

**Received:** 29.06.2025

**Revised:** 20.08.2025

**Accepted:** 29.08.2025

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2025.4.065-086

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR MEASURING RESIDUAL STRESSES IN A NICKEL ALLOY AFTER LASER SHOCK PEENING

E. A. Gachegova<sup>1, a</sup>, I. M. Vinogradov<sup>2, b</sup>, A. Yu. Iziumova<sup>1, c, \*</sup>, A. N. Vshivkov<sup>1, d</sup>,  
M. L. Bartolomei<sup>1, e</sup>, I. S. Kudryashev<sup>1, f</sup>, O. A. Plekhov<sup>3, g</sup>, and S. V. Zhrebtsov<sup>2, h</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1 Akademika Koroleva St., Perm, 614013, Russia*

<sup>2</sup>*State Marine Technical University,*

*3 Lotsmanskaya St., Saint Petersburg, 190121, Russia*

<sup>3</sup>*Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
13a Lenina St., Perm, 614000, Russia*

- <sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6849-9889>  gachegova.e@icmm.ru;  
<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0005-4666-4616>  IvanVinogradov22@yandex.ru;  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1769-9175>  fedorova@icmm.ru;  
<sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7667-455X>  vshivkov.a@icmm.ru;  
<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0009-0003-3193-7605>  bartolomei.m@icmm.ru;  
<sup>f</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-2284-7388>  kudryashev.i@icmm.ru;  
<sup>g</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0378-8249>  poa@icmm.ru;  
<sup>h</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1663-429X>  ser\_z@mail.ru

\*Corresponding author. Email: fedorova@icmm.ru

Address for correspondence: ul Ak. Koroleva, 1, Perm, 614013, Russia

Tel.: +7 (342) 237-8330; fax: +7 (342) 237-8487

The aim of this study is to evaluate the correlation of residual stress profiles obtained by the method of X-ray diffraction with layer removal and the hole-drilling method and to validate the numerical model of the residual stress formation process in Inconel 718 nickel alloy plates after laser shock peening. Three laser shock peening modes, differing in power density and the number of processing layers, are used to generate residual stress fields of different depths and magnitudes. It has been found that a direct quantitative comparison of these methods is incorrect due to differences in their physical principles. It is shown that the hole-drilling method is more indicative of the effect of the processing modes on residual stress profiles since it is sensitive to the plastic strain induced by intense laser shock loading. Based on the experimental data obtained by this method, the numerical model has been validated. It has been proved that a single set of model parameters provides an adequate prediction of residual stress fields when the laser shock peening process parameters are varied.

**Keywords:** residual stress, X-ray diffraction, hole drilling, laser shock peening, nickel alloy

### Acknowledgment

*The study was made under the government's assignment, theme registration number 124020700047-3.*

### References

1. Deng, W., Wang, C., Lu, H., Meng, X., Wang, Z., Lv, J., Luo, K., and Lu, J. Progressive developments, challenges and future trends in laser shock peening of metallic materials and alloys:

Comparative analysis of methods for measuring residual stresses in a nickel alloy after laser shock peening / E. A. Gachegova, I. M. Vinogradov, A. Yu. Iziumova, A. N. Vshivkov, M. L. Bartolomei, I. S. Kudryashev, O. A. Plekhov, S. V. Zhrebtsov // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2025. – Iss. 4. – P. 65–86. – DOI: 10.17804/2410-9908.2025.4.065-086.

- a comprehensive review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 191, 104061. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104061.
2. Jia, M., Wang, Y., Yue, J., Cao, C., Li, K., Yu, Y., Li, Y., and Lu, Z. Recent progress in laser shock peening: mechanism, laser systems and development prospects. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 44, 103757. DOI: 10.1016/j.surfin.2023.103757.
  3. Novikov, I.A., Nozhnitskii, Yu.A., and Shibaev, S.A. Global experience in research and application of laser shock peening technology for metals (review). *Aviatsionnye Dvigateli*, 2022, 2 (15), 59–82. (In Russian). DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_59.
  4. Ye, Y., Zhang, Y., Huang, T., Zou, S., Dong, Y., Ding, H., Vasudevan, V.K., and Ye, C. A critical review of laser shock peening of aircraft engine components. *Adv. Eng. Mater*, 2023, 2201451, 1–23. DOI: 10.1002/adem.202201451.
  5. Kozhevnikov, G.D., Korolev, D.D., Lyakhovetskii, M.A., Tokachev, D.A., and Tregulov, D.F. Finite element modeling of surface deformation in VT6 titanium alloy compressor blades of gas turbine engines induced by laser shock processing with low-temperature plasma expansion in a confined channel. *Teplovye Protssessy v Tekhnike*, 2024, 16, 7, 295–302. (In Russian).
  6. Li, P., Huang, S., Xu, H., Li, Y., Hou, X., Wang, Q., Fu, W., and Fang, Y. Numerical simulation and experiments of titanium alloy engine blades based on laser shock processing. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 40, 164–170. DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.017.
  7. Zhang, Y.K., Lu, J.Z., Ren, X.D., Yao, H.B., and Yao, H.X. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy. *Materials and Design*, 2009, 30, 1697–1703. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.017.
  8. Montross, C.S., Wei, T., Ye, L., Clark, G., and Mai, Y.-W. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24, 1021–1036. DOI: 10.1016/S0142-1123(02)00022-1.
  9. Zhu, J., Wang, Z., Wang, C., Luo, K., and Lu, J. Significant improvement in hot corrosion resistance of Inconel 690 by laser shock peening. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 492, 131202. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131202.
  10. Kuliiev, R., Keller, S., and Kashaev, N. Identification of Johnson-Cook material model parameters for laser shock peening process simulation for AA2024, Ti–6Al–4V and Inconel 718. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28, 1975–1989. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.168.
  11. Fedin, A.V. and Khabibulin, A.V. Laser impact treatment of nickel base alloys. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki*, 2023, 12, 213–217. (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-213-214.
  12. Fabbro, R., Fournier, J., Ballard, P., Devaux, D., and Virmont, J. Physical study of laser pre-ceded plasma in confined geometry. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68 (2), 775–784. DOI: 10.1063/1.346783.
  13. Staden, S.N., Polese, C., Glaser, D., Nobre, J.-P., Venter, A.M., Marais, D., Okasinski, J., and Park, J.-S. Measurement of residual stresses in different thicknesses of laser shock peened aluminium alloy samples. *Materials Research Proceedings*, 2018, 4, 117–122. DOI: 10.21741/9781945291678-18.
  14. Goruleva, L.S., Zadvorkin, S.M., Vichuzhanin, D.I., Savrai, R.A., and Skorynina, P.A. An experimental and computational study of through-depth strain distribution during frictional treatment of a metastable austenitic steel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2023, 6, 132–144. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.132-144. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2023-6/2023-6\\_425.html](http://dream-journal.org/issues/2023-6/2023-6_425.html)
  15. Gonchar, A.V., Plekhov, O.A., Kurashkin, K.V., Gachegova, E.A., Vshivkov, A.N., and Panteleev, I.A. Ultrasonic evaluation of residual stresses in AISI 316Ti steel specimen after laser shock peening. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2025, 61, 410–419. DOI: 10.1134/S106183092460343X.

16. ASTM E837–13a. DOI: 10.1520/E0837-13A.
17. ASTM E915-19. DOI: 10.1520/E0915-19.
18. Fontanari, V., Frendo, F., Bortolamedi, Th., and Scardi, P. Comparison of the hole-drilling and X-ray diffraction methods for measuring the residual stresses in shot-peened aluminum alloys. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2005, 40, 2, 199–209. DOI: 10.1243/030932405X7791.
19. Gordon, R.J. and William, H.C. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21 (1), 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
20. Bartolomei, M.L., Iziumova, A.Yu., Gachegova, E.A., Vshivkov, A.N., Plekhov, O.A, and Swaroop, S. Numerical analysis of residual stresses in thin TI–6AL–4V alloy plates subjected to double-sided symmetric laser shock treatment. *Vychislitel'naya Mekhanika Sploshnykh Sred*, 2024, 17 (4), 411–421. (In Russian). DOI: 10.7242/1999-6691/2024.17.4.33.
21. Tang, W., Li, S., Huang, Y., Ming, H., Wang X., Li, L., Wang, X., and Liu, Z. Surface strengthening mechanisms of laser shock peening additive manufacturing CuSn alloys: experimental and numerical simulation investigations. *Surface & Coatings Technology*, 2025, 495, 131567. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131567.
22. Jin, D., Liu, Z., Li, Z., Guo, C., and Sun, M. Experiments and numerical simulations on fatigue properties of laser shock peening for FV520B steel. *Optics & Laser Technology*, 2025, 182 (B), 112198. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.112198.
23. Bailey, K., Sunny, S., Mathews, R., and Malik, A. Impact of dynamic recrystallization in laser shock peening predicted via a coupled cellular automata finite element model. *Manufacturing Letters*, 2025, 44, 364–375. DOI: 10.1016/j.mfglet.2025.06.044.
24. Langer, K., Olson, S., Brockman, R., Braisted, W., Spradlin, T., and Fitzpatrick, M.E. High strain-rate material model validation for laser peening simulation. *The Journal of Engineering*, 2015, 13, 150–157. DOI: 10.1049/joe.2015.0118.
25. Farahani, H.K., Ketabchi, M., and Zangeneh, Sh. Determination of Johnson-Cook plasticity model parameters for Inconel 718. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26, 5284–5293. DOI: 10.1007/s11665-017-2990-2.
26. Shi, B., Attia, H., and Tounsi, N. Identification of material constitutive laws for machining – part II: generation of the constitutive data and validation of the constitutive law. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132, 051009-1. DOI: 10.1115/1.4002455.
27. Iturbe, A., Giraud, E., Hormaetxe, E., Garay, A., Germain, G., Ostolaza, K., and Arrazola, P.J. Mechanical characterization and modelling of Inconel 718 material behavior for machining process assessment. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 682, 441–453, DOI: 10.1016/j.msea.2016.11.054.
28. Pereira, J.M. and Lerch, B.A. Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel 718 for jet engine fan containment applications. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25, 8, 715–733. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00018-5.
29. Mitrofanov, A.V., Babitsky, V.I., and Silberschmidt, V.V. Thermomechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning. *Computational Materials Science*, 2005, 32, 3, 463–471. DOI: 10.1016/j.commatsci.2004.09.019.

Подана в журнал: 29.06.2025

УДК 67.017:539.538

DOI: 10.17804/2410-9908.2025.4.065-086

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВОМ СПЛАВЕ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Е. А. Гачегова<sup>1, а</sup>, И. М. Виноградов<sup>2, б</sup>, А. Ю. Изюмова<sup>1, в, \*</sup>, А. Н. Вшивков<sup>1, г</sup>,  
М. Л. Бартоломей<sup>1, д</sup>, И. С. Кудряшев<sup>1, е</sup>, О. А. Плехов<sup>3, ж</sup>, С. В. Жеребцов<sup>2, з</sup>

<sup>1</sup>«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614068, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», ул. Лоцманская, 3, Санкт-Петербург, 190121, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. Ленина, 13а, Пермь, 614000, Россия

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6849-9889>  gachegova.e@icmm.ru;  
<sup>б</sup>  <https://orcid.org/0009-0005-4666-4616>  IvanVinogradov22@yandex.ru;  
<sup>в</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1769-9175>  fedorova@icmm.ru;  
<sup>г</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7667-455X>  vshivkov.a@icmm.ru;  
<sup>д</sup>  <https://orcid.org/0009-0003-3193-7605>  bartolomei.m@icmm.ru;  
<sup>е</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-2284-7388>  kudryashev.i@icmm.ru;  
<sup>ж</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0378-8249>  poa@icmm.ru;  
<sup>з</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1663-429X>  ser\_z@mail.ru

\*Ответственный автор. Электронная почта: fedorova@icmm.ru  
Адрес для переписки: ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия  
Тел.: +7 (342) 237-83-17; факс: +7 (342) 237-84-87

Цель настоящей работы – оценка корреляции профилей остаточных напряжений, полученных методом рентгеновской дифракции с послойным травлением и методом сверления отверстия, а также валидация численной модели процесса формирования остаточных напряжений в пластинах из никелевого сплава Inconel 718 после лазерной ударной обработки. Для формирования полей остаточных напряжений различной глубины и амплитуды были применены три режима лазерной ударной обработки, различающиеся плотностью мощности и количеством слоев обработки. Установлено, что прямое количественное сравнение данных методов некорректно ввиду различий их физических принципов. Показано, что метод сверления отверстия в большей степени отражает влияние режимов обработки на профили остаточных напряжений, поскольку он чувствителен к пластической деформации, индуцированной интенсивным лазерным ударным воздействием. На основе экспериментальных данных, полученных этим методом, выполнена валидация численной модели. Доказано, что единый набор параметров модели обеспечивает адекватный прогноз полей остаточных напряжений при изменении технологических параметров лазерной ударной обработки.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, метод рентгеновской дифракции, метод сверления отверстия, лазерная ударная обработка, никелевый сплав

## 1. Введение

Поверхностная обработка материалов используется в машиностроении для повышения прочностных и коррозионных свойств деталей и конструкций. Лазерная ударная обработка (ЛУО) является одним из способов поверхностного упрочнения, который позволяет формировать поле сжимающих остаточных напряжений (ОН) в областях с повышенной вероятностью отказа, продлевая срок безопасной эксплуатации детали [1–3]. В настоящее время ЛУО широко внедряется в области аэрокосмического машиностроения для упрочнения лопаток компрессора газотурбинных двигателей [4–7]. Технология лазерного удара основана на воздействии коротких лазерных импульсов высокой энергии на поверхность материала. Импульсы генерируют в материале слабые ударные волны, которые создают в поверхностных слоях поле ОН. Глубина формирования ОН при ЛУО в зависимости от выбранного режима (энергии и длительности импульса, формы лазерного луча) может достигать 1–2 мм, что существенно превышает возможности традиционной дробеструйной обработки [8]. Технология не требует механического контакта с материалом, что позволяет обрабатывать сложные геометрии. Ключевым вопросом остается выбор режима ЛУО применительно к материалам, используемым в аэрокосмической промышленности, таким как титановые и никелевые сплавы. Параметры лазерного воздействия должны обеспечивать формирование поля сжимающих ОН на максимальную глубину, при этом не изменяя форму детали и не разрушая структуру поверхностного слоя материала. Влияние ЛУО на структуру никелевых сплавов и его коррозионную стойкость изучались в работе [9]. Было показано, что ЛУО с использованием круглого лазерного пятна диаметром 3 мм и энергией 5 Дж с перекрытием пятен 50 % не изменяет фазовый состав никелевого сплава Inconel 690, происходит измельчение зерна, которое становится более выраженным с увеличением количества проходов лазерного луча во время обработки. В описанном режиме при одном проходе ЛУО максимальные сжимающие ОН составили 250 МПа, при трех проходах – 300 МПа. Кроме того, показано, что увеличение количества проходов приводит к образованию плотных оксидных пленок на поверхности, которые положительно влияют на стойкость образцов к горячей коррозии. В работе [10] приведены результаты идентификации материальных констант в модели Джонсона – Кука для титановых и никелевых сплавов, ОН измерялись с помощью метода сверления отверстия. Показано, что при одном проходе ЛУО с плотностью мощности 10 ГВт/см<sup>2</sup> и квадратным профилем лазерного луча размером 1 × 1 мм<sup>2</sup> без перекрытия пятен максимальное значение сжимающих ОН в направлении проката составляет порядка 275 МПа. В исследовании [11] численно определены оптимальные параметры ЛУО для никелевых сплавов. Показано, что при плотности мощности лазерного воздействия 4,7–7,2 ГВт/см<sup>2</sup> можно создать поверхностные сжимающие ОН порядка 3,47 ГПа. Завышенные значения получаемых ОН, вероятно, связаны с отсутствием валидации численной модели по экспериментальным данным ОН и использованием в расчетах одномерной модели расширения плазмы Фабро [12], которая не учитывает насыщение амплитуды давления при высоких плотностях мощности, обусловленное вторичной генерацией плазмы на границе раздела «вода – воздух» при ЛУО.

Для оценки эффективности поверхностной обработки (глубины и амплитуды сформированного поля сжимающих ОН) и валидации численных моделей используется ряд экспериментальных методов измерения ОН [13–15], среди которых наиболее распространены метод сверления отверстия (ASTM E837 [16]) и рентгеновская дифракция (ASTM E915 [17]). Метод сверления отверстий основан на измерении деформаций вокруг небольшого отверстия, высверливаемого в материале. Измерение деформации производится с использованием оптических методов или тензодатчиков. Напряжения рассчитываются на основе решения соответствующей краевой задачи. Этот метод ценится за простоту, доступность оборудования и возможность применения для крупногабаритных деталей. Однако его ключевые ограничения включают локальное разрушение поверхности, малую глубину анализа (1–2 мм) и зависимость точности от корректности математических моделей, используемых для интерпретации данных.

В отличие от метода сверления отверстий, рентгеновская дифракция (РД) является неразрушающим методом, основанным на анализе смещения межплоскостных расстояний в кристаллической решетке под нагрузкой. РД обеспечивает высокую пространственную разрешающую способность и подходит для измерения поверхностных напряжений (глубина до 10–20 мкм). Для изучения градиента напряжений по глубине РД часто комбинируют с послойным травлением: последовательное удаление тонких слоев материала и последующее измерение позволяет построить распределение остаточных напряжений в подповерхностных зонах. Для реализации метода необходима тщательная подготовка поверхности, он сложен в применении для поликристаллических материалов и отличается высокой стоимостью оборудования. Кроме того, послойное травление требует точного контроля скорости удаления материала и может вносить дополнительные погрешности в процесс измерения [18].

Выбор метода для оценки ОН зависит от поставленной задачи: для быстрой оценки объемных напряжений предпочтителен метод сверления, а для детального анализа поверхностных и подповерхностных зон – комбинация РД с послойным травлением, обеспечивающая баланс между точностью и глубиной исследований. Комбинация методов может позволить достоверно изучить распределение ОН по глубине обрабатываемого материала и подобрать наиболее эффективные режимы ЛУО. В этой связи, актуальным является вопрос сходимости результатов, полученных методом сверления отверстий и методом РД с послойным травлением.

Целью настоящей работы являются оценка корреляции результатов измерения ОН двумя методиками и валидация численной модели процесса формирования ОН в результате лазерного ударного воздействия. Для создания поля ОН различной амплитуды и глубины в пластине из никелевого сплава толщиной 2 мм будут использоваться три режима ЛУО. Экспериментальное определение профилей ОН в зонах лазерного ударного воздействия будет проводиться на основе метода РД с послойным травлением и методом сверления отверстия. Условия одного из режимов ЛУО и измеренный профиль ОН будут использоваться для идентификации параметров численной модели, а два других режима – для ее валидации. В последующей работе это позволит численно получать достоверные данные о формировании поля ОН в деталях из никелевого сплава со сложной геометрией, где экспериментальное измерение затруднено, в частности в лопатках различных ступеней газотурбинных двигателей после ЛУО.

## 2. Материалы и методы

В качестве образцов использовались пластины толщиной 2 мм из никелевого сплава Inconel 718. На каждом образце было обработано две области для измерения ОН (рис. 1) с целью последующих измерений остаточных напряжений методом РД и методом сверления отверстия.

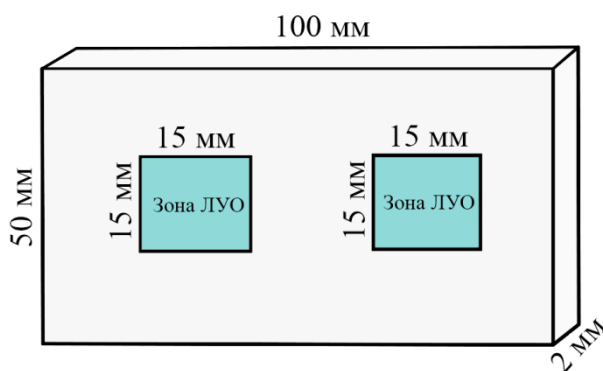


Рис. 1. Геометрия образца и зоны ЛУО

ЛУО проводилась на экспериментальной установке ИМСС УрО РАН (Пермь, Россия) (рис. 2).

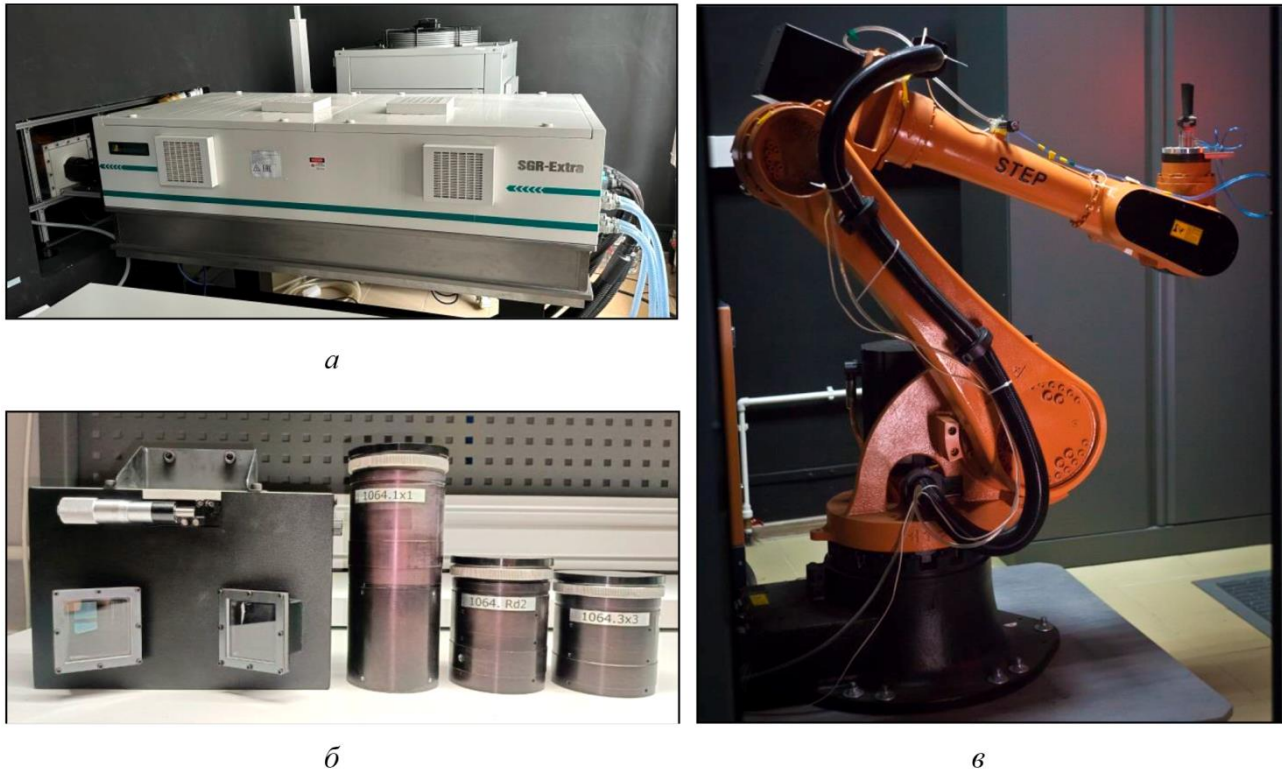


Рис. 2. Установка для ЛУО материалов (ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия): твердотельный Nd:YAG-лазер Beamtech SGR-Extra-10 (а); набор из четырех съемных оптических систем (б); роботизированный шестиосевой манипулятор STEP SR50 (в)

Установка состоит из роботизированного шестиосевого манипулятора STEP SR50 и твердотельного импульсного Nd:YAG-лазера Beamtech SGR-Extra-10. Длина волны лазерного излучения составляет 1064 нм, максимальная частота лазерных импульсов – 5 Гц, длительность импульса – 10 нс, энергия лазерного излучения может варьироваться от 1 до 9 Дж. Роботизированный шестиосевой манипулятор грузоподъемностью 50 кг позиционирует деталь с точностью до 0,25 мм и скоростью перемещения в диапазоне от 0,1 мм/с до 500 мм/с.

Последовательность и траектория обработки задается в специализированном программном обеспечении на основе трехмерной модели детали. В состав установки входят четыре съемные оптические системы (рис. 2 б). Они позволяют фокусировать лазерный луч в форме квадратов со сторонами 1 и 3 мм и круга диаметром 2 мм, а также разделять исходный луч на два для одновременной обработки обеих сторон плоских деталей. Это обеспечивает вариативность плотности мощности лазерного воздействия (от 1 до 90 ГВт/см<sup>2</sup>) и дизайна укладки лазерных пятен на поверхности детали в зависимости от ее геометрии.

Для создания различных по глубине и величине профилей остаточных напряжений в данном исследовании применяли три режима ЛУО, параметры которых представлены в табл. 1. Выбор режимов ЛУО осуществляли исходя из опыта авторского коллектива с целью получения существенной разницы в распределении остаточных напряжений. Обработку проводили в один и три прохода (слоя) без перекрытия пятен – укладку осуществляли стык в стык. Образцы закрепляли с помощью клейкой ленты на подложке, в качестве которой использовали стальную пластину толщиной 5 мм. ЛУО проводили без защитного покрытия поверхности. Подачу ламинарного водяного потока на поверхность образцов осуществляли с

целью создания стабильно ограничивающего слоя, служащего для удержания расширяющейся лазерной плазмы и повышения эффективности передачи ее энергии в материал.

Таблица 1

Параметры режимов ЛУО

Режим	Форма и размер лазерного пятна	Энергия лазерного импульса, Дж	Количество проходов	Плотность мощности лазерного воздействия, ГВт/см <sup>2</sup>
1	Квадрат 1 × 1 мм	2	1	20
2	Квадрат 1 × 1 мм	2	3	20
3	Квадрат 1 × 1 мм	3	1	30

### 2.1. Метод сверления отверстия

Измерение ОН методом сверления отверстия [16] было проведено в ИМСС УрО РАН на автоматизированной системе измерения остаточных напряжений MTS3000-Restan (рис. 3), оснащенной шаговым двигателем и магнитными фиксаторами. Система включает в себя высокоскоростную воздушную турбину (400 000 об/мин), тензостанцию и программное обеспечение для обработки результатов.

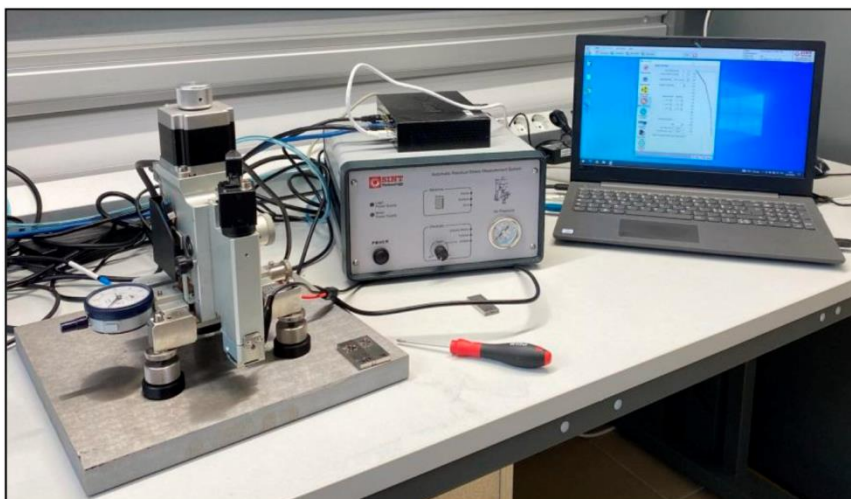


Рис. 3. Автоматизированная система измерения остаточных напряжений методом сверления отверстия MTS3000-Restan (ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия)

Метод сверления отверстия основан на измерении деформаций, возникающих при локальном снятии напряжений за счет сверления небольшого отверстия. Удаление части материала приводит к перераспределению напряжений в окружающей области и возникновению локальных упругих деформаций на поверхности. Измеряя эти деформации и решая соответствующую краевую задачу, можно рассчитать исходные остаточные напряжения.

В качестве основного измерительного инструмента в системе MTS3000-Restan используется 3-элементная тензOMETрическая розетка (типа 0°/45°/90°). Розетка крепится к поверхности в точке измерения с помощью клея. После калибровки пошагово просверливается отверстие диаметром 2 мм в центре розетки на глубину порядка 1 мм. После каждого шага сверления фиксируются величины деформаций отверстия, возникающих при снятии ОН. Погрешность измерений не превышает 1 мкм/м.

Предполагается, что остаточные напряжения постоянны в пределах каждого небольшого приращения глубины. На основе полученных данных решается обратная задача (используется один из алгоритмов обработки данных) и строится профиль ОН по глубине отверстия.

В ходе предварительных измерений было показано, что в случае неоднородного по глубине распределения ОН их достоверное определение возможно с помощью алгоритма анализа деформаций разгрузки с кубическим распределением шагов. Согласно стандарту ASTM E837-13, при неравномерном распределении ОН по глубине методика их расчета заключается в следующем. На каждом шаге сверления выполняется расчет равномерной изотропной деформации ( $p_j$ ), равномерной 45-градусной касательной деформации ( $q_j$ ) и деформации сдвига в осях  $X$ – $Y$  ( $t_j$ ):

$$p_j = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \quad q_j = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad t_j = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)}{2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – деформации.

Остаточные напряжения рассчитываются для каждого шага по глубине отверстия  $j$  путем решения следующих матричных уравнений:

$$\bar{a} \cdot \bar{P} = \frac{E}{1+\nu} \cdot \bar{p} \quad \bar{b} \cdot \bar{Q} = E \cdot \bar{q} \quad \bar{b} \cdot \bar{T} = E \cdot \bar{t}, \quad (2)$$

где

$$P_k = \frac{[(\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k]}{2} \quad Q_k = \frac{[(\sigma_y)_k - (\sigma_x)_k]}{2} \quad T_k = (\tau_{xy})_k, \quad (3)$$

$\bar{a}, \bar{b}$  – калибровочные матрицы для конкретных типов розеток и их размеров.

Из-за значительного количества шагов сверления матрицы  $\bar{a}, \bar{b}$  становятся плохо обусловленными. Чтобы избежать ошибки в численном расчете, результаты фильтруются с помощью метода регуляризации Тихонова с использованием следующей матрицы  $\bar{c}$ :

$$\bar{c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & -1 & 2 & -1 & \\ & & & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Тогда выражение (2) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} (\bar{a}^T \bar{a} + \alpha_P \cdot \bar{c}^T \bar{c}) \cdot \bar{P} &= \frac{E}{1+\nu} \cdot \bar{a}^T \bar{p} \\ (\bar{b}^T \bar{b} + \alpha_Q \cdot \bar{c}^T \bar{c}) \cdot \bar{Q} &= E \cdot \bar{b}^T \bar{q} \\ (\bar{b}^T \bar{b} + \alpha_T \cdot \bar{c}^T \bar{c}) \cdot \bar{T} &= E \cdot \bar{b}^T \bar{t}. \end{aligned} \quad (5)$$

Параметры  $\alpha_P, \alpha_Q, \alpha_T$  отражают степень регуляризации, их начальное значение выбирается в диапазоне  $10^{-4}$ – $10^{-6}$ .

2.2. Метод рентгеновской дифракции (РД)

Измерение ОН методом РД [17] проводили на экспериментальной базе Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия) на установке DS-21P (рис. 4 а, б). Исследование глубинного распределения (профиля) остаточных напряжений сопряжено с методической сложностью, обусловленной ограниченной глубиной проникновения рентгеновского излучения (порядка 10–50 мкм).

Для получения профиля ОН по глубине образцов метод РД комбинировали с послойным травлением, которое было реализовано на установке для электролитического травления DS-2211 (рис. 4 в). Глубину травления контролировали индикатором часового типа с точностью измерения 0,01 мм. Диаметр пятна травления составлял 5,5 мм.

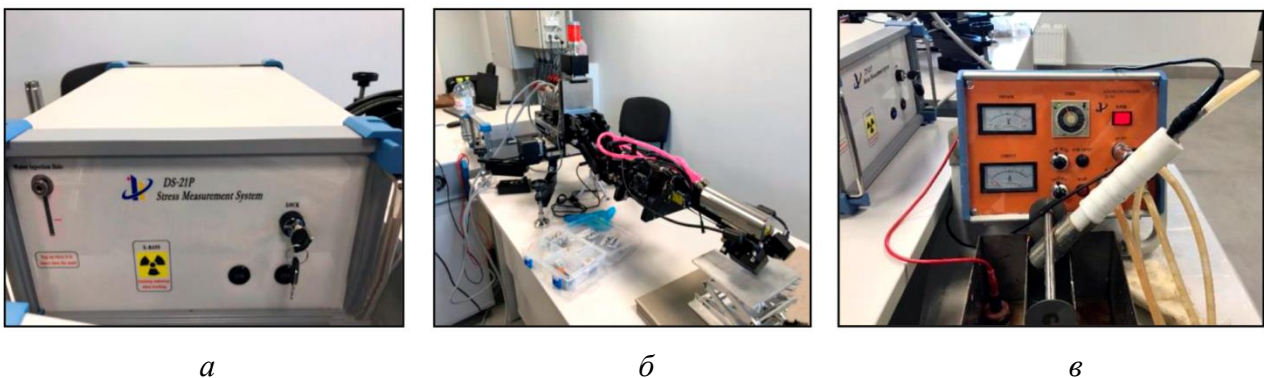


Рис. 4. Оборудование для измерения ОН методом рентгеновской дифракции с послойным травлением: блок питания и управления установкой DS-21P (а), рентгеновская трубка с гониометром на трехосевом роботе (б); установка для электролитического травления DS-2211 (СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия) (в)

Оценку уровня ОН проводили методом  $\sin^2\psi$ . Съёмки производили на Cu-K $\alpha$ -излучении в диапазоне углов  $2\theta > 120^\circ$ , что соответствует рассеянию от кристаллографической плоскости {311}. Размер пятна рентгеновского пучка составлял примерно 4 мм. Дифракционные пики определялись по 15–20 углам в диапазоне  $\pm 25^\circ$ .

В основе метода  $\sin^2\psi$  лежат измерения межплоскостных расстояний  $d_{\psi\phi}$  при различных ориентировках вектора рассеяния, определяемого углами  $\phi$  и  $\psi$  (рис. 5).

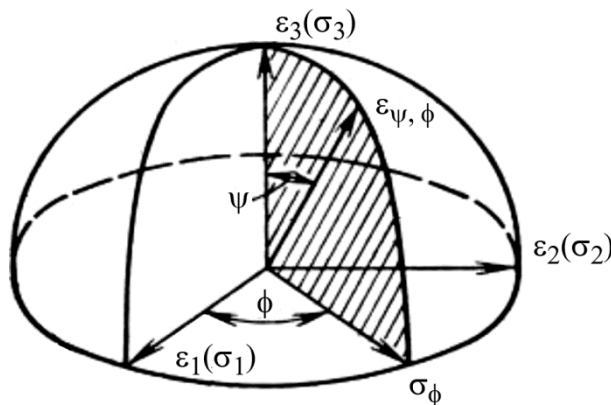


Рис. 5. Угловые соотношения между главными напряжениями  $\sigma_1$ ;  $\sigma_2$ ;  $\sigma_3$ ,

измеряемым напряжением  $\sigma_\varphi$  и координатными осями  $x, y, z$

$$\varepsilon_{\psi\varphi} = \frac{d_{\psi\varphi} - d_0}{d_0} = \left[ \frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2) \right] - \left[ \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right], \quad (6)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль Юнга,  $d_0$  – значение межплоскостного расстояния при съемке под углом  $\theta$  к поверхности образца,  $\alpha_1 = \cos\theta \sin\psi$ ,  $\alpha_2 = \sin\theta \sin\psi$ .

Последующий анализ заключается в построении графика, где по оси ординат откладываются измеренные значения межплоскостного расстояния  $d_{\psi\varphi}$ , а по оси абсцисс – соответствующие значения  $\sin^2\psi$ . Полученное множество точек аппроксимируется линейной зависимостью. Угловым коэффициентом (тангенсом угла наклона)  $m$  полученной прямой используется для расчета механических напряжений по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{Em}{(1+\nu)d_0}. \quad (7)$$

### 3. Результаты экспериментальных исследований

На рис. 6 представлены результаты измерения компонент тензора ОН по двум направлениям в плоскости образца ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) методом сверления отверстия и РД с послойным травлением, полученные после трех режимов ЛУО (табл. 1).

Результаты демонстрируют качественное соответствие, которое выражается в наличии на всех приведенных графиках двух участков, характеризующихся: 1) высокими растягивающими ОН на поверхности образца с последующим резким падением до максимальных сжимающих ОН, наблюдающихся на глубине до 0,2 мм; 2) постепенным уменьшением сжимающих ОН и достижением ими нулевого уровня с появлением слабых растягивающих ОН в объеме материала на глубине порядка 1–1,4 мм.

Высокие значения растягивающих ОН на поверхности (порядка 800 МПа), вероятнее всего, являются артефактами и связаны с погрешностями измерения в обоих методах. При использовании метода сверления отверстия вероятны ошибки в оценке ОН на поверхности при внедрении сверла в материал. Метод РД чувствителен к качеству поверхности, в данном случае в результате ЛУО без защитного покрытия могли возникнуть дефекты, которые повлияли на оценку ОН на поверхности образца.

Глубина обнаружения сжимающих ОН, согласно методу РД, составляет до 1,4 мм во всех режимах ЛУО. Глубина залегания сжимающих ОН, определенная методом сверления отверстия, составляет 0,5–0,8 мм, в зависимости от режима.

Следует отметить, что результаты, получаемые методами сверления отверстия и РД с послойным травлением, являются лишь условно (качественно) сравнимыми. Ключевой причиной этому служит различие в фундаментальных принципах, лежащих в основе методов. Метод РД с послойным травлением относится к физико-химическим методам и измеряет искажение кристаллической решетки, которое вызвано ОН. Метод сверления отверстия является механическим и измеряет деформации, вызванные релаксацией материала после просверливания отверстия в зоне с ОН.

Оба метода оценивают макронапряжения (напряжения I рода), но метод сверления отверстия определяет их усредненное значение, т. е. суммарное напряжение от всех фаз в объеме, а метод РД – только в той кристаллической фазе материала, которая дает дифракционный пик. Таким образом, метод РД чувствителен к упругим искажениям кристаллической решетки, которые проявляются в сдвиге дифракционных пиков и используются для расчета

макронапряжений. Пластическая деформация, индуцированная ЛУО, не приводит к макроскопическим искажениям решетки, а проявляется в уширении дифракционных пиков из-за микронапряжений и измельчения областей когерентного рассеяния.

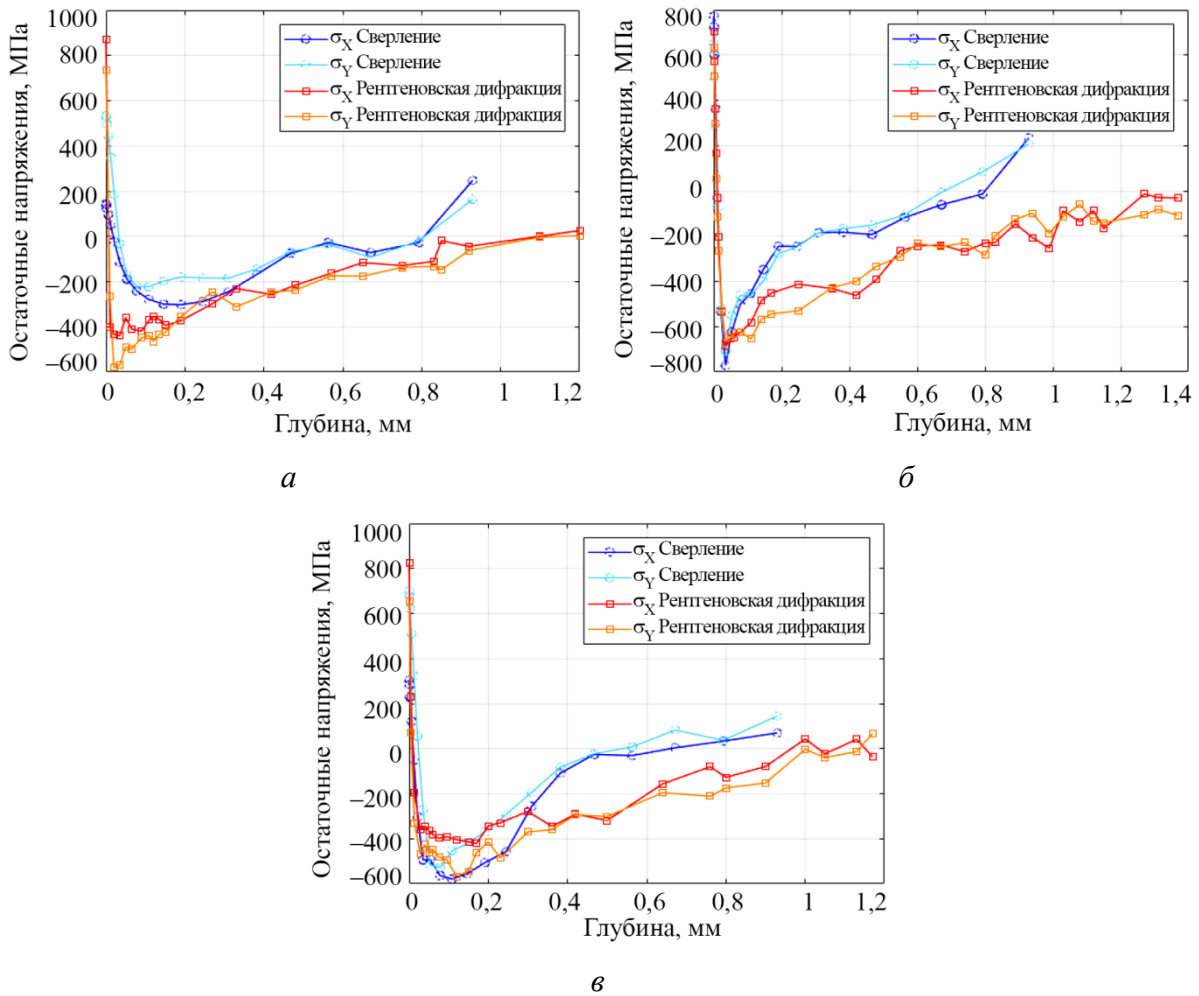


Рис. 6. Профили ОН по глубине образцов из никелевого сплава Inconel 718, полученные методом сверления отверстия и методом РД: после ЛУО в режиме 1 (а); после ЛУО в режиме 2 (б); после ЛУО в режиме 3 (в)

Метод сверления отверстия фиксирует результат воздействия всех видов внутренних «ограничений», будь то упруго запасенная энергия или необратимые пластические сдвиги. Однако при пересчете полных деформаций в напряжения используется упругая модель. Если после ЛУО в материале присутствует вклад пластической деформации в релаксацию, то упругая модель метода сверления отверстий интерпретирует его как «дополнительное» напряжение. Основываясь на вышесказанном, полученные различными методами профили ОН по глубине образцов могут иметь лишь качественную корреляцию, точное количественное совпадение маловероятно ввиду различий в ключевых принципах методов. Полученное расхождение между профилями ОН, определенными методом РД и методом сверления отверстия, указывает на существенный вклад пластической деформации в общее напряженно-деформированное состояние после ЛУО.

Сравнение профилей ОН, полученных различными методами после трех разных режимов ЛУО (рис. 7), показывает, что результаты определения ОН методом РД с послойным травлением не демонстрируют явной зависимости от режима ЛУО ни по максимальной величине сжимающих ОН, ни по глубине их обнаружения. Согласно графику на рис. 7 а, ЛУО

в режиме 2 создает немного более глубокие (до 1,4 мм) сжимающие ОН с максимальным значением у поверхности около 620 МПа.

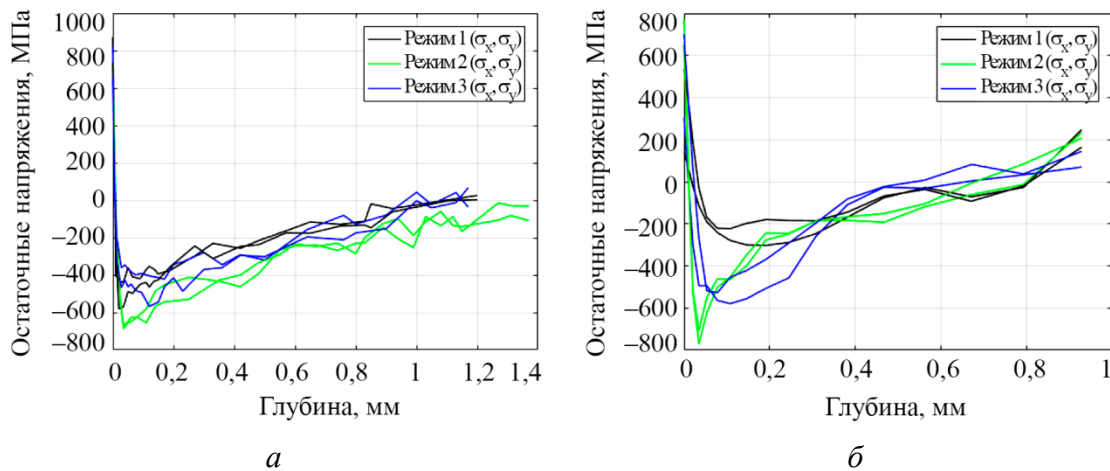


Рис. 7. Профили ОН по глубине образцов из никелевого сплава Inconel 718, полученные методом РД с послойным травлением (а) и методом сверления отверстия (б) после различных режимов ЛУО

Напротив, результаты определения ОН методом сверления отверстия (рис. 7 б) демонстрируют явную зависимость от режима ЛУО. За счет трех проходов лазерного луча (три слоя обработки в одной и той же зоне) ЛУО в режиме 2 приводит к созданию наиболее высоких сжимающих ОН, около 800 МПа. Это качественно совпадает с результатами метода РД. Глубина сжимающих ОН при этом значительно не отличается от глубины сжимающих ОН после режимов 1 и 3. Величина сжимающих ОН после режимов 1 и 3 определяется плотностью мощности лазерного воздействия: при 20 ГВт/см<sup>2</sup> (режим 1) генерируются менее значительные сжимающие ОН, чем при 30 ГВт/см<sup>2</sup> (режим 3), а именно: 300 МПа на глубине 0,2 мм в режиме 1 и 600 МПа на глубине 0,1 мм в режиме 3.

В отличие от метода РД, который измеряет остаточные напряжения через упругие деформации кристаллической решетки, метод сверления отверстия основан на релаксации полных деформаций. Поскольку ЛУО индуцирует пластические деформации, вклад которых в общее напряженно-деформированное состояние возрастает с плотностью мощности лазерного ударного воздействия, данные метода сверления отверстия в большей степени отражают изменения, связанные с интенсификацией режимов ЛУО.

Таким образом, для анализа глубинных профилей остаточных напряжений после высокоинтенсивных воздействий, подобных ЛУО, метод сверления отверстия может предоставить более репрезентативную оценку интегрального отклика материала. В связи с этим для валидации численной модели далее используются результаты измерения профилей ОН методом сверления отверстия.

#### 4. Численное моделирование поля ОН

Исследование процесса генерации ОН в объеме материала под действием слабой ударной волны проводилось с помощью конечно-элементного моделирования на основе модели Джонсона – Кука [19] аналогично работе [20]. При лазерно-ударном воздействии скорость деформации достигает порядка 10<sup>5</sup>–10<sup>6</sup> с<sup>-1</sup>. Несмотря на то что модель Джонсона – Кука (8) описывает распространение ударной волны при скоростях деформации на порядки ниже (10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> с<sup>-1</sup>), она широко используется исследователями [10, 21–23] для описания рас-

пространения ударной волны при ЛУО и формирования ОН и обеспечивает достаточное для инженерных приложений соответствие получаемых результатов экспериментальным данным профилей ОН для различных материалов после ЛУО.

$$\sigma_y = \left[ A + B \left( \varepsilon_{eq}^{pl} \right)^n \right] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{eq,0}^{pl}} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right], \quad (8)$$

где  $\sigma_y$  – эквивалентные напряжения на поверхности текучести при одноосном нагружении;  $\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$  – интенсивность скорости пластической деформации;  $\dot{\varepsilon}_{eq,0}^{pl}$  – опорная скорость интенсивности пластической деформации;  $A, B, C, n$  – параметры, характеризующие неупругое поведение материала;  $T$  – температура материала при испытании;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $T_m$  – температура плавления материала; параметр  $m$  отвечает за температурное разупрочнение.

В работе [24] было проведено три серии испытаний для двух материалов на низких, средних и высоких скоростях деформации. Показано, что расхождения между экспериментальными и прогнозируемыми по модели Джонсона – Кука напряжениями во всех диапазонах достаточно малы. Для достижения еще более высокой корреляции экспериментальных и численных данных на высоких скоростях деформации авторы дополнили модель линейным уравнением состояния, но это не оказало существенного влияния на точность прогноза. Таким образом, было показано, что модель Джонсона – Кука обеспечивает достаточную для практических приложений точность прогноза напряжений, в том числе и при высокоскоростном нагружении, характерном для ЛУО. Вместе с этим следует отметить, что с фундаментальной точки зрения данная модель не может описать особенности высокоскоростного нагружения, ее параметры в этом случае теряют свой физический смысл и должны определяться методом обратного инжиниринга (подгонка под форму кратера или профиль ОН). Для исследований, требующих высокой точности, следует рассматривать более сложные и специализированные модели, например модель Зерилли – Армстронга, модель механических пороговых напряжений, уравнения состояния и модели повреждений.

В данной работе подбор параметров модели Джонсона – Кука осуществлялся по экспериментальным данным профилей ОН, полученным методом сверления отверстия после ЛУО в третьем режиме (табл. 1). На основе подобранных параметров моделировали поля остаточных напряжений, полученные в результате ЛУО в первом и втором режимах. Далее оценивали корреляцию экспериментально и численно полученных профилей ОН после первого и второго режимов ЛУО. Это позволило оценить возможность использования единого набора параметров численной модели для адекватного прогнозирования полей ОН при варьировании технологических параметров обработки никелевого сплава Inconel 718.

Математическая модель формирования ОН в процессе ЛУО включает в себя закон сохранения импульса, а также определяющие соотношения, описывающие связь между полями напряжений и деформаций. В условии отсутствия массовых сил уравнение движения (закон сохранения импульса) может быть записано в виде

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = \rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2}, \quad (9)$$

где  $t$  – время,  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напряжений Коши,  $\rho$  – плотность материала,  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений.

Полная деформация  $\boldsymbol{\varepsilon}$  в приближении малых деформаций может быть записана следующим образом:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left( \text{grad } \mathbf{u} + \text{grad } \mathbf{u}^T \right). \quad (10)$$

Используя гипотезу аддитивного разложения, приращение полной деформации  $d\boldsymbol{\varepsilon}$  можно выразить через приращения упругой деформации  $d\boldsymbol{\varepsilon}^{el}$  и пластической деформации  $d\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$  как

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}^{el} + d\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}. \quad (11)$$

В случае изотропного материала напряжение Коши определяется по закону Гука как

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \varepsilon_{vol}^{el} \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}^{el}, \quad (12)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичный тензор;  $\varepsilon_{vol}^{el}$  – объемная часть упругой деформации;  $\lambda, \mu$  – параметры Ламе, которые могут быть рассчитаны по известным значениям модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

Согласно ассоциированному закону пластического течения, скорость пластической деформации может быть определена как

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^{pl} = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}. \quad (13)$$

Здесь  $d\lambda$  – пластический множитель, заданный условием Прагера,  $F$  – поверхность текучести. В случае изотропного упрочнения поверхность текучести можно записать в виде

$$F = \sigma_{eq} - \sigma_y \left( \varepsilon_{eq}^{pl} \right), \quad (14)$$

где  $\sigma_{eq}$  – эквивалентное напряжение;  $\varepsilon_{eq}^{pl}$  – эквивалентная пластическая деформация;  $\sigma_y(\varepsilon_{eq}^{pl})$  – функция, определяющая значение предела текучести.

Для замыкания системы уравнений (9)–(14) необходимо добавить уравнение, позволяющее рассчитывать значение  $\sigma_y(\varepsilon_{eq}^{pl})$ . В данной работе оно определялось из модели Джонсона – Кука [19]. Несмотря на высокую температуру плазмы в процессе ЛУО, высокая скорость протекания процессов обеспечивает отсутствие существенного повышения температуры материала на глубине, начиная с 50–100 мкм. Как следствие, при моделировании рассматриваются исключительно механические эффекты процесса ЛУО. Для описания распространения упругопластической волны использовалось выражение:

$$\sigma_y = \left[ A + B \left( \varepsilon_{eq}^{pl} \right)^n \right] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{eq,0}^{pl}} \right], \quad (15)$$

где  $\sigma_y$  – эквивалентные напряжения на поверхности текучести при одноосном нагружении,  $\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$  – интенсивность скорости пластической деформации,  $\dot{\varepsilon}_{eq,0}^{pl}$  – опорная скорость интенсивности пластической деформации,  $A$  – предел текучести,  $B$  – коэффициент упрочнения,

$C$  определяет скоростную чувствительность материала,  $n$  – параметры, характеризующие неупругое поведение материала. Физико-механические константы рассматриваемого никелевого сплава Inconel 718 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физические константы для никелевого сплава Inconel 718

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$
8220	190	0,29

Появление упругопластических волн происходит вследствие воздействия импульса давления, прикладываемого к границе образца, подвергнутого ЛУО. При численном моделировании для учета изменения давления во времени рассматривался треугольный импульс:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_1} P_{peak}, & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{t_2 - t}{t_1} P_{peak}, & t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases}, \quad (16)$$

где  $t_1, t_2$  – времена нарастания ( $t_1 = 20$  нс) и убывания ( $t_2 = 20$  нс) давления соответственно. Пиковое значение давления  $P_{peak}$  рассчитывалось в соответствии с моделью абляции в ограниченной среде, предложенной Р. Фабро [12]:

$$P_{peak} = 0,01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \cdot Z \cdot I, \quad (17)$$

где  $Z = \frac{2 \cdot Z_w \cdot Z_t}{Z_w + Z_t}$ ,  $Z_w$  и  $Z_t$  – акустические импедансы воды и материала покрытия (поглощающего слоя),  $\alpha$  – корректирующий множитель,  $I$  – плотность энергии.

Методом конечных элементов с использованием академической лицензии в пакете Ansys LS-Dyna было выполнено моделирование процесса формирования поля ОН при ЛУО центрального участка пластины из никелевого сплава Inconel 718. Толщина пластины составляла 2 мм, а площадь обрабатываемой области –  $7 \times 7$  мм. Расчетная модель, содержащая свыше 700 тысяч конечных элементов, характеризовалась адаптивным размером сетки: 200 мкм в зоне обработки и до 1000 мкм на периферии, вблизи границ пластины. Использование такой детализированной сетки обеспечило возможность определения трехмерного поля остаточных напряжений. Параметры ЛУО (размер лазерных пятен, плотность мощности и степень перекрытия) были приняты в соответствии с режимом 3 (табл. 1). На рис. 8 приведена расчетная схема для численной модели. Дискретизация проводилась при помощи 4-узловых тетраэдральных элементов с линейной функцией формы.

При численном расчете использованы следующие граничные условия:

- нижняя поверхность пластины закреплена – отсутствуют вертикальные перемещения,  $\mathbf{u}_y|_{\Gamma_1} = 0$ ;
- боковые поверхности пластинки свободны от нагрузки,  $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_2} = 0$ ;

– в зоне обработки, расположенной на верхней поверхности, задано механическое давление  $\mathbf{P}$  (длительность одного импульса составляет 40 нс),  $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_3} = \mathbf{P}$ .

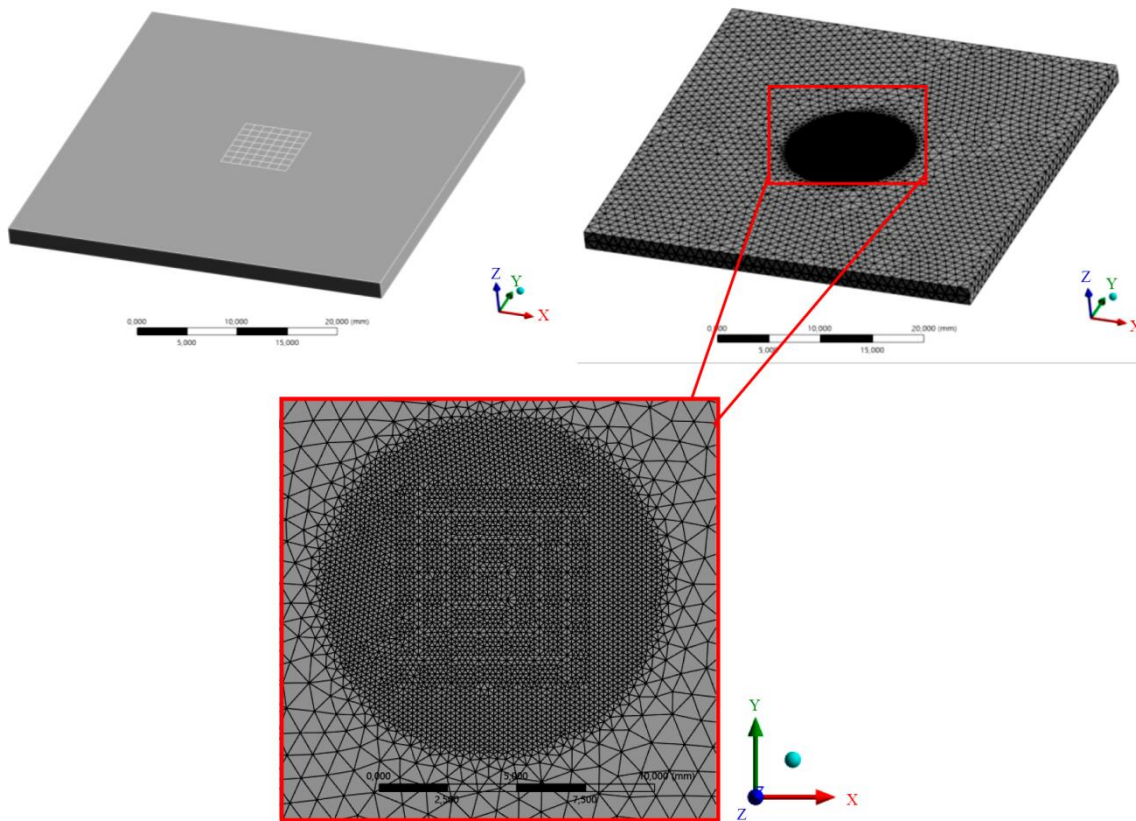


Рис. 8. Расчетная схема для численной модели

В выражение (15) входит пять параметров, значение которых необходимо знать для использования модели. Параметры  $A$ ,  $B$  и  $n$ , как правило, определяются по данным изотермических испытаний на одноосное растяжение. Параметр  $C$  находят из экспериментов, характеризующихся высокими скоростями нагружения, таких как испытания на растяжение, сжатие, кручение или баллистические испытания. Следует отметить, что в литературе встречаются табличные значения параметров для никелевого сплава Inconel 718, демонстрирующие значительный разброс (табл. 3). Он является следствием того, что модель Джонсона – Кука имеет феноменологический характер, и ее параметры не являются фундаментальными константами материала. Они представляют собой эффективные коэффициенты, которые калибруются под конкретный набор экспериментальных данных, полученных в определенных условиях и обработанных по конкретной методике.

Таблица 3

Константы модели упрочнения Джонсона – Кука для никелевого сплава Inconel 718

Параметры модели	$A$ , МПа	$B$ , МПа	$C$	$n$	$\epsilon_{eq,0}^{pl}$

Данная работа	1180	1490	0,654	0,023	0,005
Работа [25]	1108	699	0,0085	0,5189	–
Работа [26]	789	700	0,0074	0,22	–
Работа [27, 28]	1350	1139	0,0134	0,6522	1
Работа [29]	1241	622	0,0134	0,6522	1

В ходе данной работы начальные значения параметров модели Джонсона – Кока, полученные из литературы, уточнялись в процессе валидации модели до тех пор, пока результаты численного расчета не стали удовлетворительно коррелировать с экспериментальными профилями ОН, полученными после ЛУО. Набор параметров, идентифицированный на основе экспериментальных данных профилей ОН после ЛУО в рамках настоящей работы, представлен в табл. 3.

Профили ОН по глубине, полученные методом сверления отверстия на образцах после режима обработки 3 (табл. 1), а также рассчитанные на основе модели Джонсона – Кука с наиболее оптимальными параметрами, представлены на рис. 9.

Расчетные значения профилей обоих компонентов ОН ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) совпадают и удовлетворительно коррелируют с экспериментальными результатами оценки ОН методом сверления отверстия по всей глубине, за исключением участка у поверхности. Как было отмечено ранее, высокие растягивающие ОН на поверхности, полученные на основе метода сверления отверстия, могут быть связаны с артефактами измерений и качеством поверхности после ЛУО образцов без защитного покрытия. Эти особенности численная модель не учитывает, поэтому в области поверхности наблюдаются значительные расхождения результатов. Тем не менее полученная корреляция результатов является достаточной для инженерных приложений, и модель может быть использована для оценки как профилей, так и полей ОН во всем объеме материала.

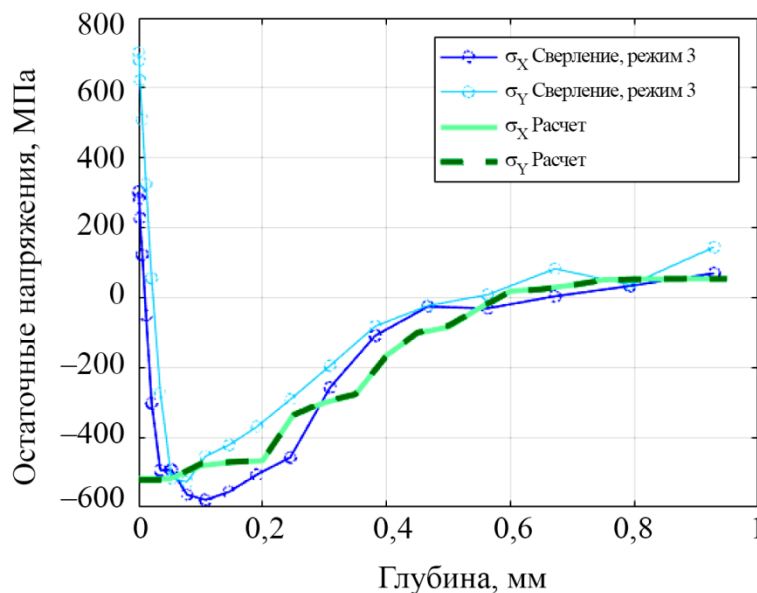


Рис. 9. Валидация численной модели: экспериментальные и расчетные профили ОН после ЛУО в режиме 3

Далее подобранный набор параметров модели Джонсона – Кука был опробован для оценки профилей ОН, получаемых после ЛУО в режимах 1 и 2, результаты представлены на рис. 10.

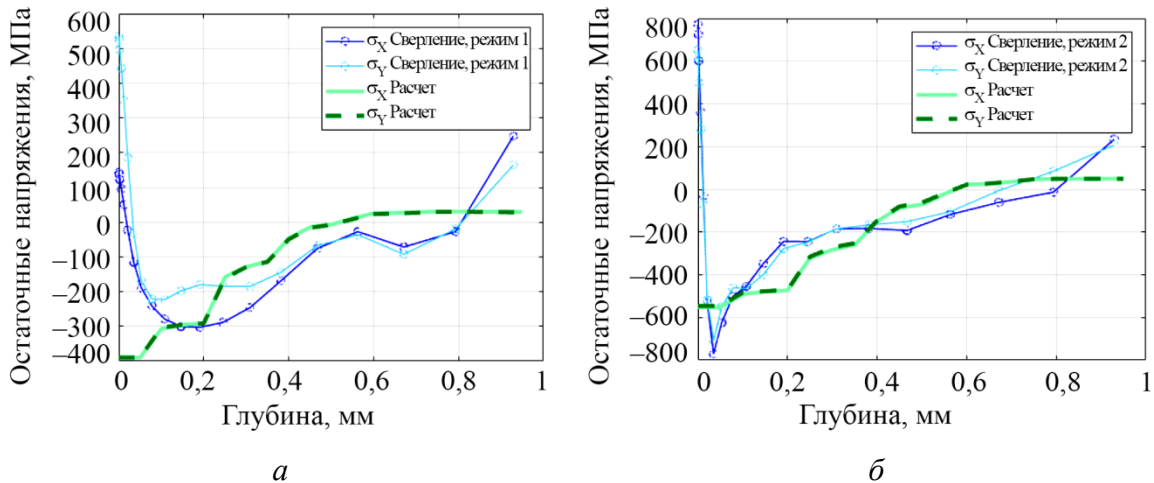


Рис. 10. Апробация численной модели с подобранным набором параметров для оценки профилей ОН, полученных в режиме 1 (а) и в режиме 2 (б)

Анализ результатов показывает, что, за исключением приповерхностной зоны, расчетные и экспериментальные профили ОН удовлетворительно коррелируют. Таким образом, подобран единый набор параметров численной модели для адекватного прогнозирования полей ОН при варьировании технологических параметров обработки никелевого сплава Inconel 718.

## 5. Заключение

В данной работе для создания полей ОН выполнена ЛУО пластин толщиной 2 мм из никелевого сплава Inconel 718. Обработка проводилась в трех различных режимах, которые отличались по плотности мощности лазерного воздействия и количеству нанесенных слоев. Профили ОН после ЛУО исследовались с применением двух широко распространенных методов: сверления отверстия и РД в сочетании с послойным травлением.

В результате сравнения полученных данных показано, что, поскольку указанные методы базируются на различных физических принципах и регистрируют деформации разной природы, прямое количественное сопоставление полученных данных некорректно. Метод РД оценивает ОН через упругие искажения кристаллической решетки, в то время как метод сверления отверстия основан на измерении релаксации полных деформаций, включающих как упругую, так и пластическую составляющие.

Качественное сопоставление результатов продемонстрировало, что данные, полученные методом сверления отверстия, в большей степени отражают влияние вариаций режимов ЛУО на профили ОН. Это объясняется тем, что более интенсивное лазерно-ударное воздействие вносит существенный вклад в пластическую деформацию, которая регистрируется методом сверления отверстия, но не выявляется методом РД с послойным травлением, чувствительным преимущественно к упругой компоненте.

Таким образом, для анализа профилей ОН в объеме материала после высокоинтенсивных воздействий, подобных ЛУО, метод сверления отверстия при допустимой геометрии образца может обеспечивать более репрезентативную оценку интегрального отклика материала.

Для моделирования процесса ЛУО предложена трехмерная математическая модель, основанная на соотношении Джонсона – Кука. Феноменологический характер модели Джонсона – Кука приводит к существенному разбросу ее параметров, используемых в литературе для описания процесса деформирования одного и того же материала. Предложенное в работе применение данной модели для описания распространения упругопластических волн в процессе ЛУО требует ее валидации для скоростей деформирования, существенно превышающих традиционные. Несмотря на это в работе показано, что модель, валидированная по дан-

ным метода сверления отверстий, позволяет, используя единый набор параметров модели, адекватно прогнозировать поля остаточных напряжений в никелевом сплаве Inconel 718 при варьировании технологических параметров ЛУО.

### Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.*

### Литература

1. Progressive developments, challenges and future trends in laser shock peening of metallic materials and alloys: a comprehensive review / W. Deng, C. Wang, H. Lu, X. Meng, Z. Wang, J. Lv, K. Luo, J. Lu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2023. – Vol. 191. – P. 104061. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104061.
2. Recent progress in laser shock peening: mechanism, laser systems and development prospects / M. Jia, Y. Wang, J. Yue, C. Cao, K. Li, Y. Yu, Y. Li, Z. Lu // Surfaces and Interfaces. – 2024. – Vol. 44. – P. 103757. – DOI: 10.1016/j.surfin.2023.103757.
3. Новиков И. А., Ножницкий Ю. А., Шибяев С. А. Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор) // Авиационные двигатели. – 2022. – Т. 2 (15). – С. 59–82. – DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_59.
4. A critical review of laser shock peening of aircraft engine components / Y. Ye, Y. Zhang, T. Huang, Sh. Zou, Y. Dong, H. Ding, V. K. Vasudevan, C. Ye // Adv. Eng. Mater. – 2023. – Vol. 2201451. – P. 1–23. – DOI: 10.1002/adem.202201451.
5. Конечно-элементное моделирование деформаций поверхности лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6, образующихся при лазерной ударной обработке с расширением низкотемпературной плазмы в ограниченном канале / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий, Д. А. Токачев, Д. Ф. Трегулов // Тепловые процессы в технике. – 2024. – Т. 16 (7). – С. 295–302.
6. Numerical simulation and experiments of titanium alloy engine blades based on laser shock processing / P. Li, S. Huang, H. Xu, Y. Li, X. Hou, Q. Wang, W. Fu, Y. Fang // Aerospace Science and Technology. – 2015. – Vol. 40. – P. 164–170. – DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.017.
7. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy / Y. K. Zhang, J. Z. Lu, X. D. Ren, H. B. Yao, H. X. Yao // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30. – P. 1697–1703. – DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.017.
8. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review / C. S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark, Y.-W. Mai // International Journal of Fatigue. – 2002. – Vol. 24. – P. 1021–1036. – DOI: 10.1016/S0142-1123(02)00022-1.
9. Significant improvement in hot corrosion resistance of Inconel 690 by laser shock peening / J. Zhu, Z. Wang, C. Wang, K. Luo, J. Lu // Surface and Coatings Technology. – 2024. – Vol. 492. – P. 131202. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131202.
10. Kuliiev R., Keller S., Kashaev N. Identification of Johnson-Cook material model parameters for laser shock peening process simulation for AA2024, Ti–6Al–4V and Inconel 718 // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 28. – P. 1975–1989. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.168.
11. Федин А. В., Хабибулин А. В. Лазерная ударная обработка сплавов на никелевой основе // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 12. – С. 213–217. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-213-214.

12. Physical study of laser preceped plasma in confined geometry / R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont // *Journal of Applied Physics*. – 1990. – Vol. 68 (2). – P. 775–784. – DOI: 10.1063/1.346783.
13. Measurement of residual stresses in different thicknesses of laser shock peened aluminum alloy samples / S. N. Staden, C. Polese, D. Glaser, J.-P. Nobre, A. M. Venter, D. Marais, J. Okasin-ski, J.-S. Park // *Materials Research Proceedings*. – 2018. – Vol. 4. – P. 117–122. – DOI: 10.21741/9781945291678-18.
14. An experimental and computational study of through-depth strain distribution during frictional treatment of a metastable austenitic steel / L. S. Goruleva, S. M. Zadvorkin, D. I. Vichu-zhanin, R. A. Savrai, P. A. Skorynina // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – Iss. 6. – P. 132–144. – DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.132-144. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2023-6/2023-6\\_425.html](http://dream-journal.org/issues/2023-6/2023-6_425.html)
15. Ultrasonic evaluation of residual stresses in AISI 316Ti steel specimen after laser shock peening / A. V. Gonchar, O. A. Plekhov, K. V. Kurashkin, E. A. Gachegova, A. N. Vshivkov, I. A. Panteleev // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2025. – Vol. 61. – P. 410–419. – DOI: 10.1134/S106183092460343X.
16. ASTM E837–13a. – DOI: 10.1520/E0837-13A.
17. ASTM E915–19. – DOI: 10.1520/E0915-19.
18. Comparison of the hole-drilling and X-ray diffraction methods for measuring the residual stresses in shot-peened aluminum alloys / V. Fontanari, F. Frendo, Th. Bortolamedi, P. Scardi // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 2005. – Vol. 40 (2). – P. 199–209. – DOI: 10.1243/030932405X7791.
19. Johnson R. G., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *EngineeringFracture Mechanics*. – 1985. – Vol. 21 (1). – P. 3148. – DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
20. Численный анализ остаточных напряжений при двухстороннем симметричном лазерном ударном упрочнении тонких пластин из титанового сплава ВТ6 / М. Л. Бартоломей, А. Ю. Изюмова, Е. А. Гачегова, А. Н. Вшивков, О. А. Плехов, С. Сваруп // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2024. – Т. 17 (4). – С. 411–421. – DOI: 10.7242/1999-6691/2024.17.4.33.
21. Surface strengthening mechanisms of laser shock peening additive manufacturing CuSn alloys: experimental and numerical simulation investigations / W. Tang, S. Li, Y. Huang, H. Ming, X. Wang, L. Li, X. Wang, Z. Liu // *Surface & Coatings Technology*. – 2025. – Vol. 495. – P. 131567. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131567.
22. Experiments and numerical simulations on fatigue properties of laser shock peening for FV520B steel / D. Jin, Z. Liu, Z. Li, C. Guo, M. Sun // *Optics & Laser Technology*. – 2025. – Vol. 182 (B). – P. 112198. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.112198.
23. Impact of dynamic recrystallization in laser shock peening predicted via a coupled cellular automata finite element model / K. Bailey, S. Sunny, R. Mathews, A. Malik // *Manufacturing Letters*. – 2025. – Vol. 44. – P. 364–375. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2025.06.044.
24. High strain-rate material model validation for laser peening simulation / K. Langer, S. Olson, R. Brockman, W. Braisted, T. Spradlin, M. E. Fitzpatrick // *The Journal of Engineering*. – 2015. – Vol. 13. – P. 150–157. – DOI: 10.1049/joe.2015.0118.
25. Farahani H. K., Ketabchi M., Zangeneh Sh. Determination of Johnson-Cook plasticity model parameters for Inconel 718 // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – Vol. 26. – P. 5284–5293. – DOI: 10.1007/s11665-017-2990-2.
26. Shi B., Attia H., Tounsi N. Identification of material constitutive laws for machining – part II: generation of the constitutive data and validation of the constitutive law // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2010. – Vol. 132. – P. 051009-1. – DOI: 10.1115/1.4002455.

Comparative analysis of methods for measuring residual stresses in a nickel alloy after laser shock peening / E. A. Gachegova, I. M. Vinogradov, A. Yu. Iziumova, A. N. Vshivkov, M. L. Bartolomei, I. S. Kudryashev, O. A. Plekhov, S. V. Zherebtsov // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2025. – Iss. 4. – P. 65–86. – DOI: 10.17804/2410-9908.2025.4.065-086.

27. Mechanical characterization and modelling of Inconel 718 material behavior for machining process assessment / A. Iturbe, E. Giraud, E. Hormaetxe, A. Garay, G. Germain, K. Ostolaza, P. J. Arrazola // *Materials Science and Engineering: A*. – 2017. – Vol. 682. – P. 441–453. – DOI: 10.1016/j.msea.2016.11.054.
28. Pereira J. M., Lerch B. A. Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel 718 for jet engine fan containment applications // *International Journal of Impact Engineering*. – 2001. – Vol. 25 (8). – P. 715–733. – DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00018-5.
29. Mitrofanov A. V., Babitsky V. I., Silberschmidt V. V. Thermomechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning // *Computational Materials Science*. – 2005. – Vol. 32 (3). – P. 463–471. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2004.09.019.