

УДК 620.179 (147+162)

Применение головных и объемных волн для оценки поврежденности стали Ст3сп5 при усталостном разрушении^{*}

А.В. Гончар, В.В. Мишакин, А.А. Соловьев, В.А. Ключников

Институт проблем машиностроения РАН — филиал ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН»

Use of head and bulk waves to assessing damage of the St3sp5 steel under fatigue

A.V. Gonchar, V.V. Mishakin, A.A. Solovyov, V.A. Klyushnikov

Institute of the RAS — branch of Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS (MERI RAS — Branch of IAP RAS)

Предложен подход к оценке поврежденности материала сварного соединения путем измерения скоростей объемных и головных волн. Комбинирование волн позволяет получать информацию о процессах разрушения материала как в объеме, так и в приповерхностных слоях, наиболее подверженных разрушению при усталости. Исследована связь усталостной поврежденности, определенной с помощью гипотезы линейного суммирования повреждения, со скоростями распространения головных и объемных волн. Испытания проведены на образцах, вырезанных из основного металла и зоны термического влияния материала сварного соединения, изготовленного из стали Ст3сп5. Получены зависимости скоростей распространения волн от параметра поврежденности, что позволяет оценить ресурс материала сварного соединения при усталости по данным акустических измерений.

EDN: TIGYIC, <https://elibrary/tigyic>**Ключевые слова:** зона термического влияния, ультразвуковой контроль, конструкционная сталь, усталостная поврежденность, объемные волны, головная волна

An approach is proposed for assessing the damage to the material of a welded joint by measuring the velocities of bulk shear and head waves. Use different waves make it possible to analyze the destruction processes in the material, both in the volume and in the near-surface layers that are most destruction under fatigue. The relationships between damage calculated by the hypothesis of linear damage summation and the ratio of the velocities of head waves and shear waves were studied. The studies were carried out on specimens cut from the base metal and cut from the heat-affected zone of the welded joint material made of St3sp5 steel. The relationships between the change in velocities and damage were obtained, that can be used for estimation of fatigue life by the acoustic method.

EDN: TIGYIC, <https://elibrary/tigyic>**Keywords:** heat-affected zone, ultrasonic testing, construction steel, microstructure, fatigue damage, bulk waves, head wave

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10395, <https://rscf.ru/project/21-79-10395/>.

Усталость стальных конструкций и деталей машин — распространенная проблема различных отраслей промышленности. Благодаря хорошим показателям по обрабатываемости, свариваемости, механическим свойствам, стоимости и доступности горячекатаная низкоуглеродистая сталь Ст3сп5 получила широкое применение в несущих элементах сварных конструкций. Вследствие неоднородности микроструктуры и механических свойств сварные соединения представляют собой ослабленные участки конструкции [1–3]. Кроме того, зона термического влияния (ЗТВ) сварного соединения является наиболее подверженной разрушению [2, 3].

Прогнозирование усталостного разрушения сварных соединений — сложная задача. Повреждения сварных соединений при усталости можно контролировать методами неразрушающего контроля [4], в качестве которого часто выступает ультразвуковой контроль [5, 6].

Известно, что на параметры распространения ультразвуковых волн (УЗВ) в конструкционных сталях, подвергаемых знакопеременным нагрузкам, влияют сложные процессы структурных изменений на различных уровнях, в том числе накопление микрповреждений и изменение кристаллографической текстуры.

Методы акустического неразрушающего контроля позволяют определять степень усталостной поврежденности материала, используя параметры, чувствительные к микроструктуре [7–9]. С учетом того, что при усталостном разрушении происходит локализация микрповреждений вблизи поверхности [10], становится интересным исследовать параметры распространения головных УЗВ, скорость которых в подповерхностном слое сопоставима с таковой для продольной УЗВ [4, 11, 12].

Для исследования процесса изменения микроструктуры в объеме материала широко используют эхо-импульсный метод ультразвукового контроля [13, 14] с применением продольных и сдвиговых объемных УЗВ. Получение данных о структурных изменениях материала как в объеме, так и в наиболее подверженных разрушению при усталости приповерхностных слоях, даст более полную информацию о состоянии материала при усталости.

Особенно актуально использовать комбинации головных и объемных УЗВ для оценки состояния сварных соединений, где характеристики структуры в ЗТВ заметно отличаются от таковых в основном металле (ОМ). Например,

по сравнению с ОМ в ЗТВ диаметр зерна и местах перегрева в несколько раз больше, что согласно закону Холла — Петча ведет к уменьшению предела текучести, увеличению интенсивности микропластических деформаций, и соответственно, скорости накопления микрповреждений в ЗТВ.

Цель работы — исследование влияния усталостного разрушения ОМ и участка перегрева ЗТВ сварного соединения на скорости распространения продольной и сдвиговой объемных УЗВ и подповерхностной головной УЗВ.

На основе проведенных исследований предложен алгоритм оценки усталостной поврежденности материала сварного соединения, построенный на комбинации скоростей распространения объемных и подповерхностной УЗВ.

Материалы и методика измерений. Исследования проводили на образцах из горячекатаной низкоуглеродистой стали Ст3сп5, изготовленных из участка перегрева и зоны ОМ сварного соединения. С помощью оптико-эмиссионного спектрометра Spectral Laboratory MCA II V5 установили, что исследуемый материал имеет следующий химический состав, % масс.: С — 0,182; Si — 0,21; Mn — 0,56; Cr — 0,11; Ni — 0,08; Fe — остальное.

Сварное соединение получали из заготовок квадратного сечения 30×30 мм ручной дуговой сваркой за несколько проходов по ГОСТ 5264–80 (рис. 1, а). Режим сварки обеспечил ширину ЗТВ около 15 мм. Заготовки для изготовления образцов вырезали параллельно сварному шву.

Изготавливали образцы круглого сечения типа II (ГОСТ 25.502–79) с диаметром рабочей зоны 7 мм, на которой вытачивали плоскопараллельные площадки размером 10×3 мм с двух сторон для установки ультразвуковых датчиков.

Испытания на малоцикловую усталость проводили на сервогидравлической испытательной машине BISS Nano UT-01-0025 с контролем деформации за цикл в режиме растяжение–сжатие с коэффициентом асимметрии $R = -1$. Амплитуда деформации за цикл ϵ_a составляла 0,3, 0,4 и 0,5 %, температура испытаний — 22 °С. Деформацию образцов контролировали с помощью экстензометра BISS AC-07-1005.

Испытания останавливали при падении напряжений в цикле на 50 % по сравнению с установившимся значением напряжения согласно ГОСТ 25.505–85. Каждый образец

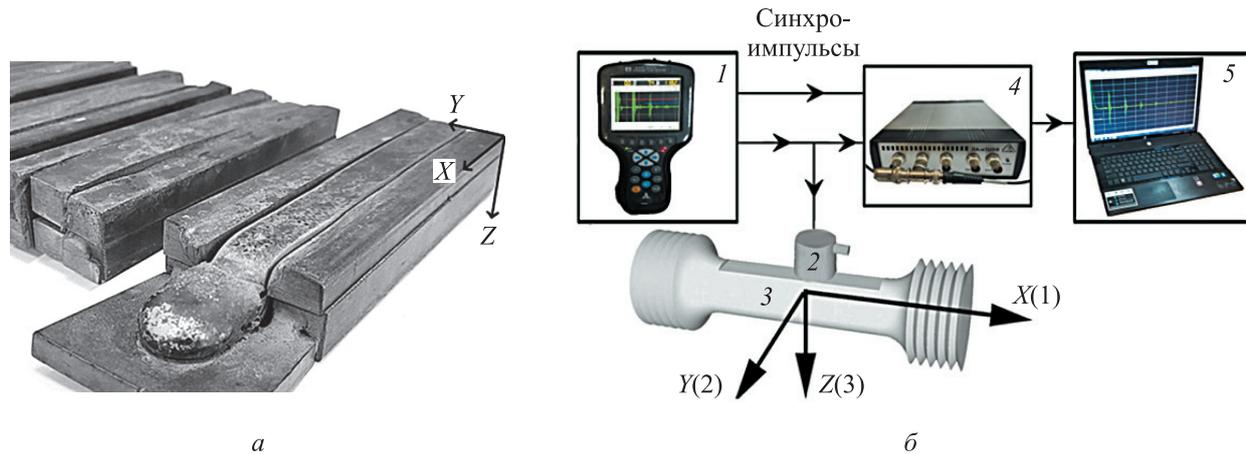


Рис. 1. Внешний вид заготовок из сварного соединения (а) и схема измерительной ультразвуковой установки (б): 1 — генератор сигналов; 2 — ультразвуковой датчик; 3 — испытуемый образец; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — персональный компьютер

нагружали поэтапно. Перед испытанием и после каждого этапа нагружения выполняли ультразвуковые измерения на каждом образце в нагруженном состоянии.

Схема измерительной ультразвуковой установки приведена на рис. 1, б. Серийно выпускаемый ультразвуковой дефектоскоп А1212 МАСТЕР с рабочей частотой 0,5...15,0 МГц использовали как генератор сигналов. В качестве аналого-цифрового преобразователя применяли цифровой осциллограф LA-n1USB с программным обеспечением ADCLab. В цифровом виде на персональном компьютере регистрировали амплитудно-временные диаграммы сигналов. Максимальная частота дискретизации осциллографа составляла 1 ГГц, что соответствует временному разрешению 1 нс. Полученные данные анализировали в оригинальной программе, разработанной в пакете математического анализа MathCAD.

Ультразвуковые исследования проводили с применением датчиков продольных, сдвиговых и головных УЗВ. В датчиках продольных и головных УЗВ с целью обеспечения акустического контакта использовали гель для ультразвуковых исследований на водной основе, в датчиках сдвиговых УЗВ — эпоксидную смолу.

Параметры распространения головных УЗВ определяли по дифференциальной схеме измерения времени. Схема состояла из одного излучающего и двух приемных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), представлявших собой пьезокерамические пластины частотой 10 МГц, наклеенные на призмы из полиметилметакрилата под углом 27°.

В соответствии с этой схемой изготавливали экспериментальный акустический блок, состоявший из трех ПЭП в одном корпусе. Дифференциальная схема измерений позволила компенсировать влияние теплового расширения призм из полиметилметакрилата на точность получаемых результатов, а также значительно уменьшить ее зависимость от слоя контактной жидкости и линий задержки [15, 16].

Калибровку акустического блока проводили на образцах с известной скоростью распространения продольных УЗВ. В результате калибровки и с учетом выбора синфазных точек измерительная база L между двумя приемными ПЭП составила $(3,76 \pm 0,005)$ мм.

Время распространения головной УЗВ t_{xx} измеряли между сигналами с первого и второго приемных ПЭП. За синфазные точки в импульсах принимали точки пересечения нуля на переходе с минимума на максимум в сигнале.

Скорость распространения головной УЗВ определяли по формуле

$$v_{xx} = L/t_{xx}.$$

Чтобы измерить параметры распространения объемных УЗВ, использовали эхо-импульсный метод. Для возбуждения применяли широкополосные ПЭП V157 и V1057 производства Olympus с диаметром излучающей пластины 3 мм и несущей частотой 5 МГц. Образцы разделяли на три зоны, в каждой из которых регистрировали амплитудно-временную диаграмму акустических сигналов. Время распространения объемных УЗВ измеряли между первым и третьим сигналами.

Скорости распространения продольной v_{zz} и сдвиговой v_{zx} УЗВ рассчитывали из соотношений

$$v_{zz} = 2h/t_{zz}; \quad v_{zx} = 2h/t_{zx},$$

где h — толщина, измеряемая микрометром до и после каждого этапа нагружения; t_{zz} и t_{zx} — время распространения продольной и сдвиговой УЗВ.

Погрешность измерения времени распространения УЗВ составляла не более 1...2 нс, а определения скоростей УЗВ — 5 м/с.

Результаты исследования. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением количества циклов N скорости распространения головных УЗВ v_{xx} в ОМ (рис. 2, а) и ЗТВ (рис. 2, б) изменяются немонотонно: снижаются на начальном этапе и увеличиваются до момента образования трещины.

Уменьшение скоростей распространения головных УЗВ v_{xx} на начальном этапе нагружения можно объяснить образованием в приповерхностном слое преимущественно ориентированных линейных микродефектов, а их последующий рост — изменением кристаллографической текстуры. В ЗТВ после первых циклов нагружения наблюдается незначитель-

ное возрастание скорости распространения головных УЗВ, что может быть вызвано релаксацией внутренних напряжений, связанных с изготовлением сварного шва.

Установлено, что скорость распространения продольных УЗВ v_{zz} в ОМ изменяется мало (рис. 2, в), в ЗТВ она монотонно увеличивается (рис. 2, з). Повышение скорости распространения продольных v_{zz} и головных v_{xx} УЗВ можно объяснить незначительным изменением кристаллографической текстуры при усталости. Скорость распространения сдвиговых УЗВ v_{zx} , поляризованных вдоль направления растяжения образцов, монотонно уменьшается, причем в ЗТВ (рис. 2, е) интенсивнее, чем в ОМ (рис. 2, д). С ростом амплитуды деформации за цикл интенсивность изменения скорости распространения сдвиговых УЗВ повышается.

В проведенном эксперименте направление поляризации сдвиговых УЗВ совпадало с направлением распространения головных УЗВ, уменьшение которых, как отмечалось, связано с образованием линейных микродефектов, преимущественно ориентированных поперек оси растяжения-сжатия образцов.

Обсуждение результатов. Анализ изменения скоростей распространения подповерхностных

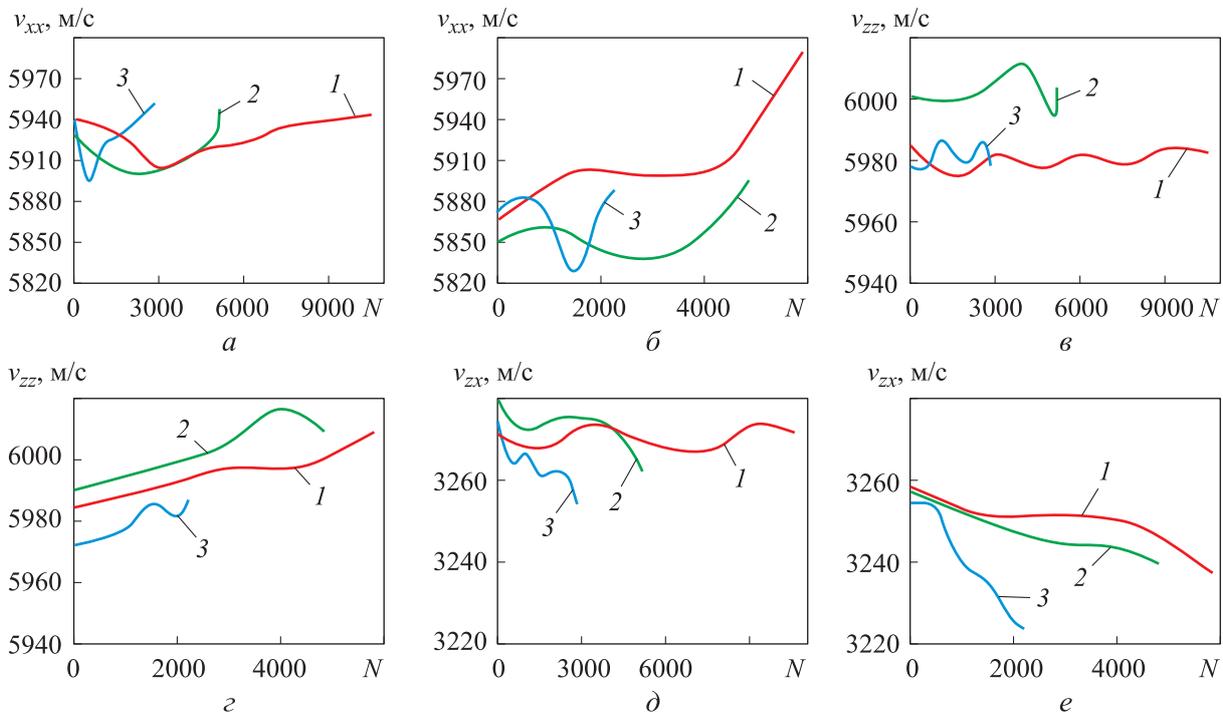


Рис. 2. Зависимости скоростей распространения головных v_{xx} (а, б), продольных v_{zz} (в, з) и сдвиговых v_{zx} (д, е) скоростей УЗВ в ОМ (а, в, д) и ЗТВ (б, з, е) от количества циклов N при амплитуде деформации за цикл $\epsilon_a = 0,3$ (1), 0,4 (2) и 0,5 % (3)

Таблица 1

Значения коэффициентов регрессии параметра поврежденности Ψ_{xx}

Зона сварного соединения	$a_1, (\text{м/с})^{-1}$	$a_2, (\text{м/с})^{-1}$	$a_3, (\text{м/с})^{-2}$	$a_4, (\text{м/с})^{-2}$	$a_5, (\text{м/с})^{-2}$
ОМ	$-1,9 \cdot 10^{-2}$	$-5,2 \cdot 10^{-2}$	$-2,4 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$-1,7 \cdot 10^{-3}$
ЗТВ	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$-5,9 \cdot 10^{-2}$	$-1,64 \cdot 10^{-5}$	$-9,2 \cdot 10^{-4}$	$-4,9 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

Значения коэффициентов регрессии Ψ_{zz}

Зона сварного соединения	$b_1, (\text{м/с})^{-1}$	$b_2, (\text{м/с})^{-1}$	$b_3, (\text{м/с})^{-2}$	$b_4, (\text{м/с})^{-2}$	$b_5, (\text{м/с})^{-2}$
ОМ	$-2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$-2,1 \cdot 10^{-3}$
ЗТВ	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$-8,1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$-2,6 \cdot 10^{-4}$

и объемных УЗВ показал, что в ЗТВ структурные изменения происходят интенсивнее, чем в ОМ. Это связано с тем, что большой размер зерна в ЗТВ приводит к уменьшению предела текучести и более интенсивным микропластическим деформациям и, соответственно, к увеличению интенсивности накопления микроповреждений.

Направление поляризации сдвиговой УЗВ, т. е. направление смещения при ее поперечных колебаниях выбрано в направлении распространения головной УЗВ. Учитывая то, что микродефекты, например микротрещины, расположены преимущественно перпендикулярно оси нагружения, сдвиговые УЗВ, поляризованные в этом направлении, являются более струк-

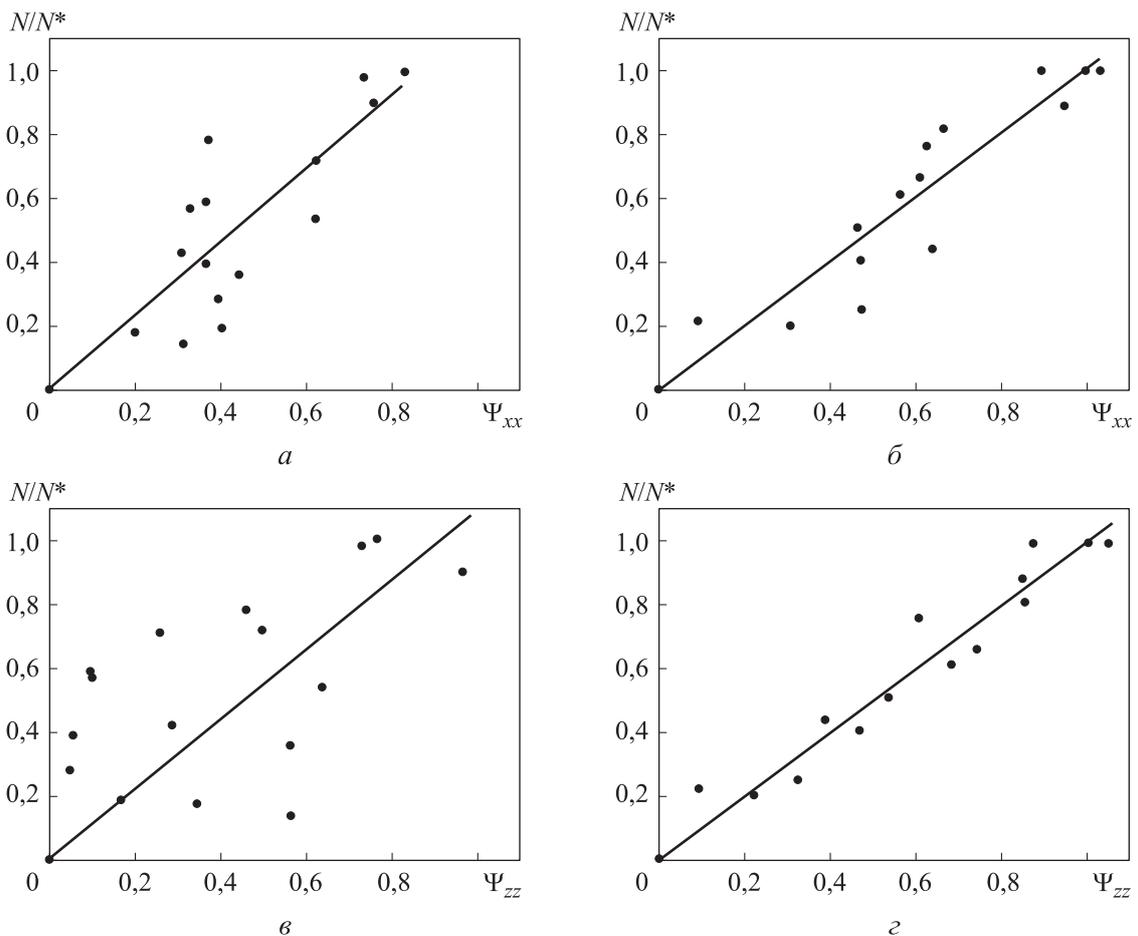


Рис. 3. Связь относительного числа N/N^* с параметрами поврежденности Ψ_{xx} ($a, б$) и Ψ_{zz} ($в, з$) для ОМ ($a, в$) и ЗТВ ($б, з$):

• — результаты расчета; — — линейная регрессия

турно-чувствительными, чем волны, поляризованные поперек оси X .

Проанализируем зависимость поврежденности материала при усталости, определяемой как относительное число циклов N/N^* (N^* — циклическая долговечность), от скоростей распространения УЗВ. Представим параметры поврежденности в следующем виде:

$$\Psi_{xx} = a_1 \Delta v_{xx} + a_2 \Delta v_{zx} + a_3 \Delta v_{xx}^2 + a_4 \Delta v_{zx}^2 + a_5 \Delta v_{xx} \Delta v_{zx}; \quad (1)$$

$$\Psi_{zz} = b_1 \Delta v_{zz} + b_2 \Delta v_{zx} + b_3 \Delta v_{zz}^2 + b_4 \Delta v_{zx}^2 + b_5 \Delta v_{zz} \Delta v_{zx}, \quad (2)$$

где Δv_{xx} , Δv_{zx} и Δv_{zz} — величина изменения скорости распространения головной, сдвиговой и продольной УЗВ соответственно; a_1, \dots, a_5 , b_1, \dots, b_5 — коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии для ОМ и ЗТВ определяли методом множественной регрессии, используя экспериментальные данные изменения скоростей распространения УЗВ Δv_{xx} , Δv_{zx} , Δv_{zz} и полученное по результатам механических испытаний относительное число циклов N/N^* . Значения коэффициентов регрессии параметров поврежденности Ψ_{xx} и Ψ_{zz} приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Для ОМ корреляционное поле относительного числа циклов с параметром поврежденности Ψ_{xx} , рассчитанным по формуле (1), приведено на рис. 3, а, для ЗТВ — на рис. 3, б. В первом случае коэффициент корреляции зависимости $N/N^*(\Psi_{xx})$ составил 0,88, во втором — 0,96.

Для ОМ корреляционное поле относительного числа циклов с параметром поврежденности Ψ_{zz} , определенным по формуле (2), приведено на рис. 3, в, для ЗТВ — на рис. 3, г. В первом случае коэффициент корреляции зависимости $N/N^*(\Psi_{zz})$ составил 0,61, во втором — 0,98.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что для оценки усталостной поврежденности материала в ОМ предпочтительнее использовать комбинацию скоростей распространения головной и сдвиговой УЗВ, т.е. формулу (1). Для оценки поврежденности ЗТВ можно применять как формулу (1), так и выражение (2) с комбинацией скоростей распространения продольной и сдвиговой УЗВ.

Наибольшее значение коэффициента корреляции получено в ЗТВ, что свидетельствует о более интенсивных структурных изменениях в этой зоне по сравнению с ОМ.

Выводы

1. В результате ультразвуковых исследований процесса усталостного разрушения материала в зоне ОМ и ЗТВ сварного соединения конструкционной стали СтЗсп5 выявлено немонотонное изменение скоростей распространения головных УЗВ вдоль оси растяжения-сжатия. Немонотонный характер объясняется образованием преимущественно ориентированных линейных микродефектов и изменением кристаллографической текстуры при усталости.

2. Установлено, что интенсивность изменения скорости распространения головной УЗВ выше, чем у объемных УЗВ, что может быть обусловлено более активным образованием микродефектов в подповерхностном слое.

3. Обнаружено, что наиболее интенсивное изменение скоростей распространения УЗВ происходит в ЗТВ, что связано с повышенной пластичностью и большей скоростью образования дефектов. Показано, что для более точной оценки поврежденности материала в ОМ и ЗТВ необходимо использовать комбинацию изменения скоростей распространения головных и сдвиговых УЗВ.

Литература

- [1] Ольшанский Н.А. *Сварка в машиностроении*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 1978. 504 с.
- [2] Алешин Н.П., Чернышов Г.Г., ред. *Сварка. Резка. Контроль*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2004. 624 с.
- [3] Захаров М.Н., Насонов В.А. Оценка влияния дефектов сварных соединений на прочностную надежность стальных сосудов и аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 4, с. 68–72, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2013-4-68-72>
- [4] Клюев В.В. *Неразрушающий контроль и диагностика*. Т. 3. Москва, Машиностроение, 2004. 864 с.

- [5] Кретов Е.Ф. *Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении*. Москва, СВЕИ, 2014. 312 с.
- [6] Ensminger D., Bond L.J. *Ultrasonics. Fundamentals, technologies, and applications*. CRC Press, 2011. 765 p.
- [7] Зуев Л.Б., Целлермаер В.Я., Громов В.Е. и др. Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей. *Журнал технической физики*, 1997, т. 67, № 9, с. 123–125.
- [8] Гончар А.В., Ключников В.А., Мишакин В.В. и др. Ультразвуковой и вихретоковый контроль процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали. *Дефектоскопия*, 2021, № 7, с. 28–36, doi: <http://doi.org/10.31857/S0130308221070046>
- [9] Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Рябов Д.А. и др. Исследование поврежденности образцов из стали 12Х18Н10Т при малоциклового усталости методами неразрушающего контроля. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2021, т. 87, № 5, с. 61–67, doi: <http://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67>
- [10] Иванова В.С., Терентьев В.Ф. *Природа усталости металлов*. Москва, Металлургия, 1975. 455 с.
- [11] Разыграев Н.П. Физика, терминология и технология в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами. *Дефектоскопия*, 2020, № 9, с. 3–19, doi: <http://doi.org/10.31857/S0130308220090018>
- [12] Шевалдыкин В.Г. Исследование распространения ультразвуковой головной волны по вогнутой поверхности металла. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2021, т. 87, № 8, с. 23–28, doi: <http://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-8-23-28>
- [13] Гончар А.В., Аносов М.С., Рябов Д.А. Оценка структурной деградации зоны термического влияния при усталостном разрушении сварного соединения. *Дефектоскопия*, 2022, № 9, с. 25–34, doi: <http://doi.org/10.31857/S0130308222090032>
- [14] Иляхинский А.В., Родюшкин В.М., Хлыбов А.А. Влияние малоциклового усталости металла на результаты ультразвуковой диагностики. *Транспортные системы*, 2016, № 2, с. 46–50, doi: http://doi.org/10.46960/62045_2016_2_46
- [15] Szelażek J. Sets of piezoelectric probeheads for stress evaluation with subsurface waves. *J. Nondestruct. Eval.*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 188–199, doi: <http://doi.org/10.1007/s10921-013-0172-1>
- [16] Liu H., Li Y., Li T. et al. Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically refracted (LCR) wave. *Appl. Acoust.*, 2018, vol. 141, pp. 178–187, doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.07.017>

References

- [1] Olshanskiy N.A. *Svarka v mashinostroenii*. Т. 1 [Welding in mechanical engineering. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 504 p. (In Russ.).
- [2] Aleshin N.P., Chernyshov G.G., eds. *Svarka. Rezhka. Kontrol*. Т. 1 [Welding. Cutting. Control. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 624 p. (In Russ.).
- [3] Zakharov M.N., Nasonov V.A. Effect assessment of welding defects on strength reliability of steel vessels and equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2013, no. 4, pp. 68–72, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2013-4-68-72> (in Russ.).
- [4] Klyuev V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika*. Т. 3 [Nondestructive control and diagnostics. Vol. 3]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. (In Russ.).
- [5] Kretov E.F. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya v mashinostroenii* [Ultrasonic flaw detection in mechanical engineering]. Moscow, SVEN Publ., 2014. 312 p. (In Russ.).
- [6] Ensminger D., Bond L.J. *Ultrasonics. Fundamentals, technologies, and applications*. CRC Press, 2011. 765 p.
- [7] Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E. et al. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1997, vol. 67, no. 9, pp. 123–125. (In Russ.). (Eng. version: *Tech. Phys.*, 1997, vol. 42, no. 9, pp. 1094–1096, doi: <https://doi.org/10.1134/1.1258774>)

- [8] Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. et al. Erratum to: ultrasonic and eddy-current fatigue monitoring of austenitic steel welded joints. *Defektoskopiya*, 2021, no. 7, pp. 28–36, doi: <http://doi.org/10.31857/S0130308221070046> (in Russ.). (Eng. version: *Russ. J. Nondestruct. Test.*, 2021, vol. 57, no. 9, p. 823, doi: <https://doi.org/10.1134/S1061830921090126>)
- [9] Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Ryabov D.A. et al. Study of the damage to 12Cr18Ni10Ti steel samples under low cycle fatigue using methods of nondestructive control. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2021, vol. 87, no. 5, pp. 61–67, doi: <http://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67> (in Russ.).
- [10] Ivanova V.S., Terentyev V.F. *Priroda ustalosti metallov* [Nature of metal fatigue]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 455 p. (In Russ.).
- [11] Razygraev N.P. Physics, terminology and technology in ultrasonic testing with head waves. *Defektoskopiya*, 2020, no. 9, pp. 3–19, doi: <http://doi.org/10.31857/S0130308220090018> (in Russ.).
- [12] Shevaldykin V.G. Study of the ultrasonic creeping wave propagation over a concave metal surface. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2021, vol. 87, no. 8, pp. 23–28, doi: <http://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-8-23-28> (in Russ.).
- [13] Gonchar A.V., Anosov M.S., Ryabov D.A. Estimation of structural degradation of the heat affected zone of the welded joint under fatigue. *Defektoskopiya*, 2022, no. 9, pp. 25–34, doi: <http://doi.org/10.31857/S0130308222090032> (in Russ.). (Eng. version: *Russ. J. Nondestruct. Test.*, vol. 58, no. 9, pp. 790–799, doi: <https://doi.org/10.1134/S1061830922090066>)
- [14] Ilyakhinskiy A.V., Rodyushkin V.M., Khlybov A.A. Influence of low-cycle metal fatigue on the results of ultrasonic diagnostics. *Transportnye sistemy* [Transport systems], 2016, no. 2, pp. 46–50, doi: http://doi.org/10.46960/62045_2016_2_46 (in Russ.).
- [15] Szelążek J. Sets of piezoelectric probeheads for stress evaluation with subsurface waves. *J. Nondestruct. Eval.*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 188–199, doi: <http://doi.org/10.1007/s10921-013-0172-1>
- [16] Liu H., Li Y., Li T. et al. Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically refracted (LCR) wave. *Appl. Acoust.*, 2018, vol. 141, pp. 178–187, doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.07.017>

Статья поступила в редакцию 17.04.2024

Информация об авторах

ГОНЧАР Александр Викторович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций. Институт проблем машиностроения РАН — филиал ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (603024, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

МИШАКИН Василий Васильевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций. Институт проблем машиностроения РАН — филиал ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (603024, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

Information about the authors

GONCHAR Alexander Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Head of Laboratory of Non-Destructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures of Mechanical Engineering Research. Institute of the RAS — branch of Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS (MERI RAS — Branch of IAP RAS) (603024, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Belinskogo St., Bldg. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

MISHAKIN Vasily Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Chief Researcher, Laboratory of Non-Destructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures of Mechanical Engineering Research. Institute of the RAS — branch of Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS (MERI RAS — Branch of IAP RAS) (603024, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Belinskogo St., Bldg. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

СОЛОВЬЕВ Александр Александрович — инженер лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций. Институт проблем машиностроения РАН — филиал ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (603024, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

КЛЮШНИКОВ Вячеслав Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций. Институт проблем машиностроения РАН — филиал ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (603024, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

SOLOVYOV Aleksander Aleksandrovich — Engineer, Laboratory of Non-Destructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures of Mechanical Engineering Research. Institute of the RAS — branch of Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS (MERI RAS — Branch of IAP RAS) (603024, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Belinskogo St., Bldg. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

KLYUSHNIKOV Vyacheslav Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Non-Destructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures of Mechanical Engineering Research. Institute of the RAS — branch of Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS (MERI RAS — Branch of IAP RAS) (603024, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Belinskogo St., Bldg. 85, e-mail: ndt@ipmran.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гончар А.В., Мишакин В.В., Соловьев А.А., Ключников В.А. Применение головных и объемных волн для оценки поврежденности стали Ст3сп5 при усталостном разрушении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 5, с. 48–56.

Please cite this article in English as:

Gonchar A.V., Mishakin V.V., Solovyov A.A., Klyushnikov V.A. Use of head and bulk waves to assessing damage of the St3sp5 steel under fatigue. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 5, pp. 48–56.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебник**

«Аналитическая геометрия»

Авторы: А.Н. Канатников, А.П. Крищенко

Книга является третьим выпуском серии «Математика в техническом университете» и знакомит читателя с основными понятиями векторной алгебры и ее приложений, теории матриц и определителей, систем линейных алгебраических уравнений, кривых и поверхностей второго порядка. Материал изложен в объеме, необходимом на начальном этапе подготовки студента технического университета.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, который читается в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для студентов технических университетов. Может быть полезен преподавателям и аспирантам.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>