

УДК 534.212

ДИАГНОСТИКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

© 2009 г. А. Ю. Девиченский, А. М. Ломоносов, С. Е. Жаринов, В. Г. Михалевич, М. Л. Лямшев, Т. О. Иванова*, Н. С. Меркулова*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

119991 Москва, ул. Вавилова 38

**ФГУП ММП "Салют"*

105118 Москва, пр-кт Буденного 16

E-mail: devichensky@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 14.12.07 г.

Обсуждается метод диагностики двусосных остаточных напряжений в металлах с помощью коротких импульсов поверхностных акустических волн (ПАВ). Использовано лазерное термоупругое возбуждение импульсов ПАВ с длительностью порядка 30 нс и пьезоэлектрическая регистрация с помощью специально разработанного клиновидного приемника с высоким временным разрешением. В эксперименте измерены относительные вариации фазовых и групповых скоростей ПАВ, вызванные наличием сварного шва, в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Частотный диапазон измерений составлял 5–25 МГц, что соответствует глубинам проникновения ПАВ порядка 120–600 мкм. Измерения проводились в образцах из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с размерами по периметру 105 × 76 мм и толщиной $h = 8$ мм, проваренных вдоль оси электронным пучком. Ширина шва составляла 5–7 мм. После проведения измерений образцы были подвергнуты исследованию с помощью разрушающего метода, основанного на методике полного освобождения. Проведено сравнение результатов измерений с данными, полученными после разрушающих испытаний. Выполнен анализ возможностей исследованного метода и оценены погрешности измерений.

PACS: 43.35.Sx

Задача исследования остаточных напряжений в материалах имеет достаточно длинную историю и остается актуальной и в наши дни, поскольку знание величины и распределения остаточных напряжений в исследуемых образцах и конструкциях необходимо для оценки ресурса конструкций и контроля качества изделий. На данный момент существуют несколько принципиальных методик неразрушающей диагностики напряжений: метод магнитной памяти (ММП) [1], рентгеновский метод [2], нейтронный [3], различные ультразвуковые методы [4, 5, 6], а также методы, основанные на влиянии остаточных напряжений на теплофизические свойства среды [7]. Каждая из перечисленных методик имеет как свои преимущества, так и недостатки, и универсального метода пока не существует. В работе [8] была продемонстрирована возможность диагностики остаточных напряжений в стальных образцах, содержащих сварные соединения, с помощью возбуждаемых лазерным излучением импульсов [9] продольных акустических волн. Были экспериментально измерены эпюры относительных изменений скоростей продольных волн, которые могут быть пересчитаны в распределения суммы объемных двусосных

напряжений. Точность измерений и полученные результаты показывают принципиальную возможность диагностики остаточных напряжений в образцах с толщинами менее 1 см. Однако данный метод имеет несколько недостатков. Во-первых, необходимо иметь доступ к обеим поверхностям исследуемых образцов и измерять с большой точностью их толщину, что не всегда удобно сделать. Во-вторых, очень важно, чтобы была соблюдена строгая параллельность поверхностей образцов. Эти факты накладывают существенные ограничения на применение данного метода на практике.

Для исследования подповерхностных остаточных напряжений в металлах наиболее эффективными являются рентгеновский метод и метод, использующий поверхностные акустические волны Рэлея. Но рентгеновский метод работает на глубинах порядка 20 мкм, в то время, как метод на волнах Рэлея применим для значительно больших глубин.

В настоящей работе развивается метод диагностики двусосных остаточных напряжений в металлах с помощью коротких импульсов волн Рэлея, возбуждаемых импульсным лазерным излу-

чением. Основными задачами работы являются выяснение возможностей метода, ошибок измерений и сравнение с данными механических испытаний. Экспериментальные образцы изготовлены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, проваренные посередине электронным пучком. В результате исследуемые напряжения действуют вдоль главных осей x_1 и x_2 , где ось x_1 параллельна сварному шву, x_2 направлена перпендикулярно ему, а x_3 направлена вглубь образца.

Задача, связанная с распространением поверхностных акустических волн (ПАВ) в среде со статическими или остаточными напряжениями, сводится к решению уравнения движения в среде со статической деформацией [5] совместно со свободными граничными условиями на поверхности образца. Решение в виде ПАВ представляет собой суперпозицию парциальных волн, экспоненциально затухающих по глубине x_3 , которая удовлетворяет граничным условиям. В общем виде эта граничная задача не имеет аналитического решения и решается численно.

В данной работе мы предполагаем, что в среде отсутствуют сдвиговые напряжения $\sigma_{ij} = 0$; $i \neq j$. Кроме того, вблизи свободной поверхности отсутствует и нормальное продольное напряжение $\sigma_{33} = 0$, и на распространение ПАВ оказывают влияние только две продольные компоненты тензора напряжений σ_{11} и σ_{22} , направленные вдоль и поперек шва соответственно. В общем случае получаемая численно зависимость фазовой скорости от напряжений σ_{11} и σ_{22} нелинейна, однако, в достаточно широком диапазоне напряжений вплоть до предела текучести материала, ее можно линеаризовать и привести к виду

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \frac{1}{A^2 - B^2} \left(A \frac{V_1 - V_0}{V_0} - B \frac{V_2 - V_0}{V_0} \right) \\ \sigma_{22} = \frac{1}{A^2 - B^2} \left(A \frac{V_2 - V_0}{V_0} - B \frac{V_1 - V_0}{V_0} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь V_1, V_2 – скорости ПАВ в направлениях x_1, x_2 соответственно, V_0 – скорость ПАВ в ненапряженной среде, константы A и B – коэффициенты акустоупругости, зависящие от упругих модулей среды второго и третьего порядков, и ее плотности. Коэффициенты A и B могут быть найдены либо в результате калибровочных измерений, либо, численно в квадратичном приближении с помощью метода, описанного, например, в [5] или в [10].

Таким образом, задача определения двух компонент напряжения сводится к измерению двух компонент скоростей ПАВ, связанных с этими напряжениями, а также требует знания скорости V_0 для данного материала.

В эксперименте для возбуждения широкополосных ПАВ за счет термооптического эффекта [9] использовалось излучение импульсного YLF : Nd лазера на основной гармонике ($\lambda = 1.047$ мкм) с длительностью $\tau_L = 7$ нс и энергией импульса $E \approx 100$ мкДж. Лазерное излучение с помощью системы линз фокусируется в линию длиной $d_0 \approx 5$ мм и шириной $d_0 \approx 30$ мкм на поверхности образца, где при поглощении излучения возбуждаются широкополосные ПАВ. Параметры линии фокусировки выбраны таким образом, чтобы исключить дифракционные эффекты при распространении ПАВ. Частотный диапазон возбуждаемых импульсов лежал в диапазоне $\Delta f = 5-100$ МГц. Для регистрации акустических сигналов использовался специально разработанный клиновидный пьезоэлектрический приемник на основе пленке PVDF толщиной $l = 30$ мкм, работающий в диапазоне частот $\Delta f = 5-60$ МГц. Далее, регистрируемый сигнал передается сначала на осциллограф, а потом на компьютер, где и осуществляется его последующая обработка. Для перемещения приемника по вертикали, перемещения образца, а также перемещения фокусирующей системы используются шаговые двигатели с минимальным размером шага $\Delta = 1$ мкм. Шаговые двигатели управляются с компьютера через контроллер, подключенный к нему через порт RS232. Таким образом, данная система позволяет производить сканирование по двум координатам в плоскости исследуемого образца.

Для исследований были выбраны образцы из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с размерами по периметру 105×76 мм и толщиной $h = 8$ мм. Остаточные напряжения в них достигались в результате проплава электронным пучком. Ширина шва составляла 5–7 мм. После проплава модельного шва поверхности образцов были отшлифованы.

В эксперименте измерялись две компоненты скоростей ПАВ V_1 и V_2 . ПАВ возбуждаются лазерным импульсом вдоль требуемого направления. Скорость V_1 соответствует направлению распространения ПАВ вдоль сварного шва, а V_2 распространению ПАВ в поперечном направлении. Измерение V_1 происходит с шагом $\Delta x_1 = 500$ мкм. При измерении V_2 меняется расстояние источник-приемник с шагом $\Delta x_2 = 125$ мкм. По регистрируемому приемником импульсам можно рассчитывать либо фазовую скорость, либо групповую – по задержкам прихода сигналов с разных расстояний.

Все теоретические выкладки и полученные выражения (1), связывающие остаточные напряжения и относительные изменения скоростей, касаются именно фазовых скоростей. Однако в исследуемых стальных образцах существует тонкий упрочненный слой порядка $\Delta x_3 \approx 50$ мкм на по-

верхности, возникший в процессе обработки материала. Наличие тонкого неоднородного слоя у поверхности приводит к появлению линейной дисперсии фазовой скорости ПАВ, что и видно из графиков на рис. 1. Практически во всем рабочем диапазоне частот дисперсия имеет линейный характер. В таком случае нетрудно показать, что групповая скорость будет иметь тот же порядок чувствительности к напряжениям, что и фазовая. Технически процесс измерения групповой скорости более удобен. Поэтому в дальнейшем в работе измеряется именно групповая скорость, и ниже излагается алгоритм для расчета групповых скоростей V_1 и V_2 с помощью корреляционного метода.

Суть корреляционного метода заключается в следующем. Зарегистрированные сигналы передаются с осциллографа на компьютер в виде массивов $F_i^j, i = 1, \dots, 500; j$ – номер сигнала. Самый первый переданный на компьютер сигнал выбирается опорным $F_i^1 = R_i$. В опорном сигнале вырезается интересующий участок $i = k \dots k + N - 1$. После этого рассчитываются корреляции опорного сигнала R_i с каждым из остальных сигналов по формуле:

$$C_n^j = \frac{\sum_{i=k}^{k+N-1} R_i F_{i+k-n-1}^j}{\sqrt{\sum_{i=k}^{k+N-1} R_i^2 \sum_{i=k}^{k+N-1} F_{i+k-n-1}^j{}^2}}, \quad (2)$$

$n = 1, \dots, 2N; j = 1, \dots, 12,$

Максимум функции C_n^j определяет самое лучшее совпадение опорного сигнала с j -м сигналом, сдвинутым на величину $(n - N)\Delta t$, где Δt – является временем дискретизации (оцифровки) сигнала и в данном случае $\Delta t = 1$ нс. Определение максимума $n = n_{\max}$ функции C_n^j позволяет вычислить значение временной задержки прихода акустического сигнала $\Delta = (n_{\max} - N - 1)$.

В результате получаем зависимость задержки от положения источника $t = t(x_j)$. Распределение скорости по координате x_j вычисляется как обратное значение ее производной:

$$V_x^j(x_s^j) = \left(\frac{\partial}{\partial x_s^j} t(x_s^j) \right)^{-1}, \quad (3)$$

где $s = 1, 2$ – определяет направление измерения скорости.

Использование корреляционной функции для определения временной задержки значительно повышает точность измерений, однако, из-за дискретности реальной временной шкалы, точность

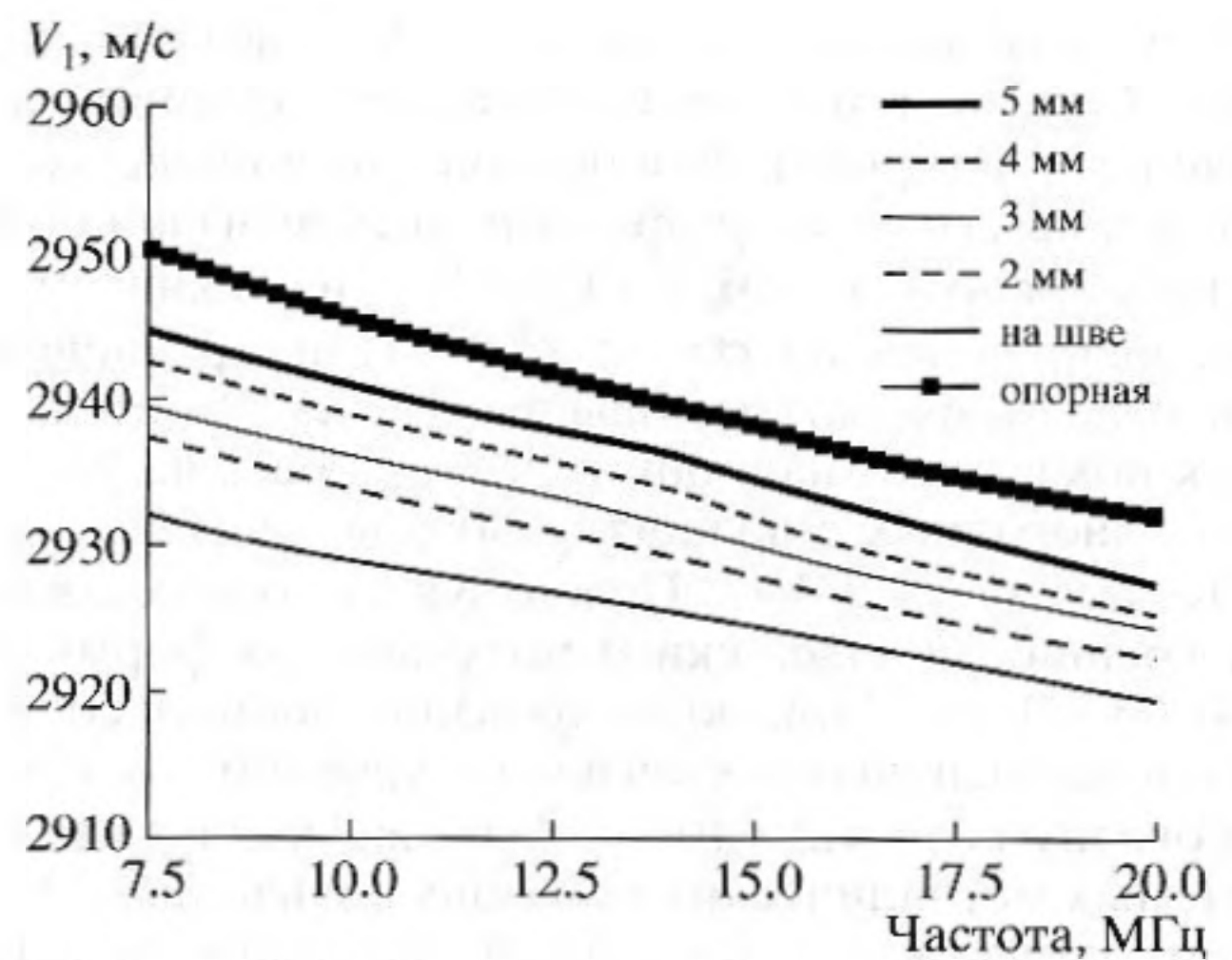


Рис. 1. Графики частотной дисперсии фазовой скорости V_1 на различных расстояниях от шва.

таких вычислений не может быть лучше времени дискретизации $\Delta t = 1$ нс. Чтобы вычислять положение максимума корреляционной функции C_n^j с лучшей точностью, а так же избежать возможных выбросов, в нее по 15-ти точкам вблизи предполагаемого максимума вписывается парабола. В таком случае максимум параболы и будет более точным значением максимума корреляционной функции, который, в свою очередь, определяет более точное значение θ задержки.

Для оценки среднеквадратичного отклонения величины задержки θ , определенной по изложенному корреляционному методу, можно получить следующее выражение:

$$\Delta\theta = 2\sqrt{3}\sigma \frac{B^2}{\tau} K^{-3/2}, \quad (4)$$

где B – полуширина автокорреляционной функции сигнала приемника ПАВ (или длительность импульса ПАВ), K – число точек C_n^j , используемых при ее аппроксимации параболой, в нашем случае $K = 15$, τ – период дискретизации, равный 1 нс. Сильная зависимость погрешности от длительности импульса B показывает важность максимального расширения частотного диапазона установки в целом. В нашем случае частота ограничена сверху сильным поглощением ПАВ в стали на частотах свыше 20 МГц.

Погрешность σ обусловлена двумя причинами. Во-первых, это наличие шумов в регистрируемом сигнале $F(t)$. Их влияние оценивается выражением:

$$\sigma^2 = \frac{2S^2(2+S^2)}{N} + \frac{1}{256^2}, \quad (5)$$

где S – отношение шум/сигнал, а N – число значений $F(t_i)$, по которым производится суммирование в (2). Второй член в правой части описывает погрешность 8-ми разрядной дискретизации. В данной работе $N = 50$, $S \approx 1.2 \times 10^{-2}$, и влияние шума оценивается как $\sigma \approx 3.5 \times 10^{-3}$. При усреднении сигнала разрядность повышается до 10 бит, но, как показывает наш опыт, погрешность на уровне одного-двух младших разрядов сохраняется, что дает $\sigma \approx 4 \times 10^{-3}$. Используя эту оценку, для погрешности задержки θ получаем по формуле (4) $\Delta\theta \approx 0.1$ нс. При моделировании процесса брались два одинаковых сигнала с уровнем гауссовского шума $S \approx 1.2 \times 10^{-2}$ – таким же, как и в измеряемых металлических образцах вблизи шва. Затем вычислялась временная задержка между ними по описанному выше алгоритму. В результате, за счет шумов, ошибка составила также $\Delta\theta \approx 0.1$ нс, что подтверждает расчетную оценку и является точностью определения временной задержки данным методом.

Известно, что в направлении вдоль сварного шва нет сильных градиентов остаточных напряжений, поэтому нет необходимости измерять скорость V_1 с достаточно высоким пространственным разрешением. В связи с этим, в дальнейшем для вычисления скорости в этом направлении делается аппроксимация на длине $\Delta l = 5.5$ мм зависимости $t = t(x_j)$ прямой. Таким образом, среднее значение скорости V_1 на этом интервале является котангенсом угла наклона этой прямой. Также согласно (1), для определения величин остаточных напряжений, необходимо вычисление относительного изменения скорости, то есть нужно знать опорную скорость в ненапряженном образце. Такой величиной может быть скорость, измеренная с помощью описанной выше процедуры, вдали от шва на краю образца.

Перед тем, как перейти непосредственно к определению скоростей и их вариаций в зависимости от присутствующих в образцах остаточных напряжений, определим точность их измерения в данной работе.

Удобством измерений относительных изменений скорости является возможность исключения систематических ошибок, связанных, например, с неравномерностью хода шагового двигателя. Поэтому основной вклад в неточность определения этой величины будут давать случайные ошибки.

В число случайных ошибок можно включить, прежде всего, точность определения временной задержки, расчет которой приведен выше. Также войдут люфт шагового двигателя, перемещающего оптическую систему, флуктуации температуры образца, за счет которой могут изменяться упругие свойства среды, и геометрическая нестабильность моды лазерного излучения на выходе из резонатора. Например, приведем оценки для

ошибки за счет неточности определения временной задержки. При измерении скорости V_1 идет усреднение по дистанции $\Delta x_1 = 5.5$ мм, что соответствует временной задержке между первым и последним сигналом $t = \Delta x_1 / V_{1cp} \approx 1.84$ мкс, тогда

$$\text{относительная ошибка составит } \delta\left(\frac{\Delta V_1}{V_0}\right) = \frac{\Delta t}{t} = \frac{0.1 \text{ нс}}{1.84 \text{ мкс}} \approx 5 \times 10^{-5} = 0.005\%.$$

Тем не менее, все вышеперечисленные ошибки войдут в суммарную статическую ошибку определения относительного измерения скорости, проведенного в одной точке для многих реализаций. Для вычисления данной статистической ошибки было проведено несколько серий измерений в одной точке. Положение приемника было фиксировано, а лазерный луч перемещался шаговым двигателем, проходя таким образом 12 положений, с которых регистрировались возбуждаемые акустические импульсы. После этого, как описано выше, значение скорости усреднялось по этим 12 реализациям. Полученное среднее значение и принималось за значение скорости для области с пространственным разрешением $\Delta x_1 = 5.5$ мм. В результате стандартное отклонение определения скорости в одной точке составила $\sigma_{V_1} \approx 0.6$ м/с, что соответствует относительной

$$\text{ошибке } \delta\left(\frac{\Delta V_1}{V_0}\right) = 0.02\%. \text{ Это значение в дальнейшем и принимается за точность измерения вариации скорости } V_1.$$

Для расчета ошибки измерения вариации скорости V_2 были проделаны аналогичные измерения. Разница состоит только в том, что в данном случае нет усреднения по всему треку смещения лазерного луча, а лишь по пяти точкам (пространственное разрешение составляет $\Delta x_2 = 4 \times 125 \text{ мкм} = 0.5$ мм). Усреднение по длине распространения и по количеству реализаций дает дисперсию шумов $\sigma_{V_2} = 4.5$ м/с, что составляет ошибку

$$\delta\left(\frac{\Delta V_2}{V_0}\right) = 0.15\% \text{ в определении относительного изменения скорости вдали от шва.}$$

Таким образом, можно сказать, что в данной работе скорость V_1 измеряется локально с пространственным разрешением $\Delta x_1 = 5.5$ мм с точностью

$$\delta\left(\frac{\Delta V_1}{V_0}\right) = 0.02\%, \text{ а } V_2 \text{ измеряется с пространственным разрешением } \Delta x_2 = 0.5 \text{ мм с точностью } \delta\left(\frac{\Delta V_2}{V_0}\right) = 0.15\%.$$

Поскольку особый интерес представляет область сильных остаточных напряжений в области

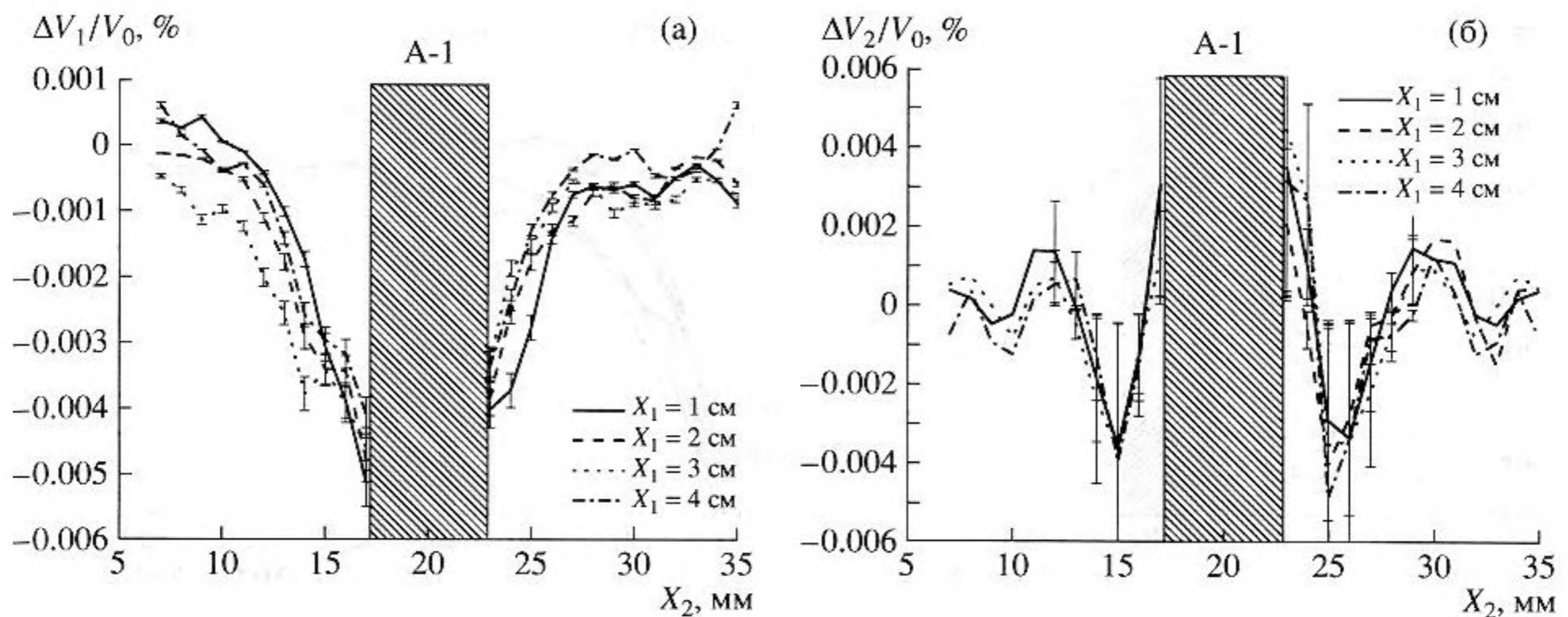


Рис. 2. Относительные изменения скорости ПАВ в образце: (а) – для скорости V_1 , (б) – для скорости V_2 .

термического шва, поэтому исследовалась 15 мм зона около шва, захватывающая интересующую область. На краях образца процесс сварки практически не оказывает влияния, поэтому эта область особого интереса не представляет, она может быть использована для измерения опорной скорости.

Остаточные напряжения слабо меняются вдоль шва, поэтому измерение обеих скоростей проводилось с шагом 1 см вдоль x_1 и 1 мм вдоль x_2 . При измерении скорости V_2 шаг сканирования составлял 125 мкм, а вычисление скорости проводилось по 5 точкам.

На рис. 2 представлены результаты измерения относительных изменений скоростей вдоль и поперек шва в одном из образцов. Максимальная вариация скорости V_1 у шва достигает 0.5% и соответствует положительным значениям напряжений σ_{11} – напряжениям растяжения. Вариация скорости V_2 у шва имеет тот же уровень, что и для скорости V_1 , и соответствует отрицательным значениям напряжений σ_{22} – напряжениям сжатия. Зона существенных изменений скорости ПАВ, и соответственно наличия остаточных напряжений, составляет примерно 6 мм по обе стороны шва, т.е. величину порядка ширины самого шва.

После проведения исследований образцы были переданы специалистам ФГУП ММП «Салют» для проведения разрушающих испытаний на установке Меркулон-3. Методика разрушающих измерений основана на измерении деформаций, появляющихся при снятии напряжений, и подробно описана в [8], [12], [14].

Остаточные напряжения можно условно подразделить на «объемные» σ_1, σ_2 , постоянные по глубине образца и «поверхностные» τ_1, τ_2 , локали-

зованные в поверхностном слое так, что их среднее по толщине образца равно нулю:

$$\sigma_{ii} = \sigma_i + \tau_i, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Объемные напряжения возникают вследствие сварки, и в данной работе именно они представляли интерес. Поверхностные остаточные напряжения, помимо указанных процессов, появляются при обработке поверхности образцов или деталей (полирование, шлифование, термическая обработка). В силу нулевого среднего поверхностных напряжений, они не влияют на величину скорости звуковых волн, распространяющихся нормально к поверхности [8]. В случае использования ПАВ, поверхностные напряжения τ_1, τ_2 приводят к частотной дисперсии фазовой (и групповой) скорости волны, а объемные составляющие напряжения σ_1, σ_2 определяют низкочастотный предел скоростей ПАВ, см. рис. 1. Вычисление скорости ПАВ корреляционным методом дает именно этот низкочастотный предел, т.е. в данной работе определялись объемные напряжения σ_1, σ_2 . Линейный характер зависимости скорости от частоты (рис. 1) указывает на то, что слой поверхностных напряжений является тонким по сравнению с длинами волн во всем частотном диапазоне измерений 5–20 МГц, т.е. его толщина значительно меньше 150 микрон. Эта оценка согласуется с непосредственными (разрушающими) измерениями напряжений (рис. 3б), которые дают толщину поверхностного слоя порядка 20 микрон. Величины напряжений τ_1, τ_2 могут быть определены из наклона дисперсионных кривых, но эта задача выходит за рамки данной работы.

На рис. 3 представлены типичные эпюры объемных и поверхностных напряжений в образцах, полученные в результате разрушающих испытаний. На рисунке с объемными напряжениями

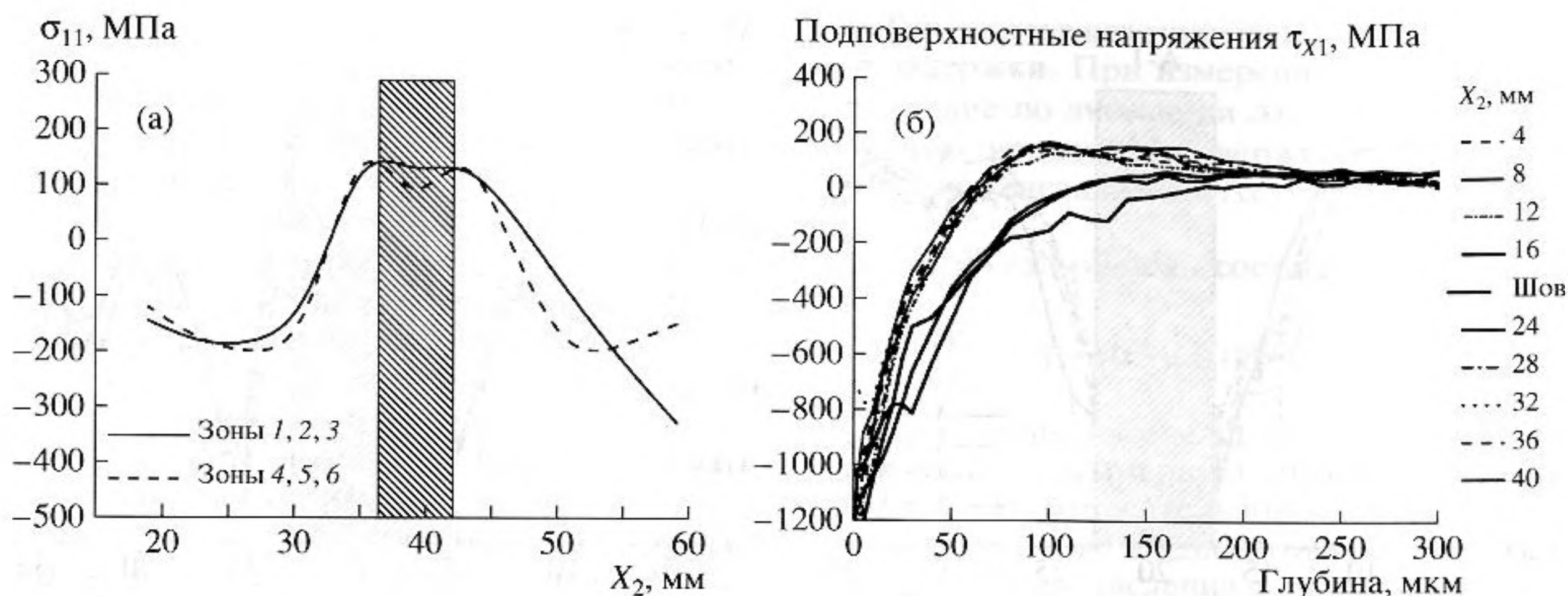


Рис. 3. Эпюры напряжений в образце с имитацией сварного шва, полученные в результате механических испытаний: (а) – объемные напряжения σ_{11} для различных сечений поперек шва, (б) – распределения по глубине поверхностных напряжений τ_{x1} для различных расстояний от шва.

(рис. 3а) приведены эпюры для различных сечений поперек шва, а на рисунке с поверхностными напряжениями (рис. 3б) приведены значения напряжений в зависимости от глубины для различных расстояний от шва по одному из сечений. Из графиков видно, что в точках, удаленных от зоны влияния шва, распределения напряжений удовлетворительно совпадают между собой и характеризуют, вероятно, состояние поверхности после шлифования, проведенного после имитации сварного шва. В точках из околошовной зоны напряжения сжатия больше, чем в самом шве. Также по распределению по глубине поверхностных напряжений видно, что влияние обработки поверхности сказывается на глубинах до $x_3 \approx 200$ мкм. До глубин порядка $x_3 \approx 50$ мкм наблюдается сильный градиент напряжений сжатия, а их значения $\tau \sim 800\text{--}900$ МПа примерно в два раза больше ха-

рактерных величин объемных напряжений. На глубинах $x_3 \approx 200$ мкм напряжения практически полностью релаксируют и выходят на небольшое постоянное значение

На рис. 4 представлено усредненное по глубине до 600 мкм распределение поверхностных напряжений τ_x^0 для обеих линий образца. Как видно из рис. 4, существенное значение среднего напряжения сжатие имеется только в области шва, которое составляет порядка (-100) МПа и может быть связано с изменением структуры материала в сварном шве. Это напряжение частично нивелирует объемное напряжение разрежения (см. рис. 4). В остальных областях вдали от шва средние поверхностные напряжения не значительны и вряд ли могут повлиять на результаты ультразвуковых исследований объемных напряжений, вызываемых процессом сварки.

Безусловно, данный ультразвуковой метод нуждается в калибровке, чтобы согласно (1) можно было пересчитывать вариации скоростей в величины остаточных напряжений. С этой целью проведено сравнение результатов, полученных данным ультразвуковым методом на поверхностных волнах и разрушающим методом. На рис. 5а, б представлены эпюры вызванных сваркой объемных напряжений σ_1 в исследуемых образцах. Из-за отсутствия калибровки эпюры нормировались таким образом, чтобы совпали минимумы эпюр, полученных обоими методами. Графики демонстрируют качественное сходство результатов. Однако существуют и различия – прежде всего в том, что эпюры, полученные, данным ультразвуковым методом, немного уже. Это может быть объяснено несколькими факторами. Прежде всего, разрушающий метод имеет пространственное разрешение в 4 раза ниже, чем в нашем



Рис. 4. Усредненное по глубине распределение поверхностных напряжений τ_x в образце.

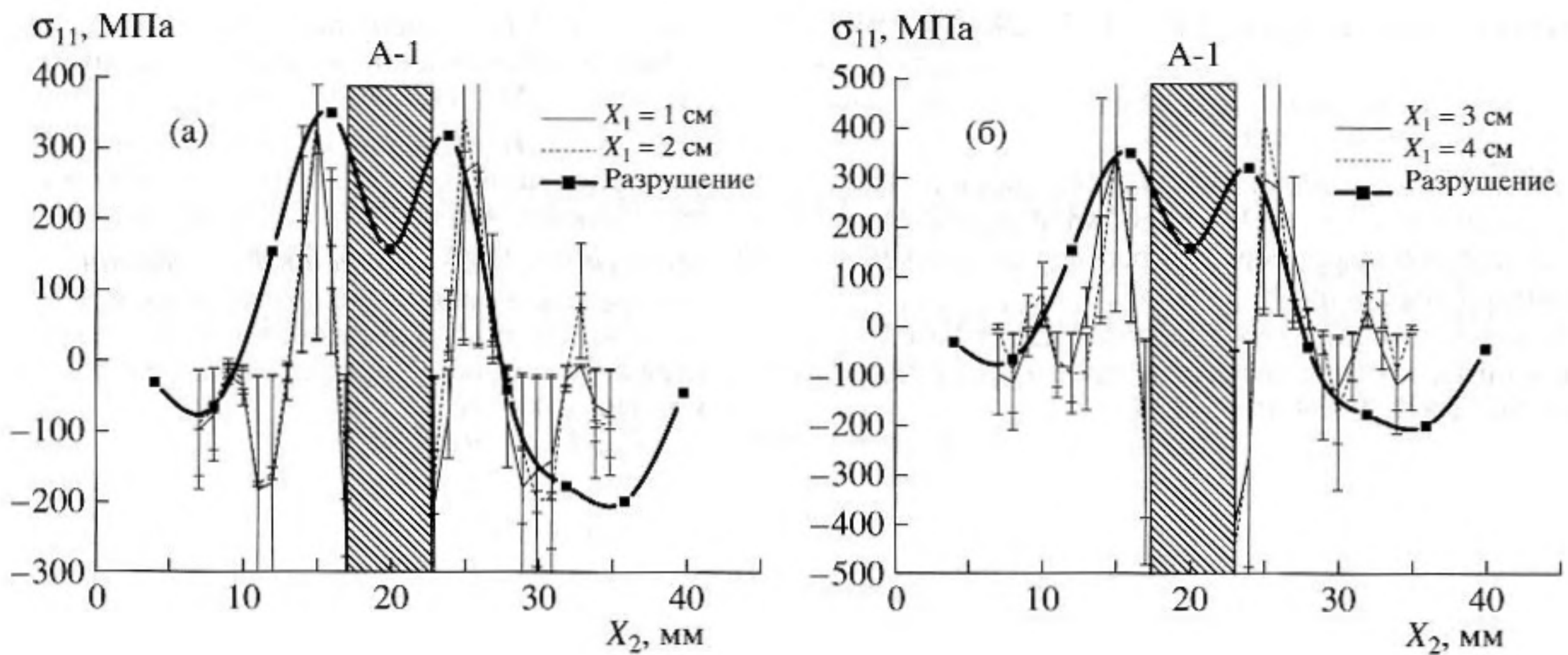


Рис. 5. Сравнение измеренных напряжений с разрушающим методом для различных зон травления.

случае. Поэтому эпюры получаются более сглаженными. Во-вторых, из-за специфики измерений разрушающим методом, в данном случае не удастся учесть вклад поперечной компоненты напряжений в продольную компоненту, которая учитывается через коэффициент Пуассона, для металлов примерно равный $\mu \sim 0.3$:

$$\sigma_{11} = \frac{1}{1 - \mu} (\sigma_{11}^0 + \mu \sigma_{22}^0), \quad (7)$$

где $\sigma_{11}^0, \sigma_{22}^0$ – компоненты напряжений, полученные без учета связи поперечной и продольной деформаций.

Подведем некоторые итоги. В работе развит лазерный ультразвуковой метод на поверхностных акустических волнах (ПАВ) Рэлея для диагностики остаточных напряжений в металлах. В основе метода лежит измерение вариаций скорости ПАВ, вызванных остаточными напряжениями. Реализована система сканирования по всей поверхности материала с достаточно высоким пространственным разрешением. Исследования проводились в образцах из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 8 мм. Для имитации сварного шва посередине они были проплавлены электронным пучком. Получены характерные распределения относительных изменений скоростей по всей зоне термического влияния шва. Скорости вдоль шва V_1 измеряется локально с пространственным разрешением 5.5 мм с точностью $\delta\left(\frac{\Delta V_1}{V_0}\right) = 0.02\%$, а поперечная скорость V_2 измеряется с пространственным разрешением 0.5 мм с точностью $\delta\left(\frac{\Delta V_2}{V_0}\right) = 0.15\%$. Также проведено качественное сравнение результатов рас-

чета остаточных напряжений с результатами испытаний разрушающим методом. Получено хорошее качественное сходство, что подтверждает адекватность получаемых результатов данным ультразвуковым методом.

Работа поддержана Министерством энергетики США в рамках программы IPP (грант CRDF RE0-10230-MO-03 (BNL)) и Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках проекта № 07-02-01425-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М: ЗАО "ТИССО", 2004. 424 с.
2. Munsif A.S., Waddell A.J., Walker C.A. A method for determining x-ray constants for the measurement of residual stress // Strain. 2003. V. 39. P. 3–10.
3. Clapham L., Abdullah K., Jeswiet J.J., Wild P.M., Rogge R. Neutron diffraction residual stress mapping in same gauge and differential gauge tailor-welded blanks // J. Mater. Proc. Tech.. 2004. V. 148. P. 177–185.
4. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 152 с.
5. Pao Y.-H., Sachse W., Fukuoaka H. Acoustoelasticity and ultrasonic measurements of residual stresses // Physical acoustics. 1984. V. 17. P. 61–143.
6. Пуро А.Э. Акустическая томография поверхностных напряжений // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 1. С. 112–115.
7. Muratkov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E. Photoacoustic effect in stressed elastic solids // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. № 5. P. 2948–2955.
8. Ивочкин А.Ю., Карабутов А. А., Лямшев М.Л., Пеливанов И.М. и др. Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим

- методом // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 4. С. 540–547.
9. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
 10. Diquennoy M., Ouafitouh M., Ourak M., Jenot F. Theoretical determination of Rayleigh wave acoustoelastic coefficients: comparison with experimental values // Ultrasonics. 2002. V. 39. P. 575–583.
 11. Lomonosov A.M., Mayer A.P., Hess P. Laser-based surface acoustic waves in material science // Exp. Methods Phys. Sci. 2001. V. 39. P. 65–134.
 12. Овсеенко А.Н., Серебряков В.И., Гаек М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения // М: НТЛ. 2003. 296 с.
 13. Ерофеев В.И. Плоские нелинейные волны в двухкомпонентной смеси твердых деформируемых тел // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 1. С. 65–70.
 14. Меркулова Н.С., Иванова Т.О., Гринченко М.И. Совершенствование средств контроля поверхностных остаточных напряжений и их метрологическая аттестация // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 3.