

05

Анализ напряжений, вносимых малыми круглыми отверстиями в образцах из нержавеющей стали, лазерным ультразвуковым методом

© А.Л. Глазов, А.Г. Оболенсков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: glazov.holo@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 июня 2026 г.

В окончательной редакции 11 августа 2026 г.

Принято к публикации 11 августа 2026 г.

Методом лазерной ультразвуковой микроскопии исследованы поля механических напряжений вокруг малого отверстия в образцах из нержавеющей стали 12X18H10T, полученных традиционным литейным способом и методом селективного лазерного плавления. Показано, что вокруг отверстия возникают осесимметричные поля напряжений, первый инвариант тензора которых отрицателен и убывает обратно пропорционально кубу расстояния от центра симметрии. При этом образцы, полученные по аддитивным технологиям, демонстрируют более сильную зависимость ультразвукового сигнала от деформаций вследствие наличия микропор и большего активационного объема термовозбуждения дефектов.

Ключевые слова: фотоакустическая микроскопия, механические напряжения, лазерный ультразвук, аддитивные технологии, концентратор напряжения.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63883.20825

Создание концентраторов напряжений в виде небольших отверстий широко используется для определения как напряженного состояния, так и некоторых механических характеристик объекта. Непосредственные измерения могут производиться с помощью системы тензометрических датчиков, методами голографической интерферометрии, термоупругого анализа или лазерного ультразвука [1–8]. При этом метод сверления пробного отверстия предполагает отсутствие дополнительных деформаций для корректного определения остаточных напряжений. Однако, как показывают результаты различных исследований, полностью избавиться от внесения дополнительных напряжений при создании отверстий не удастся. В ряде экспериментальных работ [9,10] отмечается, что процесс создания отверстия вносит заметные дополнительные деформации. Величина полученных при этом напряжений зависит от технологии изготовления отверстия и материала образца. Например, для твердых металлов с помощью интерферометрического метода наблюдалось до четырех интерференционных колец вокруг отверстия в ненапряженном изначально образце, при том что при измерении напряжений регистрируют всего несколько полос [9], т.е. точность измерения остаточных напряжений может сильно зависеть от технологии изготовления отверстия. Пробное сверление отверстий может также быть использовано для определения термоупругих характеристик материала при приложении калиброванной одноосной нагрузки, в том числе фотоакустическим способом [11]. Поэтому информация о дополнительных полях напряжений вокруг концентраторов необходима для правильного определения остаточных напряжений и механических свойств объектов.

Несмотря на важность и актуальность исследования полей напряжений вокруг осесимметричных концентраторов, в основном эти поля определяют численным моделированием. Были предложены также теоретические модели для отпечатков при индентировании [12], но экспериментальные измерения нам неизвестны.

В настоящей работе впервые теоретически и экспериментально исследуются поля напряжения, образованные вокруг цилиндрического отверстия вследствие сверления. В качестве образцов были выбраны два параллелепипеда из нержавеющей стали 12X18H10T, полученной традиционным литейным способом и методом селективного лазерного плавления. Измерения проводились лазерным ультразвуковым методом. Как было показано ранее [8], этот метод чувствителен к локальным напряжениям, что позволяет сформировать карту напряжений. Сигнал регистрируется пьезодатчиком вследствие лазерного возбуждения ультразвуковых колебаний. Количественно анализ напряженного состояния основан на предположении, что свободная поверхность является одной из главных плоскостей, и, следовательно, напряженное состояние в поверхностном слое может быть только плоским. Общее поле напряжений представляет собой суперпозицию начальных остаточных напряжений, перераспределенных вокруг кругового отверстия, и напряжений, дополнительно возникших вследствие деформаций при создании концентратора. При этом лазерный ультразвуковой сигнал определяется полным напряжением, т.е. первым инвариантом тензора напряжений.

Проблема определения деформаций и напряжений вокруг приповерхностного концентратора или при воз-

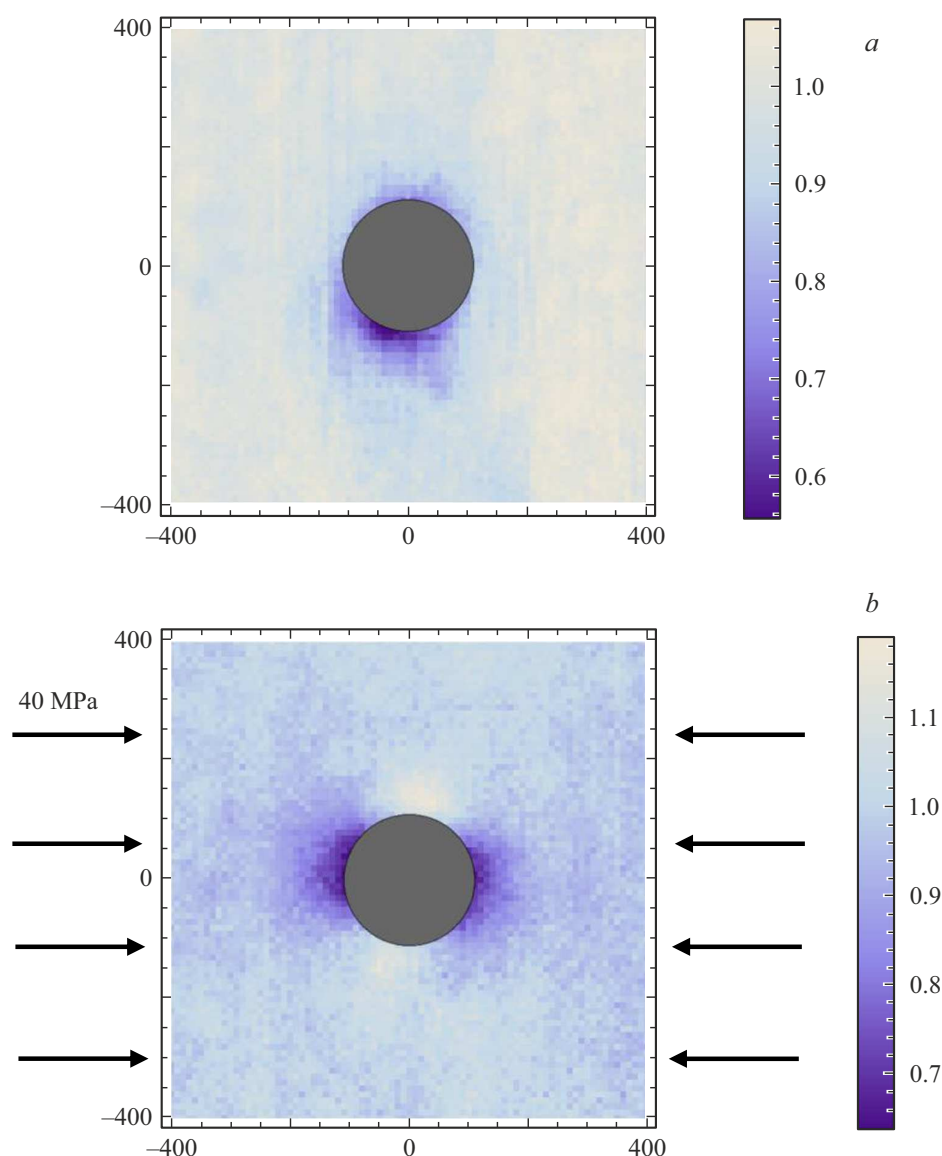


Рис. 1. Лазерные ультразвуковые изображения области вокруг отверстия в образце из обычной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. *a* — для свободного образца, *b* — для образца при одноосном давлении 40 МПа.

действию штампа в трехмерном варианте рассматривалась давно [13,14]. Например, Буссинеск еще в 1885 г. предложил метод потенциалов для решения такой задачи, широко используемый по настоящее время [15]. В справочнике Качанова [16] приведено много осесимметричных решений для упругого полупространства, но все они дают зависимости

$$\sigma_r = -\sigma_\varphi \propto 1/r^2, \quad r \geq a, \quad (1)$$

где σ_r и σ_φ — радиальное и окружное напряжения в некоторой точке в полярных координатах, a — радиус отверстия, r и φ — полярные координаты с началом в центре симметрии. Таким образом, на поверхности $\sigma = \sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z = 0$. Задача нахождения аналитического выражения для осесимметричного убывающего с радиусом поля напряжений остро возникла из-за необ-

ходимости знания полей деформаций вокруг отпечатков от инденторов при использовании их в качестве удобного инструмента исследования механических параметров различных объектов. Впервые такое решение было предложено в рамках упругопластической деформации в работе [12] и впоследствии развито в [17]. Идея состояла в использовании модели расширяющейся полости [18]. В качестве модели рассматривалась полусферическая полость вблизи поверхности, у края которой имелся пластически деформированный слой. Давление на краю полости создавало деформации в упругой среде. Для удовлетворения равенства нулю нормальной составляющей напряжения на свободной поверхности упругого полупространства предлагалось рассмотреть компенсационную силу, действующую со стороны упругого тела на пластически деформированную область вокруг поло-

сти. Для полости с центром на поверхности полупространства решение можно записать в виде

$$\sigma_r(r) = -(2 - \nu)B/r^3 + (1 - 2\nu)P/2\pi r^2, \quad r > a, \quad (2a)$$

$$\sigma_\varphi(r) = (1 - 2\nu)B/r^3 - (1 - 2\nu)P/2\pi r^2, \quad r > a, \quad (2b)$$

где B и P — параметры, зависящие от размеров полости и давления в ней. Складывая эти уравнения, получим

$$\sigma(r) = -(1 + \nu)B/r^3. \quad (3)$$

Если предположить, что вокруг отверстия также образуется пластически деформированная область, то для неглубокого отверстия с глубиной порядка радиуса можно применить тот же подход.

Для расчета напряжений, перераспределенных вокруг кругового отверстия, используется решение плоской задачи Кирша о распределении суммарного напряжения вокруг отверстия при наличии остаточных одноосных или двухосных напряжений

$$\sigma(r, \varphi) = \sigma_r + \sigma_\varphi = \sigma_{01} + \sigma_{02} - 2(\sigma_{01} - \sigma_{02})a^2 \cos(2\varphi)/r^2, \quad r \geq a, \quad (4)$$

где σ_{01} и σ_{02} — одноосные напряжения вдали от отверстия, r и φ — полярные координаты с началом в центре отверстия, причем угол φ отсчитывается от направления действия σ_{01} . Суммируя выражения (3) и (4), получим поле полного напряжения

$$\sigma(r, \varphi) = \sigma_{01} + \sigma_{02} - (1 + \nu)B/r^3 - 2(\sigma_{01} - \sigma_{02})a^2 \cos(2\varphi)/r^2. \quad (5)$$

Как было показано нами в работах [8,11], лазерный ультразвуковой сигнал зависит от полного напряжения вблизи поверхности следующим образом:

$$S = S_0(1 + b\sigma \exp(-\Omega\sigma/k_B T)), \quad (6)$$

где S_0 — сигнал от образца в ненапряженном состоянии, b — некоторый коэффициент, определяемый свойствами материала, Ω — активационный объем, k_B — постоянная Больцмана, T — средняя температура нагретой области. В линейном приближении сигнал

$$S = S_0(1 + b\sigma). \quad (7)$$

Эксперимент состоял в сканировании поверхности образца сфокусированным лазерным излучением, модулированным по амплитуде с частотой 101.4 kHz, и регистрации акустического отклика прижатом к образцу пьезоэлектрическим датчиком с близкой резонансной частотой. Образцы представляли собой прямоугольный параллелепипед размером $10 \times 5.6 \times 3$ mm. В середине большой грани было просверлено несквозное отверстие диаметром 0.20 ± 0.01 mm для обычного образца и 0.30 ± 0.01 mm для аддитивного образца.

На рис. 1 представлены полученные таким способом изображения области вокруг отверстия для образцов из

традиционной нержавеющей стали в свободном состоянии и под нагрузкой. Центально-симметричные изображения демонстрируют угловую зависимость, характерную для решения задачи Кирша, свидетельствующую о наличии одноосных или двухосных остаточных напряжений. Если бы другие напряжения отсутствовали, то в соответствии с уравнением (4) усреднение по полярному углу φ давало бы постоянный усредненный сигнал. После нормировки на среднюю амплитуду вдали от центра изображения сигнал был усреднен по полярному углу φ для каждого изображения. В результате получены зависимости от расстояния до центра симметрии. Они представлены на рис. 2, из которого видно, что сигнал заметно уменьшается с приближением к отверстию в обоих случаях, что свидетельствует о внесенных при сверлении дополнительных напряжениях. Эта зависимость может быть аппроксимирована с использованием формулы для линейной зависимости сигнала от напряжения.

Приложение фиксированной нагрузки позволяет численно оценить коэффициенты в формулах (5) и (7). Для оценки остаточного напряжения в свободном образце и коэффициента b следует проанализировать область с $r > 2a$, где влияние напряжения $(1 + \nu)B/r^3$ становится малым. Следуя процедурам, описанным в [11,19], получим $\sigma_0 \cong -26$ МПа, $b \cong -0.004$ МПа⁻¹. Используя эти значения, легко получить, что $B \cong 10^{10}$ МПа · м³.

Однако линейная зависимость имеет место только при небольших напряжениях и/или малых объемах активации дефектов. Наряду с образцом из нержавеющей стали, полученной традиционным литейным методом, мы исследовали образец из аналогичной марки стали, полученной по аддитивной технологии. Лазерные ультразвуковые изображения при тех же нагрузках пред-

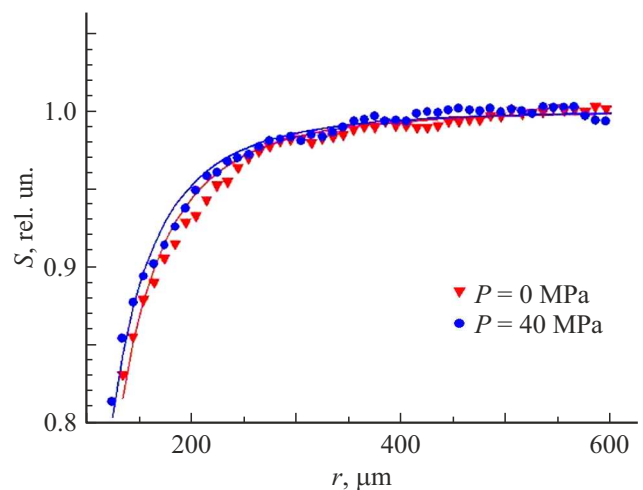


Рис. 2. Усредненные по углу зависимости лазерного ультразвукового сигнала от расстояния до центра отверстия для обычного образца. Треугольники — экспериментальные данные для свободного образца, кружки — экспериментальные данные для образца при одноосном давлении 40 МПа, линии — теоретические кривые.

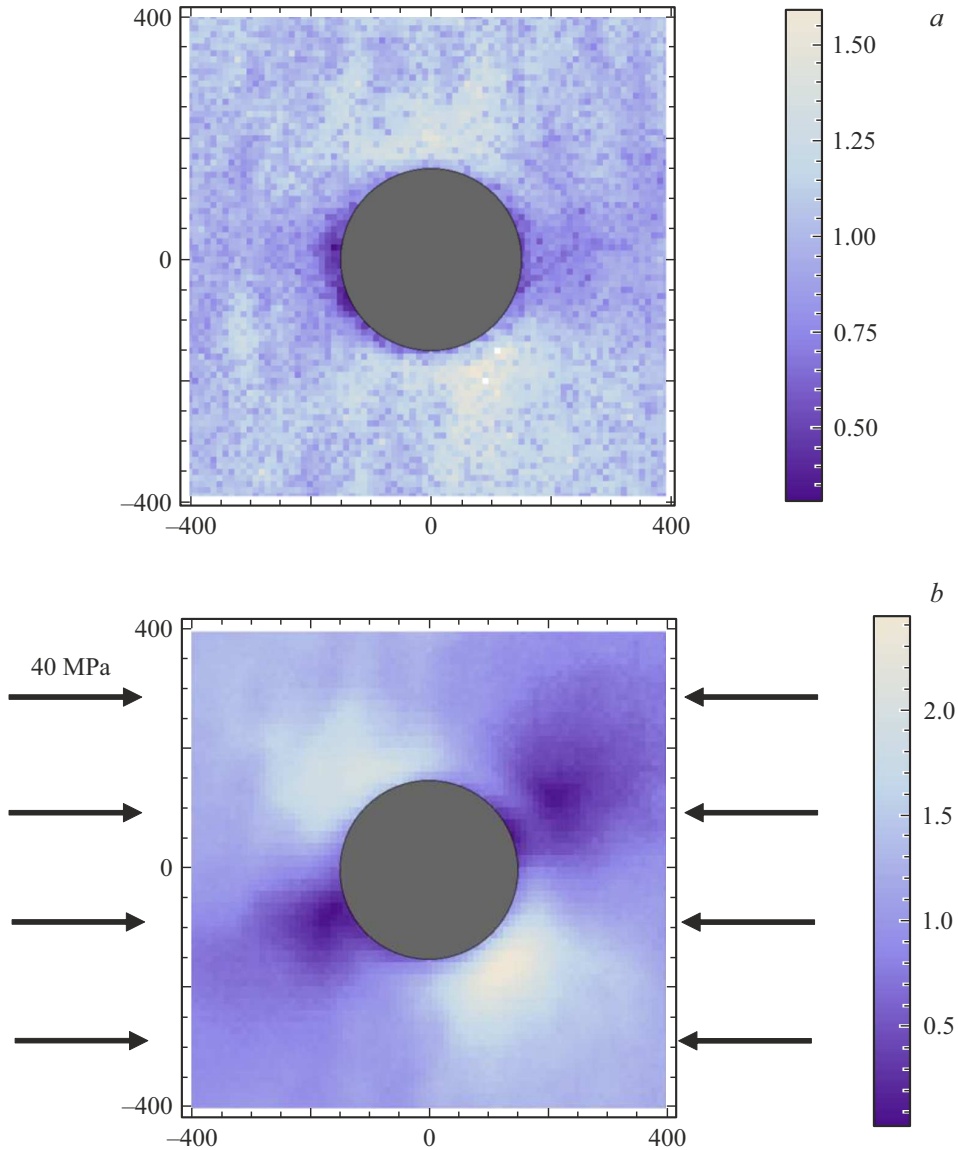


Рис. 3. Лазерные ультразвуковые изображения области вокруг отверстия в образце из нержавеющей стали 12X18H10T, полученном методом селективного лазерного плавления. *a* — для свободного образца, *b* — для образца при одноосном давлении 40 МПа.

ставлены на рис. 3. При этом усредненный по углу сигнал, как видно из рис. 4, не может быть аппроксимирован в линейном приближении. Усредненный сигнал для выражения (6) можно получить аналитически

$$\begin{aligned}
 S = & \left(1 + b\sigma_0 \exp\left(-\frac{\Omega\sigma_0}{k_B T} \left(1 - \frac{(1+\nu)B}{\sigma_0 r^3}\right)\right) \right) \\
 & \times \left(\left(1 - \frac{(1+\nu)B}{\sigma_0 r^3}\right) J_0\left(\frac{2\Omega\sigma_0 a^2}{k_B T r^2}\right) - \frac{2a^2}{r^2} J_1\left(\frac{2\Omega\sigma_0 a^2}{k_B T r^2}\right) \right) \\
 & \times \left(1 + b\sigma_0 \exp\left(-\frac{\Omega\sigma_0}{k_B T}\right) \right)^{-1}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

с его помощью можно аппроксимировать экспериментальные данные. Результаты аппроксимации представле-

ны также на рис. 4. Значения искомых параметров равны $\Omega = 3 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$, $\sigma_0 = -45 \text{ МПа}$, $b \cong -0.07 \text{ МПа}^{-1}$, $B \cong 10^8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3$. Таким образом, мы получили, что для аддитивного образца активационный объем и зависящий от него коэффициент b значительно больше этих параметров для обычного образца, а параметр B существенно меньше.

Это объясняется пористостью нержавеющей стали, полученной по аддитивной технологии. Согласно проведенным нами измерениям, удельный вес образца из традиционной стали 12X18H10T составляет $7.84 \pm 0.04 \text{ кг/м}^3$, а аддитивного образца — $7.72 \pm 0.03 \text{ кг/м}^3$, что соответствует пористости $1.5 \pm 0.9 \%$.

Таким образом, полученные результаты показывают, что при использовании метода малых отверстий для

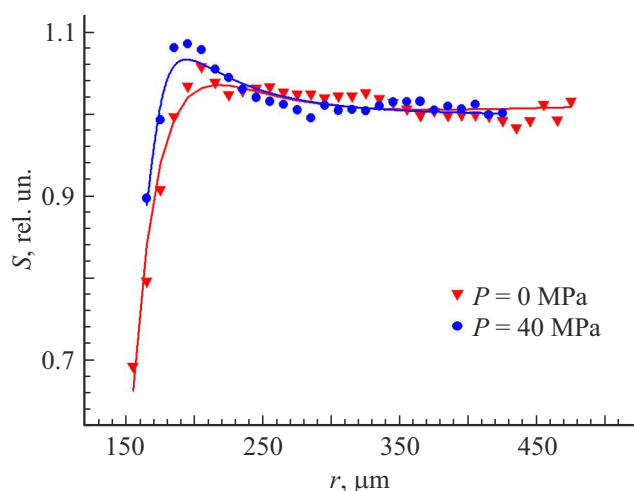


Рис. 4. Усредненные по углу зависимости лазерного ультразвукового сигнала от расстояния до центра отверстия для образца, полученного по аддитивной технологии. Треугольники — экспериментальные данные для свободного образца, кружки — экспериментальные данные для образца при одноосном давлении 40 МПа, линии — теоретические кривые.

измерения остаточных напряжений следует учитывать возможность появления дополнительных деформаций, возникающих в процессе создания отверстия. В первом приближении дополнительное поле напряжений обратно пропорционально кубу расстояния от центра отверстия. Также показано, что в металлических объектах, созданных с помощью аддитивных технологий, зависимость фотоакустического сигнала от напряжения является нелинейной уже при малых напряжениях вследствие большого активационного объема термовозбуждаемого дефекта, а вносимые при сверлении деформации существенно меньше.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00716 (<https://rscf.ru/project/24-19-00716/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ю.П. Бородин, В.В. Кесаев, А.Н. Лобанов, С.А. Амброзевич, Письма в ЖТФ, **49** (20), 16 (2023). DOI: 10.61011/PJTf.2023.20.56340.19678 [Yu.P. Borodin, V.V. Kesaev, A.N. Lobanov, S.A. Ambrozevich, Tech. Phys. Lett., **49** (10), 52 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.10.57059.19678].
- [2] S.I. Eleonsky, M.D. Zaitsev, Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, Inorg. Mater., **60** (2), 219 (2024). DOI: 10.1134/S0020168524700298

- [3] M.C. Lakey, M.R. Hill, Exp. Mech., **64**, 1529 (2024). DOI: 10.1007/s11340-024-01107-4
- [4] G. Han, L. Cai, X. Liu, Chin. J. Aeronaut., **37** (8), 486 (2024). DOI: 10.1016/j.cja.2024.05.039
- [5] G. Peng, L. Zhang, S. Li, Y. Huan, Z. Piao, P. Chen, Exp. Mech., **65**, 89 (2025). DOI: 10.1007/s11340-024-01119-0
- [6] Z. Meng, H. Chen, H. Peng, Y. Liu, Mech. Solids, **60** (4), 3244 (2025). DOI: 10.1134/S0025654425601788
- [7] Z. Sun, Mech. Mater., **173**, 104429 (2022). DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104429
- [8] A.L. Glazov, K.L. Muratkov, J. Appl. Phys., **131**, 245104 (2022). DOI: 10.1063/5.0088327
- [9] Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев, *Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах* (Наука, М., 1996).
- [10] J.E. Jonsson, M.R. Hill, C.R. Chighizola, C.R. D'Elia, B.S. Linke, D. Weber, B. Kirsch, J.C. Aurich, in *Proc. the 31st ASM Heat Treating Society Conf.* (St. Louis, Missouri, USA, 2021), p. 96. DOI: 10.31399/asm.cp.ht2021exabp0096
- [11] A.L. Glazov, K.L. Muratkov, Phys. Rev. B, **105**, 214104 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevB.105.214104
- [12] E.H. Yoffe, Phil. Mag. A, **46** (4), 617 (1982). DOI: 10.1080/01418618208236917
- [13] J. Boussinesq, *Applications of potentials for the study of equilibrium and movement of elastic solids* (Gautier-Villars, Paris, 1885), p. 11, 12.
- [14] A.E.H. Love, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, **228** (659-669), 377 (1929).
- [15] J.R. Barber, in *Elasticity*. Ser. Solid Mechanics and its Applications (Springer, Cham, 2022), vol. 172, p. 365. DOI: 10.1007/978-3-031-15214-6_22
- [16] M. Kachanov, B. Shafiro, I. Tsukrov, *Handbook of elasticity solutions* (Springer, Dordrecht, 2003).
- [17] G. Feng, S. Qu, Y. Huang, W.D. Nix, J. Mater. Res., **24** (3), 704 (2009). DOI: 10.1557/JMR.2009.0097
- [18] G.M. Sevastyanov, Acta Mech., **235**, 4229 (2024). DOI: 10.1007/s00707-024-03921-2
- [19] А.Л. Глазов, К.Л. Муратиков, Письма в ЖТФ, **48** (11), 3 (2022). DOI: 10.21883/PJTf.2022.11.52604.19013 [A.L. Glazov, K.L. Muratkov, Tech. Phys. Lett., **48** (6), 1 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.06.53453.19013].