

Received: 31.10.2024

Revised: 10.12.2024

Accepted: 13.12.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.184-202

STUDYING THE STRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE SAMPLES AFTER LASER HARDENING

I. V. Vindokurov^{1, a}, M. A. Tashkinov^{1, b}, V. A. Mubassarova^{2, c}, I. A. Panteleev^{2, d},
O. A. Plekhov^{2, e}, A. Yu. Iziumova^{2, f, *}, and A. N. Vshivkov^{2, g}

¹Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russia

²Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Ak. Koroleva St., Perm, 614013, Russia

^a  <http://orcid.org/0000-0002-1885-0404>  ivv@pstu.ru;
^b  <http://orcid.org/0000-0003-4660-0020>  M.Tashkinov@pstu.ru;
^c  <http://orcid.org/0000-0001-7593-6776>  mubassarova.v@icmm.ru;
^d  <http://orcid.org/0000-0002-7430-3667>  pia@icmm.ru;
^e  <http://orcid.org/0000-0002-0378-8249>  poa@icmm.ru;
^f  <http://orcid.org/0000-0002-1769-9175>  fedorova@icmm.ru;
^g  <http://orcid.org/0000-0002-7667-455X>  vshivkov.a@icmm.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

Improving the fatigue and strength properties of structural materials involves various surface processing methods. Laser shock peening (LSP), typically applied to the surfaces of metal components and structures, is one of the widely used approaches. This study explores the potential application of LSP to non-metallic composite materials produced via fused deposition modeling. The research examines the physical mechanisms and fundamental principles of LSP, along with its effects on the microstructure and mechanical properties of composite products. The structure of the composite samples before and after LSP was analyzed by X-ray computed microtomography. Tensile tests were conducted on samples treated with LSP, and different absorbing layers were compared, namely aluminum foil, PVC tape, and gold coating. The results have shown that the mechanical properties of the LSP-treated samples, regardless of the absorbing layer used, differ only slightly from each other and from the untreated samples.

Keywords: X-ray computed microtomography, mechanical properties, production parameters, laser shock peening

Acknowledgment

The production of the samples and the determination of their mechanical properties were carried out at Perm National Research Polytechnic University with a support from the Russian Science Foundation, project No. 22-79-10350. Laser shock processing of the composite materials, as well as the algorithms for reconstructing X-ray images and analyzing the material structure, was developed under the government assignment, theme registration number 124020700047-3.

References

1. Teimouri, R., Sohrabpoor, H., Grabowski, M., Wyszynski, D., Skoczypiec, S., and Raghavendra, R. Simulation of surface roughness evolution of additively manufactured material fabricated by laser powder bed fusion and post-processed by burnishing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 84, 10–27. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.09.045.
2. Kalentics, N., Boillat, E., Peyre, P., Gorny, C., Kenel, C., Leinenbach, C., Jhabvala, J., and Logé, R.E. 3D laser shock peening – a new method for the 3D control of residual stresses in selective laser melting. *Materials & Design*, 2017, 130, 350–356. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.05.083.
3. Takata, T., Enoki, M., Chivavibul, P., Matsui, A., and Kobayashi, Y. Effect of confinement layer on laser ablation and cavitation bubble during laser shock peening. *Materials Transactions*, 2016, 57 (10), 76–1783. DOI: 10.2320/matertrans.M2016150.
4. Xiong, Q., Shimada T., Kitamura, T., and Li, Z. Atomic investigation of effects of coating and confinement layer on laser shock peening. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131, 106409. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106409.
5. Cunha, A., Giacomelli, R.O., Kaufman, J., Brajer, J., and Pereira, T.S. An overview on laser shock peening process: from science to industrial applications. In: *Int. Opt. Photonics Conf. Keep Shining, Sbfot. IOPC*, 2021, vol. 2021, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SBFotonIOPC50774.2021.9461929.
6. Clauer, A.H. and Lahrman, D.F. Laser shock processing as a surface enhancement process. *Key Engineering Materials*, 2001, 197, 121–44. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.197.121.
7. Wei, L., Yinghong, L., Weifeng, H. and Qipeng, L. Development and application of laser shock processing. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45 (12), 15–19. DOI: 10.3788/LOP20084512.0015.
8. Tang, L., Jia, W., and Hu, J. An enhanced rapid plasma nitriding by laser shock peening. *Materials Letters*, 2018, 231, 91–93. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.010.
9. Lu, J.Z., Wu, L.J., Sun, G.F., Luo, K.Y., Zhang, Y.K., Cai, J., Cui, C.Y., and Luo, X.M. Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts. *Acta Materialia*, 2017, 127, 252–66. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.01.050.
10. Zhang, X.C., Zhang, Y.K., Lu, J.Z., Xuan, F.Z., Wang, Z.D., and Tu, S.T. Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527 (15), 3411–3415. DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.076.
11. Goh, G.D., Yap, Y.L., Agarwala, S., and Yeong, W.Y. Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4 (1), 1800271. DOI: 10.1002/admt.201800271.
12. Hwang, S., Reyes, E.I., Moon, K., Rumpf, R.C., and Kim, N.S. Thermo-mechanical characterization of metal/polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44 (3), 771–777. DOI: 10.1007/s11664-014-3425-6.
13. Yan, X., Gu, J., Zheng, G., Guo, J., Galaska, A.M., Yu, J., Khan, M.A., Sun, L., Young, D.P., Zhang, Q., Wei, S., and Guo, Z. Lowly loaded carbon nanotubes induced high electrical conductivity and giant magnetoresistance in ethylene/1-octene copolymers. *Polymer*, 2016, 103, 315–27. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.09.056.
14. Chowdhury, P., Sehitoglu, H., and Rateick, R. Damage tolerance of carbon-carbon composites in aerospace application. *Carbon*, 2018, 126, 382–93. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.10.019.
15. Zwanenburg, E.A., Norman, D.G., Qian, C., Kendall, K.N., Williams, M.A., and Warnett, J.M. Effective X-ray micro computed tomography imaging of carbon fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 258, 110707. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110707.
16. Garcea, S.C., Sinclair, I., Spearing, S.M., and Withers, P.J. Mapping fibre failure *in situ* in carbon fibre reinforced polymers by fast synchrotron X-ray computed tomography. *Composites Science and Technology*, 2017, 149, 81–89. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.06.006.

17. Stock, S.R. *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications*, 2nd edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2020.
18. Raz-Ben Aroush, D., Maire, E., Gauthier, C., Youssef, S., Cloetens, P., and Wagner, H.D. A study of fracture of unidirectional composites using in situ high-resolution synchrotron X-ray microtomography. *Composites Science and Technology*, 2006, 66 (10), 1348–1353. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.09.010.
19. Ai, S., Song, W., and Chen, Y. Stress field and damage evolution in C/SiC woven composites: image-based finite element analysis and in situ X-ray computed tomography tests. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41 (4), 2323–2334. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.12.026.
20. Majid, F., Zekeriti, N., Rhanim, R., Lahlou, M., Rhanim, H., and Mrani, B. Mechanical behavior and crack propagation of ABS 3D printed specimens. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 28, 1719–1726. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.10.147.
21. Liu, F., Ferraris, E., and Ivens, J. Mechanical investigation and microstructure performance of a two-matrix continuous carbon fibre composite fabricated by 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 79, 383–393. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.04.050.
22. Lobov, E., Dobrydneva, A., Vindokurov, I., and Tashkinov, M. Effect of short carbon fiber reinforcement on mechanical properties of 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene. *Polymers*, 2023, 15 (9) DOI: 10.3390/polym15092011.
23. Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani, M., and Zahedi, A.M. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175, 107147. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107147.
24. Zhang, H. and Sun, W. Mechanical properties and failure behavior of 3D printed thermo-plastic composites using continuous basalt fiber under high-volume fraction. *Defence Technology*, 2022, 27, 237–250. DOI: 10.1016/j.dt.2022.07.010.
25. Vindokurov, I., Pirogova, Y., Tashkinov, M., and Silberschmidt, V.V. Effect of heat treatment on elastic properties and fracture toughness of fused filament fabricated PEEK for biomedical applications. *Polymers*, 2022, 14 (24), 5521. DOI: 10.3390/polym14245521.
26. Cnudde, V. and Boone, M.N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123, 1–17. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.003.
27. Hanna, R.D. and Ketcham, R.A. X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies. *Geochemistry*, 2017, 77 (4), 547–72. DOI: 10.1016/j.chemer.2017.01.006.
28. Maire, E. and Withers, P.J. Quantitative X-ray tomography. *International Materials Review*, 2014, 59 (1), 1–43.
29. Mathews, J.P., Campbell, Q.P., Xu, H., and Halleck, P. A review of the application of X-ray computed tomography to the study of coal. *Fuel*, 2017, 209, 10–24. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.079.
30. Du Plessis, A. and Boshoff, W.P. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials. *Construction and Building Materials*, 2019, 199, 637–51. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.049.
31. Villarraga-Gómez, H., Herazo, E.L., and Smith, S.T. X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology. *Precision Engineering*, 2019, 60, 544–69. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.06.007.
32. Feldkamp, L.A. and Jesion, G. 3D X-ray computed tomography. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Springer Science, New York, USA, 1986, p. 555–566.
33. Sasov, A., Liu, X., and Salmon, P.L. Compensation of mechanical inaccuracies in micro-CT and nano-CT. In: *Proceedings in SPIE, Developments in X-Ray Tomography VI: vol. 7078*, ed., S.R. Stock, 2008, 70781C. DOI: 10.1117/12.793212.
34. Ali, M.A., Umer, R., Khan, K.A., and Cantwell, W.J. Application of X-ray computed tomography for the virtual permeability prediction of fiber reinforcements for liquid compo-

site molding processes: a review. *Composites Science and Technology*, 2019, 184, 107828. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107828.

35. Naresh, K., Khan, K.A., Umer, R., and Cantwell, W.J. The use of X-ray computed tomography for design and process modeling of aerospace composites: a review. *Materials & Design*, 2020, 190, 108553. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108553.

Подана в журнал: 31.10.2024

УДК 67.017:539.3

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.184-202

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ АКРИЛОНИТРИЛБУТАДИЕНСТИРОЛА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

И. В. Виндокуров^{1, а}, М. А. Ташкинов^{1, б}, В. А. Мубассарова^{2, в}, И. А. Пантелеев^{2, г},
О. А. Плехов^{2, д}, А. Ю. Изюмова^{2, е, *}, А. Н. Вшивков^{2, ж}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр-кт, 29, Пермь, 614990, Россия

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия

^а  <http://orcid.org/0000-0002-1885-0404>  ivv@pstu.ru;
^б  <http://orcid.org/0000-0003-4660-0020>  M.Tashkinov@pstu.ru;
^в  <http://orcid.org/0000-0001-7593-6776>  mubassarova.v@icmm.ru;
^г  <http://orcid.org/0000-0002-7430-3667>  pia@icmm.ru;
^д  <http://orcid.org/0000-0002-0378-8249>  poa@icmm.ru;
^е  <http://orcid.org/0000-0002-1769-9175>  fedorova@icmm.ru;
^ж  <http://orcid.org/0000-0002-7667-455X>  vshivkov.a@icmm.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

Улучшение усталостных и прочностных характеристик конструкционных материалов включает в себя различные методы обработки поверхности. Одним из широко используемых подходов является лазерное ударное упрочнение (ЛУУ), обычно применяемое для обработки поверхностей металлических деталей и конструкций. В данном исследовании рассматривается возможность применения метода ЛУУ к неметаллическим композитным материалам, изготовленным с помощью моделирования методом наплавленного осаждения. В ходе исследования изучаются физические механизмы и фундаментальные принципы ЛУУ, а также его влияние на микроструктуру и механические свойства композитных изделий. Структура композитных образцов до и после ЛУУ была проанализирована с помощью рентгеновской компьютерной микротомографии. Были проведены испытания на растяжение образцов, обработанных лазерным ударом, и сравнение различных защитных покрытий: алюминиевой фольги, ПВХ-ленты и золотого покрытия. Результаты показали, что механические свойства образцов после ЛУУ независимо от исследованных материалов защитного покрытия значительно отличались друг от друга и от необработанных образцов.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная микротомография, механические свойства композитов, производственные параметры, лазерное ударное упрочнение

1. Введение

Повышение надежности и долговечности деталей и конструкций машин – одна из самых ответственных задач в машиностроении. Стремительное развитие технологий приводит к появлению новых материалов, предназначенных для уникальных условий эксплуатации. Однако некоторые структурные характеристики, такие как вес, коррозионная стойкость, прочность и другие, могут ограничивать их применение в таких отраслях, как аэрокосмическая, автомобильная и медицинская. В таких случаях используются методы модификации

структуры и/или требуемых свойств материалов, например различные способы обработки поверхности [1].

Одним из таких методов является лазерное ударное упрочнение (ЛУУ), разработанное для повышения усталостной прочности металлических компонентов и конструкций. ЛУУ – это процесс, в котором короткий высокоинтенсивный лазерный импульс воздействует на поверхность материала, вызывая глубокие пластические деформации. В результате в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, что повышает прочность, устойчивость к повреждениям и долговечность материала [2]. Обширные эксперименты, проведенные в работах [3] и [4], подтвердили, что выбор материалов для защитного покрытия и ограничивающего слоя имеет решающее значение, поскольку они влияют на силу и продолжительность ударного воздействия. В процессе ЛУУ для увеличения давления ударной волны используются как защитное покрытие, так и ограничивающий слой. В работе [5] подчеркивается важность использования обоих слоев, поскольку такая структура обеспечивает три ключевые характеристики: 1) создание сверхвысоких давлений, которые трудно достичь при обычной механической обработке в течение чрезвычайно короткого периода времени, формирующих остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое на определенную глубину; 2) быстрое преобразование лазерной энергии в энергию механической ударной волны в течение наносекунд; 3) высокоскоростная пластическая деформация под воздействием ударно-волновой нагрузки при скорости деформации, достигающей 10^7 с^{-1} .

В отличие от других процессов, основанных на тепловом воздействии лазера, защитный слой не позволяет лазерной энергии повредить заготовку, что делает ЛУУ холодным процессом [6]. Лазерное ударное упрочнение имеет ряд существенных преимуществ перед дробеструйным упрочнением в различных аспектах: оно позволяет снизить шероховатость поверхности, избежать вкраплений частиц, обработать небольшие галтели, недоступные для дробеструйного упрочнения, вызвать более глубокие остаточные сжимающие напряжения и уменьшить деформационное двойникование. Кроме того, в работе [7] выделяют следующие преимущества ЛУУ по сравнению с другими технологиями обработки поверхности. Во-первых, можно получить остаточные напряжения на большей (в 5–10 раз) глубине, чем при дробеструйном упрочнении. Кроме того, в поверхностном слое образуются нанозерна, значительно повышающие усталостную прочность материала. Во-вторых, точный контроль интенсивности и положения лазера позволяет с помощью ЛУУ обрабатывать детали, недоступные для других методов. Возможность интегрировать компьютерное управление способствует высокой степени автоматизации промышленного производства. В-третьих, ЛУУ – это бесконтактный процесс, который может применяться ко многим типам поверхностей материалов без предварительной подготовки, что делает его универсальным. Как упоминалось ранее, исследования влияния ЛУУ на механические свойства материалов в основном были сосредоточены на различных металлах и сплавах. Например, Танг и др. [8] показали, что твердость образцов из стали 42CrMo увеличилась на 25 % после сочетания ЛУУ с быстрым плазменным азотированием. В другом исследовании Лу и др. [9] обнаружили, что микротвердость коммерчески чистого титана (CP-титана) увеличивается примерно на 11 % после одной обработки ЛУУ и на 28 % после трех циклов. Чжан и др. [10] показали, что предел усталости сплава Ti–6Al–4V увеличился с 216 МПа до 264 и 306 МПа после одного и двух циклов ЛУУ соответственно. Однако, в отличие от металлических материалов, влияние ЛУУ на другие материалы, такие как материалы, полученные с помощью аддитивного производства, остается практически неизученным.

Современные технологии производства композитных материалов, такие как моделирование методом наплавленного осаждения, открывают уникальные возможности для создания сложных и инновационных изделий. Однако, наряду с преимуществами, эти материалы имеют и специфические проблемы, связанные с их механическими свойствами и долговеч-

ностью. Повышение их прочности и устойчивости к разрушению является особенно важной задачей. Поэтому основной мотивацией для разработки композитных материалов в индустрии 3D-печати является достижение высоких механических свойств и дополнительных функциональных возможностей, таких как оптические, тепловые или электрические, которые недостижимы при использовании чистых полимеров [11]. В композите один (или несколько) компонентов служит армирующими элементами, а другой выступает в качестве матрицы, или связующего. Для достижения желаемых функциональных свойств или сочетания нескольких свойств в одном композите различные армирующие компоненты могут быть интегрированы в изготовленные методом наплавленного осаждения материалы. В зависимости от условий эксплуатации полимерные композиты армируются микро- или нанодисперсными частицами, короткими или длинными волокнами из металлов или неметаллов [12]. Включение металлических частиц, таких как железо, медь, нержавеющая сталь или титан, или наночастиц, таких как углеродные нанотрубки, графен или графит, в полимерную матрицу позволяет создавать высокоэффективные композиты с регулируемыми тепловыми, электрическими, оптическими и механическими свойствами [13].

Композитные материалы, особенно армированные волокнами, демонстрируют анизотропию и резкую неоднородность из-за различий в свойствах связующего и волокон. Эта неоднородность влияет на деформационное поведение материала в зависимости от ориентации волокон [14, 15]. При деформации таких композитов накопление дефектов происходит в виде сложных разветвленных трехмерных структур [16]. Считается, что композиты, армированные волокнами, разрушаются, когда количество разрушенных волокон достигает критического числа N [17]. Например, в работе [18] синхротронная микротомография показала, что простые стохастические модели разрушения недооценивают реальное значение N в 3–5 раз. Покадровый анализ [16] показал, что новые разрывы волокон обычно происходят в новых местах, а не рядом с существующими разрывами. Испытания на одноосное растяжение образцов композитов C/SiC показали, что повреждения первоначально возникают в местах дефектов обработки и затем распространяются вдоль границ раздела между волокном и матрицей [19].

Исследования армирующих полимерных матриц можно разделить на несколько основных направлений, одним из которых является изучение механических свойств этих материалов. Например, в исследовании [20] проанализировано влияние плотности изготовления на механические свойства 3D-печатных образцов акрилонитрилбутадиенстирола (АБС). В работе [21] механические свойства непрерывных терморезистивных и термопластичных композитов, армированных углеродным волокном (CFRTSTPCs), исследовались при различных условиях обработки, таких как температура форсунки, пропитка волокна и межслойная/внутрислойная прочность. Статья [22] посвящена исследованию влияния ориентации печати на механические свойства композитов, изготовленных аддитивным способом. В работе [23] для 3D-принтеров FDM был разработан инновационный экструдер для производства термопластичных композитов, армированных непрерывными волокнами (CFRT). В работе [24] исследуется влияние ориентации волокон и типа полимерной матрицы на свойства при растяжении и изгибе 3D-печатных композитов, армированных непрерывными базальтовыми волокнами.

Данное исследование посвящено влиянию ЛУУ на структуру и механические свойства композитов, изготовленных методом наплавленного осаждения из АБС, армированного короткими углеродными волокнами (УВ).

2. Материалы и методы

В качестве полимерного материала использовалась АБС-нить FormaX (РЭЦ, Россия) диаметром 1,75 мм и плотностью 1,11 г/см³. Прочность на разрыв и модуль упругости при растяжении составляли 35,52 МПа и 3,21 ГПа соответственно в стандартных лабораторных

условиях. Полимерная матрица АБС была армирована коротким УВ с объемным содержанием 15 % по отношению к матрице.

Композитные образцы изготавливались на принтере Raise3D Pro3 (Raise3D, США). Полимерная нить экструдировалась через сопло диаметром 0,4 мм. Для удаления накопленной влаги полимерные нити предварительно высушивались в камере Binder FP53 (Binder GmbH, Туттлинген, Германия) при температуре 80 °С в течение 5 часов. Для определения последовательности слоев и траектории движения инструмента 3D-принтера использовалась программа ideaMaker. Параметры 3D-печати приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры печати

Характеристика	Значение
Скорость перемещения сопла, мм/мин	1800
Температура сопла, °С	290
Температура стола, °С	110
Высота слоя, мм	0,2
Ширина экструзии, мм	0,4
Заполнение	прямолинейное
Плотность застройки, %	100
Поток воздуха, %	–

Образцы на растяжение были изготовлены в соответствии со стандартом ISO 527-2:2012, их схематическое изображение и ориентация слоев показаны на рис. 1. Ориентация была выбрана вдоль направления приложенной нагрузки, так как в этом направлении прочность образца на растяжение выше [22, 25].

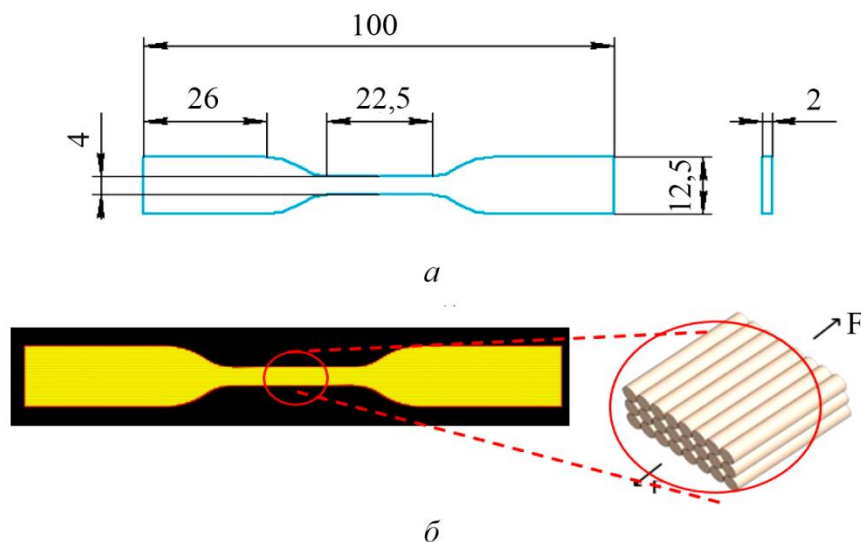


Рис. 1. Геометрия стандартного образца для испытаний на растяжение (а) и модельное представление расположения слоев образца во время 3D-печати (б)

2.1. Метод лазерного ударного упрочнения

Лазерное ударное упрочнение полимерных композиционных материалов проводилось с использованием Nd:YAG лазера (BeamTech Extra 10) в Институте механики сплошных сред УрО РАН. Длительность лазерного импульса составляла 10 нс, энергия лазерного излучения – 1 Дж. Для формирования профиля лазерного луча использовалась оптическая система, в результате чего на поверхности материала лазерный луч фокусировался в виде квадрата со стороной 1 мм. При описанных характеристиках лазерной ударной обработки плотность мощности достигала 10 ГВт/см². На рис. 2 приведены фотографии комплекса для лазерной ударной обработки и схематическое изображение процесса лазерного ударного воздействия на материал. Для изучения микроструктуры полимерных композитов после ЛУУ были обработаны две серии образцов АБС, армированных УВ. Каждая серия была разделена на две группы. В первой группе в качестве защитного покрытия на поверхность образца клеилась лента ПВХ толщиной 0,11 мм, а во второй методом вакуумного напыления на поверхность наносилось золото толщиной 30 нм. Лазерная ударная обработка проводилась на обеих поверхностях образцов последовательными ударами «встык», без перекрытия. В обоих случаях в качестве ограничивающего слоя использовался слой ламинарного водного потока толщиной около 0,5 мм.

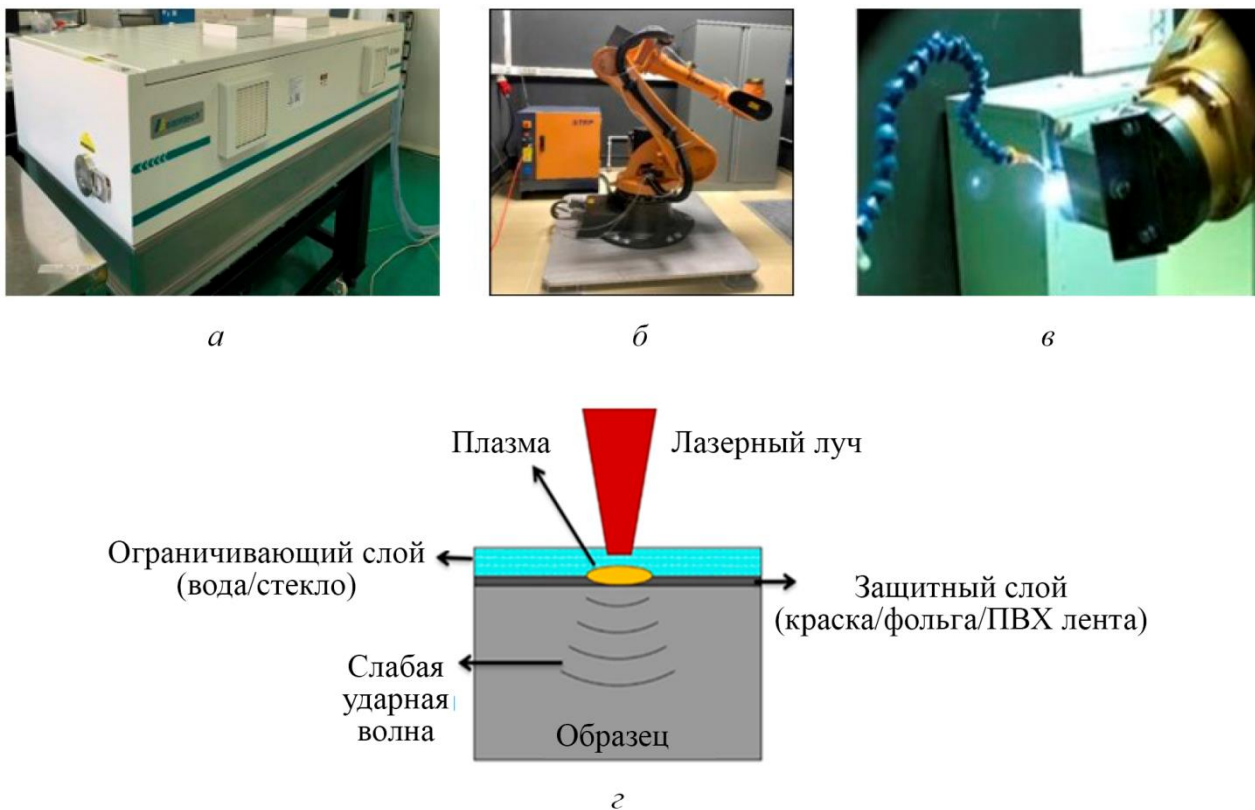


Рис. 2. Установка для лазерной ударной обработки материалов: твердотельный лазер Beamtech SGR-Extra-10 (а); робот-манипулятор STEP SR50 (б); процесс лазерной ударной обработки плоской детали (в); схематическое изображение лазерного ударного воздействия на образец (г)

2.2. Метод рентгеновской томографии

Рентгеновская компьютерная микротомография (микро-КТ, μ СТ) – это неразрушающий метод исследования структуры различных материалов, деталей и конструкций [17, 26–31]. Рентгеновская микротомография позволяет визуализировать внутреннюю структуру исследуемого объекта, получить 3D-модель, определить морфологию, особенности распределения и структурные связи между рентгеноконтрастными фазами.

Что касается композитных материалов, то микро-КТ позволяет контролировать качество на всех этапах производства благодаря неинвазивности рентгеновского излучения, быстрому сбору данных и созданию 3D-моделей, в том числе с целью численного моделирования для прогнозирования необходимых свойств деталей и конструкций.

Рентгеновский микротомограф состоит из микрофокусной рентгеновской трубки, испускающей узкий рентгеновский пучок, вращающегося столика с исследуемым образцом и детектора, преобразующего проходящие рентгеновские лучи в электрический сигнал, который затем оцифровывается и записывается на компьютер [17]. Исходные данные представляют собой набор рентгеновских теневых проекций, полученных при последовательном повороте образца вокруг вертикальной оси на $180/360^\circ$ с заданным угловым шагом и содержащих совокупную информацию об ослаблении рентгеновского пучка во всем объеме образца [17].

Следующий шаг – реконструкция теневых проекций в поперечные сечения образца с помощью модифицированного алгоритма Фельдкампа [32]. Процесс реконструкции включает в себя набор процедур предварительной обработки изображения, таких как минимизация кольцевых артефактов, компенсация ошибки положения образца, фильтрация, поворот и сглаживание изображения [17, 33]. Реконструированные сечения используются для создания 3D-модели исследуемого объекта и/или для морфологического анализа его компонентов. Для композитных материалов такими компонентами являются наполняющая полимерная матрица, возможные производственные дефекты, такие как пустоты, и армирующие частицы и/или волокна, у которых, как правило, определяются размер, форма и угловая ориентация [34, 35].

Рентгеновская съемка композитных образцов АБС, армированных УВ, проводилась в Институте механики сплошных сред УрО РАН на микротомографе SkyScan 1272 (Bruker, Бельгия). Съемка проводилась при следующих параметрах: напряжение на рентгеновской трубке – 42 кВ, ток – 56 мкА, разрешение (длина края воксела) – 2 мкм, время экспозиции – 1500 мс, шаг поворота образца – $0,1^\circ$ с получением изображения на 360° и усреднением по четырем кадрам. Продолжительность получения изображения одного образца составила 5 часов 40 минут. Восстановление проекции включало в себя поствыравнивание и подавление кольцевых артефактов, после чего полученные изображения поперечных срезов фильтровались для повышения контраста границ волокон относительно матрицы, бинаризовались и удалялись шумовые компоненты объемом менее 512 мкм^3 . Морфологический анализ включал определение длины УВ и их ориентации. Длина волокна оценивалась как расстояние между самыми удаленными точками (пикселями) отдельного объекта.

2.3. Испытание на растяжение

Испытания на растяжение проводились на универсальной испытательной машине Instron 68SC-5 с датчиком нагрузки 5 кН при постоянной скорости траверсы 0,5 мм/мин и температуре окружающей среды около 20°C . Точность измерения нагрузки составляла 0,5 % от измеренного значения в диапазоне от 5 Н до 5 кН, а разрешение смещения сервопривода – 0,0095 мкм. Деформации измерялись с помощью видеоэкстензометра AVE2. Две контрольные точки AVE2, равноудаленные от средней точки, были расположены на поверхности образца вдоль одной оси для регистрации удлинения образца. Механические свойства опреде-

лялись по кривой «напряжение – деформация». Испытания проводились не менее чем на пяти образцах из каждой серии для получения статистически значимых результатов.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Анализ структуры образцов до воздействия ЛУУ

Для выявления возможных изменений в структуре и механических свойствах, вызванных ЛУУ, были проанализированы томографические изображения исходной структуры до обработки лазерным ударом. Анализ образцов с золотым покрытием и без него показал, что структура была схожей, поэтому представлены результаты анализа только одного образца. На рис. 3 показан общий вид образца, где внешняя поверхность (внешние слои осаждения) представляет собой оболочку из полимерного материала с более высокой рентгеновской плотностью, чем полимер внутри образца. Слой золотого покрытия не может быть идентифицирован на рентгеновском снимке, поскольку внешняя полимерная оболочка имеет такую же рентгеновскую плотность. Хорошо видны УВ, преимущественно ориентированные вдоль направления 3D-печати. Наряду с УВ и плотной внешней поверхностью, в объеме образца присутствуют дефекты печати в виде пустот, окруженных плотными фрагментами полимерной матрицы. Эти дефекты, как и уплотненная внешняя поверхность образца, объясняются особенностями стеклования полимера АБС: осаждение последующего слоя в процессе 3D-печати на предыдущий не всегда происходит равномерно.

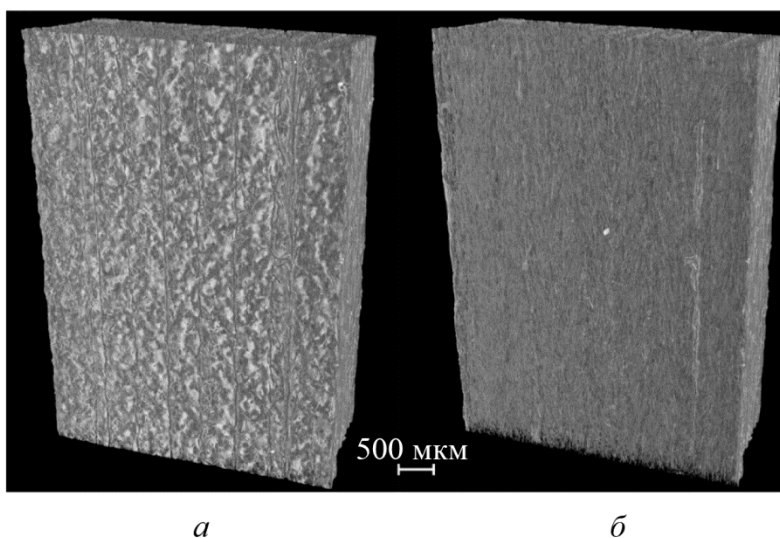


Рис. 3. Общий вид реконструированного вертикально ориентированного образца (а) и тот же вид с удаленной внешней поверхностью и визуализацией армирующих волокон (б)

Анализ компонентов показал, что содержание углеродного волокна в объеме образца составляет 9,3–12,9 %. На рис. 4 представлены результаты распределения длины волокон в цветовой шкале исходного образца. Всего был идентифицирован 33 021 объект, включая углеродные волокна, фрагменты полимеров и внешнюю поверхность. Углеродные волокна с длиной до 250 мкм были в основном равномерно распределены по объему, в то время как уплотненные полимерные фрагменты и внешняя поверхность демонстрировали более крупные значения, до 5 мм (рис. 4 б, б а).

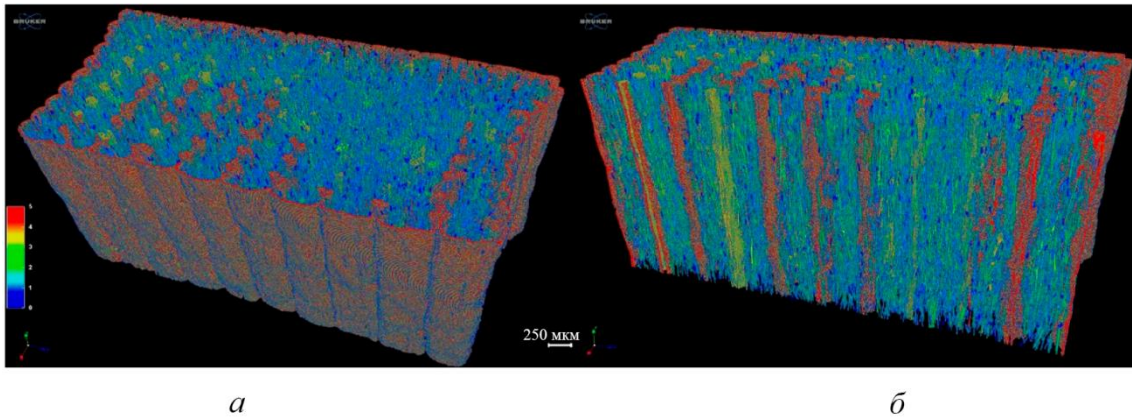


Рис. 4. Общий вид реконструированного вертикально ориентированного образца АБС+УВ с градиентом цветовой шкалы, указывающим на длину волокон (а), и увеличенный вид участка образца, показывающий армирующие волокна и дефекты 3D-печати (б)

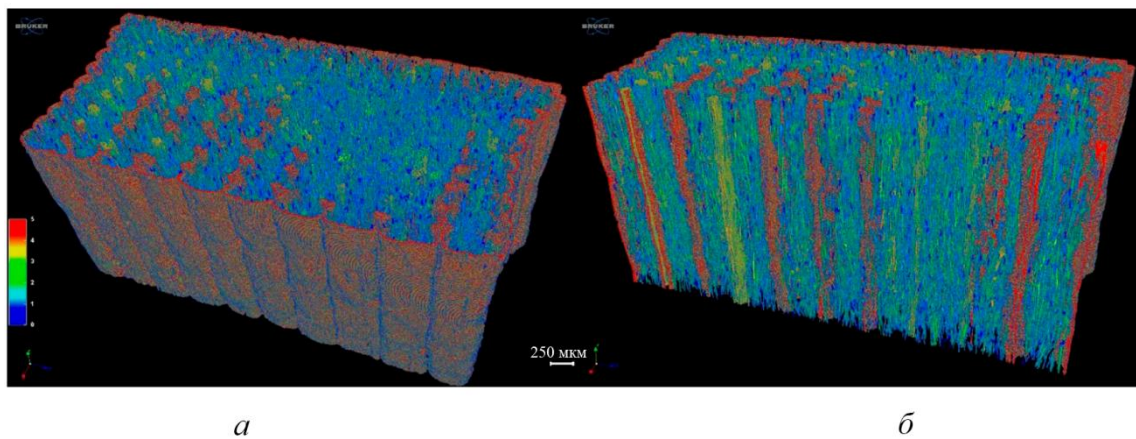


Рис. 5. Общий вид реконструированного вертикально ориентированного образца АБС+УВ с градиентом цветовой шкалы, указывающим угол ориентации (а), и увеличенный вид участка образца, показывающий армирующие волокна и дефекты 3D-печати (б)

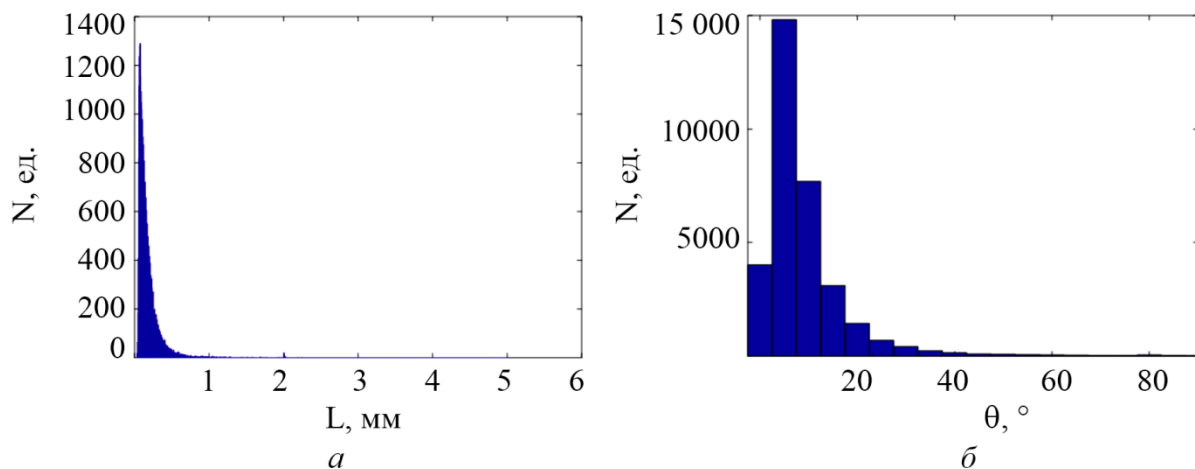


Рис. 6. Гистограммы распределения волокон в образце АБС+УВ по длине (а) и углу ориентации (б)

Количественный анализ ориентации волокон (рис. 5 и 6 б) показал, что большинство волокон выровнены под углом 0–15° к направлению 3D-печати, вместе с этим некоторые отдельные волокна и соединенные структуры ориентированы под большими углами (вплоть до 90°).

3.2. Анализ образцов после применения ЛУУ

Для стандартных образцов на растяжение в качестве защитного покрытия вместо алюминиевой ленты использовалась лента ПВХ, поскольку импеданс покрытия и композитного материала должен быть одинаковым, иначе слабая ударная волна, вызванная лазерным импульсом, будет отражаться от границы раздела. Влияния ЛУУ на микроструктуру образца АБС+УВ с защитным покрытием не было обнаружено: плотная внешняя полимерная оболочка и УВ не претерпели качественных и количественных изменений. Напротив, образец, подвергнутый лазерной ударной обработке с защитным золотым покрытием, визуально и количественно продемонстрировал изменения в своей микроструктуре. Как показано на рис. 8, микроструктура поверхности образца АБС+УВ претерпела значительные изменения, став более пористой и фрагментированной. Индивидуальный анализ объектов показал, что, хотя внешняя поверхность стала более пористой, ее целостность сохранилась. Длина и ориентация остались такими же, как и до обработки лазерным ударом (рис. 7–9). Количественный анализ волокон не выявил статистически значимых различий между образцом до и после воздействия лазерным излучением. Однако анализ связности волокон показал, что количество связей увеличилось более чем в два раза, достигнув 54 000 связей. Максимальное количество связей соответствует пористой поверхностной оболочке, измененной в результате обработки лазерным ударом. Несмотря на визуальные изменения, испарения материала за счет ЛУУ не произошло: объемное содержание волокон и денсифицированных фрагментов полимерной матрицы, включая внешнюю оболочку, осталось таким же, как и до обработки.

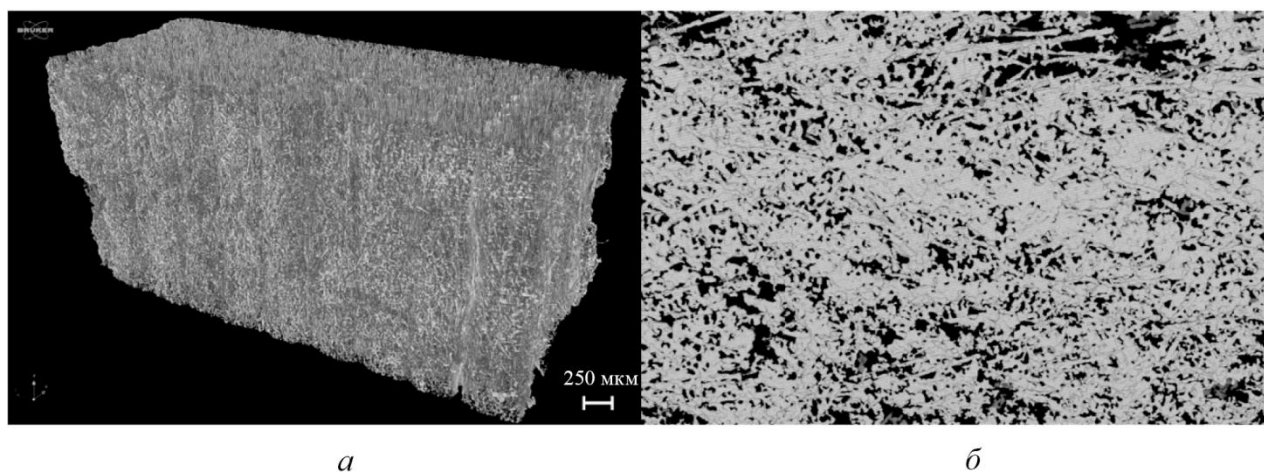


Рис. 7. Общий вид реконструированного вертикально ориентированного образца, подвергнутого лазерной ударной обработке (а), и увеличенное изображение поверхностной оболочки образца после ЛУУ (б)

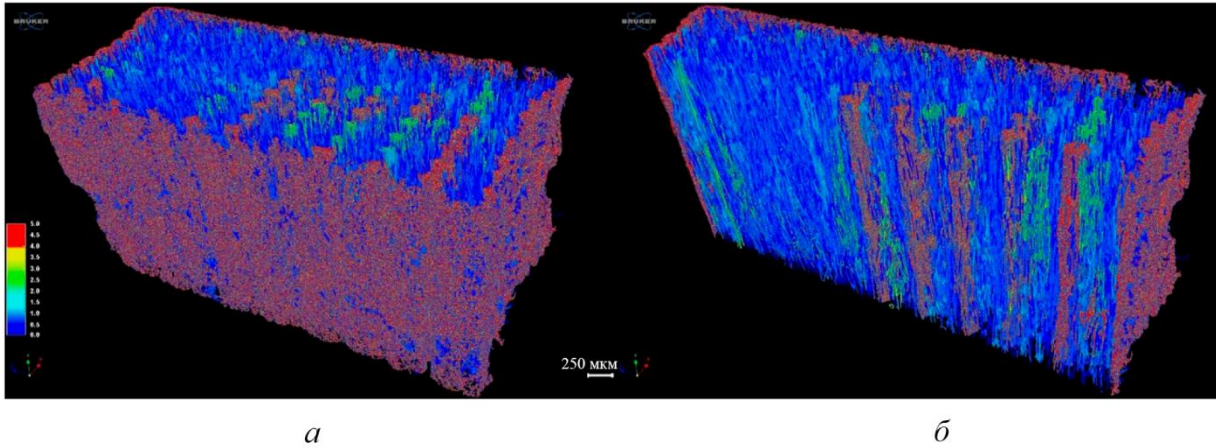


Рис. 8. Общий вид реконструированного вертикально ориентированного образца АБС+УВ с градиентом цветовой шкалы, указывающим на длину волокон (а), и увеличенный вид участка образца, показывающий армирующие волокна и дефекты 3D-печати (б)

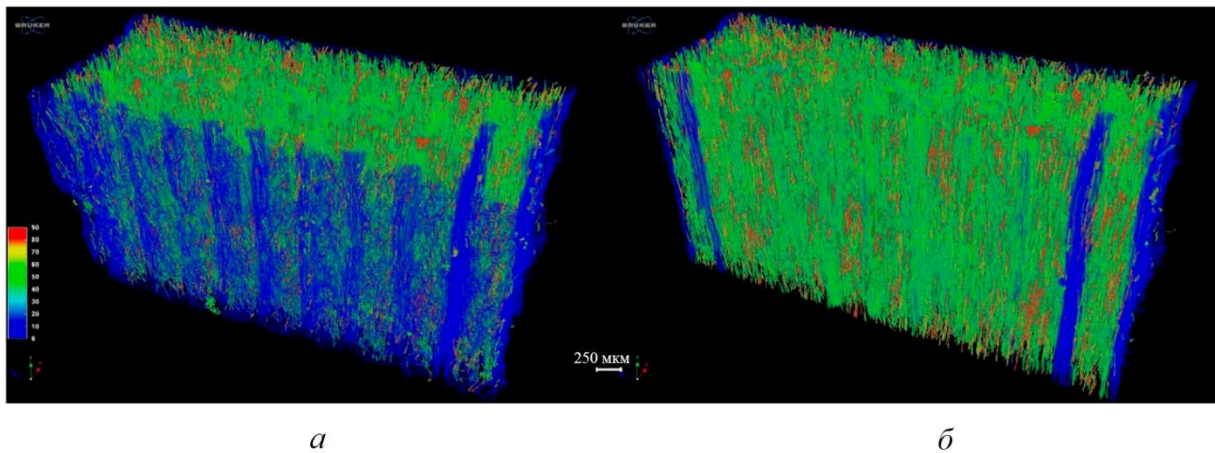


Рис. 9. Общий вид реконструированного вертикально ориентированного образца АБС+УВ с градиентом цветовой шкалы, указывающим угол ориентации (а), и увеличенный вид участка образца, показывающий армирующие волокна и дефекты 3D-печати (б)

3.3. Анализ механических свойств при растяжении

Рассмотрим результаты испытаний композитных образцов на растяжение. На рис. 10 представлена средняя диаграмма «напряжение – деформация» для серии необработанных образцов с указанием доверительного интервала. Как видно из графика, максимальное растягивающее напряжение достигает 70 МПа при деформации 4,6 %. В табл. 2 приведены средние значения со стандартными отклонениями для необработанных образцов при испытании на растяжение.

Таблица 2

Параметры образцов при испытании на растяжение

Тип образца	Прочность на разрыв, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация при разрушении, %	Поглощение энергии, Дж·м ⁻³
Необработанные образцы	69,57 ± 2,61	9,27 ± 0,15	4,34 ± 0,26	156,30 ± 15,45

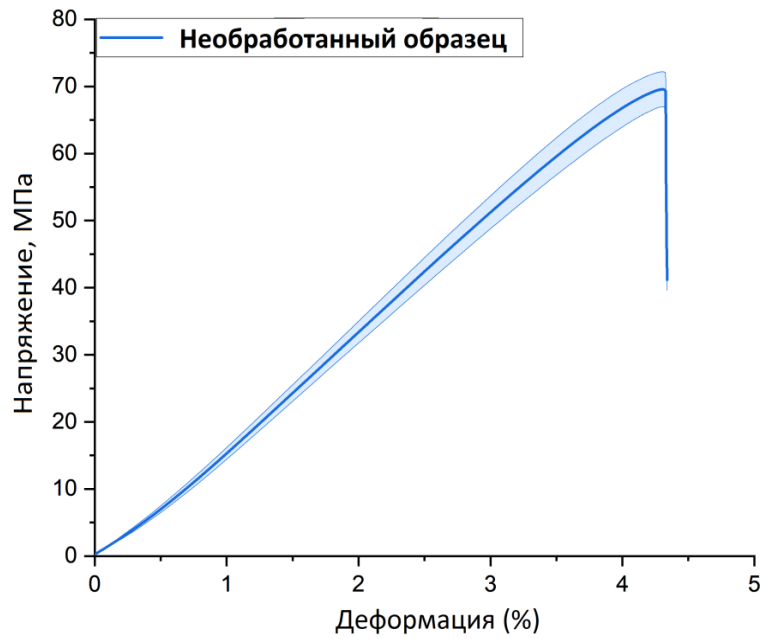


Рис. 10. Общая кривая «напряжение – деформация» для серии образцов, не подвергавшихся ЛУУ

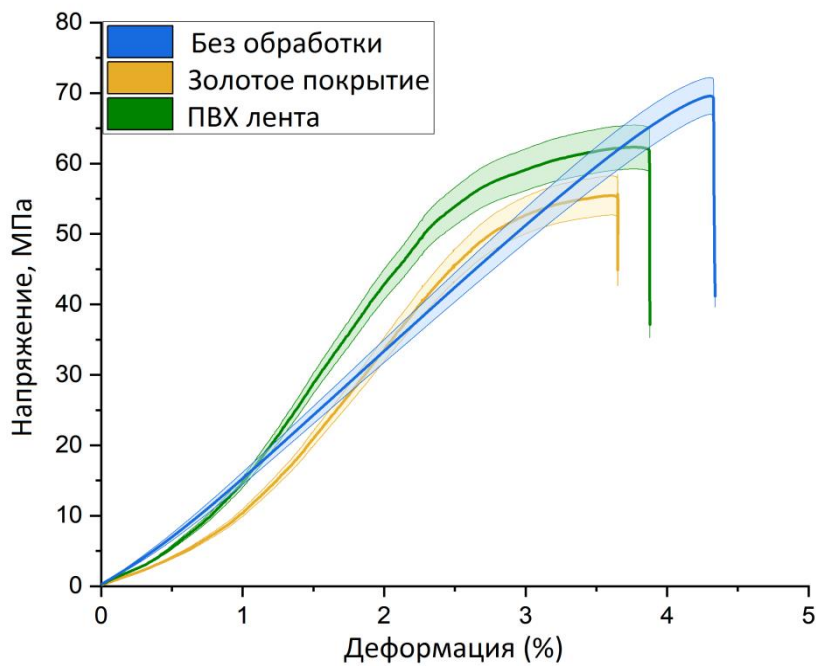


Рис. 11. Зависимость напряжения от деформации для образцов при испытании на растяжение

Таблица 3

Параметры образцов после ЛУУ при испытании на растяжение

Тип образца (защитное покрытие)	Прочность на разрыв, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация при разрушении, %	Поглощение энергии, Дж·м ⁻³
После ЛУУ (золотое покрытие)	55,45 ± 2,77	7,50 ± 0,38	3,65 ± 0,18	105,90 ± 5,30
После ЛУУ (ПВХ лента)	62,32 ± 3,12	8,34 ± 0,42	3,88 ± 0,19	141,50 ± 7,10

На рис. 11 показаны результаты испытаний на растяжение образцов после лазерного ударного упрочнения с различными защитными покрытиями. Для сравнения приведены данные базовых образцов. Как видно из графиков, обе серии образцов после ЛУУ демонстрируют более низкие значения прочности на разрыв и деформации по сравнению с базовыми образцами. Данные испытаний на растяжение представлены в табл. 3. Анализ экспериментальных результатов для стандартных образцов на растяжение показывает, что лазерная ударная обработка при использовании рассматриваемых защитных покрытий не улучшает механические свойства. Различные защитные покрытия приводят к различному поведению стандартных образцов при растяжении: прочность на разрыв отличается на 20 % для золотого покрытия и на 10 % для ПВХ-ленты по сравнению с необработанными образцами. Значения модуля упругости демонстрируют такую же разницу. Деформация при разрушении составляет 16 и 11 % для образцов с золотым покрытием и ПВХ-лентой соответственно. Наибольшее расхождение наблюдается в способности материала поглощать энергию при упругой деформации (табл. 1, 2) и составляет 32 % для образца с золотым покрытием и 9 % для ПВХ-ленты.

4. Заключение

В данном исследовании изучалась возможность повышения надежности и долговечности композиционных материалов, изготовленных методом послойного осаждения, а также применимость метода ЛУУ к полимерам. Были получены результаты испытаний на растяжение образцов из АБС с углеродным наполнителем, подвергнутых ЛУУ с использованием различных материалов защитного покрытия. Структурные изменения в образцах до и после лазерной ударной обработки отслеживались с помощью компьютерной рентгеновской микротомографии. Экспериментальные данные позволили установить следующее: значения прочности обработанных образцов зависят от типа защитного покрытия, отклонения от стандартных образцов составляют от 10 до 20 %; использование ПВХ-ленты в качестве покрытия предпочтительнее золотого покрытия из-за меньшего (10 %) отклонения прочности на растяжение от этого показателя для необработанных образцов; на основании кривых «напряжение – деформация» можно предположить, что лазерная ударная обработка активирует дополнительные механизмы деформации или, возможно, фазовые переходы в материале. Полученные результаты могут послужить основанием для проведения дальнейших экспериментальных исследований с целью определения оптимальных параметров ЛУУ и выбора материалов защитного покрытия, а также различных композиционных материалов. Это позволит сформировать базу данных по физико-механическим свойствам 3D-печатных композитов при различных защитных покрытиях и режимах ЛУУ, что в конечном итоге повысит их прочность и устойчивость к разрушению.

Благодарность

Изготовление и определение механических свойств образцов проводилось в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10350). Лазерная ударная обработка композиционных материалов, алгоритмы реконструкции рентгеновских изображений и анализа структуры материала были разработаны в рамках государственного задания (регистрационный номер темы 124020700047-3).

Литература

1. Simulation of surface roughness evolution of additively manufactured material fabricated by laser powder bed fusion and post-processed by burnishing / R. Teimouri, H. Sohrabpoor, M. Grabowski, D. Wyszynski, S. Skoczypiec, R. Raghavendra // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 84. – P. 10–27. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.09.045.
2. 3D laser shock peening – a new method for the 3D control of residual stresses in selective laser melting / N. Kalentics, E. Boillat, P. Peyre, C. Gorny, C. Kenel, C. Leinenbach, J. Jhabvala, R. E. Logé // Materials & Design. – 2017. – Vol. 130. – P. 350–356. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.05.083.
3. Effect of confinement layer on laser ablation and cavitation bubble during laser shock peening / T. Takata, M. Enoki, P. Chivavibul, A. Matsui, Y. Kobayashi // Materials Transactions. – 2016. – Vol. 57 (10). – P. 1776–1783. – DOI: 10.2320/matertrans.M2016150.
4. Atomic investigation of effects of coating and confinement layer on laser shock peening / Q. Xiong, T. Shimada, T. Kitamura, Z. Li // Optics & Laser Technology. – 2020. – Vol. 131. – P. 106409. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106409.
5. An overview on laser shock peening process: from science to industrial applications / A. Cunha, R. O. Giacomelli, J. Kaufman, J. Brajer, T. S. Pereira // Int. Opt. Photonics Conf. Keep Shining, Sbfot. IOPC. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/SBFotonIOPC50774.2021.9461929.
6. Clauer A. H., Lahrman D. F. Laser shock processing as a surface enhancement process // Key Engineering Materials. – 2001. – Vol. 197. – P. 121–144. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.197.121.
7. Development and application of laser shock processing / L. Wei, L. Yinghong, W. He, Q. Li // Laser & Optoelectronics Progress. – 2008. – Vol. 45 (12). – P. 15–19. – DOI: 10.3788/LOP20084512.0015.
8. Tang L., Jia W., Hu J. An enhanced rapid plasma nitriding by laser shock peening // Materials Letters – 2018. – Vol. 231. – P. 91–93. – DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.010.
9. Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts / J. Z. Lu, L. J. Wu, G. F. Sun, K. Y. Luo, Y. K. Zhang, J. Cai, C. Y. Cui., X. M. Luo // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 127. – P. 252–266. – DOI: 10.1016/j.actamat.2017.01.050.
10. Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening / X. C. Zhang, Y. K. Zhang, J. Z. Lu, F. Z. Xuan, Z. D. Wang, S. T. Tu // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol. 527 (15). – P. 3411–3415. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.076.
11. Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite / G. D. Goh, Y. L. Yap, S. Agarwala, W. Y. Yeong // Advanced Materials Technologies. – 2019. – Vol. 4 (1). – P. 1800271. – DOI: 10.1002/admt.201800271.
12. Thermo-mechanical characterization of metal/polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process / S. Hwang, E. I. Reyes, K. Moon, R. C. Rumpf, N. S. Kim // Journal of Electronic Materials. – 2015. – Vol. 44 (3). – P. 771–777. – DOI: 10.1007/s11664-014-3425-6.
13. Lowly loaded carbon nanotubes induced high electrical conductivity and giant magnetoresistance in ethylene/1-octene copolymers / X. Yan, J. Gu, G. Zheng, J. Guo, A. M. Galaska,

- J. Yu, M. A. Khan, L. Sun, D. P. Young, Q. Zhang, S. Wei, Z. Guo // *Polymer*. – 2016. – Vol. 103. – P. 315–327. – DOI: 10.1016/j.polymer.2016.09.056.
14. Chowdhury P., Sehitoglu H., Rateick R. Damage tolerance of carbon-carbon composites in aerospace application // *Carbon*. – 2018. – Vol. 126. – P. 382–393. – DOI: 10.1016/j.carbon.2017.10.019.
15. Effective X-ray micro computed tomography imaging of carbon fibre composites / E. A. Zwanenburg, D. G. Norman, C. Qian, K. N. Kendall, M. A. Williams, J. M. Warnett // *Composites Part B: Engineering*. – 2023. – Vol. 258. – P. 110707. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110707.
16. Mapping fibre failure in situ in carbon fibre reinforced polymers by fast synchrotron X-ray computed tomography / S. C. Garcea, I. Sinclair, S. M. Spearing, P. J. Withers // *Composites Science and Technology*. – 2017. – Vol. 149. – P. 81–89. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.06.006.
17. Stock S. R. *MicroComputed Tomography*. – 2nd edition. – Boca Raton, London, New York : CRC Press, Taylor and Francis Group, 2020.
18. A study of fracture of unidirectional composites using in situ high-resolution synchrotron X-ray microtomography / D. Aroush Raz-Ben, E. Maire, C. Gauthier, S. Youssef, P. Cloetens, H. D. Wagner // *Composites Science and Technology*. – 2006. – Vol. 66 (10). – P. 1348–1353. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.09.010.
19. Ai S., Song W., Chen Y. Stress field and damage evolution in C/SiC woven composites: Image-based finite element analysis and in situ X-ray computed tomography tests // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 41 (4). – P. 2323–2334. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.12.026.
20. Mechanical behavior and crack propagation of ABS 3D printed specimens / F. Majid, N. Zekeriti, R. Rhanim, M. Lahlou, H. Rhanim, B. Mrani // *Procedia Structural Integrity*. – 2020. – Vol. 28. – P. 1719–1726. – DOI: 10.1016/j.prostr.2020.10.147.
21. Liu F., Ferraris E., Ivens J. Mechanical investigation and microstructure performance of a two-matrix continuous carbon fibre composite fabricated by 3D printing // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 79. – P. 383–3893. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.04.050.
22. Effect of short carbon fiber reinforcement on mechanical properties of 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene / E. Lobov, A. Dobrydneva, I. Vindokurov, M. Tashkinov // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15 (9). – DOI: 10.3390/polym15092011.
23. Heidari-Rarani M., Rafiee-Afarani M., Zahedi A. M. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 175. – P. 107147. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107147.
24. Zhang H., Sun W. Mechanical properties and failure behavior of 3D printed thermoplastic composites using continuous basalt fiber under high-volume fraction // *Defence Technology*. – 2022. – Vol. 27. – P. 237–250. – DOI: 10.1016/j.dt.2022.07.010.
25. Effect of heat treatment on elastic properties and fracture toughness of fused filament fabricated PEEK for biomedical applications / I. Vindokurov, Y. Pirogova, M. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (24). – P. 5521. – DOI: 10.3390/polym14245521.
26. Cnudde V., Boone M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications // *Earth-Science Reviews*. – 2013. – Vol. 123. – P. 1–17. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.003.
27. Hanna R. D., Ketcham R. A. X-ray computed tomography of planetary materials: a primer and review of recent studies // *Geochemistry*. – 2017. – Vol. 77 (4). – P. 547–572. – DOI: 10.1016/j.chemer.2017.01.006.
28. Maire E., Withers P. J. Quantitative X-ray tomography // *International Materials Review*. – 2014. – Vol. 59 (1). – P. 1–43.
29. A review of the application of X-ray computed tomography to the study of coal / J. P. Mathews, Q. P. Campbell, H. Xu, P. Halleck // *Fuel*. – 2017. – Vol. 209. – P. 10–24. – DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.079.

30. Du Plessis A., Boshoff W. P. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 199. – P. 637–651. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.049.
31. Villarraga-Gómez H., Herazo E. L., Smith S. T. X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology // *Precision Engineering*. – 2019. – Vol. 60. – P. 544–569. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.06.007.
32. Feldkamp L. A., Jesion G. 3D X-ray computed tomography // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – New York, USA : Springer Science, 1986. – P. 555–566.
33. Sasov A., Liu X., Salmon P. L. Compensation of mechanical inaccuracies in micro-CT and nano-CT // *Proceedings of SPIE. Vol. 7078 : Developments in X-Ray Tomography VI* / ed. by S. R. Stock. – 2008. – P. 70781C. – DOI: 10.1117/12.793212.
34. Application of X-ray computed tomography for the virtual permeability prediction of fiber reinforcements for liquid composite molding processes: a review / M. A. Ali, R. Umer, K. A. Khan, W. J. Cantwell // *Composites Science and Technology*. – 2019. – Vol. 184. – P. 107828. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107828.
35. The use of X-ray computed tomography for design and process modeling of aerospace composites: a review / K. Naresh, K. A. Khan, R. Umer, W. J. Cantwell // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 190. – P. 108553. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108553.