01

Оптоакустический спектральный контроль повреждаемости конструкционных материалов в процессе деформирования. Эксперимент

© Б.А. Зимин, Ю.В. Судьенков¶, С.А. Чертищева

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: y.sudenkov@yandex.ru

Поступила в Редакцию 20 января 2026 г.
В окончательной редакции 9 февраля 2026 г.
Принята к публикации 9 февраля 2026 г.

Представлена оптоакустическая методика контроля и развития процесса повреждаемости мезомасштаба конструкционных материалов в процессе (нелинейного) деформирования. Показано возникновение и развитие процесса поврежденности при одноосном растяжении образцов металлов (меди М1, титана ВТ6). Отмечается возможность раздельной оценки поврежденности в результате действия внешнего нагружения и сдвиговых деформаций.

Ключевые слова: оптоакустика, тепловыделение, спектральный анализ, продольные и поперечные волны, коэффициент Пуассона.

DOI: 10.61011/FTT.2026.02.62712.8997

1. Введение

К настоящему времени практически все теории пластичности базируются на разделения жесткости материала на два механизма деформирования, один из которых определяет изменение объема, а другой изменение формы. При этом ответственность за все виды нелинейного поведения материала определяется механизмом изменения формы и на этой основе построены практически все теории пластичности и ползучести [1–5].

В процессе нелинейного деформирования в каждый момент времени испытуемый материал находится в новом состоянии, которое определяется перестройкой структуры, формированием и взаимодействием мезоструктур, характерных для разных стадий деформирования. Например, в металлах на стадии пластического течения выделяется до четырех этапов, различающихся характером и масштабами структурных преобразований [6–8], что в первую очередь, обусловлено действием сдвиговых напряжений.

Изменение механических свойств материалов в процессе деформирования могут иметь различную природу, что можно интерпретировать как процессы накопления различных дефектов структуры — изменение формы фрагментов, ячеек, блоков, полигонов и так далее, определяемых зачастую степенью разориентировки структурных элементов.

Долговечность материалов под воздействием внешних механических напряжений описывается в рамках моделей накопления такого рода рассеянной поврежденности в рамках механики повреждённой среды.

Основополагающими в задачах оценки степени повреждения структуры являются работы Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова и В.В. Болотина [2–4], в где в качестве меры поврежденности используют параметр внутреннего состояния, физическая природа которого обусловлена выбором конкретной модели.

Особую роль в задачах оценки степени изменения структуры и поврежденности играет диагностика, использующая методы неразрушающего контроля, в частности, акустические методы, обладающие высокой чувствительностью и универсальностью.

Обоснованием применения акустических методов для количественной оценки и стадий развития поврежденности конструкционных материалов являются результаты работ, посвященных распространению упругих волн в средах с повреждениями при различных видах воздействия [9,10].

В последнее время предложены варианты спектрально-акустических измерений, имеющие повышенную чувствительность к структурным перестройкам в материалах, и представляются перспективными для решения задач контроля поврежденности конструкционных материалов [11,12].

Расширением возможностей таких методик является исследование изменений коэффициента поперечных деформаций (коэффициента Пуассона) в процессе деформирования материалов с использованием акустических методик. Это открывает возможности получения информации о нелинейных процессах деформирования, так как коэффициент поперечных деформаций (ν) как и параметр Грюнайзена (γ) в механике деформируемого твердого тела, определяет термодинамические и механи-

ческие характеристик состояния материала:

$$\gamma = \frac{3}{2} \cdot \frac{1+\nu}{2-3\nu}; \quad \nu_{td} = \frac{c_{\mathrm{l}}^2 - 2c_{\mathrm{t}}^2}{2(c_{\mathrm{l}}^2 - c_{\mathrm{t}}^2)}, \tag{1}$$

где c_{l} и c_{t} — скорости продольных и поперечных волн.

Возникающие на стадии нелинейного процесса деформирования структурные неоднородности, по сути, представляют собой мезо резонаторы, характеризующиеся собственными спектрами частот. При взаимодействии с этими структурами спектры наносекундных акустических импульсов диагностики меняются, что и позволяет контролировать процесс поврежденности материалов.

Современные методы лазерной оптоакустики существенно расширяют информативность акустической диагностики за счет бесконтактного возбуждения наносекундных акустических импульсов и возможности одновременного возбуждения импульсов продольных и поперечных волн [13,14], контроль скоростей распространяя которых содержит информацию об изменениях объемных и сдвиговых модулей материалов.

Широкий спектр частот $\Delta f \sim 0.1 \div 50$ MHz, возбуждаемых лазерным излучением акустических импульсов позволяет определять возникновение неоднородностей мезомасштаба.

При этом использование такой методики диагностика состояния среды осуществляется за времена много меньшие времен изменения параметров квазистатического нагружения, а энергия возбуждаемых лазерным излучением акустических импульсов, много меньше характерных энергий активации механизмов структурных изменений.

Таким образом, контроль изменения спектров импульсов продольных и поперечных волн, распространяющихся через испытуемый образец, дают возможность оценивать структурные изменения, то есть степень поврежденности материала.

Рассматривая материал как акустический четырехполюсник, задачу определения характеристик рассеянной поврежденности можно определить, как задачу получения информации из передаточной характеристики материала.

В применении такого подхода импульсы отклика линейной системы $F(t)$ на внешнее воздействие $f(\tau)$ могут быть записаны в виде [15]:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(t-\tau) f(\tau)\, d\tau, \tag{2}$$

где $H(t)$ — это отклик системы на воздействие, описываемое δ функцией Дирака, или передаточная функция, характеризующая исследуемую среду.

Спектр акустического сигнала $\tilde{F}(\omega)$, прошедший через деформированный материал, связан со спектром сигнала на входе $\tilde{f}(\omega)$.

$$\tilde{F}(\omega) = \tilde{H}(\omega)\tilde{f}(\omega), \tag{3}$$

где $\tilde{F}(\omega)$ — Фурье преобразование $F(t)$.

Простейший параметр поврежденности, описывающий изменения в материале при деформациях, можно описать, используя теорему о свертке для преобразования Фурье [16]:

$$\psi = 1 - \frac{\left|\left|\tilde{F}(\omega)\right|\right|_{\sigma}}{\left|\left|\tilde{F}(\omega)\right|\right|_{0}}, \tag{4}$$

где $\left|\left|\tilde{F}(\omega)\right|\right|_{\sigma}$ — отклик системы при нагрузке σ, $\left|\left|\tilde{F}(\omega)\right|\right|_{0}$ — в отсутствие нагрузки, ψ — параметр поврежденности, подобный введенному в работе [17].

2. Методика исследований

Квазистатическое растяжение стандартных плоских образцов с размерами рабочей части $50 \times 5 \times 2$ mm проводилось на универсальной испытательной машине SHIMADZU AG-X50в при комнатной температуре при скоростях деформирования 5 mm/min и 20 mm/min. Изменение температуры образцов контролировалось по инфракрасному излучению, регистрировавшемуся тепловизионной камерой ThermaCAM SC 300 с частотой 50 Hz.

В процессе растяжения, применялся оптико-акустический метод [14,18], основанный на зондирование образца короткими акустическими импульсами продольных и поперечных волн, возбуждаемых наносекундными импульсами лазера, следующими с частотой 1 Hz.

Доставка лазерного излучения с длительностью $\tau_{0.5} = 10^{-8}$ s и энергией $E \leq 10^{-3}$ J осуществлялась с помощью оптического волокна диаметром 0.6 mm. При таком воздействии в исследуемых образцах возбуждается как импульс продольной, так и поперечной волны.

С целью повышения точности измерения спектров и скоростей c_{l} и c_{t} была реализована одновременная регистрация импульсов продольных и поперечных волн одним пьезокерамическим датчиком. С этой целью пьезопластина толщиной 3 mm вырезалась из толстой плоскопараллельной пьезокерамики ЦТС19 под углом $\sim 45^{\circ}$ к направлению ее поляризации.

Регистрация сигналов с пьезодатчика осуществлялась осциллографом Lecroy с $\Delta f \approx 600$ MHz. Схема измерений и типичные осцилограммы лазерного импульса, а также сигнал пьезодатчика при растяжении образца стали приведены на рис. 1.

Разработанный для автоматической обработки экспериментальных данных алгоритм на основе MATLAB, позволял выделять из осциллограмм, соответствующие точкам на зависимостях $\boldsymbol{\sigma}$-$\boldsymbol{\varepsilon}$ (рис. 1, a), импульсы продольных и поперечных волн. В дальнейшем проводился раздельный спектральный анализ нормированных продольных и поперечных импульсов, соответствующих разным величинам нагрузки.

Представленные на рис. 1 и 2 методика и результаты исследований позволили диагностировать характер развития повреждаемости испытанных материалов в процессе растяжения с применением простого параметра Ψ из соотношения (4).

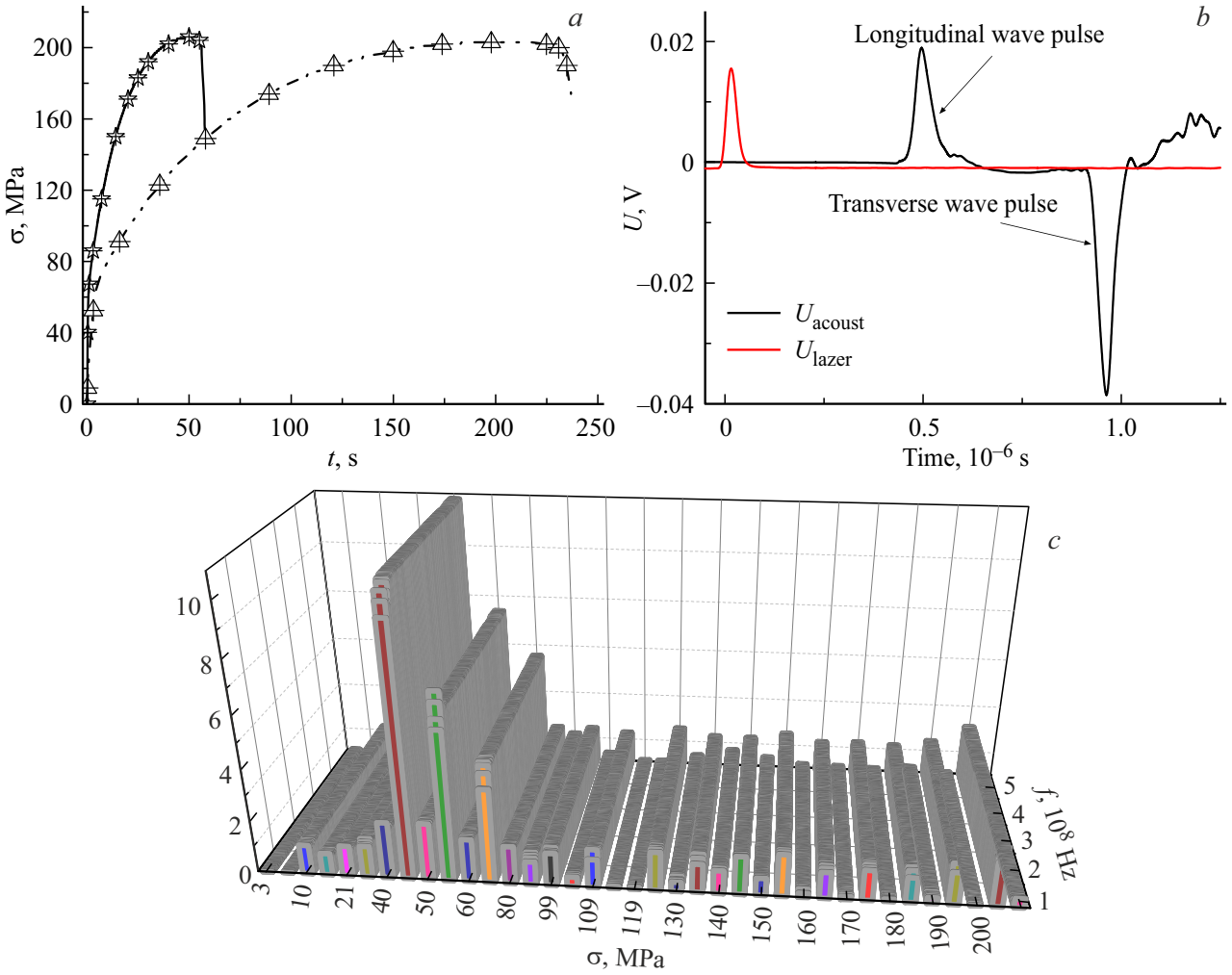

Рис. 1. Зависимости σ-ε — *a*; осциллограммы лазерного импульса и сигнала пьезодатчика при испытании образца стали — *b*, зависимость спектральной плотности мощности при испытании меди М1 при скорости 5 mm/min — *c*.

3. Обсуждение результатов

На рис. 2 приведены результаты определения повреждаемости (Ψ) образцов меди М1 — (*a, b*), нержавеющей стали 12Х18Н10Т — (*c, d*), сплава титана ВТ1 — (*e,f*) при скорости растяжения 5 mm/min и 20 mm/min.

В левом столбце представлены результаты, полученные при анализе спектров импульсов продольных волн, в правом — поперечных волн. Для скорости нагружения 5 mm/min диаграммы повреждаемости — Ψ_l бесцветны, а для скорости 20 mm/min — Ψ_t заштрихованы.

Наблюдается неравномерное развитие процессов повреждаемости для всех испытанных металлов, а также значительное различие в характере изменения Ψ_l и Ψ_t, полученных при спектральном анализе импульсов продольных и поперечных волн.

Это обусловлено существенным отличием повреждаемости (мезомасштаба) при действии внешней работы изменения объема и действии объемных (внутренних) сил, определяющих поперечные деформации. Наблюдаемое изменение знака параметра поврежденности определяется изменением формы и характерных размеров, возникающих неоднородностей, что меняет условия взаимодействия, составляющих спектра импульса диагностики с дефектами. Рассеяние для одних частот может сменяться поглощением для других составляющих спектра.

Также следует отметить существенное различие развития процесса повреждаемости при разных скоростях нагружения, представленных в левом (5 mm/min) и правом (20 mm/min) столбцах рис. 2.

Отличаются как величины введенного в (4) значения поврежденности Ψ, так и характер развития этого процесса.

4. Заключение

Таким образом, развитие представленной методики могут позволить контролировать изменение структуры в процессах нелинейного деформирования твердых тел

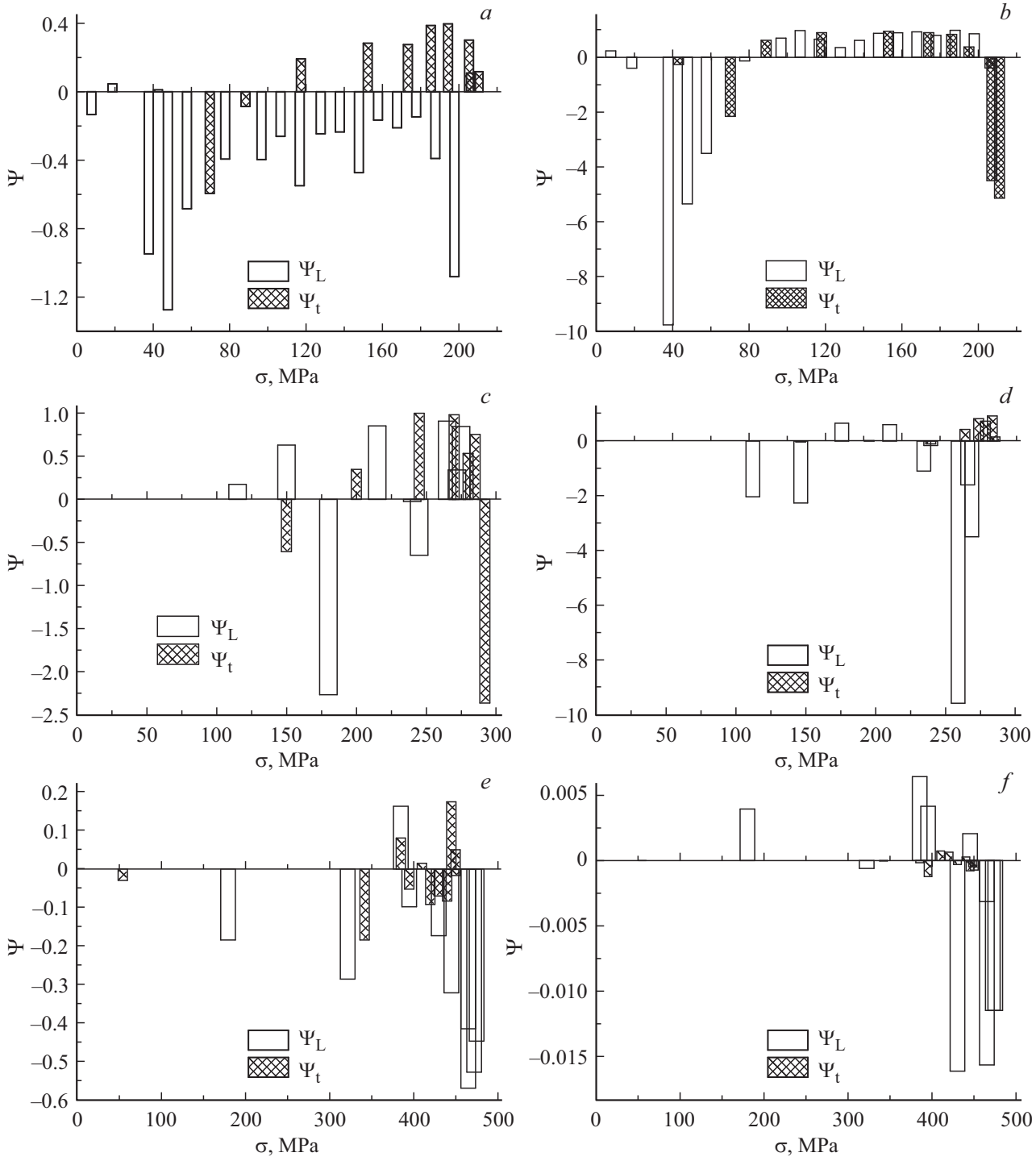

Рис. 2. Процессы повреждаемости образцов меди М1 — (*a, b*), нержавеющей стали 12Х18Н10Т — (*c, d*), сплава титана ВТ1 — (*e,f*) при скоростях растяжения 5 mm/min и 20 mm/min.

и внести значительный вклад в развитие методов диагностики напряженно-деформирования состояния материалов и элементов конструкций.

Следует добавить, что представленная методика позволяет получать не только данные о изменении спектров и накопления поврежденности материалов, но и дает возможность контролировать изменения энергетического баланса в процессе деформирования [18] при контроле тепловыделения.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 25-29-00218.

Конфликт интересов

Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] В. Прагер. Проблемы теории пластичности. Физматгиз, М. (1958). 136 с.
[2] Л.М. Качанов. Основы теории пластичности. Наука, М. (1969).
[3] Ю.Н. Работнов. Избранные труды. Проблемы механики деформируемого твердого тела. Наука, М. (1991).
[4] В.В. Болотин. Ресурс машин и конструкций. Машиностроение, М. (1990).
[5] В.А. Кузьменко. Новые схемы деформирования твердых тел. Наук. думка, Киев (1973).
[6] В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. Структурные уровни деформации твердых тел. Наука, Новосибирск (1985).
[7] Н.А. Конева, Э.В. Козлов. В сб.: Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Под ред. В.Е. Панина. Наука, Новосибирск (1990). С. 123.
[8] Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. Наука, Новосибирск (1995).
[9] Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, А. Хиката. Ультразвуковые методы исследования пластической деформации. Мир, М. (1969).
[10] Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. УФН **102**, *4*, 549 (1970).
[11] С.В. Кириков, В.В. Мишакин, В.А. Клюшников. ЖТФ **92**, *3*, 405 (2022).
[12] А.А. Хлыбов, А.Л. Углов, Д.А. Рябов. Физическая мезомеханика **26**, *2*, 106 (2023).
[13] В.Д. Гусев, А.А. Карабутов. Лазерная оптоакустика, Наука, М. (1991).
[14] Н.В. Вовненко, Б.А. Зимин, Ю.В. Судьенков, ЖТФ **81**, *3*, 93 (2011).
[15] J.F. Ney. Acta Metall. **1**, 153 (1953).
[16] Н. Винер. Интеграл Фурье и некоторые его приложения. Физматлит, М., (1963).
[17] А.В. Каштанов, И.В. Петров. ЖТФ **76**, *5*, 71 (2006).
[18] Ю.В. Судьенков. ФТТ **66**, *2*, 310 (2024).

Редактор Ю.Э. Китаев