



# ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

ISPMS  
SB RAS

П.В. Лаврентьева, С.А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

## Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования влияния пониженных температур на механические характеристики и акустические параметры акустической технички чистого алюминия при растяжении. Показано, что снижение температуры испытаний приводит к монотонному росту прочностных свойств и увеличению скорости распространения поверхностных акустических волн Рэлея. Впервые установлена корреляция между параметром поврежденности и относительным изменением скорости поверхностных акустических волн на разных стадиях деформационного упрочнения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов акустического контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур.

## Введение

Методы неразрушающего контроля играют ключевую роль в оценке состояния конструкций. Исследование распространения ультразвуковых волн в металлах важно для понимания поведения конструкционных материалов при термической и механической обработке [1-3]. В последние годы активно развиваются методы термо-акустоупругости, позволяющие по изменению скорости волн (включая волны Рэлея) при температурном воздействии оценивать нелинейные упругие постоянные материала. Однако, несмотря на имеющиеся данные по механическим свойствам и отдельно по акустическим характеристикам, остается недостаточно изученным вопрос о взаимосвязи неоднородности пластической деформации и изменения скорости поверхностных акустических волн непосредственно в процессе нагружения в широком диапазоне низких температур. В частности, отсутствуют систематические данные, связывающие стадии деформационного упрочнения алюминия с кинетикой акустического отклика при температурах от комнатной до температуры жидкого азота для разработки единых критериев диагностики широкого спектра технических объектов [2]. Целью настоящей работы является экспериментальное установление связи между стадийностью кривой пластического течения, изменением скорости распространения ультразвуковых волн и накоплением повреждаемости на примере технического алюминия (содержание Al – не менее 99,5 мас.%) с размером зерна ~ 40 мкм.

## Методы

Выбор материала исследований связан с тем, что микромеханизмы пластического течения (дислокационного скольжения) Al известны в литературе. Механические испытания плоских образцов проводились по схеме одноосного растяжения на испытательной машине Walter+Baï (Швейцария) в интервале температур 173-293 K со скоростью  $6,67 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Одновременно с регистрацией кривых нагружения производилась запись изменения скорости ультразвуковых волн автоциркуляционным методом, описанным в работе [4]. Скорость распространения рэлеевских волн определялась как отношение длины пути волны в образце ко времени задержки прихода сигнала на приемный преобразователь относительно излучающего. Относительное изменение плотности деформированных образцов  $\Delta\rho/\rho_0$  по сравнению с их исходным состоянием  $\rho_0$  определяли методом гидростатического взвешивания. Изменение плотности материала зависит от концентрации микропор/микротрещин и среднего объема пор. В данной работе параметр поврежденности  $\psi$  оценивали в виде отношения:

$$\psi = -\Delta\rho/\rho_0$$

где  $\Delta\rho$  - изменение плотности металла,  $\rho_0$  - исходная плотность.

## Результаты

Синхронная запись диаграмм растяжения  $\sigma(\epsilon)$  и измерений скорости рэлеевских акустических волн  $V_R$  позволяет получить зависимости скорости от величины общей деформации  $V_R(\epsilon)$  и действующего напряжения  $V_R(\sigma)$  (рис. 1 а). Как показано в [4], скорость распространения ультразвука существенно меняется при растяжении металлов и сплавов. Такие же изменения отражаются на характере кривой течения  $\sigma(\epsilon)$ , которая относится к диаграммам параболического типа, на которой фиксируются после упругопластического перехода стадии параболического деформационного упрочнения и предразрушения (рис. 1 а). Стадии параболического деформационного упрочнения, предразрушения и шейкообразования выявляются как по прямолинейным зависимостям в координатах напряжение течения  $(\sigma - \sigma_0)$ -деформация  $\epsilon^{1/2}$ , так и в координатах напряжение течения  $(\sigma - \sigma_0)$  - относительное изменение скорости распространения рэлеевских волн  $(\Delta V/V_0)^{1/2}$ , где  $\sigma_0$  - предел текучести,  $V_0$  - скорость в исходном недеформированном состоянии, а  $\Delta V = (V_0 - V_R)$  - разность скорости в исходном и деформируемом состоянии (рис. 1 б).

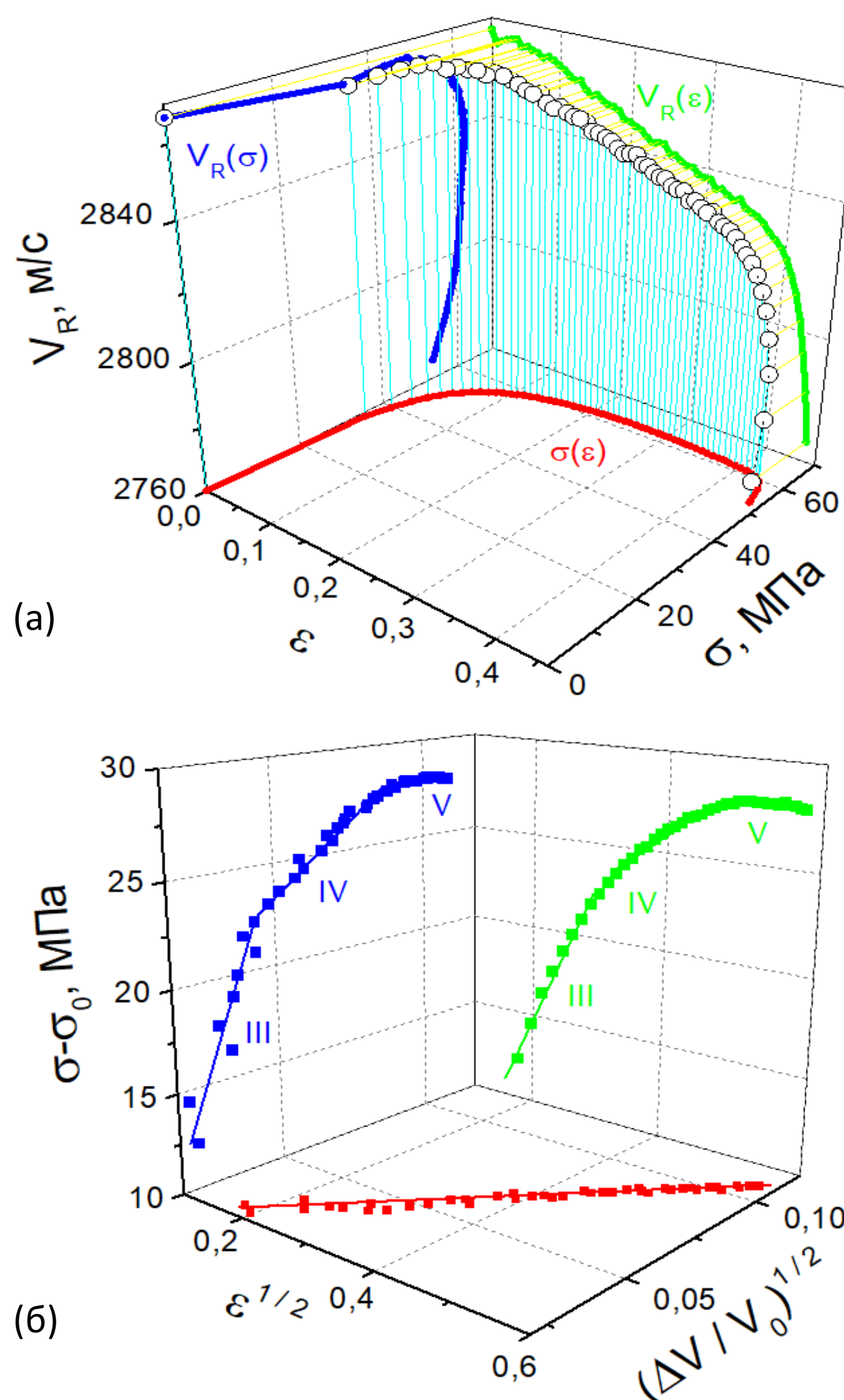


Рис.1. Изменение скорости распространения ультразвука от общей деформации и действующего напряжения (а); стадии деформационного упрочнения: III – параболическая стадия, IV – стадия предразрушения, V – развитие шейки (б) для  $T=293 \text{ K}$

Анализ развития микронесплошностей в процессе растяжения показал (рис. 2 а), что разуплотнение материала  $\Delta\rho/\rho$  возникает уже на ранних стадиях пластической деформации в исследуемом температурном интервале. Так как скорость распространения упругих волн в среде зависит от упругих модулей и плотности среды, то величину относительного изменения скорости распространения ультразвука  $\Delta V/V_0$  можно также выразить через параметр поврежденности  $\psi = \Delta\rho/\rho_0 \sim \Delta V/V_0$ , где  $V_0$  - скорость в исходном недеформированном состоянии, а  $\Delta V = (V_0 - V_R)$  - разность скорости в исходном и деформируемом состоянии (рис. 2 б).

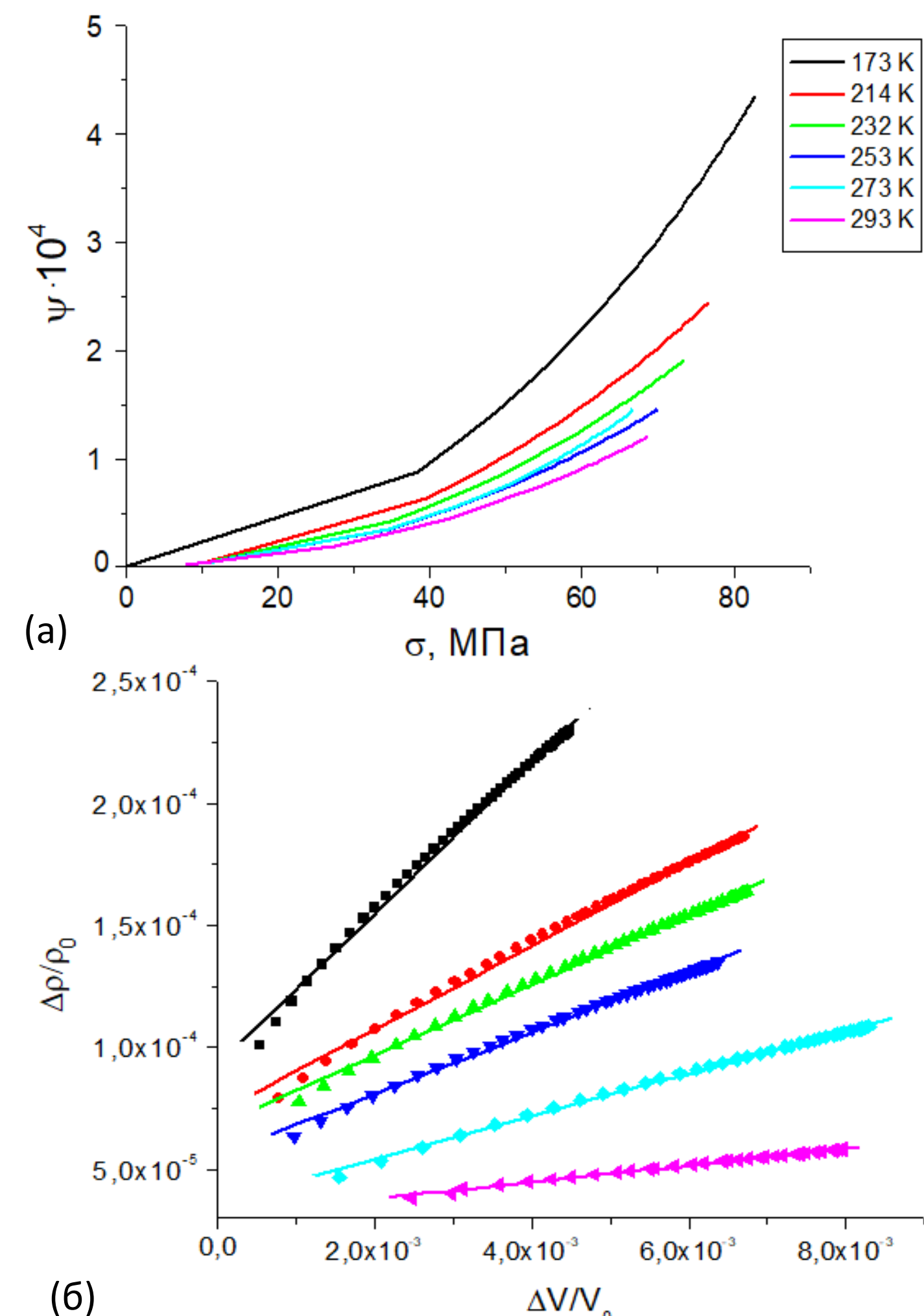


Рис.2. Зависимости параметра поврежденности от напряжений (а), корреляция поврежденности и относительного изменения скорости волн Рэлея(б) для разных температур

Согласно [4] скорость распространения ультразвуковых волн возрастает при уменьшении внутренних напряжений в материалах и уменьшается при их увеличении. Это явление связано с возникновением двойного акустического преломления в напряженных объемах и генерацией дефектов кристаллической решетки [2], приводящей к появлению дефекта упругих модулей. Таким образом, экспериментально наблюдаемый характер изменения скорости распространения рэлеевских акустических волн с ростом деформации (или напряжений) указывает на изменение состояния напряженных областей в деформируемом образце, связанных с формированием структурных фрагментов с разным уровнем внутренних напряжений в объеме образца.

## Заключение

- С ростом температуры испытаний увеличивается пластичность, уменьшается прочность и скорость распространения ультразвука.
- Зависимости скорости рэлеевских акустических волн от величины общей деформации и действующего напряжения являются многостадийными, и их характерные участки надежно разделяют деформационную кривую на отдельные стадии упрочнения.
- Установлена линейная корреляция между параметром поврежденности и относительным изменением скорости поверхностных акустических волн.
- Полученные данные имеют практическое значение для разработки методик акустического контроля напряженно-деформированного состояния и степени поврежденности металла при низких климатических температурах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2026-0006.

## Список источников

1. Zeng S., Zhu J. Thermo-acoustoelastic effect of Rayleigh wave: Theory and experimental verification // Ultrasonics. – 2023. –Vol. 131. – P. 106948.
2. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
3. Рохлин Л.Л. Акустические свойства легких сплавов. М.: Наука, 1974. — 140 с.
4. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.