

05.1;06.5;10

Особенности поведения лазерных ультразвуковых сигналов вблизи отверстия в дюралюминии при воздействии двух несоосных механических напряжений

© А.Л. Глазов, К.Л. Муратиков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: glazov.holo@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 сентября 2021 г.

В окончательной редакции 6 апреля 2022 г.

Принято к публикации 7 апреля 2022 г.

Исследовано влияние несоосных механических напряжений на возбуждение ультразвуковых колебаний сфокусированным лазерным излучением вблизи отверстий малого диаметра в сплаве алюминия. Проведен анализ поведения сигнала при различных взаимных углах и величинах двух одноосных напряжений. Показано, что при определенных углах под действием механических напряжений не только происходит изменение контраста лазерных ультразвуковых изображений, но и может происходить их поворот как целого относительно центра отверстия. Также продемонстрирована возможность исчезновения линейной составляющей лазерных ультразвуковых сигналов при определенных характеристиках напряжений и появления нелинейной составляющей.

Ключевые слова: диагностика, неразрушающий контроль, механические напряжения, лазерный ультразвук.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52604.19013

В последнее время лазерные ультразвуковые (ЛУ) методы продемонстрировали свою эффективность при получении информации о механических и термоупругих свойствах современных материалов, твердотельных структур и тонких пленок [1,2]. Проводятся активные исследования применения ЛУ-методов для диагностики и неразрушающего контроля изделий, производимых с помощью новых аддитивных технологий и 3D-печати [3,4]. Большой интерес представляет также изучение вопросов поведения ЛУ-сигналов от материалов различной природы и влияния на их характеристики дефектов различных типов. При решении подобных задач большим достоинством ЛУ-методов является их неразрушающий характер и возможность контролировать не только поверхностные характеристики материалов, но и характеристики подповерхностных слоев.

Одной из важнейших характеристик изделий, определяющих их работоспособность, является уровень присутствующих в них механических напряжений [5]. Необходимость их контроля объясняет значительные усилия, направляемые на исследование перспективности использования ЛУ-методов для решения подобных задач. Чувствительность ЛУ-методов к механическим напряжениям продемонстрирована как для керамик [6,7], так и для металлов [8,9]. В этих работах на модельных образцах установлена связь ЛУ-сигналов с присутствующими в них напряжениями.

Выполненные в работах [10,11] модельные эксперименты по анализу поведения ЛУ-сигналов вблизи отверстия в напряженных металлах позволили определить не только качественные, но и количественные характеристики связи ЛУ-сигналов с напряжениями для ряда

металлов. Следует отметить, что в указанных работах исследования ограничивались случаем совпадения направлений действия внешней нагрузки и одноосных остаточных напряжений. В такой геометрии влияние соосных механических напряжений сводится к простому изменению контраста ЛУ-изображений области вокруг отверстия. Целью настоящей работы является исследование более сложной ситуации несовпадения указанных направлений, в которой возможно появление принципиально новых особенностей поведения ЛУ-изображений.

В соответствии с [12] в результате действия одноосной деформации вокруг отверстия формируется поле напряжений, характеризующееся следующим распределением первого инварианта тензора напряжений в полярных координатах (r, φ) с началом координат в центре отверстия:

$$\sigma = \sigma_0(1 - 2a^2 \cos(2\varphi - 2\varphi_0)/r^2), \quad (1)$$

где σ_0 — напряжение вдали от отверстия, a — радиус отверстия, φ_0 — угол между одноосной деформацией вдали от отверстия и направлением $\varphi = 0$.

Если под углом α приложить внешнюю нагрузку P , то дополнительное напряжение в образце также будет определяться выражением (1) с заменой φ_0 на α и σ_0 на P . Тогда, согласно принципу суперпозиции, суммарное напряжение вокруг отверстия будет определяться выражением

$$\sigma = P + \sigma_0 - 2a^2 \Sigma \cos(2\varphi - 2\beta)/r^2, \quad (2)$$

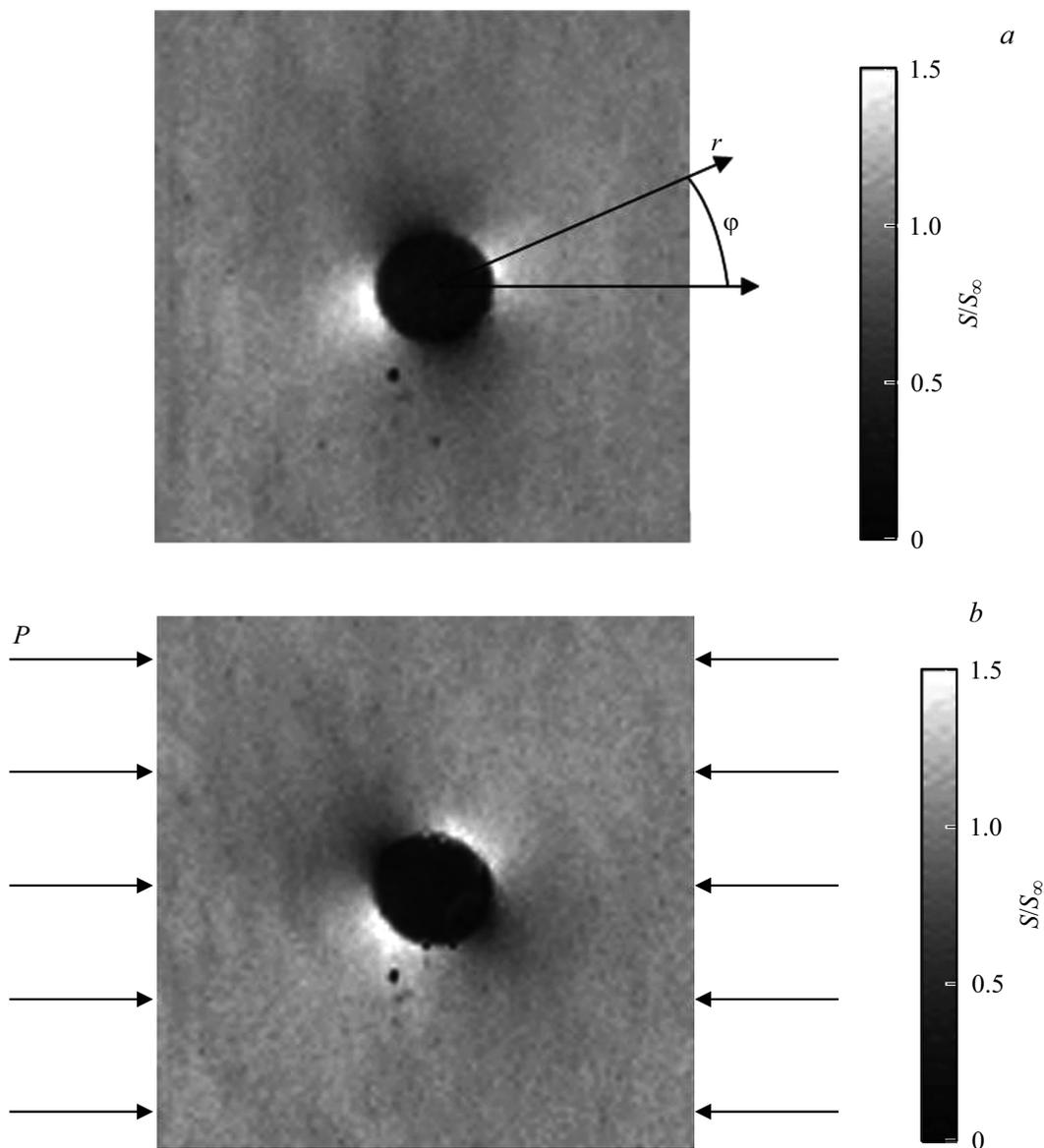


Рис. 1. ЛУ-изображения поверхности образца из дюралюминия. *a* — образец в начальном состоянии, *b* — образец под сжимающей одноосной нагрузкой $P = 20$ МПа (направление приложения нагрузки обозначено стрелками). Размер изображений 1×1 мм.

где

$$\Sigma = \sqrt{P^2 + \sigma_0^2 + 2P\sigma_0 \cos(2\alpha - 2\varphi_0)}, \quad (3)$$

$$\beta = 0.5 \arctan \frac{P \sin(2\alpha) + \sigma_0 \sin(2\varphi_0)}{P \cos(2\alpha) + \sigma_0 \cos(2\varphi_0)}. \quad (4)$$

В работах [10,11] исследовался случай линейной зависимости ЛУ-сигналов от механических напряжений. В соответствии с полученными результатами, используя равенство (2), ЛУ-сигнал можно представить в виде

$$S = S_0(1 + b\sigma) = S_0(1 + b(P + \sigma_0) - 2ba^2\Sigma \cos(2\varphi - 2\beta)/r^2), \quad (5)$$

где S_0 — сигнал от образца в ненапряженном состоянии, b — некоторый коэффициент пропорциональности,

определяемый типом материала, σ — первый инвариант тензора напряжений.

Из экспериментальных данных по поведению ЛУ-изображений вблизи отверстия можно определить угол φ_0 при $P = 0$ и угол β при действии нагрузки. Тогда, используя выражение (4) и зная внешнюю нагрузку P , можно определить напряжение в исходном состоянии

$$\sigma_0 = P \sin(2\alpha - 2\beta) / \sin(2\beta - 2\varphi_0). \quad (6)$$

Из формулы (5) можно также найти коэффициент b для данного материала.

Анализ выражения (5) показывает, что при несовпадении направлений внешнего и внутреннего напряжений появляются принципиально новые особенности

поведения ЛУ-изображений. Во-первых, присутствие механических напряжений в образце может приводить не только к изменению контраста ЛУ-изображений, но и к их повороту относительно центра отверстия. Во-вторых, в условиях низкого контраста линейных ЛУ-изображений, соответствующих нагрузкам, при которых величина Σ близка к нулю, может регистрироваться нелинейное ЛУ-изображение, имеющее другую структуру, а именно не по два максимума и два минимума в угловом распределении, а по четыре. Далее мы продемонстрируем представленные теоретические выводы на экспериментальных данных по поведению ЛУ-сигналов, полученных на образцах из широко используемого на практике алюминиевого сплава Д16. Данный сплав был выбран, так как для него мы уже показали зависимость ЛУ-сигнала от остаточных напряжений [10,11]. В целом полученные выводы являются достаточно общими вследствие выявленной ранее связи ЛУ-сигнала с внутренними напряжениями и решения задачи теории упругости, не связанной с конкретным материалом.

Образец представлял собой прямоугольный параллелепипед размером $8.8 \times 7.1 \times 4.0$ mm. По центру большой грани было просверлено несквозное отверстие с фактическим диаметром на поверхности 0.11 ± 0.01 mm. Эксперимент состоял в облучении поверхности образцов сфокусированным лазерным излучением с длиной волны 532 nm, промодулированным по амплитуде с частотой 101.4 kHz, и регистрации термоупруго возбуждаемых акустических колебаний образца. Схема экспериментальной установки приведена в [13]. Средняя мощность излучения, падающего на поверхность образца, составляла 40 mW, а диаметр пятна на поверхности — 15 μ m. При этом средняя температура в центре пятна оценивается на уровне 55°C. Акустические колебания регистрировались с обратной стороны образца с помощью прижатого через акустический гель пьезоэлектрического датчика с близкой резонансной частотой. Электрический сигнал, пропорциональный скорости смещения тыльной поверхности образца, регистрировался при сканировании поверхности вокруг отверстия в двух перпендикулярных направлениях. Во время сканирования к образцам прикладывалась одноосная сжимающая нагрузка. ЛУ-изображения образцов в исходном состоянии и под нагрузкой 20 ± 2 МПа, полученные таким способом, представлены на рис. 1. Изображения нормированы на средний сигнал вдали от отверстия S_∞ . На рис. 1, a образец в начальном состоянии демонстрирует характерное двусесимметричное распределение сигнала с осями, расположенными под углами -1.31 ± 0.01 rad и $\pi/2 - 1.31 \pm 0.01$ rad. При приложении нагрузки 20 МПа (рис. 1, b) оси симметрии поворачиваются на угол $+0.57$ rad. Таким образом, в соответствии с введенными выше обозначениями $\varphi_0 = -1.31 \pm 0.01$ rad, $\beta = -0.77 \pm 0.01$ rad. Указанные погрешности являются стандартными отклонениями при аппроксимации распределения сигнала по формуле (5). По формуле (6) определяем $\sigma_0 = -20 \pm 3$ МПа в предпо-

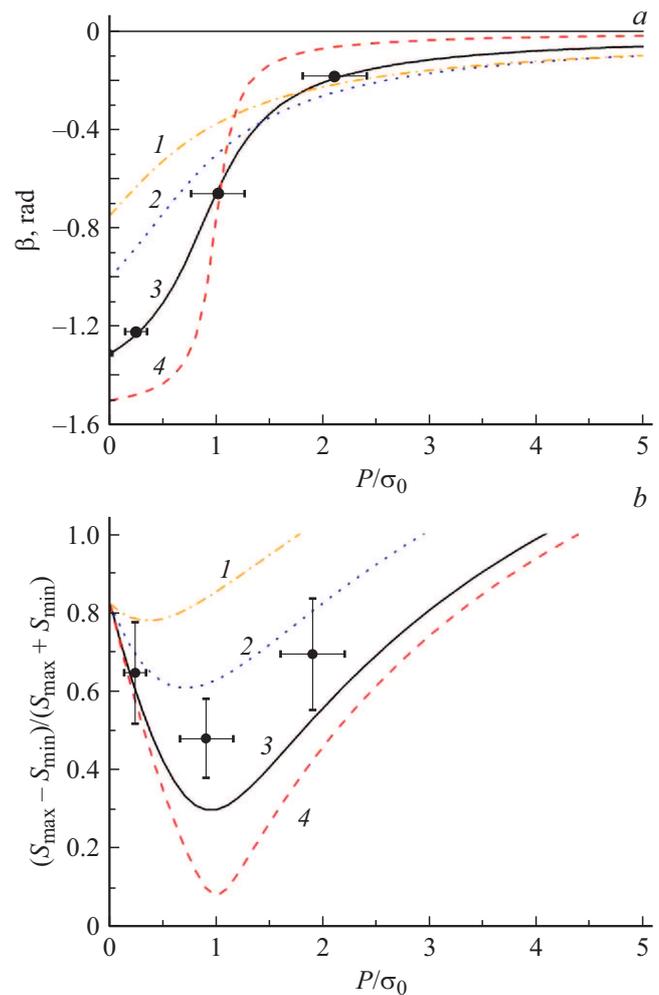


Рис. 2. *a* — зависимость угла оси симметрии распределения сигнала β , рассчитанного по формуле (4), от отношения P/σ_0 при различных начальных углах φ_0 . *b* — контрастность изменения сигнала $(S_{\max} - S_{\min})/(S_{\max} + S_{\min})$, вычисленная с использованием формулы (5) при $b\sigma_0 = 0.7$. На обоих фрагментах кривые соответствуют углам $\varphi_0 = -0.75$ (1), -1.0 (2), -1.31 (3) и -1.5 rad (4). Точки обозначают соответствующие величины, найденные при аппроксимациях экспериментальных ЛУ-изображений.

ложении $\alpha = 0$. Нами были получены ЛУ-сигналы также при других величинах внешней нагрузки. Подгонка одновременно по четырем наборам сигналов при $P = 0, 5, 20$ и 41 МПа дает такое же значение величины напряжения с учетом погрешности. Следует отметить, что в общем случае найденная величина представляет собой разность двух главных компонент тензора напряжений, т.е. это может быть или сжимающее напряжение вдоль оси под углом $\varphi = -1.31$ rad, или растягивающее напряжение такой же величины вдоль перпендикулярной оси, либо их разность. На рис. 2, a показана зависимость угла оси симметрии распределения сигнала β , рассчитанного по формуле (4), от отношения P/σ_0 при различных углах φ_0 , в том числе и при -1.31 rad. Точками отме-

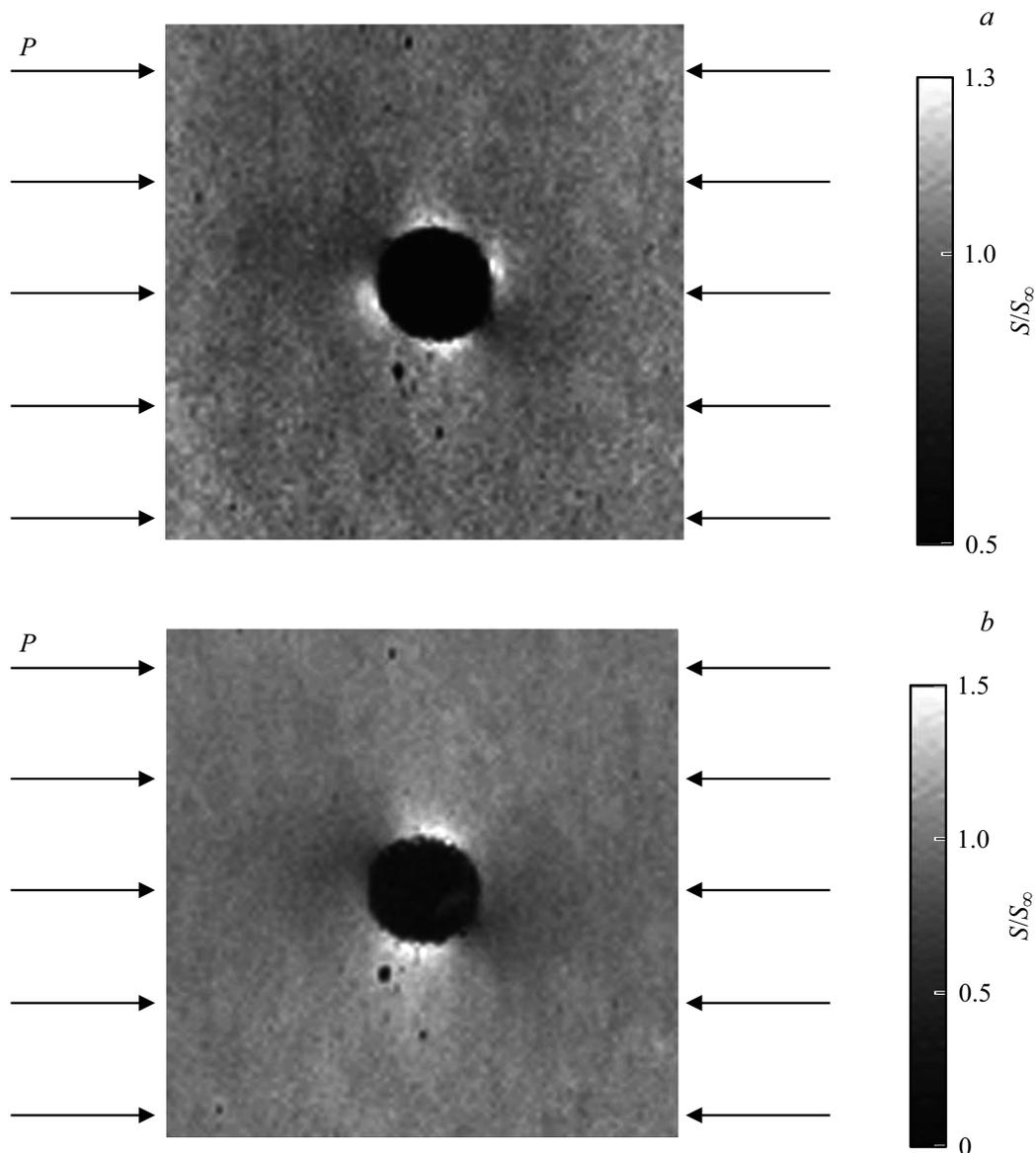


Рис. 3. ЛУ-изображения поверхности образца из дюралюминия. *a* — образец под сжимающей одноосной нагрузкой 28 МПа, *b* — образец под сжимающей одноосной нагрузкой 41 МПа. Размер изображений 1×1 мм.

ченны экспериментальные данные с учетом найденной величины σ_0 . Видно, что максимальная чувствительность при определении исходного напряжения по углу поворота изображения имеет место в области $P \approx \sigma_0$. При больших нагрузках ось симметрии ЛУ-изображения будет близка к направлению действия внешней нагрузки ($\beta \approx \alpha$).

Рассмотрим теперь поведение амплитуды ЛУ-сигнала вокруг отверстия в зависимости от внешней нагрузки. На рис. 2, *b* показана контрастность изменения сигнала $(S_{\max} - S_{\min}) / (S_{\max} + S_{\min})$ в зависимости от отношения P / σ_0 , рассчитанная при тех же углах φ_0 и $b\sigma_0 = 0.7$. Здесь S_{\max} и S_{\min} — максимальное и минимальное значения амплитуды сигнала около края отверстия. Точки на рисунке соответствуют амплитудам сигналов,

полученных при аппроксимации изображений по формуле (5). Графики имеют минимум в области $P \approx \sigma_0$, т.е. распределение сигнала должно стать более равномерным. Однако при приложении указанной нагрузки на ЛУ-изображении появляется угловое распределение сигнала, соответствующее $\cos(4\varphi)$. Пример такого изображения при $P = 28$ МПа представлен на рис. 3, *a*. Это означает, что при исчезновении линейного члена проявляется квадратичная зависимость от напряжения [11], приводящая к увеличению сигнала как при сжимающих, так и при растягивающих напряжениях. Важно, что при дальнейшем увеличении нагрузки линейная компонента опять растет, как следует из рис. 2, *b*, и изображение принимает вид, показанный на рис. 3, *b* для нагрузки 41 МПа. Одна из осей симметрии уже становится

близка к направлению действия внешней нагрузки, и дальнейшего поворота изображения не происходит. В общем случае присутствие нелинейной составляющей в ЛУ-изображениях может быть обнаружено при их дополнительной числовой обработке, например при сравнении аппроксимаций двумерного распределения ЛУ-сигналов линейной и квадратичной функциями [11].

В заключение следует подчеркнуть, что представленное поведение амплитуды ЛУ-сигналов позволяет осуществить оценку остаточных напряжений, измеряя только углы главных осей тензора деформаций, соответствующие положениям максимумов и минимумов регистрируемых сигналов. В работе также впервые экспериментально продемонстрирована нелинейная зависимость возбуждаемых ЛУ-колебаний от механических напряжений.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0040-2019-0019).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Setiawan, G.B. Suparta, M. Mitrayama, W. Nugroho, *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inform. Technol.*, **7** (6), 2189 (2017). DOI: 10.18517/ijaseit.7.6.2816
- [2] D.D. Markushev, J. Ordonez-Miranda, M.D. Rabasović, M. Chirtoc, D.M. Todorović, S.E. Bialkowski, D. Korte, M. Franko, *Eur. Phys. J. Plus.*, **132** (1), 33 (2017). DOI: 10.1140/epjp/i2017-11307-2
- [3] C. Millon, A. Vanhoye, A.F. Obaton, J.D. Penot, *Weld. World*, **62** (3), 653 (2018). DOI: 10.1007/s40194-018-0567-9
- [4] Y. Zhan, H. Xu, W. Du, C. Liu, *Ultrasonics*, **115**, 106466 (2021). DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106466
- [5] И.А. Биргер, *Остаточные напряжения* (ЛЕНАНД, М., 2015).
- [6] K.L. Muratikov, A.L. Glazov, D.N. Rose, J.E. Dumar, *J. Appl. Phys.*, **88** (5), 2948 (2000). DOI: 10.1063/1.1287526
- [7] А.Л. Глазов, К.Л. Муратиков, *Письма в ЖТФ*, **47** (12), 42 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.12.51067.18740 [A.L. Glazov, K.L. Muratikov, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 605 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021060225].
- [8] A.Yu. Devichenskii, A.M. Lomonosov, S.E. Zharinov, V.G. Mikhalevich, M.L. Lyamshev, T.O. Ivanova, N.S. Merkulova, *Acoust. Phys.*, **55** (1), 61 (2009). DOI: 10.1134/S1063771009010060
- [9] N.B. Podymova, I.E. Kalashnikov, L.K. Bolotova, L.I. Kobeleva, *Ultrasonics*, **108**, 106235 (2020). DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106235
- [10] А.Л. Глазов, К.Л. Муратиков, *Письма в ЖТФ*, **45** (17), 51 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.17.48226.17892 [A.L. Glazov, K.L. Muratikov, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (9), 902 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019090049].
- [11] А.Л. Глазов, Н.Ф. Морозов, К.Л. Муратиков, *Письма в ЖТФ*, **46** (4), 22 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49045.18100 [A.L. Glazov, N.F. Morozov, K.L. Muratikov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (2), 171 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020200].
- [12] S. Timoshenko, J.N. Goodier, *Theory of elasticity* (McGraw–Hill, N.Y., 1951), p. 78.
- [13] A.L. Glazov, K.L. Muratikov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697**, 012186 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012186