

Современные технологии диагностики остаточных напряжений

С.К. Каргапольцев^{1а}, А.К. Мозалевская^{2б}

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

^а kck6262@mail.ru, ^б mozalevskay@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-0590-176X>

Статья поступила 21.08.2024, принята 19.09.2024

Рассматривается современное состояние развития методологии определения остаточных напряжений, возникающих при производстве деталей различной формы в процессе их изготовления, которые оказывают влияние на прочностные параметры материалов. Возникновение и перераспределение остаточных напряжений на различных стадиях производства изделий сопровождаются возникновением остаточных деформаций и снижают геометрическую точность изделий. Проблема устранения остаточных напряжений в деталях с малой жесткостью, в частности из алюминиевых сплавов, является актуальной и обусловлена необходимостью обеспечения регламентированной прочности и долговечности готовых изделий. В связи с этим определение остаточных напряжений важно для контроля качества готовой продукции. Оценка существующей методологии определения остаточных напряжений показывает, что данное научное направление достаточно разработано и имеет большое количество методов, обладающих как достоинствами, так и недостатками. Их применение зависит от многих заявленных параметров, к основным из которых можно отнести точность определения, сложность и затратность испытаний, дороговизну научно-исследовательского оборудования. Рассматриваются наиболее существенные аспекты основных современных методов определения остаточных напряжений и их применение к решению практических задач, наиболее подходящих под заявленные параметры точности рассматриваемых методов. Проведена систематизация методов определения остаточных напряжений разрушающего и неразрушающего характера. Проанализированы их основные достоинства и недостатки. Сформирован ряд рекомендаций по использованию рассмотренных методов в научных и производственных целях. Кратко раскрыта сущность изученных методов с использованием иллюстративного материала. Приведена обобщающая таблица по сравнительному обзору методов измерения остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения; разрушающие методы; неразрушающий контроль; систематизация; практическое применение.

Modern technologies for diagnostics of residual stresses

S.K. Kargapoltsev^{1а}, A.K. Mozalevskaya^{2б}

¹ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

^а kck6262@mail.ru, ^б mozalevskay@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-0590-176X>

Received 21.08.2024, accepted 19.09.2024

The current state of development of the methodology for determining residual stresses that arise during the production of parts of various shapes during their manufacture and which influence the strength parameters of materials is considered. The occurrence and redistribution of residual stresses at various stages of product production is accompanied by the occurrence of residual deformations and reduces the geometric accuracy of products. The problem of eliminating residual stresses in parts with low rigidity, in particular, made of aluminum alloys, is relevant and determined by the need to ensure regulated strength and durability of finished products. In this regard, the determination of residual stresses is important for quality control of finished products. An assessment of the existing methodology for determining residual stresses shows that this scientific direction is sufficiently developed and has a large number of methods that have both advantages and disadvantages. Their use depends on many stated parameters, the main ones of which include the accuracy of determination, the complexity and cost of testing, and the high cost of research equipment. The most significant aspects of the main modern methods for determining residual stresses and their application to solving practical problems that are most suitable for the declared accuracy parameters of the methods under consideration are considered. Methods for determining residual stresses of destructive and non-destructive nature have been systematized. Their main advantages and disadvantages are analyzed. A number of recommendations have been formed for the use of the considered methods for scientific and industrial purposes. The essence of the studied methods is briefly revealed using illustrative material. A summary table is provided for a comparative review of methods for measuring residual stresses.

Keywords: residual stresses; destructive methods; non-destructive testing; systematization; practical application.

Введение. Увеличение объемов промышленного производства обуславливает необходимость развития научных исследований в области современного машиностроения. В данном направлении необходимо решать проблемы повышения эффективности производственных процессов для уменьшения времени изготовления готовых изделий, оценки их качества, увеличения прочности и долговечности таких деталей. Научные исследования, посвященные этим вопросам, нашли отражение в [1–3].

Особое внимание неизменно уделяется авиационной промышленности, представляющей сложнейший научно-производственный комплекс, решающий огромный пласт проблем, связанных как с обеспечением стабильной динамики полета летательных аппаратов, так и с формированием соответствующей технологии производства авиационных деталей. В этом плане большое внимание уделяется определению остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов. Остаточные напряжения возникают в деталях на всех этапах их производства.

Наличие остаточных напряжений влияет на прочностные характеристики изделий, а также может вызывать формирование остаточных деформаций, что в конечном итоге приводит к геометрическим искажениям, снижает срок службы деталей, увеличивает количество брака при их изготовлении [1–3].

В предлагаемой статье рассматриваются как разрушающие, так и неразрушающие методы определения остаточных напряжений.

I. Общие положения. Постановка задачи исследования. Оценка остаточных напряжений и, как следствие, анализ прочности и прогнозирование остаточных деформаций при обработке заготовок являются актуальным направлением современных исследований, так как остаточные напряжения рассматриваются как один из ключевых факторов, влияющих на ухудшение прочностных качеств и эксплуатационных характеристик деталей.

Следует отметить, что остаточные напряжения не всегда отрицательно сказываются на

эксплуатационных характеристиках деталей. К примеру, дробеструйное упрочнение или обкатка роликами обеспечивает создание сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, что улучшает их прочностные характеристики. Данные технологические процессы также сопровождаются контролем остаточных напряжений после обработки [4].

В настоящее время методы определения остаточных напряжений можно разделить на две категории — разрушающие, к которым можно отнести механические и химические методы, и неразрушающие, основанные на измерении физических свойств самого материала с помощью определенных типов оборудования.

Разрушающие методы определения остаточных напряжений впервые стали изучать более века назад. Одними из первых фундаментальных работ в этой области стали работы И. Гейна и русского ученого Н.В. Калакуцкого, предложивших механический метод определения остаточных напряжений.

Разрушающие методы позволяют количественно измерять как поверхностные, так и внутренние остаточные напряжения. При этом разрушающие методы относительно просты в выполнении и, несмотря на существенную трудоемкость и разрушение образца при их реализации, обладают высокой точностью.

В тех случаях, когда данные методы приводят к разрушению детали, их применение недопустимо, в связи с чем разработаны методы неразрушающего контроля, которые, как правило, дают качественную картину остаточных напряжений, а не количественную. Эти методы не влияют на эксплуатационные свойства детали после измерения остаточных напряжений, из-за чего они получили широкое распространение в производственной практике.

В данной работе на основе рассмотрения различных методов измерения остаточных напряжений проведена их систематизация и даны рекомендации по их применению (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов измерения остаточных напряжений

В предлагаемой статье рассматривается систематизация различных методов измерения остаточных напряжений, для которых проанализированы преимущества и недостатки, физические ограничения, разработаны рекомендации по их применению в научных и производственных целях.

II. Разрушающие методы определения остаточных напряжений. Сущность принципа определения остаточных напряжений в разрушающих методах состоит в том, что разрез и обнажение поверхности эквивалентны (для оставшейся части тела) к приложению поверхности сечения остаточных напряжений обратного знака (рис. 2).

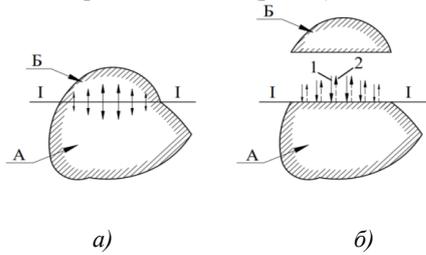


Рис. 2. Иллюстрация основного принципа определения остаточных напряжений в разрушающих методах (до разреза образца (а), после разреза образца (б)): 1 — остаточные напряжения; 2 — остаточные напряжения, «эквивалентные» разрезу

При срезе некоторых частей тела в оставшейся части возникают деформации (и перемещения), и по известной совокупности их значений определяются вызвавшие напряжения на поверхности среза.

Для этого удаляют материал, а остаточное напряжение определяется математическими методами для упругого и упруго-пластичного тела в соответствии со смещением или деформацией в этой области [1].

В практических задачах определение напряжений по всей поверхности среза по измененным перемещениям часто оказывается затруднительным, тогда проводится постепенное увеличение поверхности среза. В данном разделе приведен обзор наиболее распространенных разрушающих методов определения остаточных напряжений.

Методы сегментирования и расщепления используются для приблизительной оценки остаточных напряжений при производстве деталей простой формы и основаны на нанесении на образец глубокого разреза, приводящего к смыканию или раскрытию соседних фрагментов исследуемого образца у разреза (рис. 3, 4). По величине раскрытия (смыкания) определяют приблизительную величину и знак остаточных напряжений [5].

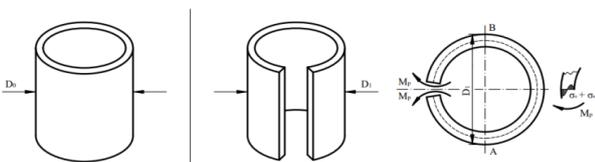


Рис. 3. Схема измерения диаметра кольца при сегментировании

После получения экспериментальных данных величина напряжений может быть найдена следующим образом:

$$\sigma_{res}^{min} = \pm \frac{Et}{(1-\nu^2)} \left(\frac{D_1 + D_0}{D_1 D_0} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_{res}^{max} = \pm \frac{Et}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{R_1 + R_0}{R_1 R_0} \right), \quad (2)$$

где σ_{res}^{min} , σ_{res}^{max} — минимальное и максимальное остаточное окружное напряжение на поверхности трубы; E — модуль Юнга; t — толщина трубы; ν — коэффициент Пуассона; D_0 — средний наружный диаметр трубы до разделения; D_1 — средний наружный диаметр трубы после разделения; R_0 — средний внешний радиус до разделения; R_1 — средний внешний радиус после разделения.

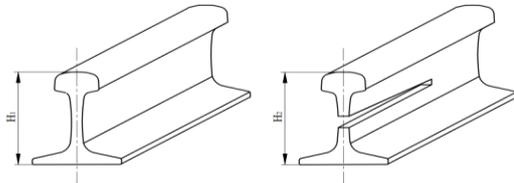


Рис. 4. Схема определения остаточных напряжений в шейке рельса

Метод сверления отверстий основан на сверлении на поверхности образца отверстия малого диаметра (рис. 5). Измеряются деформации вокруг области сверления на каждом шаге увеличения глубины отверстия, минимум в трех независимых направлениях вокруг отверстия. Первоначальные остаточные напряжения в материале оцениваются на основе измеренных деформаций с использованием калибровочных коэффициентов, определяемых экспериментально или расчетным методом, в частности, может быть использован метод конечных элементов. Деформации измеряются с помощью тензометрических датчиков или методом электронной спекл-интерферометрии [3].

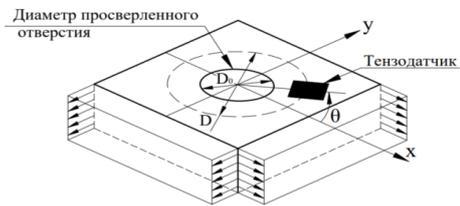


Рис. 5. Расчетная схема при реализации метода сверления отверстий

Полученные значения напряжений позволяют определить значения деформаций при помощи выражения:

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

где \bar{a} — калибровочный коэффициент для нормальных изотропных напряжений; \bar{b} — калибровочный коэффициент для касательных напряжений; σ_x — равномерное нормальное напряжение x ; σ_y — равномерное нормальное напряжение y ; ν — коэффициент Пуассона; θ — угол тензодатчика от оси x ; E — модуль Юнга; D — диаметр измерительной окружности; D_0 — диаметр просверленного отверстия.

Данный метод является наиболее широко используемым методом измерения остаточных напряжений в настоящее время, имеет преимущества в виде высокой точности, использования недорогого оборудования и так называемого полуразрушающего подхода из-за небольшого повреждения изделий. На возникающие деформации влияют только поверхностные остаточные напряжения, поэтому максимальная глубина измерения 2 мм.

Метод сверления «глубоких» отверстий является развитием метода сверления отверстий. Первым этапом производится сверление контрольного отверстия малого диаметра (обычно 1,5; 3 и 5 мм) на всю толщину детали. Производится измерение его диаметра по всей толщине детали под разными углами. Вторым этапом из детали постепенно вырезается столбец материала цилиндрической формы (соответственно 5; 10; 17 мм) вокруг контрольного отверстия, при этом контрольное отверстие располагается в качестве оси цилиндра, и на каждом этапе приращения глубины производятся повторные измерения диаметра контрольного отверстия в тех же местах [6]. Вырезание цилиндра обычно выполняется с использованием электроэрозионной обработки, чтобы свести к минимуму возникновение дополнительных напряжений во время резки. Разница между измеренными диаметрами на первом и втором этапах позволяет рассчитать исходные остаточные напряжения с использованием теории упругости (рис. 6).

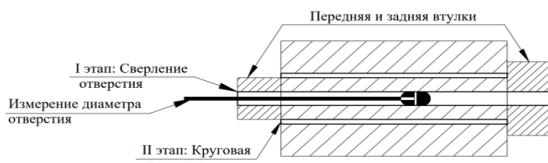


Рис. 6. Иллюстрация метода сверления «глубоких» отверстий

Диаметральная деформация $\varepsilon(\theta)$ связана с остаточными напряжениями следующим образом:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{\Delta d(\theta)}{d_0(\theta)}, \quad (4)$$

где Δd — изменение диаметра отверстия; d_0 — исходный диаметр.

В детализированном виде формула примет вид:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} f(\theta) + \sigma_{yy} g(\theta) + \tau_{xy} h(\theta)), \quad (5)$$

где σ_{xx} , σ_{yy} и τ_{xy} — компоненты тензора напряжений, E — модуль Юнга (изотропного) материала.

Дополнительные соотношения определяются следующим образом:

$$f(\theta) = 1 + \cos(2\theta), g(\theta) = 1 - \cos(2\theta), h(\theta) = 4 \sin(2\theta). \quad (6)$$

Все три величины являются функцией угла θ на окружности отверстия (определяется как против часовой стрелки от оси x). Метод направлен на определение остаточных напряжений вдоль оси просверленного контрольного отверстия на глубине до 750 мм.

Метод кольцевого сердечника аналогичен методу сверления отверстий и заключается в вырезании кольцевой выточки диаметром D в детали и измерении деформации внутри области сверления на каждом шаге приращения ее глубины с помощью установки в середине этой области розетки из тензодатчиков (рис. 7).

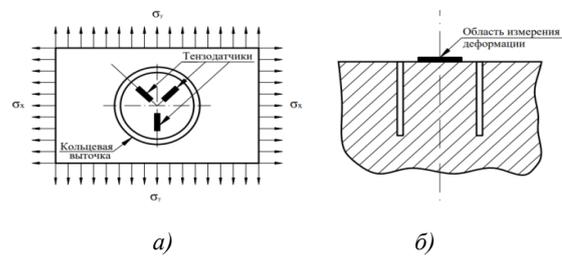


Рис. 7. Горизонтальная (а) и фронтальная (б) проекции образца при реализации метода кольцевого сердечника

Остаточные напряжения в этом случае рассчитываются так же, как при реализации метода сверления отверстий. Данный метод позволяет определять остаточные напряжения на глубине до 6 мм и учесть характер распределения по глубине поверхностного слоя. Точность измерения остаточных напряжений с помощью данного метода более высокая, чем при реализации метода сверления отверстий. Методы сверления отверстий и кольцевой выточки основаны на применении тензорезисторов для измерения деформации после удаления слоя материала с образца. В то же время, необходимо учитывать и то, что сам тензометрический датчик влияет на точность измерений. В связи с этим для совершенствования измерительной системы используют лазерный спекл-интерферометр вместо тензорезисторов для измерения деформации, основанный на использовании оптического сигнала в качестве измерительной среды для проведения бесконтактного измерения деформации заготовки на основе спекл-интерферограммы [8]. В электронной спекл-интерферометрии в качестве референтного оптического сигнала используется пространственно-смещенное спекл-изображение исследуемой поверхности. Данный метод обладает высокой точностью и возможностью получения полного поля деформаций на поверхности исследуемого образца.

Метод снятия слоев материала является одним из наиболее известных методов измерения остаточного напряжения в заготовках. Описанию данного метода посвящены работы Н.Н. Давиденкова. В них предполагается, что остаточное напряжение равномерно распределено в заготовке (образце). При

снятии слоя материала остаточные напряжения что приводит к формированию остаточных деформаций [9–11].

Снятие слоев проводится двумя основными методами, механическим и электролитическим (травлением). При реализации механического метода снятия слоев необходимо учитывать формирование остаточных напряжений, обусловленных обработкой (рис. 8, 9) [9].

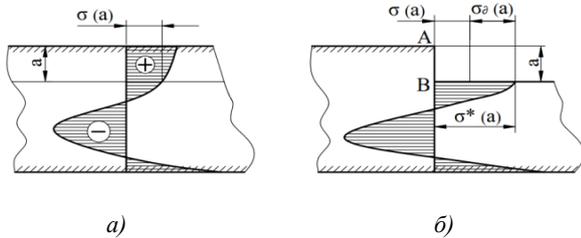


Рис. 8. Схемы эюр распределения остаточных напряжений до (а) и после (б) снятия слоев материала

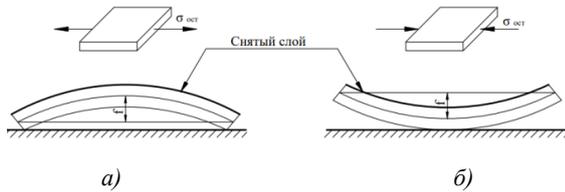


Рис. 9. Деформации образца при реализации метода снятия слоев при действии растягивающих (а) и сжимающих (б) напряжений

Величина напряжений может быть найдена с использованием следующего выражения:

$$\sigma(a) = \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da}(a) - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right], \quad (7)$$

где l , h — длина и высота стержня; ξ — расстояние от верхней границы до удаляемого слоя; a — расстояние от верхней границы до определяемых напряжений; f — прогиб в середине длины стержня.

Метод пропилов (разреза) заключается в прорезании узкой канавки (тонкого паза) поперек детали (фрезерованием или электроэрозионной обработкой) и измерении поверхностных деформаций с помощью тензодатчиков, расположенных с обратной стороны детали относительно паза и рядом с ним. Глубина паза постепенно увеличивается до заданного значения, и регистрируются деформации на каждом шаге увеличения его глубины.

При этом глубина паза должна более чем в 5 раз превышать его ширину [12]. На основе измерений деформации при помощи тензометрических датчиков строятся функции зависимости деформаций от глубины паза, после чего распределение остаточных напряжений может быть найдено при помощи аналитических методов, основанных на классической теории упругости (рис. 10).

перераспределяются,

После получения данных для определения величины остаточных напряжений может быть использовано следующее выражение:

$$\varepsilon(h) = \int_0^h A(H, h) \sigma(H) dH, \quad (8)$$

где $\varepsilon(h)$ — измеренная поверхностная деформация при глубине пропила, равного h ; $\sigma(H)$ — нормальное остаточное напряжений на глубине пропила H ; $A(H, h)$ — функция податливости.

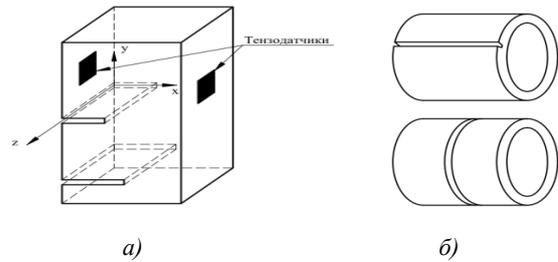


Рис. 10. Принципиальная схема метода пропилов (разреза, податливости) для прямоугольных (а) и цилиндрических (б) образцов

Поскольку данный метод чувствителен к деформациям, возникающим в направлении, перпендикулярном направлению пропила, его точность выше, чем у методов сверления отверстий и удаления слоев.

Контурный метод (метод профилирования). При реализации данного метода заготовка разрезается вдоль участка, где необходимо измерить остаточное напряжение. Предполагается, что поверхность реза является идеальной плоскостью и что существует неизвестное остаточное напряжение в образце. Разрез инициирует перераспределение остаточных напряжений, что приводит к деформированию контура поверхности реза. Далее производят измерения кривизны поверхности реза для оценки ее изменения с учетом перераспределения остаточных напряжений (рис. 11). Для обеспечения плоскости реза и уменьшения погрешность измерений резку осуществляют на электроэрозионных станках [3].

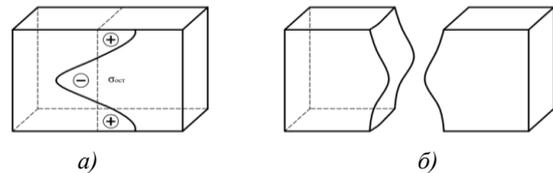


Рис. 11. Схема реализации контурного метода до (а) и после (б) разреза образца

III. Неразрушающие методы определения остаточных напряжений. К неразрушающим методам относятся следующие: рентгеновский, метод нейтронной дифракции, ультразвуковой и магнитный методы. Реализуются эти методы обычно при помощи небольших, мобильных и простых в обращении устройств. Существенное достоинство этих методов — минимизация временных затрат на измерения без предварительной трудоемкой подготовки детали [2].

Неразрушающими методами чаще всего получают косвенную информацию о напряженно-деформационном состоянии объекта с выделением зон концентрации остаточных напряжений [13]. Поэтому эффективность данных методов при определении количественных значений остаточных напряжений остается низкой при использовании на практике. Таким образом, они дают только качественную оценку и, как правило, не дают количественной.

В настоящее время накопился достаточно большой арсенал средств и методов неразрушающего контроля остаточных напряжений, рассмотрим некоторые из них.

Дифракционный метод является наиболее широко используемой технологией среди методов неразрушающего контроля и включает в себя определение остаточных напряжений рентгеновской дифракцией, дифракцией нейтронов и рентгеновским синхротронным излучением.

Рентгенодифрактометрия является в настоящее время наиболее широко используемым методом измерения остаточных напряжений и применяется в различных областях. Благодаря высокой точности и широкому применению используется в научных и производственных целях, а также в качестве контрольного средства измерения остаточных напряжений при проведении экспериментов для подтверждения результатов, полученных при помощи других методов, и проверки их точности [14]. Определение остаточных напряжений рентгеновским методом основано на рассеянии монохроматических рентгеновских лучей при прохождении кристаллической решетки регулярного строения. При таком рассеянии происходит интерференция лучей, в результате которой в определенных направлениях интенсивность лучей увеличивается, тогда как в других направлениях уменьшается. Угол между падающим и отраженным рентгеновскими лучами является строго определенным, зависящим от расстояния между плоскостями кристаллической решетки (рис. 12), длины волны и порядка отражения.

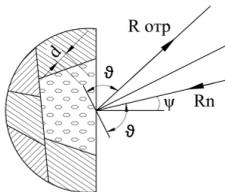


Рис. 12. Схема определения деформации кристаллической решетки (d — расстояние между кристаллографическими плоскостями; θ — угол отражения (угол Брегга); ψ — угол падения рентгеновского луча к нормали исследуемой поверхности)

В основе определения остаточных напряжений лежит закон Вульфа – Брегга. Зная угол между падающим и отраженным рентгеновскими лучами, можно вычислить межплоскостное расстояние решетки d при напряженном состоянии металла [1], и, зная его величину при отсутствии напряжений d_0 , можно вычислить деформацию кристаллической решетки:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0}, \quad (9)$$

которая связана с действующими в поверхностном слое напряжениями:

$$\varepsilon = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (10)$$

где σ_1 и σ_2 — нормальные напряжения в поверхностном слое в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Наиболее точный результат получается при размере зерна материала заготовки от 30 до 100 мкм. Глубина измерения находится в пределах 10–30 мкм. Метод используется для измерения поверхностных остаточных напряжений 1-го рода. Для измерения остаточных напряжений на больших глубинах используются методы рентгеновского *синхротронного излучения* и *дифракции нейтронов*, но дорогостоящее и специфическое испытательное оборудование очень ограничивает практическое применение этих методов [15; 16].

Ультразвуковой метод обычно используется для обнаружения дефектов в изделиях, но также может применяться для определения напряжений. Основывается он на теории акустической упругости и использует явление акустического двойного лучепреломления в напряженном материале, где на скорость распространения ультразвуковой волны в изотропном упругом теле влияет напряжение и его величина, а для измерения остаточного напряжения используется зависимость между скоростью ультразвуковой волны и напряжением. Величина и направление остаточных напряжений рассчитываются путем точного измерения скорости ультразвуковой волны, проходящей через напряженные и ненапряженные области материала. К видам ультразвуковых измерений относятся следующие методы [17]: метод прямого измерения времени распространения импульса (наиболее широко используемый принцип); метод сравнения фаз; метод *sing-around* (используется в основном при определении остаточных напряжений при сварке); эхо-амплитудный метод (прост в работе и обладает высокой точностью); ультразвуковой гониометрический метод (часто применяется для измерения остаточных напряжений на поверхности заготовок для зубных имплантов); спектральные методы; томографические методы. Диапазон измерений при определении остаточных напряжений зависит от предела текучести материала исследуемого образца, чувствительность методов в данном случае зависит от использования поперечных и продольных ультразвуковых волн. Измеряемая величина напряжений представляет собой среднее значение напряжений, действующих между излучателем и приемником. На измерения влияют следующие факторы: микроструктура, состав и шероховатость поверхности образца материала. Точность ультразвукового метода сильно подвержена влиянию собственной температуры образца и температуры окружающей среды и является важным фактором, влияющим на скорость ультразвуковых волн:

$$\Delta t = \Delta t_{AS} + \Delta t_{RS} + \Delta t_T + \Delta t_M, \quad (11)$$

где Δt — изменение времени прохождения ультразвуковой волны через образец; Δt_{AS} — изменение времени прохождения ультразвуковой волны из-за внешних напряжений; Δt_{RS} — изменение времени прохождения ультразвуковой волны из-за остаточных напряжений; Δt_T — изменение времени прохождения ультразвуковой волны из-за температуры образца; Δt_M — изменение времени прохождения ультразвуковой волны из-за микроструктуры образца.

С учетом (10) можно найти величину напряжения с использованием следующего выражения:

$$\Delta \sigma = \frac{E \Delta t}{L_{ij} t_0}, \quad (12)$$

где L_{ij} — коэффициент акустоупругости материала образца; t_0 — время прохождения ультразвуковой волны через эталонный образец без остаточных напряжений.

Метод рамановской спектроскопии основан на эффекте комбинационного рассеяния света и представляет собой аналитический метод, применяемый для изучения молекулярных структур. Основной принцип заключается в том, что при наличии в материале остаточного напряжения сдвиг частоты комбинационного рассеяния будет изменяться вместе с деформацией кристаллической решетки, т. е. когда материал испытывает напряжения сжатия, длина связи молекулы уменьшается, а при наличии растягивающего напряжения — увеличивается.

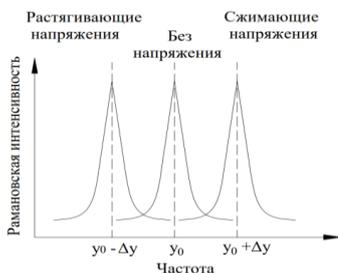


Рис. 13. Явление сдвига рамановской частоты

В соответствии с пропорциональной зависимостью между эталонным остаточным напряжением и относительным сдвигом частоты комбинационного рассеяния света (рис. 13) величина остаточного напряжения в кристалле может быть рассчитано точно:

$$\sigma = \Phi \Delta y, \quad (13)$$

где Φ — величина эталонного остаточного напряжения; Δy — изменение частоты.

Метод применяется для определения остаточных напряжений 2-го рода. На точность измерений при использовании данного метода влияют рэлеевское рассеяние, лазерные тепловые эффекты, комнатная температура и качество оборудования [3].

Метод наноиндентирования основан на том, что остаточные напряжения вызывают изменение напряженно-деформированного состояния при вдавливании индентора в поверхность детали по сравнению с «эталонным» (при вдавливании в заведомо ненапряженную деталь). Измерение каким-либо способом этого различия позволяет получить

данные об остаточных напряжениях в поверхностном слое детали. С помощью кривых зависимости нагрузки-перемещения (сила-глубина), полученных в ходе испытания инструментальным индентированием, можно получить данные о твердости материала, модуле упругости и в соответствии с ними определить остаточное напряжение. Расширение рассматриваемого метода возможно при определении остаточных напряжений на основании данных о распределении и величинах нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка (рис. 14), возникающего при вдавливании индентора в поверхность образца [18–19]. Данный метод относится к методам оценки наличия остаточных напряжений и имеет невысокую чувствительность, что связано с тем, что изменение диаметра отпечатка на уровне предела текучести материала составляет 5–8 %, что соизмеримо с погрешностью измерения диаметра отпечатка стандартными измерительными устройствами. Кроме того, результатом измерения является величина интенсивности остаточных напряжений, а для определения компонент тензора остаточных напряжений используется математический аппарат теории пластичности.

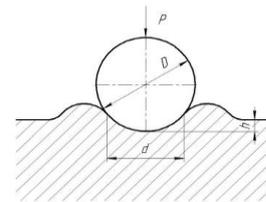


Рис. 14. Схема реализации метода (P — усилие вдавливания индентора; D — диаметр индентора; d — расстояние между крайними точками поверхности приложения индентора; h — глубина проникновения)

С развитием технологии наноиндентирования появились другие методы определения и расчета остаточных напряжений, основанные на использовании инденторов различных форм и соответствующего математического аппарата, каждый из которых имеет свои недостатки, что вызывает несоответствие результатов [19].

Метод магнитной памяти металла был впервые предложен А.А. Дубовым в 1994 г. и основан на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния, возникающих на изделиях и оборудовании в зонах концентрации напряжений и дефектах металла. При этом локальное изменение магнитного сигнала отражает необратимое изменение намагниченности в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок [20]. Когда намагниченная в магнитном поле Земли металлическая заготовка подвергается внешнему воздействию, внутри материала возникает локальное изменение магнитного сигнала в области концентрации напряжений из-за необратимого изменения намагниченности в зоне концентрации напряжений и нарушения сплошности материала в образцах, образуя «магнитное поле утечки», которое остается после снятия нагрузки [21]. Метод применяется для обнаружения концентраций остаточных напряжений в деталях. На

точность определения влияют состояние окружающей среды и интенсивность магнитного сигнала.

Магнитоанізотропний метод основан на эффекте Э. Виллари, когда явление магнитной анизотропии возникает в образце как из-за внешних и внутренних напряжений, так и из-за магнитоупругих деформаций, и заключается в изменении магнитных свойств образца (намагниченность, коэффициент магнитной проницаемости и др.). Параметры магнитных свойств позволяют определить величину остаточных напряжений в ферромагнитном образце. Существуют различные способы реализации данного метода определения остаточных напряжений. Например, в металлическом образце создается переменное магнитное поле по какому-либо направлению, и под воздействием возрастающих механических напряжений поворачивается вектор магнитной индукции [22]. Угол поворота и величина вектора магнитной индукции могут быть косвенной мерой механических напряжений в ферромагнетике. Связь между остаточными напряжениями и магнитными свойствами образца характеризуется магнитоупругой чувствительностью и обладает линейными свойствами при значениях напряжений меньше предела текучести материала:

$$\lambda_B = \frac{\partial B}{\partial \sigma}, \quad (14)$$

где λ_B — линейная магнитоупругая чувствительность; B — магнитная индукция; σ — нормальное остаточное напряжение.

Метод магнитного шума Баркгаузена основан на концепции индуктивного измерения амплитуды шумов Баркгаузена, которые генерируются в ферромагнитном материале при воздействии магнитного поля. Когда ферромагнитный материал намагничивается, магнитная область вращается прерывисто. При наличии остаточного напряжения происходит изменение магнитной проницаемости, что инициирует

серию электрических импульсных сигналов Баркгаузена в приемном блоке анализатора, присоединенном к поверхности испытуемого образца. Амплитуда полученного сигнала шумов Баркгаузена возрастает при уменьшении твердости и наличии растягивающих остаточных напряжений и снижается при увеличении твердости и наличии сжимающих остаточных напряжений. Метод позволяет качественно оценивать области концентрации напряжений, но одним из основных факторов, ограничивающих область применения, является влияние микроструктуры материала на точность измерений.

Метод магнитомеханической акустической эмиссии основан на регистрации и последующей обработке параметров акустических сигналов ультразвукового диапазона, сопровождающих локальную перестройку структуры материала при приложении нагрузки, зарождение и развитие микро- и макродефектов [24]. Для практического применения этого метода необходимо установить взаимосвязь магнитных и акустических параметров с прочностными характеристиками, включающими пределы пропорциональности, текучести и прочности при помощи экспериментальных данных и математического моделирования.

IV. Сравнительный анализ методов определения остаточных напряжений и рекомендации по применению. На основе анализа приведенных выше методов определения остаточных напряжений в таблице представлены данные о глубине измерения остаточных напряжений, их преимущества и недостатки, а также область и объекты для их использования. В современных исследованиях различные методы измерений имеют свои преимущества и недостатки, поэтому комбинированное использование нескольких методов подходит для решения более широкого класса задач.

Таблица. Обзор методов определения остаточных напряжений (ОН) и рекомендации по их применению в лабораторных и производственных условиях

Методика	Глубина измерения	Преимущества	Недостатки	Область/ объект применения
Метод сегментирования и расщепления	По толщине образца	Простота и низкая трудоемкость исследований; возможность исследования образцов из различных металлов и сплавов; отсутствие необходимости наличия сложного оборудования. Быстрый оценочный тест для контроля качества при производстве изделий	Применение метода возможно только при однородном распределении напряжений по толщине образца; подходит только для приблизительной оценки ОН из-за большой погрешности; ограничение при оценке неоднородных деформаций	Образцы или изделия простой геометрической формы из углеродистых сталей, для стальных, алюминиевых и нержавеющей профилей; сварные подкрепленные алюминиевые конструкции, в том числе с отверстиями в центральной части; применяется для контроля ОН в тонкостенных трубках насосно-компрессорных установок
Метод сверления отверстий	До 2 мм	Высокая точность измерений; оценка однородных и неоднородных ОН; измерение двухосного распределения ОН; минимальный уровень повреждений в сравнении с	Определение только поверхностных ОН; погрешность тензометрического датчика влияет на точность измерения; вызывает образование ОН, обусловленных механической обработкой; отсутствие возможности учета пространственного распределения	Толстые стыковые соединения алюминиевых деталей и сварных швов; сплавы для изготовления материалов самолетных авиационных двигателей; сварные листы из различных материалов; нержавеющие и аустенитные стали

Методика	Глубина измерения	Преимущества	Недостатки	Область/ объект применения
		другими методами	ОН	
Метод сверления «глубоких» отверстий	До 750 мм	Возможность измерения двухосного распределение ОН на большой глубине	Может использоваться для образцов (деталей) толщиной более 6 мм; высокие требования к соосности осей отверстий	Стальные, алюминиевые образцы, детали из ламинированных композитных материалов
Метод кольцевого сердечника	До 6 мм	Высокая точность измерений; оценка однородных и неоднородных ОН; измерение двухосного распределения ОН	Погрешность тензометрического датчика влияет на точность измерения; вызывает образование ОН, обусловленных механической обработкой; отсутствие возможности учета пространственного распределения ОН; процесс проточки обычно проводят с помощью электроэрозионной обработки, что накладывает ограничения на спектр исследуемых материалов	Детали и образцы всей группы изотропных материалов с известным модулем упругости при механической обработке; после сварки конструкций из стали; авиационные двигатели; паровые турбины и турбогенераторы; композитные материалы
Метод снятия слоев материала	По толщине образца	Измерение больших перепадов ОН по всей толщине изделия; высокая точность; оценка распределения ОН по всему объему образца; возможность определения всех трех компонент ОН	Длительный процесс измерения; полное разрушение образца; погрешность измерения существенно зависит от качества удаления материала, а также точности определения толщины удаляемого слоя; не подходит для сварных деталей (образцов)	При исследовании ОН в металлических и неметаллических деталях и образцах
Метод пропилов (разреза)	По толщине образца	Измерение больших перепадов ОН по толщине изделия; простота реализации; высокая точность; относительно быстрый и простой в применении процесс	Определение только одноосных нормальных остаточных напряжений к поверхности реза; влияние погрешности тензометрического датчика на точность измерения; повышенная погрешность; затрудненная реализация метода на деталях сложной формы	При исследовании ОН в металлических и неметаллических деталях и образцах; применяют для контроля ОН в сварных швах
Контурный метод (метод профилирования)	Заготовка (образец) толщиной более 5 мм	Измерение больших перепадов ОН по толщине изделия; получение картины ОН, нормальных к поверхности разреза по всему сечению; возможность определения ОН в изделиях больших размеров	Определение только одноосных остаточных напряжений, нормальных к поверхности реза; повышенная погрешность при измерении поверхностных ОН; затрудненная реализация метода на деталях сложной формы; разрушение образца	Заготовки, образцы из металлических материалов; сварные швы; закаленные толстостенные пластины; холоднокатаные трубы; поковки из алюминиевых сплавов; заготовки, образцы больших габаритных размеров при наличии электроэрозионного станка
Рентгеноди фрактометрия	10–50 мкм в алюминиевых сплавах и сталях, до 100 мкм (сплавы из титана); в сочетании с электрополировкой и глубиной удаления от поверхности до 1–1,5 мм	Нет разрушения образца; измерение двухосного распределения ОН; высокая точность; измерение больших перепадов ОН; быстрота и простота в применении; возможность определения ОН в изделиях сложной формы	Может измерять только поверхностные ОН; метод применим только к поликристаллическим материалам; на точность измерений сильно влияют размер зерна и текстура материала образца	Образцы, детали из поликристаллических, композиционных, гетерогенных и мелкозернистых материалов; определения ОН в изделиях различной формы, в том числе с изогнутыми тонкопластичными и сферическими поверхностями; после сварки конструкций из различных сталей
Дифракция нейтронов	До 200 мм (в алюминиевых сплавах); До 25 мм (в сталях)	Нет разрушения образца; измерение трехосных ОН, включая градиенты напряжений; ОН большой величины измеряются с высокой точностью; возможность определения ОН в изделиях сложной формы	Измерения в специализированных лабораториях с дорогостоящим оборудованием, ограничения на размер и вес образца; только кристаллические материалы; на точность измерений сильно влияют размер зерна и текстура материала образца; не подходит для измерений поверхностных ОН	Для деталей из металлических и керамических материалов; образцы, детали из поликристаллических, композиционных, гетерогенных и мелкозернистых материалов; в сварных швах в образцах, детали из различных сталей
Синхротронное излучение	До 150 мм (в алюминиевых сплавах); До 50 мм (в сталях)	Нет разрушения образца; измерение трехосных ОН, включая градиенты напряжений; ОН большой величины измеряются с высокой точностью; возможность определения	Измерения в специализированных лабораториях с дорогостоящим оборудованием, ограничения на размер и вес образца; только кристаллические материалы; на точность измерений сильно влияют размер зерна и текстура	Для исследований ОН в заготовках и образцах из многофазных и композиционных материалов

Методика	Глубина измерения	Преимущества	Недостатки	Область/ объект применения
		ОН в изделиях сложной формы	материала образца; не подходит для измерений поверхностных ОН	
Ультразвуковой метод	До 150 мм	Нет разрушения образца; измерение трехосных ОН; использование портативных и недорогих приборов; применим к широкому спектру материалов; быстрота	Требуется измерение на эталонном образце без ОН для определения измерений абсолютных значений ОН; метод чувствителен к микроструктурным изменениям материала образца; не применим на деталях сложной геометрической формы	Для исследования остаточных напряжений в образцах, деталях из металлических материалов; плановый контроль ОН в крупногабаритных деталях
Метод рамановской спектроскопии	До 2 мкм	Нет разрушения образца; подходит для микроструктур	Точность измерения зависит от параметров применяемого оборудования и температуры окружающей среды; определение остаточных напряжений только на поверхности образца	Для определения ОН в заготовках и образцах из различных монокристаллических материалов
Метод наноиндентирования	До 1,5 мм	Простое и быстрое обнаружение остаточных напряжений	Определение только поверхностных ОН; низкие точность и чувствительность; большая трудоемкость из-за ориентации диагоналей индентора	Тонкопленочные материалы; ограничивается требованиями к параметрам шероховатости поверхности исследуемой детали
Метод магнитной памяти	По толщине образца	Высокая точность; не требует специальных намагничивающих устройств	Позволяет осуществлять только качественную оценку ОН	Для образцов, деталей из ферромагнитных материалов
Магнитоаннизотропный метод	По толщине образца	Высокая точность, возможность измерения двухосного распределения ОН	Перед проведением исследований необходимость намагничивание образца; необходимость калибровки прибора для каждой марки стали	Для образцов, деталей из ферромагнитных материалов
Метод магнитного шума Баркгаузена	От 0,03 до 0,2 мм	Быстрота; подходит для образцов с круглой геометрией (колец, подшипников, роликов и т. п.); нет требования прямого контакта	Необходимость намагничивания образца; не подходит для сварных деталей; зависит от магнитной проницаемости материала; зависит от микроструктуры материала	Для образцов, деталей из ферромагнитных материалов
Метод магнитомеханической акустической эмиссии	По толщине образца	Не требует специальных намагничивающих устройств	Только качественная оценка ОН в образце (детали); необходимость создания напряженного состояния объекта	Для образцов, деталей из ферромагнитных материалов

Заключение. Таким образом, наличие большого количества методов определения остаточных напряжений не всегда позволяет выбрать оптимальный, который обеспечит возможность исследований тех или иных образцов или деталей из различных материалов на наличие остаточных напряжений с требуемой точностью и минимальной трудоемкостью. В связи с этим определение наиболее подходящего метода определения остаточных напряжений для конкретного образца является актуальной задачей.

Литература

- Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Гос. науч.-техническое изд-во машиностроительной лит., 1963. 233 с.
- Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. № 35. P. 572-588.
- Jiang G.U.O., Haiyang F.U., Bo P.A.N., Renke K.A.N.G. Recent progress of residual stress measurement methods: A review // Chinese Jour. of Aer. 2021. V. 34, iss. 2. P. 54-78.
- Радченко В.П., Шишкин Д.М. Метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с надрезом полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования // Изв. Сарат. ун-та. Новая сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 478-492.
- Монахов А.Д., Яковлев Н.О., Автаев В.В., Котова Е.А. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). С. 95-104.
- Mahmoudi A.H., Hossain S., Truman C.E. A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique. 2009. Exp Mech 49. P. 595-604.
- Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В. Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после механической обработки методами сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений // iPolytech Journal. 2024. V. 28, № 1. P. 40-50.

8. Pisarev V., Eleonsky S., Odintsev I., Apalkov A. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments // Optics and Lasers in Engineering. 2018. V. 110. P. 437-456.
9. Замашчиков Ю.И., Промптов А.И., Ботвенко С.И., Каргапольцев С.К. Способ определения закалочных остаточных напряжений: авт. свид. № 1643928; опубл. 23.04.1991. 5 с.
10. Каргапольцев С.К., Мозалевская А.К. Способы определения термических остаточных напряжений в заготовках типа плит из алюминиевых сплавов // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 27-32.
11. Каргапольцев С.К., Гозбенко В.Е., Большаков Р.С. Метод оценки остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: материалы XVI Междунар. науч.-практической конф. (3-7 июля 2023 г.). Иркутск: ИрННТУ, 2023. С. 86-91.
12. Cheng W., Finie I. Residual stress measurement and the slitting method. USA: Springer Mechanical Engineering Series, 2006. 209 p.
13. Hauk Viktor. Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: evaluation, application, assessment. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997. 640 p.
14. Русаков А.А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 237 с.
15. Rustichelli Franco, Skrzypek Jacek J. Innovative technological materials. Structural properties by neutron scattering, Synchrotron radiation and modeling. London-New York: Springer, 2010. 280 p.
16. Zhang Z. Research on residual stress and machining distortion of aeronautic weak rigidity in aluminum structure. URL: file:///C:/Users/Dmitriy/Downloads/encyclopedia201812.0002.v1.pdf (дата обращения: 20.08.2024).
17. Tanala E., Bourse G., Fremiot M., De Belleval J.F. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods // NDT & E Int. 1995. 28 (2). P. 83-88.
18. Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Способ определения поверхностных остаточных напряжений: пат. № 2572670 РФ, МПК G01L1/06; заявл. 29.07.2014; опубл. 20.01.2016. 3 с.
19. Игнатъев А.Г. Метод измерения остаточных напряжений на основе упругопластического контактного взаимодействия // Вестн. ЧГАУ. 2007. Вып. 50. С. 51-59.
20. Дубов А.А. Исследование свойств металла с использованием эффекта магнитной памяти металла // Металловедение и термическая обработка металлов. 1997. № 9. С. 35-38.
21. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО «Тиссо», 2004. 424 с.
22. Жуков С.В., Жуков В.С. Устройство для измерения механических напряжений в металлических изделиях: пат. № 2079825 РФ, МПК G01L1/00; заявл. 30.09.1994; опубл. 20.05.1997.
23. Венгринович В.Л., Винтов Д.А., Прудников А.Н., Подугольников П.А., Рябцев В.Н. Особенности измерения напряжений в ферромагнетиках методом эффекта Баркгаузена // Контроль. Диагностика. 2017. № 8. С. 10-17.
24. Семашко Н.А., Шпорт В.И., Мар'ин Б.Л. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002. 239 с.
25. advanced surface plastic deformation // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. 2020. V. 20, вып. 4. P. 478-492.
26. Monahov A.D., Yakovlev N.O., Avtaev V.V., Kotova E.A. Destructive methods for determining residual stresses (review) // Trudy VIAM. 2021. № 9 (103). P. 95-104.
27. Mahmoudi A.H., Hossain S., Truman C.E. A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique. 2009. Exp Mech 49. P. 595-604.
28. Mahalov M.S., Krechetov A.A., Blyumenshtejn V.Yu., Gorbatenko V.V. Study of the distribution of residual stresses along the depth of the surface layer after mechanical treatment by drilling probe holes and digital image correlation methods // iPolytech Journal. 2024. V. 28, № 1. P. 40-50.
29. Pisarev V., Eleonsky S., Odintsev I., Apalkov A. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments // Optics and Lasers in Engineering. 2018. V. 110. P. 437-456.
30. Zamashchikov Yu.I., Promptov A.I., Botvenko S.I., Kargapol'cev S.K. Method for determining hardening residual stresses: avt. свид. № 1643928; opubl. 23.04.1991. 5 p.
31. Kargapol'cev S.K., Mozalevskaya A.K. Methods for Determining Thermal Residual Stresses in Aluminum Alloy Plate-Type Workpieces // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4 (60). P. 27-32.
32. Kargapol'cev S.K., Gozbenko V.E., Bol'shakov R.S. Method for Assessing Residual Stresses in Aluminum Alloy Workpieces // Sovremennye aviacionnye tekhnologii. International Conference on Aviation Engineering: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (3-7 iyulya 2023 g.). Irkutsk: IrNITU, 2023. P. 86-91.
33. Cheng W., Finie I. Residual stress measurement and the slitting method. USA: Springer Mechanical Engineering Series, 2006. 209 p.
34. Hauk Viktor. Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: evaluation, application, assessment. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997. 640 p.
35. Rusakov A.A. Radiography of metals. M.: Atomizdat, 1977. 237 p.
36. Rustichelli Franco, Skrzypek Jacek J. Innovative technological materials. Structural properties by neutron scattering, Synchrotron radiation and modeling. London-New York: Springer, 2010. 280 p.
37. Zhang Z. Research on residual stress and machining distortion of aeronautic weak rigidity in aluminum structure. URL: file:///C:/Users/Dmitriy/Downloads/encyclopedia201812.0002.v1.pdf (data obrashcheniya: 20.08.2024).
38. Tanala E., Bourse G., Fremiot M., De Belleval J.F. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods // NDT & E Int. 1995. 28 (2). P. 83-88.
39. Ignat'ev A.G., Tretyakov A.A. Method for determining surface residual stresses: pat. № 2572670 RF, MPK G01L1/06; yayavl. 29.07.2014; opubl. 20.01.2016. 3 p.
40. Ignat'ev A.G. Method for measuring residual stresses based on elastic-plastic contact interaction // Vestnik Chuvash State Agrarian University. 2007. Vyp. 50. P. 51-59.
41. Dubov A.A. Study of metal properties using the effect of metal magnetic memory // Metal Science and Heat Treatment. 1997. № 9. P. 35-38.
42. Vlasov V.T., Dubov A.A. Physical foundations of the metal magnetic memory method. M.: ZAO «Tisso», 2004. 424 p.
43. Zhukov S.V., Zhukov V.S. Device for measuring mechanical stresses in metal products: pat. № 2079825 RF, MPK G01L1/00; yayavl. 30.09.1994; opubl. 20.05.1997.
44. Vengrinovich V.L., Vintov D.A., Prudnikov A.N., Podugol'nikov P.A., Ryabcev V.N. Features of measuring stresses in ferromagnets by the Barkhausen effect method // Kontrol. Diagnostika (Testing. Diagnostics). 2017. № 8. P. 10-17.
45. Semashko N.A., Shport V.I., Mar'in B.L. Acoustic emission in experimental materials science. M.: Mashinostroenie, 2002. 239 p.

References

1. Birger I.A. Residual stresses. M.: Gos. nauch.-tekhnicheskoe izdvo mashinostroitel'noj lit., 1963. 233 p.
2. Rossini N.S., Dassisi M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. № 35. P. 572-588.
3. Jiang G.U.O., Haiyang F.U., Bo P.A.N., Renke K.A.N.G. Recent progress of residual stress measurement methods: A review // Chinese Jour. of Aer. 2021. V. 34, iss. 2. P. 54-78.
4. Radchenko V.P., Shishkin D.M. Method for reconstructing residual stresses in a prismatic specimen with a semicircular notch af-