

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ

А.В. Гончар<sup>1</sup>

imndt31@mts-nn.ru

В.В. Мишакин<sup>1,2</sup>К.В. Курашкин<sup>1</sup>В.А. Ключников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИПМ РАН — филиал ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН»,  
Нижний Новгород, Российская Федерация

<sup>2</sup> НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния пластической деформации на температурную зависимость скорости продольных упругих волн в алюминиевом сплаве АМг6. Показана высокая чувствительность температурной зависимости к пластической деформации и микроповрежденности. Разработан алгоритм для расчета изменения скорости продольных волн и относительного изменения модулей упругости в поликристаллических металлических сплавах с кубической симметрией решетки в зависимости от температуры и микроповрежденности, накопленной в результате пластического деформирования. Получено, что учет влияния пластического деформирования на температурную зависимость скорости упругих волн существенно снижает погрешности при акустической толщинометрии и локализации дефектов с помощью ультразвуковой дефектоскопии

### Ключевые слова

Ультразвуковой метод, алюминиевый сплав, пластическая деформация, отрицательная температура, скорость продольных волн

Поступила в редакцию 25.12.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

*Работа выполнена в НГТУ им. Р.Е. Алексеева при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект RFMEFI58017X0012)*

**Введение.** При проектировании конструкций необходимо учитывать влияние температуры на прочностные и упругие характеристики материалов [1–3]. Изменение модулей упругости в результате температурного воздействия также заметно влияет на скорости упругих волн и увеличивает погрешности при акустической толщинометрии и локализации дефектов с помощью ультразвуковой дефектоскопии.

Материалы конструкций при их изготовлении и эксплуатации могут подвергаться пластическим деформациям, что приводит к изменению их физических свойств, в том числе и упругих. В этом случае накопление микроповреждений в виде микропор и микротрещин ведет к изменению упругих модулей [4] и снижению ресурсных характеристик материала.

Вопрос о совместном влиянии температуры и пластического деформирования на модули упругости и скорости упругих волн до сих пор остается открытым.

*Цель работы* — исследование влияния температуры и поврежденности при пластическом деформировании на температурную зависимость скорости ультразвуковых волн в алюминиевом сплаве АМг6.

**Влияние температуры и поврежденности на модули упругости.** Для описания зависимости модуля Юнга  $E$ , модуля объемного сжатия  $K$  и модуля сдвига  $G$  от температуры  $T$  А. Беллом [5] была предложена эмпирическая формула, полученная на основе экспериментальных исследований более 500 металлов и сплавов:

$$\{E(T), K(T), (G(T))\} = \{E(0)K(0), G(0)\} \cdot 1,03(1 - T/(2T_{pl})), \quad (1)$$

где  $E(0)$ ,  $K(0)$ ,  $G(0)$  — значения модулей упругости при  $T \rightarrow 0$  К;  $T_{pl}$  — температура плавления материала,  $0,06 < T/T_{pl} < 0,57$ .

При известных значениях  $K(T_0)$  и  $G(T_0)$  при конкретной температуре  $T_0$ , исходя из выражения (1), можно получить простую линейную зависимость относительного изменения модулей упругости от температуры при постоянной температуре плавления для данного материала:

$$\frac{\{K(T), (G(T))\} - \{K(T_0), G(T_0)\}}{\{K(T_0), G(T_0)\}} = -\frac{T - T_0}{2T_{pl} - T_0} \sim (T - T_0). \quad (2)$$

В работе Ж. Леметра [4] показано, что изменение модуля Юнга линейно связано с повреждением материала:  $E = E_0(1 - D)$ , где  $D$  — характеристика поврежденности, определяемая как площадь трещин и пор на единицу площади сечения материала;  $E_0$  — модуль Юнга неповрежденного материала.

Влияние трещин на эффективные механические характеристики изотропного твердого тела рассмотрено в работе [6]. Согласно [6], изменение модулей упругости линейно связано с параметром поврежденности материала  $\nu$ :

$$E = E_0 \left( 1 - \frac{16}{45} (10 - 3\nu_0) \frac{1 - \nu_0^2}{2 - \nu_0} \nu \right);$$

$$K = K_0 \left( 1 - \frac{16}{9} \frac{1 - \nu_0^2}{1 - 2\nu_0} \nu \right);$$

$$\nu = \nu_0 \left( 1 - \frac{16}{15} (3 - \nu_0) \frac{1 - \nu_0^2}{2 - \nu_0} \nu \right);$$

$$\nu = nd^3.$$

Здесь  $K_0$ ,  $\nu_0$  — модуль объемного сжатия и коэффициент Пуассона неповрежденного материала (без трещин);  $n$  — концентрация трещин;  $d$  — величина, характеризующая размер трещин; поврежденность  $\nu$  является малым параметром.

Влияние пор на механические характеристики керамических материалов описано в работе [7], там же предложена формула для определения модуля Юнга:  $E(T) = E_0 (1 - \varphi)^n$ , где  $E_0$  — модуль Юнга материала без пор;  $\varphi$  — пористость (отношение общего объема пор к объему материала);  $n$  — параметр.

Зависимости модулей упругости различных керамических материалов от пористости и температуры собраны и обобщены в работе [8]. На основе экспериментальных результатов предложены выражения

$$E(T) = E_0 (1 - aT)(1 - \varphi)^n;$$

$$K(T) = K_0 (1 - bT)(1 - \varphi)^m.$$

Здесь  $E_0, K_0, a, b, n, m$  — параметры модели.

Данная модель пригодна для керамических материалов, обладающих значительной пористостью (до 90 %).

Для поликристаллических металлических сплавов, в которых вследствие накопления микропор и микротрещин изменение плотности не превышает 1...2 %, инженерная методика определения поправок к скорости упругих волн при наличии поврежденности и изменения температуры отсутствует. Необходимо разработать алгоритм для учета совместного влияния температуры и микроповрежденности на модули упругости и скорость упругих волн.

**Алгоритм учета совместного влияния температуры и микроповрежденности на модули упругости и скорость упругих волн.** Влияние поврежденности на температурную зависимость модулей можно объяснить влиянием микродефектов на осцилляторы Эйнштейна, частоты тепловых колебаний и энергия которых связаны с межатомным взаимодействием и температурой [9]. Изменение межатомного взаимодействия в результате появления дефектов кристаллической решетки приводит к изменению температурной зависимости модулей и теплоемкости металла.

Построение физической модели, начиная с квантово-механического уровня, для описания влияния микродефектов на температурные зависимости модулей представляет значительные трудности. Для создания алгоритма инженерного расчета влияния поврежденности на температурную зависимость модулей упругости и скорости упругих волн можно ограничиться феноменологическим подходом, позволяющим при данной поврежденности и температуре оценить их значения.

Для описания упругих свойств изотропного материала достаточно знать две упругие постоянные, например, объемный модуль и модуль сдвига. Объемный модуль  $K$  и модуль сдвига  $G$  поликристаллического твердого тела, состоящего из кубических кристаллитов (железо, алюминий, медь и другие металлы), определяются по методике Хилла [10]:

$$K = \frac{1}{3}(C_{11} + 2C_{12}); \quad (3)$$

$$G = \frac{1}{10}(C_{11} - C_{12} + 3C_{44}) + \frac{5C_{44}(C_{11} - C_{12})}{6(C_{11} - C_{12}) + 8C_{44}}, \quad (4)$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  — модули упругости кубического монокристалла.

Связь модулей с поврежденностью  $\psi$  и температурой  $T$  после разложения  $C_{ij}(T, \psi)$  в ряд Тейлора для функции двух переменных, ограничиваясь первым перекрестным членом, можно получить в виде

$$C_{ij}(T, \psi) = C_{ij}(T_0, 0)(1 + k_1(T - T_0) + k_2\psi + k_3\psi(T - T_0)). \quad (5)$$

Здесь  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  — коэффициенты, которые определяются экспериментальным путем.

При  $\psi = 0$  выражение (5) подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе [8] для значений температуры, далеких от экстремальных и сравнительно близко лежащих к комнатной температуре.

Подставляя выражение (5) в уравнения (3), (4) для относительного изменения модулей  $K$  и  $G$  ( $\psi = 0$ ), получаем выражение (2), вытекающее из формулы Белла.

Поврежденность  $\psi$  в такой модели является малым параметром. В настоящей работе определена поврежденность как разуплотнение материала вследствие увеличения концентрации микродефектов (микропор, микротрещин):

$$\psi = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \quad (6)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  — плотность неповрежденного и поврежденного материала.

Изменение упругих модулей отражается на скоростях распространения упругих волн. В частности, для скорости продольной волны  $V$ , распространяющейся перпендикулярно плоскости прокатки (ортотропный материал) в листовом металле, справедливо выражение [10]:

$$V = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G + \frac{32\sqrt{2}\pi^2}{35}CW_{400}}{\rho}}, \quad (7)$$

где  $W_{400}$  — коэффициент функции распределения ориентировок, характеризующий кристаллографическую текстуру материала;  $C = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$  — фактор анизотропии монокристалла. Коэффициент  $W_{400}$  не зависит от температуры и разуплотнения, но может изменяться, например, в результате пластического деформирования.

Модули упругости  $K$  и  $G$ , фактор  $C$  — функции температуры  $T$  и разуплотнения  $\psi$ . Учитывая выражения (3)–(5), получаем

$$\{K(T, \psi), G(T, \psi), (C(T, \psi))\} = \{K(T_0, 0)G(T_0, 0), C(T_0, 0)\} \times \\ \times (1 + k_1(T - T_0) + k_2\psi + k_3\psi(T - T_0)). \quad (8)$$

Плотность  $\rho$  также является функцией параметров  $T$ ,  $\psi$  и определяется по выражению

$$\rho = \frac{\rho_0 (1 - \psi)}{1 + 3\alpha (T - T_0)}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного теплового расширения, который принимается постоянной скалярной величиной.

Исходя из уравнения (7), скорость распространения продольной волны зависит от плотности материала, упругих модулей, зависящих, в свою очередь, от температуры и разуплотнения, а также от коэффициента функции распределения ориентировок  $W_{400}$ . Разуплотнение материала уменьшает скорость распространения упругих волн. Изменение текстуры может как увеличить, так и уменьшить скорость [10]. Влияние механических напряжений и фазового состава в рамках рассматриваемой модели не учитывается.

Из выражений (3)–(9) получим

$$\frac{\Delta K}{K_0} = \frac{\Delta G}{G_0} = \frac{C_{ij}(T, \psi) - C_{ij}(T_0, \psi)}{C_{ij}(T_0, \psi)} = \frac{V^2(T, \psi)}{(1 + 3\alpha(T - T_0))V^2(T_0, \psi)} - 1. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что на относительное изменение модулей кристаллографическая текстура не влияет. Относительное изменение определяется с помощью измерения скорости упругих волн и связано с поврежденностью и температурой.

С учетом выражения (10) скорость продольных волн при изменении температуры и поврежденности определяется как

$$V(T, \psi) = V(T_0, \psi) \left\{ (1 + 3\alpha(T - T_0)) \left( 1 + \frac{k_1 + k_3\psi}{1 + k_2\psi} (T - T_0) \right) \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) находим поврежденность

$$\psi \approx \frac{k_1 - \frac{2}{V(T_0, \psi)} \frac{\partial V(T, \psi)}{\partial T} + 3\alpha}{\left[ \frac{2}{V(T_0, \psi)} \frac{\partial V(T, \psi)}{\partial T} - 3\alpha \right] k_2 - k_3}.$$

**Методика эксперимента.** Для проверки применимости предложенного алгоритма были проведены экспериментальные исследования влияния температуры и пластической деформации на скорость распространения продольной упругой волны в алюминиевом сплаве АМг6.

Плоский образец прямоугольного сечения толщиной 6 мм помещался в камеру, в которой происходило его медленное охлаждение с температуры 293 до 210 К. На образец устанавливался пьезоэлектрический преобразователь *V110 Panametrics-NDT* (прямой, совмещенный, частота 5 МГц, диаметр пьезоэлемента 6 мм). Использовался импульсный эхо-метод, регистрировались амплитудно-временные диаграммы, соответствующие текущей температуре. Для обеспечения ввода упругих волн в материал поверхность в месте установки преобразователя шлифовалась и обезжиривалась спиртом. В качестве контактной жидкости применялся спирт. Для генерации электрических импульсов,

возбуждающих пьезоэлектрический преобразователь, применялся ультразвуковой дефектоскоп А1212 «Мастер». Для получения временной развертки сигналов от пьезоэлектрического преобразователя использовались цифровой осциллограф ЛА-н10USB и приложение *ADCLab*. Разрешение развертки по времени 10 нс. Полученная временная развертка сохранялась в цифровом виде для последующей обработки в программе *Mathcad* для определения времени распространения упругих волн.

Время распространения упругих волн измерялось между синфазными точками полупериодов максимальной амплитуды первого и второго отраженных импульсов. Относительная погрешность измерения времени не превышала 0,03 %.

Скорость распространения продольной волны рассчитывалась по формуле  $V = 2h/t$ , где  $h$  — толщина образца;  $t$  — измеряемое время распространения упругих волн. Измерение толщины проводилось микрометром. Погрешность определения скорости не превышала 5 м/с.

После ультразвуковых исследований проводилось одноосное растяжение на испытательной машине *Tinius Olsen H100KU* при температуре 293 К. Ультразвуковые исследования при разных значениях температуры повторялись при значениях пластической деформации 16 и 25 %.

Плотность материала определялась при температуре 293 К методом гидровзвешивания с помощью лабораторных весов АВ60-01 производства ООО «ОКБ «Веста». Погрешность измерения плотности не превышала 4 кг/м<sup>3</sup>.

Разуплотнение рассчитывалось по формуле (9). При деформации  $\varepsilon = 25$  % было получено значение  $\psi = 0,91$  %, при деформации  $\varepsilon = 16$  % —  $\psi = 0,43$  %. Абсолютная погрешность определения разуплотнения составила 0,14 %.

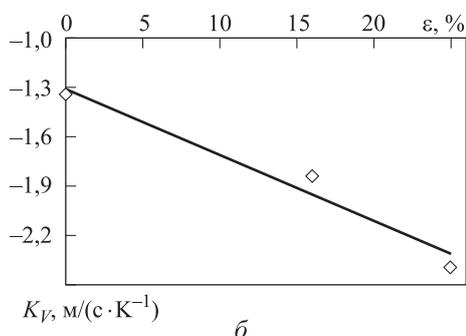
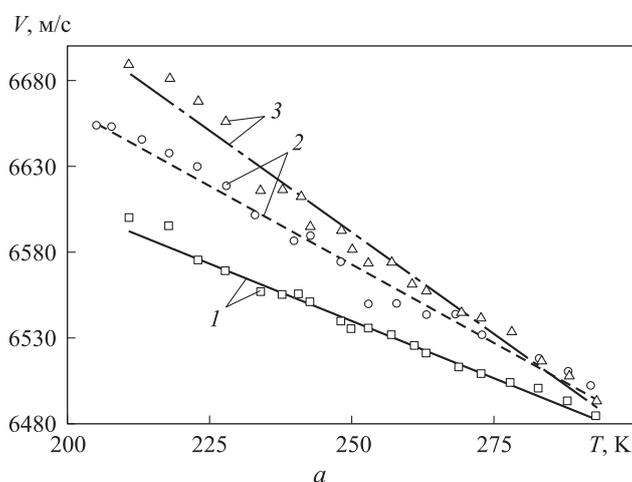
Значение коэффициента линейного теплового расширения для сплава АМг6 принято равным  $2,47 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  [11].

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** В результате экспериментальных исследований была получена зависимость скорости распространения продольных волн от температуры при значениях пластической деформации 0, 16 и 25 % (рисунок, а).

В исследованном диапазоне значений температуры скорость распространения, как и следовало ожидать, изменяется по линейному закону, при этом чем больше пластическая деформация и, соответственно поврежденность, тем больше угол наклона прямой.

С учетом минимального среднеквадратического отклонения экспериментальных данных от расчетных значений скорости  $V(T)$  при значениях деформации 0 и 25 %,  $\psi = 0$  и 0,91 % получены следующие значения коэффициентов,  $\text{K}^{-1}$ :  $k_1 = -0,00049$ ;  $k_2 = -3,8$ ;  $k_3 = -0,033$ .

В целях верификации предложенного алгоритма с использованием выражения (11) был построен график расчетной зависимости  $V(T)$  для  $\psi = 0,45$  % (см. рисунок, а). Коэффициент корреляции экспериментальных и расчетных данных составляет 0,95.



Экспериментальная зависимость скорости упругой волны в алюминиевом сплаве от температуры (а) при  $\varepsilon = 0$  (1), 16 (2), 25 % (3), зависимость температурного коэффициента скорости от пластической деформации (б)

Зависимость температурного коэффициента скорости

$$K_V = (V(T, \psi) - V(T_0, \psi)) / (T - T_0)$$

от пластической деформации  $\varepsilon$  приведена на рисунке, б. Температурный коэффициент скорости при деформировании сплава на 25 % изменился более чем в 1,5 раза.

Отсутствие коррекции скорости на температурные изменения и микроразрушенность могут привести к возникновению существенных погрешностей при ультразвуковой толщинометрии и определении мест расположения дефектов при ультразвуковой дефектоскопии. Например, учитывая приведенные экспериментальные данные, максимальная погрешность измерения алюминиевой плиты толщиной 50 мм составит 1,6 мм, что в некоторых случаях является неприемлемым результатом.

Высокая чувствительность температурного коэффициента скорости к пластической деформации позволяет использовать этот параметр в качестве диагностического для оценки состояния материалов конструкций, подвергаемых нагружению.

**Выводы.** В результате экспериментальных исследований показано, что на температурную зависимость скорости упругих волн существенное влияние ока-

зывает пластическая деформация. Исследования показали высокую чувствительность температурного коэффициента скорости ультразвука  $K_V$  к изменению микрповрежденности алюминиевого сплава АМг6. При деформации в пределах 0...25 % температурный коэффициент изменяется более чем в 1,5 раза. Разуплотнение материала в результате накопления микрповрежденности составило 0,95 %.

Разработан алгоритм, связывающий температурные изменения скорости упругой волны с микрповрежденностью. Результаты расчетов в рамках разработанного алгоритма хорошо согласуются с экспериментальными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.
2. Максимович Г.Г., ред. Прочность деформированных металлов. Киев: Наукова Думка, 1976. 274 с.
3. Kobayashi T. Strength and toughness of materials. Springer, 2004. 275 p.
4. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов // Теор. основы инж. расчетов. 1985. Т. 107. № 1. С. 124–134.
5. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2 ч. М.: Наука, 1984. Ч. 1. 600 с.; Ч. 2. С. 432.
6. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1973. № 4. С. 149–158.
7. Wagh A.S., Poeppel R.B., Singh J.P. Open pore description of mechanical properties of ceramics // J. Mater. Sci. 1991. Vol. 26. Iss. 14. P. 3862–3868. DOI: 10.1007/BF01184983
8. Munro R.G. Analytical representations of elastic moduli data with simultaneous dependence on temperature and porosity // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2004. Vol. 109. No. 5. P. 497–503. DOI: 10.6028/jres.109.036
9. Бадамишин И.Х. От четырех к одному. Силы внутриаомного взаимодействия и прочность материалов. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. 134 с.
10. Allen D.R., Sayers C.M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique // Ultrasonics. 1984. Vol. 22. Iss. 4. P. 179–188. DOI: 10.1016/0041-624X(84)90034-9
11. Промышленные алюминиевые сплавы / М.Б. Альтман, В.И. Елагин, Ф.И. Квасов, Б.И. Матвеев, И.Н. Фридляндер, ред. М.: Металлургия, 1984. 528 с.

**Гончар Александр Викторович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций ИПМ РАН — филиала ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН» (Российская Федерация, 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85).

**Мишакин Василий Васильевич** — д-р техн. наук, заведующий лабораторией неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций ИПМ РАН — филиала ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН» (Российская Федерация, 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85); сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Российская Федерация, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24).

**Курашкин Константин Владимирович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций ИПМ РАН — филиала ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН» (Российская Федерация, 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85).

**Ключников Вячеслав Александрович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций ИПМ РАН — филиала ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН» (Российская Федерация, 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85).

**Просьба сослаться на эту статью следующим образом:**

Гончар А.В., Мишакин В.В., Курашкин К.В., Ключников В.А. Влияние пластического деформирования на температурную зависимость скорости продольных упругих волн в поликристаллическом алюминиевом сплаве // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 6. С. 64–74. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-64-74

**EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON LONGITUDINAL ELASTIC WAVE VELOCITY IN A POLYCRYSTALLINE ALUMINUM ALLOY AS A FUNCTION OF TEMPERATURE**

A.V. Gonchar<sup>1</sup>

imndt31@mts-nn.ru

V.V. Mishakin<sup>1,2</sup>

K.V. Kurashkin<sup>1</sup>

V.A. Klyushnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, branch of Federal Research Centre Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Abstract**

The paper presents experimental investigation results concerning the effect of plastic strain on longitudinal elastic wave velocity as a function of temperature in the AMg6 Al–Mg alloy. We show that the temperature function is highly sensitive to plastic strain and microdamage. We developed an algorithm for computing the variation in the longitudinal wave velocity and the relative change of the elastic moduli in polycrystalline metallic alloys featuring a cubic crystal system depending on the temperature and microdamage accumulated during plastic deformation. We found out that accounting for the effect of plastic deformation on longitudinal elastic wave velocity as a function of temperature considerably reduces error in ultrasonic thickness gauging and fault localisation via ultrasonic testing

**Keywords**

*Ultrasonic method, aluminum alloy, plastic strain, sub-zero temperature, longitudinal wave velocity*

Received 25.12.2017

© BMSTU, 2018

*The study was performed in the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev and supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. RFMEFI58017X0012)*

## REFERENCES

- [1] Callins J.A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention. John Wiley & Sons, 1993. 654 p.
- [2] Maksimovich G.G., ed. Prochnost' deformirovannykh metallov [Strength of deformed metals]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1976. 274 p.
- [3] Kobayashi T. Strength and toughness of materials. Springer, 2004. 275 p.
- [4] Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *J. Eng. Mat. Tech.*, 1985, vol. 107, no. 1, pp. 83–89.
- [5] Bell J.F. Mechanics of solids Vol. 1: The Experimental foundations of solid mechanics. *Encyclopedia of Physics*. Springer, 1973. 813 p.
- [6] Salganik R.L. Mechanics of bodies with large number of cracks. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1973, no. 4, pp. 149–158 (in Russ.).
- [7] Wagh A.S., Poeppel R.B., Singh J.P. Open pore description of mechanical properties of ceramics. *J. Mater. Sci.*, 1991, vol. 26, iss. 14, pp. 3862–3868. DOI: 10.1007/BF01184983
- [8] Munro R.G. Analytical representations of elastic moduli data with simultaneous dependence on temperature and porosity. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2004, vol. 109, no. 5, pp. 497–503. DOI: 10.6028/jres.109.036
- [9] Badamshin I.Kh. Ot chetyrekh k odnomu. Sily vnutriatomnogo vzaimodeystviya i prochnost' materialov [From four to one. Intraatomic interaction forces and strength of materials]. Moscow, Izdatel'skiy dom Akademii Estestvoznaniya Publ., 2016. 134 p.
- [10] Allen D.R., Sayers C.M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique. *Ultrasonics*, 1984, vol. 22, iss. 4, pp. 179–188. DOI: 10.1016/0041-624X(84)90034-9
- [11] Al'tman M.B., Elagin V.I., Kvasov F.I., Matveev B.I., Fridlyander I.N, ed. Promyshlennyye alyuminievyye splavy [Industrial aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 528 p.

**Gonchar A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Laboratory of Nondestructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, branch of Federal Research Centre Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Belinskogo ul. 85, Nizhny Novgorod, 603024 Russian Federation).

**Mishakin V.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of Laboratory of Nondestructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, branch of Federal Research Centre Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Belinskogo ul. 85, Nizhny Novgorod, 603024 Russian Federation); research assistant, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Minina ul. 24, Nizhny Novgorod, 603155 Russian Federation).

**Kurashkin K.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Laboratory of Nondestructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, branch of Federal Research Centre Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Belinskogo ul. 85, Nizhny Novgorod, 603024 Russian Federation).

**Klyushnikov V.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Laboratory of Nondestructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, branch of Federal Research Centre Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Belinskogo ul. 85, Nizhny Novgorod, 603024 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Gonchar A.V., Mishakin V.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A. Effect of Plastic Deformation on Longitudinal Elastic Wave Velocity in a Polycrystalline Aluminum Alloy as a Function of Temperature. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 6, pp. 64–74 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-64-74



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие авторов  
**И.В. Блудовой, Э.Н. Беляновой**

**«Начала топологии в примерах  
и задачах»**

Рассмотрены различные классические примеры топологических и метрических пространств и непрерывных отображений, сформулированы все необходимые топологические определения и утверждения. Читателям предложено самостоятельно доказать некоторые свойства указанных выше топологических и метрических пространств, а в случае недостаточной успешности попыток получить эти доказательства — узнать подробные решения предложенных задач.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru