

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.386.12; 539.16.04
DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9

О НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ ИЗ СТАЛИ 03Н17К10В10МТ*

А. Л. Углов, доктор технических наук, Научно-исследовательский центр контроля и диагностики, Нижний Новгород, Россия

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. Л. Бычков, Научно-исследовательский машиностроительный институт имени В. В. Бахирева, Москва, Россия

М. О. Кувшинов, аспирант, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

Известно, что остаточные напряжения имеют важное значение в обеспечении работоспособности материалов. При отрицательных температурах они приводят к снижению надежности конструкций. Природа появления остаточных напряжений различная. В частности в процессе изготовления осесимметричных деталей из мартенситно-старяющей стали 03Н17К10В10МТ возникают значительные остаточные напряжения, которые часто приводят к появлению трещин и разрушению деталей, особенно в тех элементах изделий, где имеются концентраторы напряжений. Анализ литературных данных, результаты расчетов с использованием методов решения осесимметричной задачи теории упругости для остаточных напряжений в трубах показывают, что максимальные по абсолютной величине растягивающие осевые и тангенциальные напряжения сосредоточены вблизи наружной поверхности.

В ряде производственных случаев требуется получение оперативной информации о величине остаточных напряжений, возникающих как в процессе производства этих изделий, так и при их эксплуатации, особенно при отрицательных температурах. На основании этих расчетов, а также анализа имеющихся разрушений был выбран метод контроля остаточных напряжений с использованием поверхностных акустических волн Рэлея.

В предлагаемой методике контроля остаточных напряжений были использованы преобразователи с фиксированной базой между излучающим и приемным датчиками. Постоянная база в качестве измеряемого параметра позволяет использовать время распространения упругих волн. Предложен алгоритм расчета остаточных напряжений, в основе которого лежат уравнения акустоупругости для поверхностных волн. В качестве аппаратных средств измерений использовался ИВК «АСТРОН». На базе этой установки и предложенного алгоритма разработана методика определения остаточных напряжений в деталях сложной осесимметричной формы.

Результаты акустических измерений были подтверждены данными, полученными на установке рентгеноструктурного анализа «ДРОН-2». Тем самым была показана возможность практического применения предложенной методики контроля с использованием поверхностных волн. Также показано, что для уменьшения ошибки измерения необходимо проводить как минимум 8 измерений в одной точке.

Ключевые слова: остаточные напряжения, упругие волны, сталь, поверхностные волны.

Введение
Наилучшим сочетанием прочности, пластичности и сопротивления хрупкому разрушению в настоящее время обладают мартенситно-старяющие стали. Среди них

одними из наиболее высоких прочностных и пластических характеристик обладает высоколегированная мартенситно-старяющая коррозионно-стойкая жаропрочная сталь ЭП836 марки 03Н17К10В10МТ, предназначенная для изго-

© Углов А. Л., Хлыбов А. А., Бычков А. Л., Кувшинов М. О., 2019

* Исследование выполнено по гранту РФФИ №19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

товления трубных заготовок, бесшовных труб, деталей специальной техники, оборудования и деталей нефтегазовой, химической и аэрокосмической отраслей.

Высокая пластичность позволяет успешно использовать сталь 03Н17К10В10МТ при изготовлении различных деталей методомковки.

В настоящее время к числу наиболее перспективных методовковки относится метод обжатия пластическим деформированием на радиально-обжимных машинах (РОМ), обеспечивающий высокую точность изготовления деталей, высокую производительность процесса и малые потери металла.

Особенностью процессаковки на радиально-обжимных машинах является нестационарность, характеризующаяся переменными во времени значениями напряжений и деформаций в объеме обрабатываемых заготовок. Причина появления переменных параметров очагов деформации – сложное движение рабочих бойков машины, особенно в случаях деталей сложной формы (например, осесимметричных деталей переменного сечения).

Пространственная неоднородность пластической деформации с неизбежностью вызывает появление значительных остаточных напряжений, неблагоприятное сочетание которых часто приводит к появлению трещин и разрушению деталей в случаях, если не приняты соответствующие меры по снижению опасных остаточных напряжений на завершающей стадии технологического цикла.

Таким образом, возникает проблема оценки остаточных напряжений в процессе изготовления деталей сложной осесимметричной формы методомковки.

Цель исследования – разработка алгоритма и инженерной методики определения остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали ЭП836 на базе акустического неразрушающего метода контроля с использованием поверхностных акустических волн Рэлея.

Методика эксперимента

Исследования проводились на образцах из стали 03Н17К10В10МТ. Химический анализ стали ЭП836 выполнялся на оптическом эмиссионном спектрометре SPECTROMAX. Содержание основных химических элементов, %: Fe – основа, С – 0,01, Ni – 16,90, Mo – 1,20, W – 1,15, Co – 9,90, Ti – 0,75. Прутки из стали ЭП836 по ТУ14-1-4862–90 режут на заготовки, просверливают сквозное отверстие, далее на РОМ делают заготовки под деталь в форме толстостенных полых цилиндров с наружной резьбой (рис. 1).

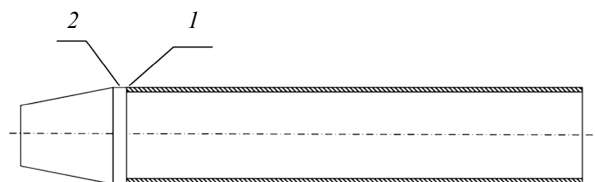


Рис. 1. Эскиз исследуемой детали: 1 – зоны появления трещин; 2 – зоны акустических измерений

Fig. 1. Sketch of the investigated part:

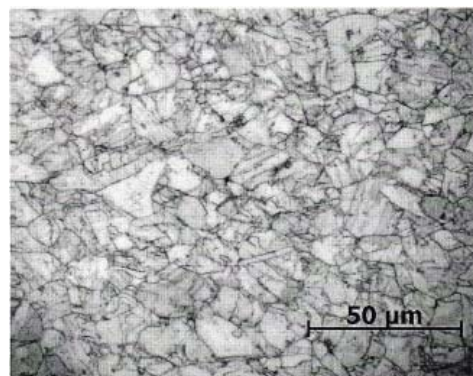
1 - zones of cracking; 2 - zones of acoustic measurements

После этого проводят старение в электропечи при температуре 475 °С.

Фотографии типичной микроструктуры образцов, вырезанных в продольном направлении, показаны на рис. 2.



a



b

Рис. 2. Фотографии микроструктуры: a – $\times 200$; b – $\times 500$

Fig. 2. Photos of the microstructure: a - $200\times$; b - $500\times$

Микроструктура образцов состоит из зерен мартенсита, величина действительного зерна соответствует 8–9 баллам по ГОСТ 5639–82 и удовлетворяет требованиям ТУ на сталь.

Качественный контроль на наличие опасных остаточных напряжений проводился методом испытаний на кислотную пробу путем погруже-

ния готовой детали в 20%-й водный раствор серной кислоты по ГОСТ 2184–2013. Детали выдерживались в течение 24 часов при температуре 15...25 °С.

После выдержки в кислоте обнаружены кольцевые трещины в начале наружной резьбы (в зонах I на рис. 1), идущие от канавок резьбы вглубь металла под прямым углом к поверхности.

Трещины не выходят на внутреннюю поверхность и имеют извилистый характер, малую ширину, мелкие ответвления, свидетельствующие о том, что они являются трещинами напряжения.

Таким образом, можно предположить, что в материале деталей действуют остаточные осевые растягивающие поверхностные напряжения. Известно [1, 2], что поверхностные растягивающие напряжения оказывают значительное влияние на прочностные характеристики, поскольку именно в поверхностных слоях сосредотачиваются микродефекты и технологические концентраторы напряжений, которые обычно являются очагами разрушения практически при всех видах нагружения.

Для определения поля остаточных напряжений в стенке трубы после завершения цикла ее обработки можно воспользоваться решением осесимметричной задачи теории упругости для остаточных напряжений в трубах.

Соответствующие формулы расчета радиальных σ_{rr} , тангенциальных $\sigma_{\varphi\varphi}$ и осевых σ_{zz} остаточных напряжений имеют вид [3]:

$$\sigma_{rr} = -\alpha_0 (R_1 - r)(r - R_2); \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \alpha_0 [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]; \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \alpha_0 v [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)], \quad (3)$$

где R_1 и R_2 – соответственно, внутренний и наружный радиусы сечения осесимметричной детали в расчетной области; v – коэффициент Пуассона материала детали.

Параметр α_0 зависит от технологических особенностей изготовления детали, и рассчитать его в случае сложной технологии изготовления детали достаточно сложно даже с использованием современных численных методов.

Поскольку результаты металлографических исследований показывают, что осевые напряжения на поверхности детали растягивающие, то величина α_0 – положительная.

Величины остаточных напряжений, приведенных к максимальному значению тангенциального напряжения, выражаются формулами:

$$\sigma'_{rr} = -\frac{(R_1 - r)(r - R_2)}{R_2(R_2 - R_1)}; \quad (4)$$

$$\sigma'_{\varphi\varphi} = \frac{(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)}{R_2(R_2 - R_1)}; \quad (5)$$

$$\sigma'_{zz} = \frac{v[2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_2(R_2 - R_1)}. \quad (6)$$

На рис. 3 показаны эпюры приведенных остаточных напряжений для сечений.

Из анализа формул (1)–(3) следует, что максимальные по абсолютной величине растягивающие осевые и тангенциальные напряжения сосредоточены вблизи наружной поверхности.

Этим объясняется выбор варианта акустоупругого метода контроля действующих напряжений с использованием поверхностных акустических волн Рэлея (ПАВР), для которых соотношения акустоупругости аналогичны соответствующим соотношениям для объемных волн и информативность которых в задачах контроля поверхностных напряжений надежно установлена, а применение дает достаточно хорошие результаты [4–7].

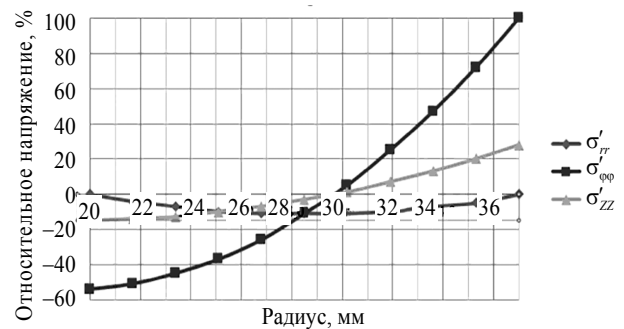


Рис. 3. Эпюры приведенных остаточных напряжений для зоны 2

Fig. 3. Plots of reduced residual stresses for zone 2

Рис. 3 показывает, что радиальными напряжениями вблизи поверхности детали можно пренебречь и считать напряженное состояние здесь плоским. Таким образом, акустоупругие соотношения для ПАВР на поверхности детали в соответствии с [8] могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{\Delta V_{\varphi\varphi}}{V_{\varphi\varphi}(0)} = A_1 \sigma_{\varphi\varphi} + A_2 \sigma_{zz}; \quad (7)$$

$$\frac{\Delta V_{zz}}{V_{zz}(0)} = A_1 \sigma_{zz} + A_2 \sigma_{\varphi\varphi}, \quad (8)$$

где $V_{\text{фф}}(0)$, $V_{\text{zz}}(0)$ – скорости ПАВР, распространяющиеся по поверхности детали при отсутствии остаточных напряжений в тангенциальном и осевом направлениях соответственно; $\Delta V_{\text{фф}}$, ΔV_{zz} – соответствующие приращения скоростей вследствие появления остаточных напряжений; A_1 и A_2 – акустоупругие коэффициенты скорости распространения.

Обычно при использовании поверхностных волн база прозвучивания остается фиксированной. Поэтому в качестве измеряемого параметра удобнее использовать время распространения упругих волн, которое в данном случае связано с относительными изменениями скоростей соотношениями

$$\frac{\Delta t_{\text{фф}}}{t_{\text{фф}}(0)} = -\frac{\Delta V_{\text{фф}}}{V_{\text{фф}}(0)}; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta t_{\text{zz}}}{t_{\text{zz}}(0)} = -\frac{\Delta V_{\text{zz}}}{V_{\text{zz}}(0)}. \quad (10)$$

Соответственно, связь между временем распространения (задержек импульсов) упругих волн и напряжениями в материале детали запишется в следующем виде:

$$\frac{\Delta t_{\text{фф}}}{t_{\text{фф}}(0)} = B_1 \sigma_{\text{фф}} + B_3 \sigma_{\text{zz}}; \quad (11)$$

$$\frac{\Delta t_{\text{zz}}}{t_{\text{zz}}(0)} = B_1 \sigma_{\text{zz}} + B_3 \sigma_{\text{фф}}, \quad (12)$$

где акустоупругие коэффициенты времени распространения B_1 , B_2 связаны с коэффициентами A_1 и A_2 очевидными соотношениями $B_1 = -A_1$; $B_2 = -A_2$.

Технически проще и точнее могут быть измерены задержки импульсов ПАВР, распространяющихся в тангенциальном направлении. С учетом этого, а также следующего из формул (2), (3) соотношения между значениями σ_{zz} и $\sigma_{\text{фф}}$ для поверхностного слоя $\sigma_{\text{zz}} = v \sigma_{\text{фф}}$ формулу для определения растягивающего осевого напряжения, способствующего появлению трещин, можно записать следующим образом:

$$\sigma_{\text{zz}} = k \frac{\Delta t_{\text{фф}}}{t_{\text{фф}}(0)}, \quad (13)$$

где $k = \frac{1}{\frac{B_1}{v} + B_2}$.

Приблизительное значение коэффициента k , исходя из данных по акустоупругим коэффициентам стали, близкой к исследуемой, в соответствии с данными [9–11] равно 0,2 ТПа.

Для измерения остаточных напряжений в поверхностном слое контролируемых деталей разработаны специальные преобразователи поверхностных волн, в конструкции которых использован излучатель – приемник опорных импульсов, аналогичный подобному преобразователю, описанному в [12].

Вид преобразователя представлен на рис. 4.

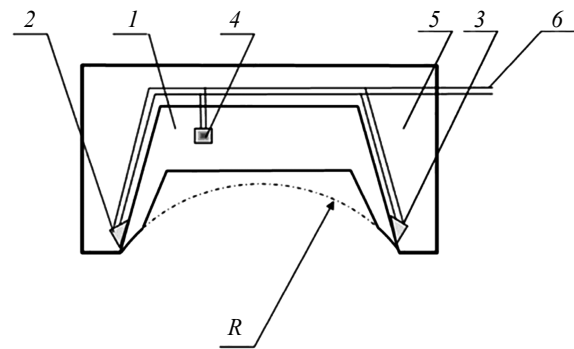


Рис. 4. Конструкция преобразователя ПАВР: 1 – двусторонний клин из оргстекла; 2 – излучатель рэлеевских волн; 3 – приемник рэлеевских волн; 4 – излучатель – приемник опорных импульсов; 5 – корпус; 6 – высокочастотный кабель; R – радиус кривизны детали в зоне контроля

Fig. 4. Design of the SAW converter: 1 - double-sided wedge from plexiglass; 2 - emitter of Rayleigh waves; 3 - receiver of Rayleigh waves; 4 - emitter - receiver of reference pulses; 5 - case; 6 - high-frequency cable; R is the radius of curvature of the part in the zone control

Излучатель – приемник опорных импульсов 4 представляет собой механически задемпфированную пьезопластину из пьезокерамики ЦТС-19, приклеенную к корпусу преобразователя ПАВР, работающую в режиме излучения – приема продольных волн с той же частотой (5 МГц), что и излучатель и приемник ПАВР 2 и 3. Излучатель-приемник 4 возбуждается электрическими импульсами синхронно с излучателем ПАВР 2.

Типичная осциллограмма сигналов приведена на рис. 5.

Опорный импульс позволяет заметно уменьшить случайную погрешность определения задержки импульса ПАВР. Использование при этом задержки t , показанной на рис. 5, вместо $t_{\text{фф}}$, фигурирующей в расчетной формуле (13), приводит лишь к систематической погрешности, которая была учтена, поскольку известна акустическая длина пути опорного импульса, равная двойной толщине корпуса преобразова-

теля в зоне установки дополнительного датчика 4 (рис. 4).

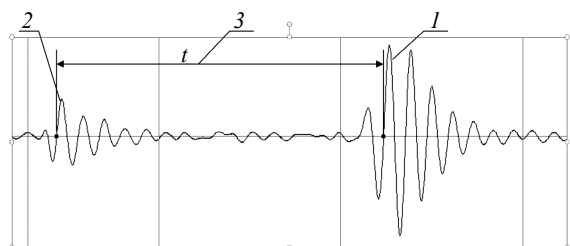


Рис. 5. Типичная осциллограмма: 1 – импульс ПАВР; 2 – опорный импульс; 3 – задержка импульса ПАВР относительно опорного импульса

Fig. 5. Typical oscillogram: 1 - SAWR impulse; 2 - reference pulse; 3 - delay pulse SAWR relative to the reference pulse

Для измерения временных задержек использовался один из наиболее надежных методов измерения задержек радиоимпульсов – метод перехода через нуль (*zero-crossing method*).

В качестве аппаратно-программных средств измерений использовался ИВК «АСТРОН» (в Государственном реестре средств измерений № 67552-17), обеспечивающий возможность измерения задержек акустических импульсов с погрешностью не более ± 2 нс.

Для измерений была изготовлена специальная установка, позволяющая осуществлять дискретный поворот детали на угол, кратный 45° вокруг оси при неподвижном преобразователе.

Результаты измерений задержки $t_{\text{фр}}$ усреднялись после полного оборота детали.

На рис. 6 приведены результаты оценки погрешности измерений задержки в результате многократных оборотов детали.

В качестве характеристики погрешности измерений использовалась величина доверительного интервала $t_\alpha \Delta S_{t_{\text{фр}}}$.

Коэффициент Стьюдента t_α соответствовал доверительной вероятности α , равной 0,95; $\Delta S_{t_{\text{фр}}}$ – средняя квадратическая погрешность результата серии N измерений, равная

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_{\text{фр}} - \bar{t}_{\text{фр}})^2}{N(N-1)}} \quad (\bar{t}_{\text{фр}} - \text{среднее по } N \text{ измерениям значение задержки}).$$

Полученные данные показывают, что после превышения 8...10 оборотов величины дальнейшего уменьшения доверительного интервала задержки рэлеевского импульса не происходит. Это число оборотов было признано оптимальным.

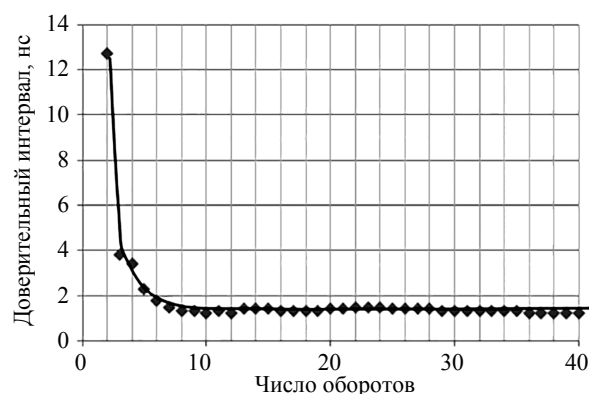


Рис. 6. Зависимость доверительного интервала от числа оборотов детали

Fig. 6. Dependence of the confidence interval on the speed of the part

Использование описанного метода акустоупругости предполагает измерение временных задержек для материала детали в двух состояниях – напряженном и ненапряженном. Для оценки работоспособности данной методики были изготовлены специальные эталонные образцы, остаточные напряжения в которых отсутствуют. При выполнении работы оценивали не абсолютные значения остаточных напряжений в материале детали σ_{ZZ} , а их приращения $\Delta\sigma_{ZZ}$ к напряжениям в эталонном образце. Результаты измерений для четырех деталей после их изготовления приведены в таблице.

Приращения остаточных напряжений для деталей после их изготовления
Increments in residual stresses for parts after their manufacture

| № детали | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| $\Delta\sigma_{ZZ}$, МПа | 250 | 280 | 210 | 190 |

Для проверки результатов, полученных по предложенной методике расчета остаточных напряжений, использовался рентгеновский дифрактометр типа «ДРОН-2». Использованный метод измерения дифракции рентгеновских лучей и анализа внутренних напряжений $\sin^2\psi$ является наиболее точным и базируется на измерении спектра отраженных лучей, связанном с изменением частоты колебаний и расстояния между узлами кристаллической решетки, т. е. с ее пластической деформацией. В результате рентгеновских измерений были получены величины приращений напряжений $\Delta\sigma_{ZZ}$, достаточно близкие к соответствующим значениям, приведенным в таблице.

Выводы

1. Проанализированы особенности формирования остаточных поверхностных напряжений в цилиндрической осесимметричной детали из мартенситно-старееющей стали ЭП836, изготовленной методомковки на радиально-обжимной машине.

2. Предложен расчетный алгоритм определения поверхностных напряжений, основанный на использовании соотношений акустоупругости для поверхностных акустических волн Рэлея.

3. Разработана инженерная методика определения поверхностных остаточных напряжений с использованием ИВК «АСТРОН» и оригинальных пьезопреобразователей.

4. Сравнение результатов измерений остаточных напряжений акустическим и рентгеновским методами показало хорошую сходимость и возможность практического использования предложенной методики

Библиографические ссылки

1. Каратушин С. И., Спиридонов Д. В., Плешанова Ю. А. Остаточные напряжения в цилиндрических изделиях // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 6. С. 53–56.

2. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Абабков Н. В. Разрушение и диагностика металлов : монография. М. : Инновационное машиностроение ; Кемерово : Сибирская издательская группа, 2016. 479 с.

3. Колмогоров Г. Л., Кузнецова Е. В., Тиунов В. В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий : монография. Пермь : Изд-во Перм. нац. иссл. политехн. ун-та, 2012. 226 с.

4. Оценка напряженно-деформированного состояния сварных соединений углеродистых сталей после различных режимов тепловложения акустическим методом / А. Н. Смирнов, В. А. Князьков, Н. В. Абабков [и др.] // *Дефектоскопия*. 2018. № 1. С. 40–46.

5. Khlybov A. A. [Effect of heat treatment on residual stresses in the zone of fusion of austenitic and vessel steels]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, pp. 426-430. DOI: 10.1007/s11041-016-0029-1.

6. Husson D. [Measurement of surface stresses using Rayleigh waves]. *IEE, Ultrasonic symposium* (San-Diego, USA, 1982), pp. 889-892.

7. Zhan Y. [Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress]. *Ultrasonics*, 2017, vol. 73, pp. 271-276.

8. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 4. : в 3 кн. Кн. 1. Акустическая тензометрия // В. А. Анисимов [и др.]. Изд. 2-е, перераб. М. : Машиностроение, 2006. 736 с.

9. Zeiger A., Jassby K. M. [Measurement of Acoustoelastic Coefficients of Rayleigh Waves in Steel Alloys]. *Journ. of Non-destruct. Evaluation*, 1982, vol. 2, no. 3, pp. 115-124.

10. Ducuenny M. [Theoretical determination or Rayleigh wave acoustoelastic coefficients: comparison with experimental values]. *Ultrasonics*, 2002, vol. 39, pp. 575-583.

11. Hafezi M. H., Kundu T. [Peri-ultrasound modeling for surface wave propagation]. *Ultrasonics*, 2018, vol. 84, pp. 162-171.

12. Об ультразвуковом контроле толщины плазменной наплавки из медно-никелевого сплава на стальную цилиндрическую поверхность / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, М. В. Колесников [и др.] // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2019. Т. 22, № 3. С. 3–10. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-3-10.

References

1. Karatushin S.I., Spiridonov D.V., Pleshanova Yu.A. [Residual stresses in cylindrical products]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 6, pp. 53-56 (in Russ.).

2. Smirnov A.N., Murav'ev V.V., Ababkov N.V. *Razrushenie i diagnostika metallov* [Destruction and diagnostics of metals]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroyeniye Publ.; Kemerovo, Sibirskaya izdatel'skaya gruppa Publ., 2016, 479 p. (in Russ.).

3. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i ikh vliyaniye na dolgovechnost' i nadezhnost' metalloizdelii* [Technological residual stresses and their influence on the durability and reliability of metal products]. Perm', Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet Publ., 2012, 226 p. (in Russ.).

4. Smirnov A.N., Knyaz'kov V.A., Ababkov N.V. [Assessment of the stress-strain state of welded joints of carbon steel after various modes of heat input by the acoustic method]. *Defektoskopiya*, 2018, no. 1, pp. 40-46 (in Russ.).

5. Khlybov A.A. [Effect of heat treatment on residual stresses in the zone of fusion of austenitic and vessel steels]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, pp. 426-430. DOI: 10.1007/s11041-016-0029-1.

6. Husson D. [Measurement of surface stresses using Rayleigh waves]. *IEE, Ultrasonic symposium* (San-Diego, USA, 1982), pp. 889-892.

7. Zhan Y. [Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress]. *Ultrasonics*, 2017, vol. 73, pp. 271-276.

8. Anisimov V.A. *Akusticheskaya tenzometriya* [Acoustic Strain Measurement]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006, 736 p. (in Russ.).

9. Zeiger A., Jassby K.M. [Measurement of Acoustoelastic Coefficients of Rayleigh Waves in Steel Alloys]. *Journ. of Non-destruct. Evaluation*, 1982, vol. 2, no. 3, pp. 115-124.

10. Ducuenny M. [Theoretical determination or Rayleigh wave acoustoelastic coefficients: comparison with experimental values]. *Ultrasonics*, 2002, vol. 39, pp. 575-583.

11. Hafezi M.H., Kundu T. [Peri-ultrasound modeling for surface wave propagation]. *Ultrasonics*, 2018, vol. 84, pp. 162-171.

12. Uglov A.L., Khlybov A.A., Kolesnikov M.V. [On ultrasonic control of the thickness of plasma surfacing of copper-nickel alloy on a steel cylindrical surface]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 3-10 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-3-10.

About Non-Destructive Control of Residual Stresses in Axisymmetric Parts Made of Steel 03Ni17Co10W10MoTi

A.L. Uglov, DSc in Engineering, Scientific Research Center of Control and Diagnostics, Nizhny Novgorod, Russia
A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.L. Bychkov, Mechanical Engineering Research Institute named after V.V. Bahirev, Moscow, Russia

M.O. Kuvshinov, Post-graduate, Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia.

It is known that residual stresses are important in ensuring the performance of materials. At negative temperatures, they lead to a decrease in the reliability of structures. The nature of the appearance of residual stresses is different. In particular, in the process of manufacturing axisymmetric parts of martensitic-aging steel 03Ni17Co10W10MoTi there are significant residual stresses, which often lead to cracks and destruction of parts, especially in those elements of products where there are stress concentrators. The analysis of the literature data and the results of calculations using the methods of solving the axisymmetric problem of the theory of elasticity for residual stresses in pipes, show that the maximum absolute tensile axial and tangential stresses are concentrated near the outer surface.

In a number of production cases, it is required to obtain the current information about the magnitude of residual stresses arising both in the manufacturing process of these products and during their operation, especially at negative temperatures. On the basis of these calculations, as well as after analyzing the existing failures, a method for monitoring residual stresses using surface acoustic Rayleigh waves was chosen. In the proposed method of residual voltage monitoring, converters with a fixed base between the emitting and receiving sensors were used.

The constant base as a measured parameter allows to use the time of propagation of elastic waves. An algorithm for calculating residual stresses based on the acoustoelasticity equations for surface waves is proposed. IVK "ASTRON" was used as the hardware measuring equipment. On the basis of this device and the proposed algorithm for calculating residual stresses, a method for determining residual stresses in parts of complex axisymmetric shape is developed.

The results of acoustic measurements were confirmed by the data obtained at the Dron-2 x-ray diffraction analysis unit. Thus, the possibility of practical use of the proposed method of control using surface waves was shown. It is also shown that in order to reduce the measurement error, it is necessary to carry out at least 8 measurements at one point.

Keywords: residual stresses, elastic waves, steel, surface waves.

Получено 15.10.2019

Образец цитирования

О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Ni17Co10W10MoTi / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, А. Л. Бычков, М. О. Кувшинов. 2019. Т. 22, № 4. С. 3-9. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9.

For Citation

Uglov A.L., Khlybov A.A., Bychkov A.L., Kuvshinov M.O. [About Non-Destructive Control of Residual Stresses in Axisymmetric Parts Made of Steel 03Ni17Co10W10MoTi]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 3-9 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9.