

В. А. БЫЧЕНОК

ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Экспериментально исследована возможность лазерно-ультразвуковой диагностики остаточных напряжений в тонкостенных элементах камер. Исследования проводились с использованием лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М и лазерных оптико-акустических преобразователей продольных и поверхностных волн Рэлея.

Ключевые слова: безотказность функционирования, остаточные напряжения, метод, лазерно-ультразвуковая диагностика, прецизионная точность, тонкостенные элементы.

Наличие остаточных напряжений в поверхностных слоях материала изделий существенным образом влияет на их усталостную прочность, безотказность и долговечность. Многолетний опыт производства и эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) показывает, что безотказность функционирования элементов РКТ, таких как камеры, топливные баки и агрегаты пневмогидравлических систем жидкостных ракетных двигательных установок, в значительной мере зависит от технологических остаточных напряжений, которые возникают в результате механических, термических и термомеханических воздействий на данные изделия. В процессе эксплуатации данных изделий суммарные напряжения (остаточные напряжения и напряжения, возникающие под действием эксплуатационных нагрузок) порой могут превысить допустимые значения и тем самым вызвать отказ изделия или его разрушение. На сегодняшний день определение остаточных напряжений осуществляется методами как разрушающего, так и неразрушающего контроля. Недостатки разрушающих методов контроля общеизвестны и не требуют дополнительных комментариев. Существующие методы неразрушающего контроля (НК), такие как рентгеновский, вихретоковый, тепловой, оптический, магнитный, электрический, ультразвуковой [1—6], имеют ряд ограничений, что не позволяет применять их при определении остаточных напряжений в изделиях из алюминиевых, никелевых и других сплавов, которые широко применяются при производстве элементов РКТ.

В рассматриваемом типе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в качестве компонентов топлива используются жидкий кислород и керосин, двигатель выполнен по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа и имеет следующие технические характеристики: удельный импульс тяги в пустоте 359 с, давление в камере сгорания 15,69 МПа, давление горючего на выходе из насоса от 36,3 до 47,1 МПа. Камера ЖРД конструктивно представляет собой двустенную оболочку, изготовленную из высоколегированных сталей. Внутренняя стенка камеры оребренная с шириной ребра 0,8 мм и высотой 1,5 мм при общей толщине стенки 2,1 мм, наружная стенка гладкая, толщиной 0,6 мм. Соединение внутренней и наружной стенок камеры выполняется по ребрам методом вакуумно-компрессионной пайки с использованием припоя на основе серебра. Кроме того, верхняя сопловая часть камеры ЖРД содержит подколлекторное кольцо, которое приваривается к ее наружной стенке, соединение верхнего и нижнего сопел камеры также производится с использованием сварки.

Все перечисленные методы НК не позволяют определить уровень остаточных напряжений, возникающих при изготовлении ЖРД, что требует поиска новых методов и средств НК.

На сегодня не существует универсального метода, дающего распределение трехосных остаточных напряжений по всему объему тела. Причиной этому, прежде всего, является относительно слабое влияние остаточных напряжений на изменение упругих и теплофизических свойств напряженной среды (плотности, теплопроводности, скорости звука, электропроводности, электрической и магнитной восприимчивости и т.д.).

Одна из основных сложностей данного метода заключается в том, что относительное изменение скорости звука, даже при напряжениях на пороге текучести, невелико, как правило, не выше нескольких процентов. При типичных напряжениях порядка 100 МПа относительное изменение скорости упругих волн лежит в диапазоне 10^{-3} — 10^{-4} . Поэтому требуется высокая точность измерения скорости звука [8, 9] в ограниченной области. Такой прецизионной точности можно достичь с использованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптоакустики [8]. При этом вопрос количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости звука является очень важным для данного метода, но не всегда очевидно разрешимым.

Основной целью настоящей работы являлось рассмотрение результатов проведенных автором совместно со специалистами Международного лазерного центра МГУ им. М. В. Ломоносова экспериментальных исследований, позволяющих оценить возможности применения метода лазерно-ультразвуковой диагностики для оценки остаточных напряжений в тонкостенных элементах камер ЖРД.

Экспериментальные исследования проводились с использованием лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М и лазерных оптико-акустических (ОА) преобразователей продольных и поверхностных волн Рэлея.

Использование продольных волн для диагностики остаточных напряжений. Лазерно-ультразвуковые исследования были проведены на образцах из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Параметры образцов представлены в таблице.

Образец	Размеры, мм	Ширина шва, мм
<i>A-1</i>	106,5×78×8,51	5
<i>A-2</i>	106,5×78×8,87	6
<i>A-3</i>	106,5×78×8,73	7
<i>C-1</i>	80×50×1,91	2
<i>C-2</i>	80×50×1,67	3
<i>C-3</i>	80×50×1,97	4

Измерения скорости продольных акустических волн проводились с помощью лазерного ОА-преобразователя. Измерялся интервал времени между зондирующим ОА-импульсом, возбуждаемым на лицевой поверхности образца, и одной из ревербераций этого импульса в образце. По измеренным значениям определялось относительное изменение скорости продольных волн в различных точках образцов.

Использование волн Рэлея для диагностики двuosных остаточных напряжений. Возбуждались поверхностные волны Рэлея для времяпролетных измерений и вычисления вариации скоростей этих волн с целью восстановления распределения двuosных напряжений $\sigma_{11}(x_1, x_2)$ и $\sigma_{22}(x_1, x_2)$ в плоскости исследуемых объектов.

В ходе эксперимента измерялись значения скорости V_1 и V_2 . Возбуждаемый акустический импульс распространяется вдоль (ось x_1 , рис. 1, *a*) и поперек (ось x_2 , рис. 1, *b*) шва и регистрируется клиновидным пьезоэлектрическим приемником. Для высокого пространственного разрешения измерений, особенно для измерения скорости V_2 (из-за сильного градиента напряжений поперек шва у его границы), нужно иметь соответствующую базу время-

пролетных измерений. Лазерный луч смещается по направлению распространения возбуждаемого сигнала на расстояние $\Delta x_1 = 500$ и $\Delta x_2 = 125$ мкм для V_1 и V_2 соответственно.

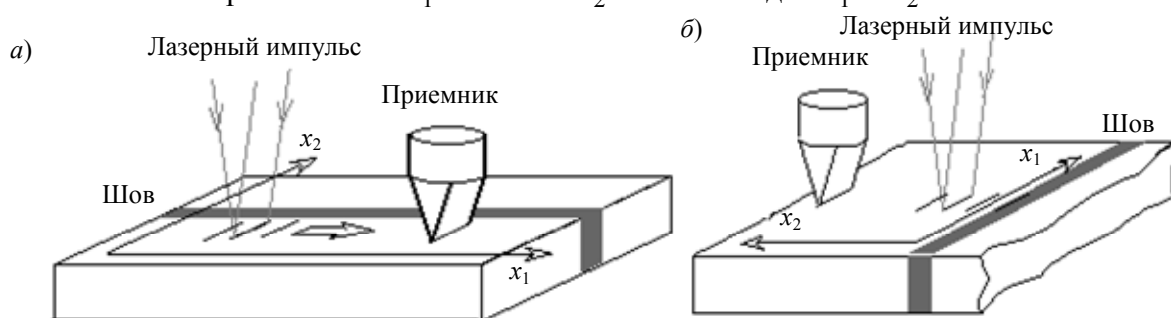


Рис. 1

При проведении исследований в образцах *A-1*, *A-2*, *A-3* измерялись относительные изменения скоростей, вызванные остаточными напряжениями, появившимися при сварке. На рис. 2 показана область измерений. Поскольку особый интерес представляет поле сильных градиентов остаточных напряжений, т.е. зона термического влияния шва $\Delta x_T \approx 6-8$ мм, исследовалась 15-миллиметровая зона около шва.

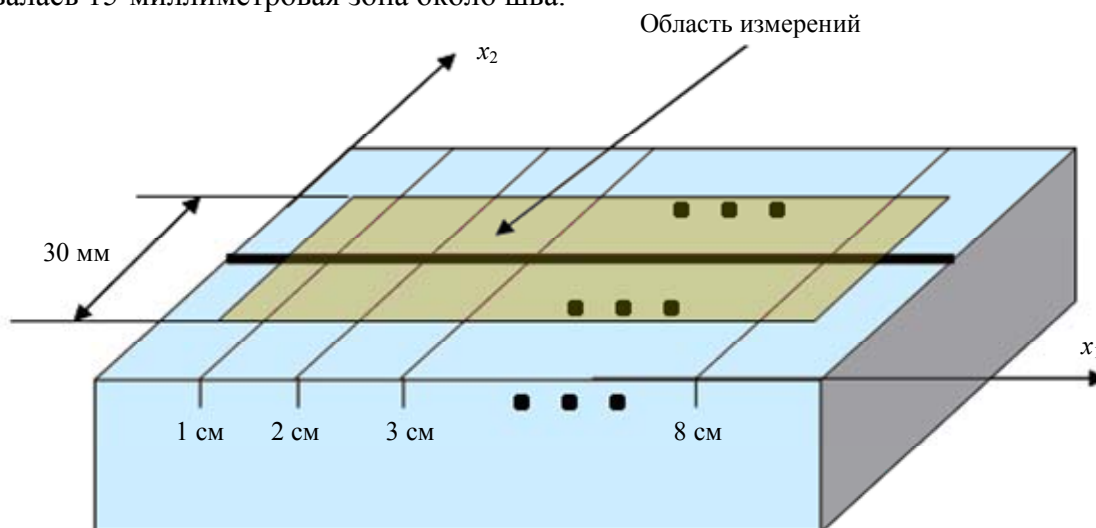


Рис. 2

Градиент напряжений вдоль шва практически отсутствует, поэтому сканирование по оси x_1 проводилось по линиям, разнесенным на 1 см. Вдоль x_1 скорость V_1 измерялась с шагом 1 мм. При измерении скорости V_2 вдоль x_2 шаг регистрации сигналов составлял 125 мкм, после чего при расчетах проводилось усреднение скорости по пяти точкам.

Для анализа зависимости скорости распространения поверхностной акустической волны (ПАВ) от присутствующих в среде остаточных напряжений используются фазовые скорости. Однако в проведенных ранее исследованиях [10] было показано, что групповая скорость чувствительна к напряжениям, как и фазовая. Однако технически процесс измерения групповой скорости более удобен. Поэтому в данном эксперименте измерялись именно групповые скорости V_1 и V_2 .

На рис. 3 представлены результаты измерения относительных изменений скоростей вдоль ($\Delta V_1/V_0$) и поперек ($\Delta V_2/V_0$) шва в образце *A-1*.

Видно, что около шва присутствует существенный градиент скоростей, соответствующий градиенту напряжений, а вдали от шва эпюры относительных изменений скорости плавно выходят на нулевое значение, соответствующее отсутствию напряжений. Максимальное изменение скорости V_1 у шва достигает значения 0,5 %, предсказываемого теорией, и соответствует

положительным значениям напряжений σ_{11} — напряжениям растяжения. Изменение скорости V_2 у шва имеет тот же уровень, что и для скорости V_1 , и соответствует отрицательным значениям напряжений σ_{22} — напряжениям сжатия.

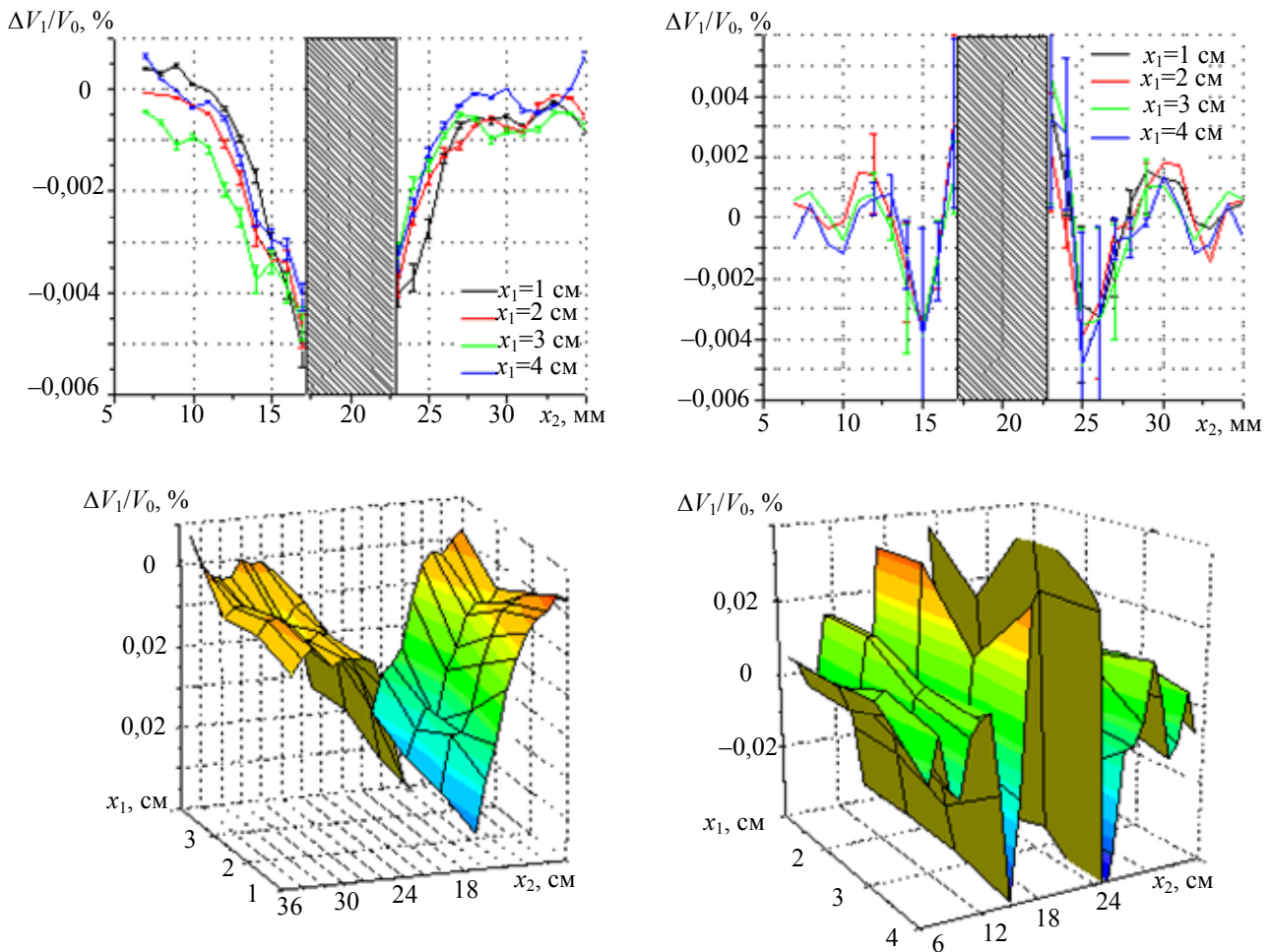


Рис. 3

Обсуждение результатов. Проведенные исследования с помощью лазерно-ультразвукового метода на продольных акустических волнах позволяют сделать следующие выводы.

Относительное изменение скорости продольных волн $\Delta V/V_0$ пропорционально сумме продольных и поперечных напряжений, определить их влияние или измерить анизотропию напряжений на продольных волнах невозможно. Кроме того, данный метод предполагает усреднение напряжений по глубине образца. Для диагностики остаточных напряжений в сварных швах последнее приближение оправдано. Однако использовать метод для диагностики, например, поверхностных упрочнений в металлах нельзя, необходимо анализировать временную форму рассеянного назад ультразвукового импульса.

Используя ОА-эффект, можно возбудить мощные широкополосные акустические сигналы наносекундной длительности. Как отмечалось выше, погрешность в определении скорости напрямую зависит от точности измерения интервала времени Δt между сигналами. С помощью данного метода величину Δt удастся измерить с точностью не менее 0,5 нс, что является наилучшим результатом для всех методов измерения скорости звука. При данной погрешности $\Delta V/V_0 = \frac{\Delta t}{2H} V_0 \cong 1,5 \cdot 10^{-4}$ для толщины образца $H = 10$ мм. Такая точность

вполне приемлема при диагностике образцов толщиной $H > 1,6$ мм. Для образцов серии А удалось восстановить распределение напряжений. Однако для самых тонких образцов (серия С) удается установить лишь тенденцию к изменению напряжений. Поэтому использование данного метода для более тонких образцов, по-видимому, бессмысленно.

При рассмотрении лазерного ультразвукового метода неразрушающей диагностики остаточных напряжений в металлах, использующего поверхностные волны Рэлея, измерены относительные изменения скорости ПАВ в трех образцах из нержавеющей стали, проваренных электронным пучком. Измеренные зависимости пересчитаны в распределения остаточных напряжений в образцах и построены соответствующие эпюры. Максимальное значение изменения скоростей составляет 0,5 %.

При обработке результатов измерений применялся корреляционный алгоритм расчета, позволяющий определять не только относительные изменения скоростей, но и их абсолютные значения. При этом пространственное разрешение данного метода при измерении V_1 составляет $\Delta x_1 = 5,5$ мм, а при измерении V_2 — $\Delta x_2 = 0,5$ мм.

Проведенные с помощью лазерно-ультразвукового метода исследования на поверхностных акустических волнах Рэлея показывают не только принципиальную возможность применения данного метода для диагностики остаточных напряжений, но и его высокую эффективность, возможно измерять не только требуемые для диагностики напряжений относительные изменения скоростей с очень высоким пространственным разрешением, но и абсолютные значения как фазовых, так и групповых скоростей.

Полученные результаты экспериментов позволяют сделать вывод о возможности применения для оценки остаточных напряжений тонкостенных элементов изделий РКТ лазерно-ультразвукового метода с использованием поверхностных волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1. Ф. Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2006. 560 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2. А. И. Евлампиев, Е. Д. Попов, С. Г. Сажин, Л. Д. Муравьева С. А. Добротин, А. В. Половинкин, Ю. А. Кондратьев. Контроль герметичности. Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 5. В. П. Вавилов. Тепловой контроль. К. В. Подмастерьев, Ф. Р. Соснин, С. Ф. Корндорф, Т. И. Ногачева, Е. В. Пахолкин, Л. А. Бондарева, В. Ф. Мужичкий. Электрический контроль. М.: Машиностроение, 2006. 679 с.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6. В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. В. Н. Филинов, А. А. Кеткович, М. В. Филинов. Оптический контроль. В. И. Матвеев. Радиоволновой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
5. Васильков С. Д. Применение неразрушающего резистивного электроконтактного метода контроля напряженного состояния металлов и сплавов после различных технологических воздействий // „Техника и технологии трибологических исследований“. Тез. докл. II Междунар. семинара. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2009. С. 45.
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
7. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
8. Ивочкин А. Ю., Карабутов А. А., Лямшев М. Л., Пеливанов И. М., Рохатги У., Субудхи М. Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим методом // Акустич. журн. 2007. Т. 53, № 4. С. 1—8.
9. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 151 с.

10. Karabutov A., Devichensky A., Ivochkin A., Lyamshev M., Pelivanov I., Rohadgi U., Solomatin V., Subudhi M. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress // Ultrasonics. 2008. Vol. 48. P. 631—635.
11. Pao Y.-H., Sachse W., Fukuoka H. Acoustoelasticity and ultrasonic measurements of residual stresses // Physical acoustics. 1984. Vol. 17. P. 61—143.

Сведения об авторе

Владимир Анатольевич Быченко — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.