемых при определении остаточных напряжений. Наиболее распространенный контактный способ – с использованием тензометрических датчиков, а также бесконтактные методы: поляризационно-оптический (фотоупругость), оптическая спекл-интерферометрия, корреляция цифровых изображений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, тензометрия, деформация, спекл-интерферометрия, корреляция цифровых изображений.

A.D. Monakhov¹, N.O. Yakovlev¹, V.V. Avtaev¹, E.A. Kotova¹**DESTRUCTIVE METHODS FOR DETERMINING
RESIDUAL STRESSES (review)**

The paper presents an overview of methods for determining residual stresses. Methods such as splitting and segmentation, layer-by-layer removal, slitting (cutting, pliability), profiling, drilling holes (including a «deep» hole) are considered. The description of the methods for measuring the deformation used in the determination of residual stresses is given. The most common contact method using strain gauges, as well as non-contact methods: polarization-optical (photoelasticity), optical speckle interferometry, digital image correlation.

Keywords: residual stresses, tensometry, deformation, speckle interferometry, digital image correlation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Внедрение новых материалов и технологий в авиационную промышленность предъявляет особые требования к контролю качества производственных процессов [1–4]. В результате большинства технологических операций, связанных с пластической деформацией, неравномерным нагревом (охлаждением), фазовыми или структурными превращениями, в изделиях происходит образование макронапряжений [5], наличие которых может оказывать существенное влияние на эксплуатационные свойства материала [6]. Эти макронапряжения называют остаточными напряжениями I рода. Так, в работах [7–9] изучено распространение остаточных напряжений в сварных соединениях и предложен комплекс мер для снижения их влияния на механические характеристики, а в работе [10] – в изделиях, произведенных методом селективного лазерного сплавления.

Однако не всегда остаточные напряжения носят негативный характер – так, они могут способствовать повышению характеристик сопротивления усталости [5, 8]. Противоположные по знаку остаточные напряжения, созданные в поверхностном слое, вычитаются из эксплуатационных напряжений, в результате чего поверхностный слой изделия испытывает меньшие напряжения и менее склонен к образованию усталостных трещин.

Знание уровней остаточных напряжений в полуфабрикатах и конечных деталях необходимо для конструирования авиационной техники и других сложных технических изделий [11].

Условно все методы определения напряжений можно разделить по типу воздействия на материал – на разрушающие и неразрушающие методы [6, 12]. Разрушающие методы основаны на измерении деформационного отклика, возникающего в результате перераспределения напряжений, вызванного локальным удалением (разрезанием или другим способом) материала. Полученные деформации являются упругими и могут быть пересчитаны в упругие напряжения [13], как правило, I рода (остаточные напряжения уравновешены в объемах, сопоставимых с размером исследуемого тела). В свою очередь, большинство неразрушающих методов определения остаточных напряжений основаны либо на определении напряжений II (уравновешены в объемах, сопоставимых с размером зерен) и III рода (уравновешены в объемах, сопоставимых с размером элементарной ячейки кристаллической решетки), либо наличие микронапряжений искажает результаты измерения макронапряжений [13].

В данной работе проведен обзор и дана характеристика наиболее распространенных разрушающих методов оценки остаточных напряжений.

Методы расщепления и сегментирования

Методы используются для оценки остаточных напряжений при производстве материалов на образцах простой формы и основаны на нанесении на образец глубокого разреза, приводящего к смыканию или раскрытию соседних фрагментов материала у разреза (рис. 1). По величине раскрытия (смыкания) определяют приблизительную величину и знак остаточных напряжений [14]. Средние значения кольцевых напряжений (σ) в тонкостенных трубах рассчитывают по соотношению [15]

$$\sigma = \pm \frac{Et}{1-\mu^2} \cdot \frac{D_1 - D_0}{D_1 D_0}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости; t – толщина стенки трубы; μ – коэффициент Пуассона; D_0 – внешний диаметр трубы до разреза; D_1 – внешний диаметр трубы после разреза.

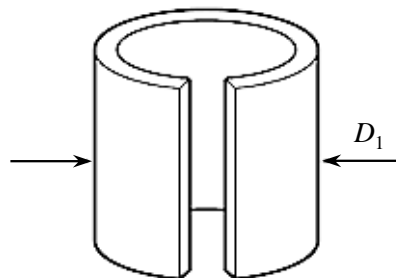


Рис. 1. Метод сегментирования

Методы характеризуются простотой реализации и низкой трудоемкостью, однако реализуемы только на образцах или изделиях простой геометрической формы и предполагают однородное распределение напряжений по толщине материала, а погрешность измерений может достигать 50 % [12], что позволяет использовать методы в первую очередь для качественной оценки остаточных напряжений.

Метод послойного удаления

Метод послойного удаления материала, предложенный Н.Н. Давиденковым, подразумевает разрезание цилиндра вдоль его образующей с замером изменения диаметра аналогично сегментированию (рис. 1) и последующим удалением слоев материала с фрагментов цилиндра. Кольцевые остаточные напряжения (σ_{φ}) определяют как сумму трех составляющих [5]:

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{\varphi 1} + \sigma_{\varphi 2} + \sigma_{\varphi 3}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\varphi 1}$ – напряжения, снимающиеся при разрезке кольца и определяющиеся соотношением (1); $\sigma_{\varphi 2} = f(a)$ – напряжения, снимающиеся при удалении текущего слоя; a – расстояние от наружной поверхности до середины удаляемого слоя; $\sigma_{\varphi 3} = f(\Delta D, a)$ – напряжения, снимающиеся при удалении предыдущих слоев; ΔD – изменение наружных диаметров при последовательном удалении предыдущих слоев.

Определение продольных напряжений проводят аналогичным образом на узкой полосе, вырезанной параллельно оси, с измерением возникшего прогиба. Точность метода существенно зависит от способа и качества удаления слоев материала: предпочтительным считается способ химического травливания, так как после механической обработки в поверхностных слоях могут возникать дополнительные остаточные напряжения.

Метод получил широкое распространение благодаря тому, что имеет высокую повторяемость [5], позволяет определять продольные и тангенциальные напряжения по всей толщине материала, может применяться для цилиндров и труб разной толщины. Погрешность измерения этим методом существенно зависит от качества удаления материала, а также точности определения толщины удаляемого слоя и составляет 10–30 % [13]. Метод применяют для количественной оценки остаточных напряжений.

Метод пропилов (разреза, податливости)

В процессе исследования проводят постепенное прорезание тонкого паза с заданным количеством шагов и глубиной (рис. 2). Контроль деформации осуществляют на обратной или лицевой стороне поверхности образца у ослабленного сечения [6, 16]. Расчет остаточных напряжений основан на решении задачи теории упругости, включающей определение матрицы податливости, которая чаще всего рассчитывается с помощью методов конечных элементов и зависит от геометрической формы исследуемого образца и области измерения деформации. Метод прост в реализации, имеет высокую повторяемость и позволяет проводить оценку одной составляющей остаточных напряжений, нормальной к плоскости пропила, по всей толщине для образцов с призматическим сечением. Однако следует учитывать влияние пластической деформации в вершине надреза, которая может вносить погрешность в результаты измерений [17].

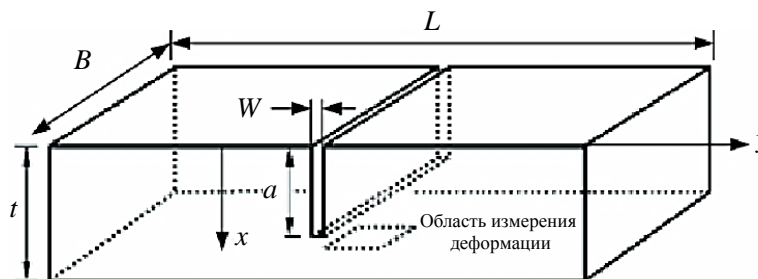


Рис. 2. Схема образца для исследования остаточных напряжений методом пропила

Метод характеризуется простотой исполнения, возможностью исследования широкой номенклатуры материалов, погрешность измерения составляет до 20 % [13] и зависит от качества пропила. Данный метод применяют для количественной оценки остаточных напряжений.

Метод профилирования

Метод позволяет получить распределение нормальной составляющей остаточных напряжений к поверхности реза исследуемого объекта в виде двухмерной карты на образцах или изделиях сложной геометрической формы с толщиной >5 мм. Принцип метода заключается в измерении формы (профиля) исследуемого объекта до и после удаления части материала. Точность метода существенно зависит от качества резания, поэтому исследования обычно проводят на металлических материалах, а удаление фрагментов рекомендуют проводить электроэрозионной резкой [18]. Измерение формы (профиля) проводят с помощью координатно-измерительной машины или профилометра для определения смещений, которые связаны с перераспределением напряжений. Их включают в компьютерную модель конечных элементов. Предполагается, что напряжения в плоскости разреза имеют упругую природу и полностью релаксируют (рис. 3, б). Эти смещения компенсируют приложением внешних напряжений (рис. 3, в). Таким образом, остаточные напряжения равны напряжениям, необходимым для возврата деформированной поверхности в исходное состояние.

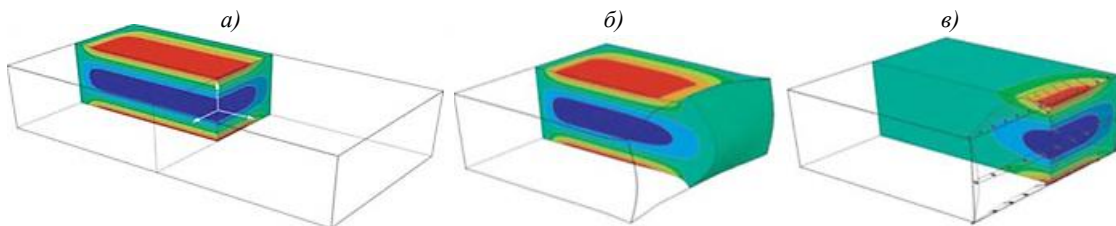


Рис. 3. Модель конечных элементов для оценки остаточных напряжений методом профилирования [18]: *а* – исследуемый образец до удаления фрагмента; *б* – образец с деформацией, после удаления фрагмента; *в* – образец после компенсации высвободившихся перемещений

В настоящее время существует ряд усовершенствований данного метода, которые основаны на нанесении дополнительных разрезов, что позволяет проводить оценку нескольких составляющих остаточных напряжений [19].

Уникальность метода заключается в возможности получения распределения поверхностных напряжений на поверхности разреза на образцах и изделиях сложной формы. Дополнительные разрезы позволяют проводить исследования нескольких компонент тензора напряжений. Однако сложность исполнения, высокие требования к качеству разреза, ограниченный круг исследуемых материалов (токопроводящие материалы), размещение высокоточных систем измерения формы вблизи отрезного станка делают метод сложно реализуемым в практике применения.

Методы сверления отверстий (в том числе «глубокого» отверстия)

Это наиболее распространенный метод оценки остаточных напряжений. Он основан на измерении локальных деформаций в области сверления (рис. 4, *а*), по уровню которых на каждом шаге приращения глубины сверления определяют полный профиль остаточных напряжений. Альтернативным исполнением метода является метод кольцевой выточки, при котором удаление материала проводят вокруг зоны измерения деформации (рис. 4, *б*).

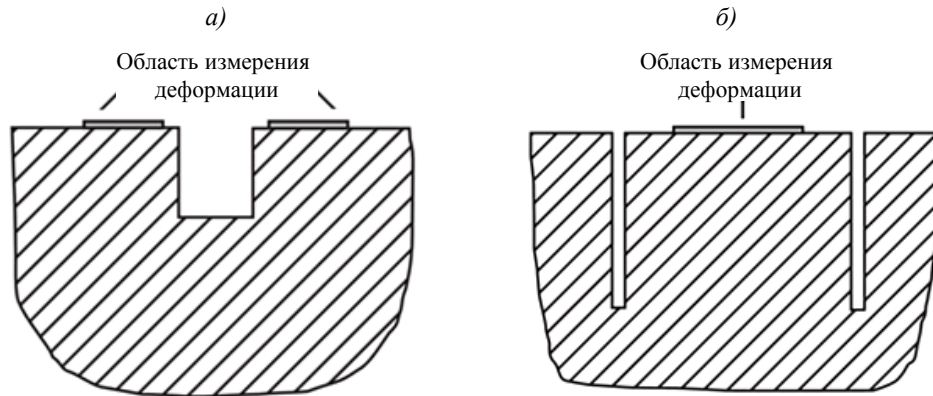


Рис. 4. Профиль высверленного отверстия (а) и кольцевой выточки (б)

При сверлении отверстия, диаметр которого не превышает толщину исследуемого образца, определяют как однородные (не изменяются по глубине), так и неоднородные (изменяются по глубине) остаточные напряжения, в остальных случаях – только однородные. Метод стандартизирован [20] и разработан для исследования изотропных материалов, однако существуют работы по определению остаточных напряжений в ортотропных материалах [21], в том числе и слоистых [22]. Связь между деформацией (ε) и однородными остаточными напряжениями определяют по соотношению [23]

$$\varepsilon = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \frac{(1 + \mu)\bar{a}}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \frac{\bar{b}}{E} \cos 2\theta + \tau_{xy} \frac{\bar{b}}{E} \sin 2\theta, \quad (3)$$

где \bar{a} – калибровочная константа для нормальных изотропных напряжений; \bar{b} – калибровочная константа для касательных напряжений; θ – угол между областями измерения деформации; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; σ_x, σ_y – однородные напряжения по осям x и y соответственно; τ_{xy} – однородное напряжение сдвига.

Калибровочные константы \bar{a} и \bar{b} определяют расчетным (как правило, методом конечных элементов) или эмпирическим способом.

Точность измерения напряжений зависит от расстояния между исследуемой областью и областью измерения деформации. Таким образом, диаметр высверленного отверстия (D_0) и диаметр окружности (D), по которой расположены области измерения деформации, должны удовлетворять следующему неравенству [23]:

$$0,3 < \frac{D_0}{D} < 0,5. \quad (4)$$

Качество сверления также влияет на погрешность измерения – рекомендуется для уменьшения влияния пластических деформаций, наведенных при сверлении отверстия, проводить сверление на скоростях вращения фрезы не менее 10 тыс. об/мин. Однако высокоскоростное сверление при исследовании высокотвердых или абразивных материалов может не только увеличить уровень наклепа, но и повредить режущую фрезу, что исказит профиль высверленного отверстия и внесет дополнительные ошибки в результаты исследований. Для устранения данных недочетов разработан метод орбитального сверления, при котором сверление проводится боковой стороной фрезы меньшего, чем отверстие диаметра, движущейся по окружности на некотором расстоянии от оси отверстия. При этом образуется дополнительная область для вывода продуктов сверления. Происходит меньший разогрев образца, а тангенциальная и осевая силы, возникающие при воздействии на материал, значительно меньше аналогичных при стандартном сверлении [24].

Исследования рекомендуют проводить на образцах толщиной не менее $1,2D$ при расстоянии до края $0,8D$ [20], а глубина сверления отверстия в некоторых случаях может достигать 2 мм [13], что является достаточным для оценки остаточных напряжений, возникающих в результате большинства технологических процессов. Дальнейшее сверление может внести дополнительные погрешности измерения вследствие того, что удаление материала на большей глубине вносит меньший вклад в изменение деформации на поверхности.

Метод позволяет проводить оценку равномерных и неравномерных остаточных напряжений с относительной погрешностью до 15 %, отличается низкой трудоемкостью, а допускаемый уровень максимальных определяемых напряжений соответствует 70 % от предела текучести материала [20]. Метод считается полуразрушающим [13], так как уровень повреждений значительно меньше, чем у других разрушающих методов, и для некоторых исследуемых объектов может быть незначительным или ремонтпригодным. Имеется возможность применения метода в полевых условиях, что позволяет использовать его для периодического контроля конструкций, находящихся в эксплуатации, или для промежуточного контроля технологических процессов. Существует возможность исследования композиционных материалов, однако это накладывает определенные трудности, связанные с расчетом матриц калибровочных коэффициентов для каждого этапа сверления.

Метод «глубокого» отверстия – модификация метода сверления отверстий, позволяющая проводить оценку остаточных напряжений без ограничений по глубине, которая основана на сверлении предварительного отверстия и дальнейшей кольцевой проточки вокруг предварительного отверстия. В процессе проточки происходит перераспределение напряжений и искажение формы предварительного отверстия, по которым определяют уровень остаточных напряжений [25]. Метод предъявляет высокие требования как к соосности предварительного отверстия (что может быть трудно реализуемо на большой глубине сверления), так и к качеству кольцевой проточки вокруг него. Процесс проточки обычно проводят с помощью электроэрозионной обработки, что накладывает определенные ограничения на спектр исследуемых материалов.

Измерение деформаций при определении остаточных напряжений

Разрушающие методы оценки остаточных напряжений основаны на измерении деформаций в характерных зонах исследуемого объекта в результате перераспределения напряжений. Таким образом, погрешность и полнота данных, обеспеченные способом измерения деформации, могут оказать существенное влияние на результаты исследований. Способы измерения деформации условно разделяют на контактные и бесконтактные.

Среди *контактных способов* наибольшее распространение получило использование тензометрических датчиков (рис. 5, а), которые обеспечивают высокую точность измерения, просты в эксплуатации и могут быть использованы в большинстве разрушающих методов оценки остаточных напряжений. Для определения нормальных составляющих напряжений два датчика устанавливают во взаимно перпендикулярных направлениях. Для определения главных напряжений и их ориентации деформацию измеряют в трех направлениях. Например, для метода сверления отверстий стандартизованы тензометрические розетки, в которых под определенными углами расположены три (рис. 5, б) или шесть (рис. 5, в) тензорезисторных датчиков [20].

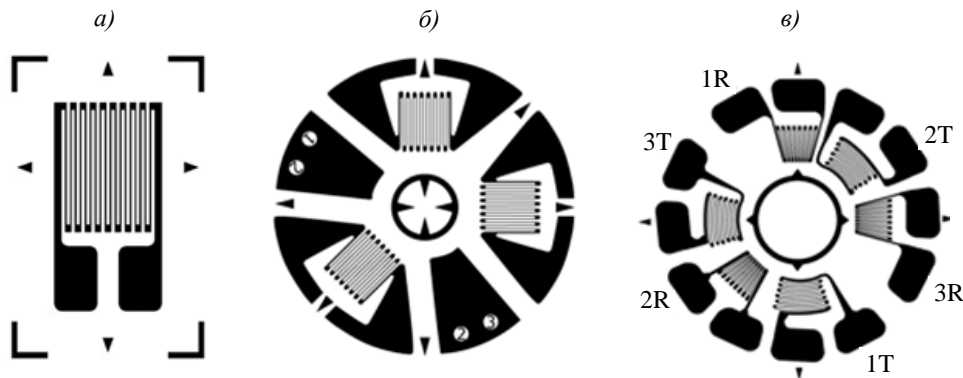


Рис. 5. Схемы контактных способов измерения остаточных напряжений с помощью тензорезисторного датчика (а) и тензорезисторных розеток (б, в) (1–3; 1R–3R; 1T–3T – датчики)

В свою очередь *бесконтактные способы* измерения деформаций предоставляют возможность исследования на поверхности всех компонент тензора деформаций, в том числе и у зон удаления материала, на основе которых могут проводиться более сложные методы оценки распределения остаточных напряжений и их сравнения с результатами математического моделирования. К методам бесконтактного измерения деформаций относятся:

– **поляризационно-оптический метод (фотоупругость)** – один из первых методов, позволяющий проводить исследования объемного напряженного состояния по полному полю напряжений; он ограничен использованием прозрачных изотропных материалов, однако может использоваться для материалов оптически непрозрачных для видимого света, но прозрачных для других длин волн электромагнитного излучения; основан на явлении двойного лучепреломления поляризованного света в оптически анизотропных областях, возникающих в результате деформирования [26].

Нанесение фотоупругих покрытий позволяет проводить исследование полей деформации на непрозрачных материалах [27], что нашло применение при оценке остаточных напряжений на образцах и изделиях сложной формы [27, 28]. Высокая трудоемкость и требования к качеству нанесенного покрытия определили применимость метода преимущественно для лабораторных исследований;

– **оптическая спекл-интерферометрия** – получила широкое распространение при исследовании остаточных напряжений методом сверления отверстий [29], основана на интерференции когерентного излучения, отраженного от поверхности исследуемого неоднородного объекта [30–32], в результате чего формируются интерференционные полосы и случайная спекл-структура (рис. 6). Хаотичная спекл-структура содержит информацию о поверхности объекта. Деформации, которые возникают в процессе перераспределения напряжений, смещают отдельные участки спекл-структуры. Сравнивая полученное изображение с исходным, определяют поля перемещений и деформации.

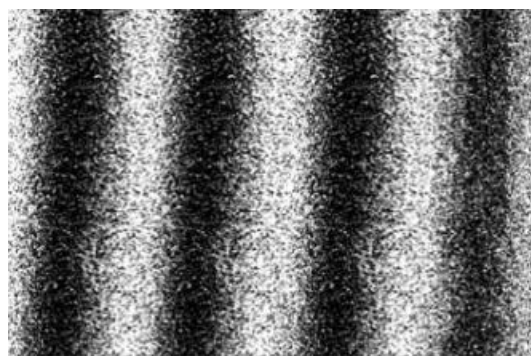


Рис. 6. Интерференционные полосы

Метод позволяет получать полное поле деформаций на поверхности исследуемого образца, характеризуется высокой точностью, а оценку остаточных напряжений проводят путем расчета через поле смещений и калибровочные коэффициенты;

– **корреляция цифровых изображений** – основана на отслеживании перемещений хаотичных текстурных областей (спеклов), нанесенных на поверхность исследуемого объекта, в процессе внешнего воздействия – нагружения, деформирования или удаления материала [33]. При сравнении двух или более цифровых изображений со спекл-картинами определяются поля перемещений и деформаций в тензорном виде. Способ нанесения на поверхность хаотичной текстуры (при помощи красок, перманентного маркера, распыления частиц графита или тонера, ионного осаждения) определяет ее дисперсность. Более мелкодисперсная текстура позволяет получать более локализованные поля деформаций, однако продолжительность процесса пост-обработки изображений при помощи функции корреляции будет увеличена. К преимуществам метода относятся заниженные требования к стабильности измерительной системы, возможность измерения деформаций на криволинейных поверхностях с учетом их поворотов, а также независимость измерительной системы от системы внешнего воздействия на исследуемый объект (например, системы сверления при определении остаточных напряжений методом сверления отверстия).

Несмотря на необходимость предварительного нанесения текстурного покрытия и пост-обработку всех полученных изображений с использованием высокоразрешающей регистрирующей аппаратуры и высокопроизводительного персонального компьютера, точность метода достаточна для большинства задач определения остаточных напряжений [34, 35].

Заключения

По результатам аналитического обзора научно-технической литературы можно сделать вывод, что выбор метода измерения остаточных напряжений определяется типом и геометрической формой исследуемого объекта, а также требованиями к результатам исследований, их полноте и точности.

Наиболее универсальным методом является метод сверления отверстий, поскольку он позволяет получить полное распределение остаточных напряжений по глубине на объектах сложной геометрической формы, при этом характеризуется высокой точностью и относительно низкой трудоемкостью, а возможность исследований слоистых ортотропных материалов делает метод еще более перспективным на фоне развития полимерных композиционных материалов в авиационной промышленности. Метод может применяться при контроле и отработке технологических процессов. Для повышения стабильности определения остаточных напряжений вследствие измерения всего поверхностного поля деформаций вокруг отверстия в качестве способа регистрации деформаций предпочтительно использовать высокоразрешающие оптические методы.

В то же время особый интерес представляют методы, позволяющие получать полное поле распределений остаточных напряжений в исследуемой области. Так, метод профилирования позволяет получать полную картину распределения остаточных напряжений, нормальных к поверхности разреза вблизи концентраторов напряжений и на изделиях сложной формы.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.

2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
4. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Медведев П.Н., Крупнина О.А., Роголев А.М. Особенности структуры сплава Ti–6Al–4V, полученного методом селективного лазерного сплавления // *Труды ВИАМ*. 2019. № 10 (82). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-14-24.
5. Буркин С.П., Шимов Г.В. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2015. 247 с.
6. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 233 с.
7. Ночовная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов // *Труды ВИАМ*. 2014. № 5. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-2-2.
8. Лукин В.И., Иода Е.Н. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1461 // *Сварочное производство*. 2010. № 11. С. 14–17.
9. Арисланов А.А., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Грибков М.С. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из сплава ВТ6ч // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-74-79.
10. Zhongxu X., Changpeng C. Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V // *Materials & Design*. 2020. Vol. 193. Art. 108846. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108846.
11. Гриневич А.В., Лаптев А.Б., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.
12. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // *Materials and Design*. 2012. No. 35. P. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022.
13. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Oxford: Elsevier Science, 2001. Section 5a. P. 8152–8158. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01462-5.
14. Walton H.W. Deflection Methods to Estimate Residual Stress // *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International, 2002. P. 89–98.
15. ASTM E1928. Standard Practice for Estimating the Approximate Residual Circumferential Stress in Straight Thin-walled Tubing. 2019. URL: <https://www.astm.org/Standards/E1928.htm> (дата обращения: 20.06.2021).
16. Cheng W., Finnie I. Residual Stress Measurement and the Slitting Method. New York: Springer, 2007. 164 p.
17. Hill M.R. The Slitting Method // *Practical Residual Stress Measurement Methods*. Vancouver: University of British Columbia, 2013. P. 89–108. DOI: 10.1002/9781118402832.ch4.
18. Prime M.B. Cross-sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2001. No. 123 (2). P. 162–168.
19. Pagliaro P., Prime M.B., Swenson H., Zuccarello B. Measuring Multiple Residual-Stress Components Using the Contour Method and Multiple Cuts // *Experimental Mechanics*. 2010. No. 50 (2). P. 187–194. DOI: 10.1007/s11340-009-9280-3.
20. ASTM E837 – Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. 2020. URL: <https://www.astm.org/Standards/E837.htm> (дата обращения: 20.06.2021).
21. Schajer G.S., Yang L. Residual-stress Measurement in Orthotropic Materials Using the Hole-drilling Method // *Experimental Mechanics*. 1994. No. 34. P. 324–333.

22. Ghasemi A.R., Shokrieh M.M. Measuring residual stresses in composite materials using the simulated hole-drilling method // *Residual Stresses in Composite Materials*. Woodhead Publishing, 2014. P. 76–120. DOI: 10.1533/9780857098597.1.76.
23. Mathar J. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes // *Transactions ASME*. 1934. No. 56 (4). P. 249–254.
24. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // *Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics*. 2018. No. 1. P. 1–186. DOI: 10.2200/S00818ED1V01Y201712SEM001.
25. Leggatt R.H., Smith D.J., Smith S.D., Faure F. Development and Experimental Validation of the Deep Hole Method for Residual Stress Measurement // *Journal of Strain Analysis*. 1996. No. 31 (3). P. 177–186. DOI: 10.1243/03093247V313177.
26. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1973. 572 с.
27. Разумовский И.А. Метод фотоупругих покрытий при исследованиях в зонах больших градиентов напряжений // *Машиноведение*. 1984. № 2. С. 84–87.
28. Thomas W.C., Wayne E.N. Residual strain Measurement using Photoelastic Coating // *Optics and Lasers in Engineering*. 1997. Vol. 27. Is. 1. P. 111–123. DOI: 10.1016/S0143-8166(95)00012-7.
29. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 45. P. 203–206. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.256.
30. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд-во МГТУ, 2007. 240 с.
31. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Разумовский И.А. Применение электронной спеклинтерферометрии для измерения остаточных напряжений // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2002. Т. 68. № 4. С. 48–51.
32. Nelson D.V., McCrickerd J.T. Residual-stress Determination Through Combined Use of Holographic Interferometry and Blind-Hole Drilling // *Experimental Mechanics*. 1986. No. 26 (4). P. 371–378.
33. Sutton M.A., Orteu J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer, 2009. 321 p.
34. Nelson D.V., Makino A., Schmidt T. Residual Stress Determination Using Hole Drilling and 3D Image Correlation // *Experimental Mechanics*. 2006. No. 46 (1). P. 31–38. DOI: 10.1007/s11340-006-5859-0.
35. Gao J., Shang H. Deformation-Pattern-Based Digital Image Correlation Method and its Application to Residual Stress Measurement // *Applied Optics*. 2009. Vol. 48. P. 1371–1381. DOI: 10.1364/AO.48.001371.