

Волновое деформационное упрочнение в комбинированных и аддитивных технологиях

А.В. Киричек¹, Д.Л. Соловьев², А.В. Яшин², С.А. Силантьев²

¹ Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия;

² Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин в технологических процессах их изготовления необходимо использование упрочняющих операций. Способ волнового деформационного упрочнения имеет широкие технологические возможности и позволяет формировать большую глубину модифицированного слоя с различной равномерностью упрочнения.

Цель работы — рассмотреть технологические возможности применения волнового деформационного упрочнения в комбинированных и аддитивных технологиях.

Результаты. ВДУ это один из способов, который позволяет полнее реализовать потенциальные возможности других упрочняющих технологий, с которыми он применяется при комбинированном упрочнении. Описаны результаты исследований комбинированной технологии, включающей предварительное волновое деформационное упрочнение и последующую химико-термическую обработку (цементацию). Установлено, что использование такой обработки позволяет до 2,5 раз повысить долговечность при действии контактно-усталостных нагрузок. Описаны результаты исследований комбинированной технологии, включающей предварительное волновое деформационное упрочнение и последующую термическую обработку. Установлено, что использование такой технологии при создании равномерно модифицированной структуры позволяет повысить абразивную износостойкость до 16%, при создании гетерогенно модифицированной структуры повысить усталостную долговечность до 60% и более. Описаны результаты исследований использования волнового деформационного упрочнения в аддитивных технологиях для повышения прочностных характеристик синтезируемого металлического материала. Установлено, что механические свойства образцов, полученных при использовании волнового деформационного упрочнения, могут быть повышены до 2,5 раз относительно аналогичных свойств проката из материала той же марки.

Заключение. Полученные результаты исследований могут быть использованы не только для упрочнения ответственных деталей машин на финишных этапах их изготовления, но и в аддитивных технологиях получения деталей.

Ключевые слова: волна деформации; твёрдость; термическая обработка; химико-термическая обработка; поверхностный слой; аддитивные технологии; деформационное упрочнение.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Яшин А.В., Силантьев С.А. Волновое деформационное упрочнение в комбинированных и аддитивных технологиях // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 5. С. **x-y**. DOI: [10.17816/0321-4443-677151](https://doi.org/10.17816/0321-4443-677151) EDN: NVNCVV

Wave Strain Hardening in Combined and Additive Technologies

Andrey V. Kirichek¹, Dmitry L. Soloviev², Alexander V. Yashin², Sergey A. Silantiev²

¹ Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia;

² Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov, Vladimir, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: To ensure the operational properties of machine parts in the technological processes of their manufacturing, use of hardening operations is necessary. The method of wave strain hardening has wide technological possibilities and allows forming a large depth of the modified layer with various uniformity of strengthening.

AIM: Studying of the technological possibilities of using wave strain hardening in combined and additive technologies.

RESULTS: Wave strain hardening is one of the methods that helps to enhance the potential of other hardening technologies, with which it is used in combined strengthening. The paper considers the results of studies of the combined technology, including preliminary wave strain hardening and subsequent thermochemical treatment (cementation). It was found that the use of such treatment increases the durability under the action of contact-fatigue loads by up to 2.5 times. The paper considers the results of studies of the combined technology, including preliminary wave strain hardening and subsequent heat treatment. It was found that the use of such technology increases the abrasive wear resistance up to 16% in creating a uniformly modified structure, and the fatigue life up to 60% or more in creating a heterogeneously modified structure. The paper considers the results of studies of the use of wave strain hardening in additive technologies to improve the strength characteristics of the synthesized metallic material. It was found that the mechanical properties of samples obtained using wave strain hardening can be increased up to 2.5 times regarding similar properties of rolled products made from the same grade of material.

CONCLUSION: The obtained study results can be used not only for hardening critical machine parts at the final stages of their manufacturing, but also in additive technologies for producing parts.

Keywords: strain wave; hardness; heat treatment; thermochemical treatment; surface layer; additive technologies; strain hardening.

TO CITE THIS ARTICLE:

Kirichek AV, Soloviev DL, Yashin AV, Silantiev SA. Wave Strain Hardening in Combined and Additive Technologies. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(5):x-y. DOI: 10.17816/0321-4443-677151 EDN: NVNCVV

ОБОСНОВАНИЕ

Одной из главных задач технологии машиностроения является обеспечение необходимых эксплуатационных свойств наиболее нагруженных ответственных деталей машин, которые определяют срок службы всего механизма или изделия. Для её решения обычно используется упрочняющая обработка. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) хорошо известный способ упрочнения деталей машин, преимуществами которого является простота реализации и широкие технологические возможности получения поверхностного слоя с необходимыми параметрами качества.

Среди известных способов ППД волновое деформационное упрочнение (ВДУ) статико-импульсной обработкой занимает особое место, поскольку позволяет создавать глубокий упрочненный поверхностный слой до 6-8 мм и более, при этом существует возможность регулировать равномерность упрочнения, которая крайне важна для повышения эксплуатационных свойств деталей. Возможность получения большой глубины упрочнения достигается за счёт концентрирования ударных волн деформации в пятне контакта инструмента и упрочняемой поверхности, которые возникают в ударной системе боек-волновод после удара. Управление ударными волнами осуществляется за счёт изменения геометрических параметров ударной системы. Волны деформации образуют в пятне контакта ударные импульсы, форма которых адаптирована для передачи максимальной энергии упрочняемому металлическому материалу. Упрочнение волной деформации осуществляется в условиях комбинированного воздействия статической и ударной нагрузки. Статическая нагрузка должна обеспечивать непрерывный контакт ударной системы с упрочняемой поверхностью и обычно составляет не менее 10% от динамической. Постоянный контакт с деформируемым телом создаёт эффект пролонгированного ударного импульса. Это позволяет более полно передавать энергию ударов от ударной системы к нагружаемому материалу, максимально повышая КПД процесса упрочнения. В результате воздействия волн деформации на поверхности образуются пластические отпечатки требуемых размеров с заданным перекрытием, что позволяет регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно модифицированную структуру, которая часто более эффективна для повышения эксплуатационных характеристик деталей, работающих в условиях действия циклических нагрузок [1, 2].

Особенности ВДУ позволяют использовать его как самостоятельно, так и в составе комбинированных упрочняющих технологий, а также в аддитивных технологиях, которые в последнее время развиваются достаточно интенсивно.

Цель работы заключается в изучении технологических возможностей волнового деформационного упрочнения (ВДУ) для совместного применения в комбинированных технологиях и аддитивном производстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все чаще традиционные методы упрочнения не всегда отвечают современным требованиям к надежности и долговечности деталей машин. Поэтому в настоящее время достаточно актуальным становится развитие комбинированных технологий упрочнения. Особенно эффективными оказались подходы, которые объединяют воздействия на упрочняемый материал с различной физической природой. Анализ существующих методов комбинированного упрочнения продемонстрировал высокую эффективность совместного применения ППД и химико-термической обработки. Применение ППД перед процессом цементации увеличивает плотность дислокаций, активизирует диффузионные процессы и позволяет достичь более высоких уровней концентрации углерода в диффузионной зоне. Это создает возможность сокращения времени и энергетических затрат на процесс упрочнения, а также обеспечивает дополнительный ресурс для улучшения эксплуатационных характеристик деталей [3, 4]. Применение ВДУ при комбинированном упрочнении позволяет формировать более глубокую диффузионную зону для проникновения углерода при последующей цементации.

В результате проведенных исследований установлено, что при комбинированном упрочнении цементацией с предварительным ВДУ формируется равномерно модифицированный поверхностный слой, наиболее насыщенный углеродом после

цементации, и расположенный под ним гетерогенно модифицированный подслоя. Изменение чередования твёрдых и мягких участков гетерогенно модифицированного подслоя осуществляется режимами ВДУ [5–8]. Установлены режимы комбинированного упрочнения цементацией с предварительным ВДУ, способствующие повышению долговечности при действии контактно-усталостных нагрузок до 2,5 раз. Применение предварительного ВДУ позволило сократить время и энергетические затраты, связанные с процессом науглероживания и ускорить процесс цементации до 6 раз. Это особенно важно при получении глубоких науглероженных слоев до 5 мм и более.

Традиционно считается, что предварительное ППД металлических материалов перед термической обработкой (ТО) не имеет смысла, так как упрочнение исчезает при последующем термическом воздействии. Однако известен способ упрочнения, использующий комбинированное воздействие предварительным объёмным пластическим деформированием (волочение, прокатка и др.) и последующей ТО — предварительная термомеханическая обработка (ПТМО). Целью ПТМО является повышение прочностных характеристик металлических материалов за счёт образования пластическим деформированием дислокационной структуры, которая сохраняет свою устойчивость при нагреве ТО [4, 6]. Недостатком такого способа является невозможность регулирования равномерности упрочнения и, соответственно, создание гетерогенно модифицированной структуры.

Сочетание, когда вначале осуществляется предварительное упрочнение ППД, а затем происходит упрочнение ТО, не применялось. Использование при комбинированной обработке ВДУ позволит не только создавать гетерогенно модифицированную структуру, но и получать глубокий упрочнённый поверхностный слой что, как показывает ПТМО, достаточно важно для дополнительного эффекта при сочетании с ТО.

В результате проведенных исследований комбинированной обработки ВДУ+ТО установлено, что применение ВДУ позволяет достигнуть более высоких значений средней твёрдости в поверхностном слое, как относительно неупрочненной стали, так и после упрочнения только ТО. Например, для стали 30ХГСА степень упрочнения после ТО составила 18%, а после ВДУ+ТО – 48% (рис. 1). Твёрдость при применении ВДУ+ТО относительно ТО может быть повышена до 25 % при неизменной ударной вязкости. Для стали 10ХСНД степень упрочнения после ТО составила 10%, а после ВДУ+ТО — 39%. Твёрдость при применении ВДУ+ТО относительно ТО может быть повышена до 27 % при неизменной ударной вязкости, при этом поверхностный слой получает одновременное повышение твёрдости и ударной вязкости [6].

При режимах ВДУ, обеспечивающих равномерно модифицированную структуру, комбинированная обработка ВДУ+ТО позволила увеличить абразивную износостойкость образцов из стали 30ХГСА до 16%. При создании ВДУ гетерогенно модифицированной структуры комбинированная обработка ВДУ+ТО позволила увеличить усталостную долговечность более чем на 60% по сравнению с образцами, упрочнёнными только ТО.

В настоящее время аддитивные технологии, используемые для создания металлических деталей машин, активно развиваются и внедряются в производство [7–11]. Однако, несмотря на растущую популярность, главным недостатком деталей, полученных таким способом, является наличие внутренних дефектов структуры выращенного металлического материала и, в связи с этим, низкие прочностные характеристики относительно материалов, полученных традиционными методами. Для улучшения структуры и повышения прочностных характеристик, выращиваемых металлических материалов, достаточно эффективно применение упрочняющей обработки ППД.

Проблема улучшения структуры и механических характеристик выращиваемого металла может быть решена применением деформационной упрочняющей обработки в процессе послойного синтеза. В настоящее время активно развивается применение при выращивании металлических материалов различных способов ППД, таких как накатывание, ультразвуковая ударная обработка, чеканка, лазерная ударная обработка, когда каждый последующий наплавленный слой подвергается пластическому деформированию в горячем или холодном состоянии, измельчая и оптимизируя размер зерна наплавленного металла и, тем самым, улучшая механические свойства материала изделия [12–17].

Такие способы, как правило, обеспечивают упрочнённый поверхностный слой глубиной не более 1–3 мм, тогда как синтезируемый слой при выращивании наплавкой может

достигать 1,5-2,5 мм и более.

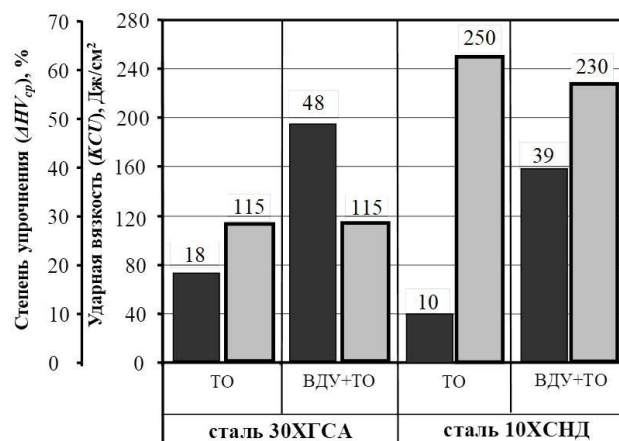


Рис. 1. Степень упрочнения и ударная вязкость после термической обработки и предварительного волнового деформационного упрочнения с последующей термической обработкой для сталей 30ХГСА (исходная ударная вязкость 150 Дж/см²) и 10ХСНД (исходная ударная вязкость 200 Дж/см²).

Fig. 1. Degree of hardening and impact resistance after heat treatment and preliminary wave strain hardening followed by heat treatment for the 30HGSA (initial impact resistance 150 J/cm²) and the 10ChSND steels (initial impact resistance 200 J/cm²).

Поверхностный слой синтезируемой 3DMP-методом детали, нагреваясь до высоких температур тепловым потоком от ванны расплава, частично утрачивает эффект деформационного упрочнения. Решение проблемы эффективного упрочнения возможно при использовании ВДУ, обеспечивающего большую глубину упрочнённого поверхностного слоя, позволяя упрочнять одновременно несколько наплавленных слоев. Процесс ВДУ целесообразно проводить при температуре деформируемой поверхности 200...400°C, то есть через небольшой промежуток времени после наплавки, без необходимости полного охлаждения наплавленного материала.

Волновое термдеформационное упрочнение (ВТДУ) показало высокую эффективность в повышении прочностных характеристик выращенного металлического материала [18, 19]. В результате проведённых исследований установлено, что в отличие от неупрочнённых, синтезированных с применением ВТДУ образцы из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы имеют более высокие механические свойства: твёрдость может быть повышена в 2,5-2,6 раза, предел текучести — в 2-2,2 раза, предел прочности — в 1,5-1,7 раза, что существенно (в 1,4-2,5 раза) превышает аналогичные свойства проката из материала той же марки (рис 2.).

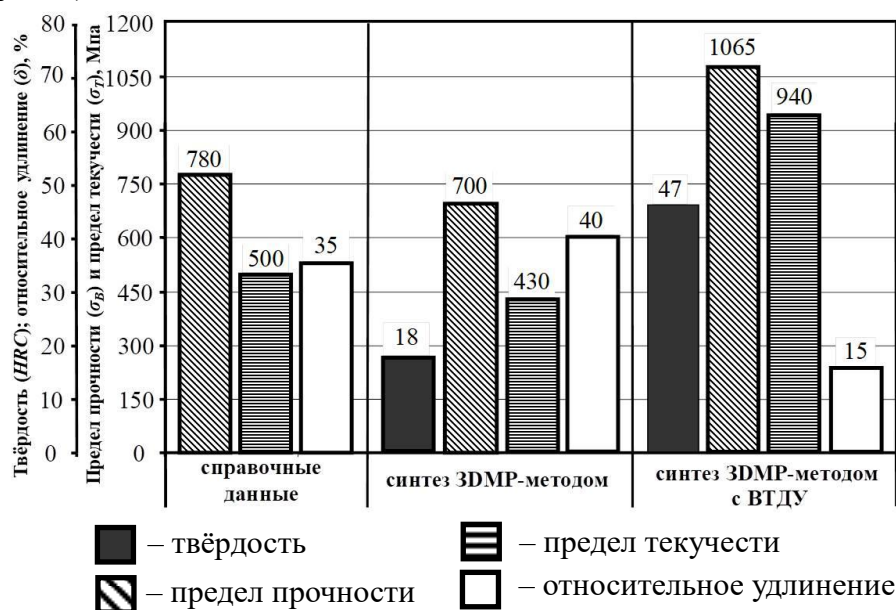


Рис. 2. Прочностные характеристики проката и выращенных образцов из сплава NiCrMo-3.

Fig. 2. Strength characteristics of rolled and grown samples from the NiCrMo-3 alloy.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование поверхностного слоя тяжело нагруженных деталей с заранее заданными высокими параметрами качества является одним из важнейших ресурсов повышения долговечности узлов машин и оборудования. Широкими возможностями в повышении долговечности обладают технологические методы, основанные на использовании поверхностного пластического деформирования. Применение таких методов в составе комбинированных и аддитивных технологий позволяет увеличить их потенциал. Рассмотренный в работе метод ВДУ позволяет создавать глубокий упрочнённый поверхностный слой с требуемой равномерностью упрочнения, формируя при необходимости как равномерно, так и гетерогенно модифицированную структуру. ВДУ может достаточно эффективно применяться не только самостоятельно, но и при комбинированной обработке, а также для упрочнения синтезируемых слоев при аддитивном синтезе. При использовании предварительного ВДУ с последующей термической или химико-термической обработкой (цементацией), усталостная долговечность деталей, изготовленных из широко распространённых конструкционных сталей, может быть повышена до 60%. Применение ВДУ с нагревом при послойном синтезе хромникелевых и хромникельмолибденовых сплавов позволяет повышать физико-механические характеристики материала в 1,5–2,5 раза по сравнению со свойствами аналогичного материала, полученного прокатом. Проведение дальнейших исследований возможностей ВДУ в составе различных технологий позволит значительно расширить номенклатуру обрабатываемых материалов и деталей из них.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.В. Киричек — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; Д.Л. Соловьев — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; А.В. Яшин — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; С.А. Силантьев — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, работа «Проведение фундаментальных научных исследований» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по проекту №FZWR-2024-0003 (№ 075-00150-24-03) «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термомодеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: A.V. Kirichek: literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the manuscript; D.L. Soloviev: literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the manuscript; A.V. Yashin: literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the manuscript; S.A. Silantiev: literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the manuscript. All the

ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the work "Conducting fundamental scientific research" within the framework of the basic part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for project No. FZWR-2024-0003 (No. 075-00150-24-03) "Development of a technological strategy and theoretical and experimental study of key elements of the technology of additive synthesis from metal wire parts by the 3DMP method and wave thermal strain hardening of synthesized machine parts".

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Kirichek AV, Solovyev DL, Lazutkin AG. *Technology and equipment for static-pulse processing of surface-plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 2004. (In Russ.) EDN: OWDGXC
2. Papshev DD, Pronin AM, Kubyshev AB. Efficiency of strengthening of cemented machine parts. *Bulletin of mechanical engineering*. 1990;(8):61–64. (In Russ.)
3. Boytsov AG, Mashkov VN, Smolentsev VA, et al. *Hardening of parts surfaces by combined methods*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1991. (In Russ.) EDN: SXSCYJ
4. Bernstein ML. *Thermomechanical processing of metals and alloys* (in 2 vols). Moscow: Metallurgiya; 1968. (In Russ.)
5. Ivashko VS, Buikus KV, Sarancev VV. *Modern technologies in restoration of units and parts of cars*. Minsk: Izobretatel'; 2011. (In Russ.)
6. Kirichek AV, Soloviev DL, Yashin AV, et al. Application of combined strengthening by deformation wave and heat treatment to improve wear resistance. *Hardening technologies and coatings*. 2024;(4):185–188. (In Russ.) doi: 10.36652/1813-1336-2024-20-4-185-188 EDN: AVLZIB
7. Oskolkov AA, Matveev EV, Bezukladnikov II, et al. Advanced technologies of additive manufacturing of metal products. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2018. 20(3):90–105. (In Russ.) doi: 10.15593/2224-9877/2018.3.11 EDN: YGHHLV
8. Gibson I, Rosen D, Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd ed. New York: Springer Science+Business Media; 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3 EDN: XOQOWP
9. Dinovitzer M, Chen X, Laliberte J, et al. Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure. *Additive Manufacturing*. 2019;26:138–146. doi: 10.1016/j.addma.2018.12.013
10. Fonseca PP, Vidal C, Ferreira F, et al. Orthogonal cutting of Wire and Arc Additive Manufactured parts. *Int J Adv Manuf Technol*. 2022;119(2):1–21. doi: 10.1007/s00170-022-08678-3 EDN: HRFYSJ
11. Duarte VR, Rodrigues TA, Schell N, et al. In-situ hot forging direct energy deposition-arc of CuAl8 alloy. *Addit Manuf*. 2022;55:102847. doi: 10.1016/j.addma.2022.102847 EDN: ZEVNTI

THEORY, DESIGN, TESTING

12. Xiangfang X, Ganguly S, Ding J, et al. Improving mechanical properties of wire plus arc additively manufactured maraging steel through plastic deformation enhanced aging response. *Materials Science & Engineering A*. 2019;747:111–118. doi: 10.1016/j.msea.2018.12.114
13. Colegrove PA, Martina F, Roy MJ, et al. High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium Components. *Advanced Materials Research*. 2014;996:694-700. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.996.694
14. Zhang HO, Rui W, Liye L, et al. HDMR technology for the aircraft metal part. *Rapid Prototyp. J*. 2016;22(6):857-863. doi: 10.1108/RPJ-05-2015-0047
15. Zhou C, Jiang F, Xu D, et al. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment. *Journal of Materials Processing Tech*. 2020; 80(6):116599. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116599
16. Adams RJ, inventor. *Solid-free-form fabrication process including in-process component deformation*. United States patent US 20070122560 (A1). 2007.
17. Farias FWC, dos Santos TJG, Oliveira, JP. Directed energy deposition + mechanical interlayer deformation additive manufacturing: a state-of-the-art literature review. *Int J Adv Manuf Technol*. 2024;131(3-4):1-40. doi: 10.1007/s00170-024-13126-5
18. Fedonina SO. *Improving the quality of wire-synthesized parts using wave thermal deformation hardening* [dissertation]. Bryansk; 2021. (In Russ.) EDN: UOPRMN
19. Kirichek AV, Fedonin ON, Khandozhko AV, et al. Hybrid technologies and equipment for additive synthesis of products. *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2022;8(134):31–38 (In Russ.) doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-31-38 EDN: PHNJGX

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Яшин Александр Васильевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения; адрес: Россия, 600026, Владимир, ул. Горького, д. 87; ORCID: 0000-0002-3186-1300; eLibrary SPIN: 3473-4047; e-mail: yashin2102@yandex.ru	* Alexander V. Yashin, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor of the Mechanical Engineering Technology Department; address: 87 Gorkogo st, Vladimir, Russia, 600026; ORCID: 0000-0002-3186-1300; eLibrary SPIN: 3473-4047; e-mail: yashin2102@yandex.ru
Соавторы:	Co-Authors:
Киричек Андрей Викторович, д-р техн. наук, профессор, проректор по перспективному развитию; ORCID: 0000-0002-3823-0501; eLibrary SPIN: 6910-0233; e-mail: avkbgtn@gmail.com	Andrey V. Kirichek, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Vice-rector for Advanced Work; ORCID: 0000-0002-3823-0501; eLibrary SPIN: 6910-0233; e-mail: avkbgtn@gmail.com
Соловьев Дмитрий Львович, д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения; ORCID: 0000-0002-4475-319X; e-mail: murstin@yandex.ru	Dmitry L. Soloviev Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Mechanical Engineering Technology Department; ORCID: 0000-0002-4475-319X; e-mail: murstin@yandex.ru
Силантьев Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения; ORCID: 0000-0002-3524-385X; eLibrary SPIN: 2686-4678; e-mail: ppdsio@yandex.ru	Sergey A. Silantiev, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor of the Mechanical Engineering Technology Department; ORCID: 0000-0002-3524-385X; eLibrary SPIN: 2686-4678; e-mail: ppdsio@yandex.ru
* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author	