

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 31-40.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 31-40.

Научная статья
УДК 621.787.6.004
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-31-40

Волновое деформационное упрочнение в процессе аддитивного синтеза

Андрей Викторович Киричек¹, д.т.н.
Дмитрий Львович Соловьев², д.т.н.
Сергей Владимирович Баринов³, к.т.н.
Светлана Олеговна Федонина⁴, к.т.н.

^{1, 4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

^{2, 3} Владимирский государственный университет, Владимир, Россия

¹ avk.57@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

² murstin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>

³ box64@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-446X>

⁴ fedonina.sv2015@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0472-4845>

Аннотация. В статье рассматривается гибридная технология, объединяющая аддитивное производство металлических изделий с использованием метода WAAM и волнового деформационного упрочнения, направленная на улучшение механических характеристик создаваемых деталей. WAAM-технология, представляет собой метод аддитивного производства, который использует электрическую дугу для плавления металлической проволоки, позволяя создавать объемные металлические изделия путем наложения слоев. Эта технология сочетает в себе принципы традиционного сварочного производства и аддитивных методов, позволяя эффективно изготавливать детали сложной формы. Ключевыми преимуществами WAAM-технологии являются скорость производства, снижающая затраты, а также возможность создания больших и сложных деталей, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами. Однако при синтезировании изделий обычно сталкиваются с проблемами неоднородности микроструктуры, пористости и крупнозернистости, снижающими их прочность. Для преодоления этих проблем предлагается использование волнового деформационного упрочнения, которое обеспечивает значительное увеличение глубины упрочнения, создает сжимающие остаточные напряжения и способствует тонкому измельчению зернистой структуры. Разработана конечно-элементная модель в ANSYS, для анализа температурных полей и механических нагрузок в гибридном процессе. Моделирование позволило оптимизировать режимы синтеза и волнового деформационного упрочнения, учитывая термдеформационные эффекты. Экспериментальные исследования на сплаве ЭИ868 подтвердили эффективность подхода: применение волнового деформационного упрочнения привело к измельчению структуры (до 10 раз), повышению твердости в 2,5 раза, предела прочности в 1,5 раза и предела текучести в 2 раза при сохранении ударной вязкости. Результаты демонстрируют потенциал гибридной технологии WAAM и волнового деформационного упрочнения для создания крупногабаритных деталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: аддитивные технологии, сварочная дуга, волна деформации, деформационное упрочнение, микроструктура, твердость, прочность

Благодарности: 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 термдеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

Для цитирования: Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Федонина С.О. Волновое деформационное упрочнение в процессе аддитивного синтеза // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 31–40. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-31-40

Wave strain hardening in the additive synthetic process

Andrey V. Kirichek¹, D. Eng.

Dmitry L. Soloviev², D. Eng.

Sergey V. Barinov³, PhD. Eng.

Svetlana O. Fedonina⁴, PhD. Eng.

^{1,4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

^{2,3} Vladimir State University, Vladimir, Russia

¹ avk.57@yandex.ru

² murstin@yandex.ru

³ box64@rambler.ru

⁴ fedonina.sv2015@gmail.com

Abstract. The article discusses a hybrid technology that combines additive manufacturing of metal products using the WAAM technique and wave strain hardening aimed at improving the mechanical characteristics of the parts being created. WAAM technology is an additive manufacturing technique that through an electric arc melts metal wire, making three D metal products by layering. This technology combines the principles of traditional welding production and additive methods, making efficient parts production of complex shapes possible. Key advantages of WAAM technology are the following: speed of production, which reduces costs, as well as the ability to manufacture large and complex parts that are difficult or impossible to make using traditional techniques. However, when synthesizing products, the most popular problems are heterogeneity of microstructure, porosity and coarse-grain zones, which result in strength loss. To overcome these problems, it is recommended to use wave strain hardening, which provides a significant increase in the depth of hardening, creates compressive residual stresses and promotes fine grinding of the granular structure. A finite element model has been developed in ANSYS for the analysis of temperature fields and mechanical loads in a hybrid process. The simulation made it possible to optimize the modes of synthesis and wave strain hardening, taking into account thermal deformation effects. Experimental studies on the ES868 alloy have confirmed the effectiveness of the approach: the use of wave strain hardening resulted in structure refinement (up to 10 times), hardness increase by 2.5 times, tensile strength by 1.5 times and yield strength by 2 times at one and the same toughness. The results prove the potential of hybrid WAAM technology and wave strain hardening for large-sized parts manufacturing with improved performance characteristics.

Keywords: additive technologies, welding arc, deformation wave, strain hardening, microstructure, hardness, strength

Acknowledgments: 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 the 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 deformation hardening of synthesized machine parts."

For citation: Kirichek A.V., Soloviev D.L., Barinov S.V., Fedonina S.O. Wave strain hardening in the additive synthetic process / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 31–40. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-31-40

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) в области металлических материалов представляют собой важное направление современного машиностроительного производства. АТ характеризуются возможностью создания объектов с помощью послойного выращивания материала, что значительно отличает их от традиционных методов производства. Аддитивные технологии для металлов, становятся все более популярными в различных отраслях, включая авиацию, энергетику, автомобильную промышленность и

медицинскую технику. Преимуществом использования АТ является возможность создания компонентов со сложными формами, которые могут быть недостижимы при использовании традиционных методов производства, проектировать ажурные и тонкостенные детали с оптимизированной геометрией и весом. Традиционные методы получения деталей обычно приводят к значительным отходам, в то время как АТ минимизируют количество материала и не требуют создания сложных инструментов, что сокращает затраты на производство и

воздействие на окружающую среду. Кроме того, АТ отличается быстрой реакцией на изменения в геометрии деталей, что значительно увеличивает гибкость производства.

Аддитивная технология WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), представляет собой одну из современных технологий послойного синтеза, используемую для создания металлических изделий. Она сочетает преимущества дуговой сварки и 3D-печати и характеризуется использованием электрической дуги как источника энергии для плавления проволоки, которая служит сырьем для формирования изделий. Основным принципом WAAM-технологии заключается в том, что ровный слой металла формируется путем наплавления проволоки, подаваемой в зону электрической дуги, где она плавится и сразу же осаждается на предварительно подготовленную подложку или предыдущие слои [1].

Преимуществами использования WAAM-технологии является более высокая производительность и экономическая эффективность по сравнению с порошковыми аддитивными технологиями. Использование дуговой сварки позволяет быстро наплавливать металл, что значительно ускоряет процесс, а использование проволоки вместо металлических порошков, а также менее дорогостоящего оборудования, по сравнению с лазерными или электронно-лучевыми системами, значительно снижают затраты. Таким образом, WAAM-технология позволяет получать крупные и сложные по форме детали, которые зачастую невозможно произвести другими методами, такими как литье или механическая обработка [2 – 4].

Однако WAAM-технология имеет недостатки, которые сдерживают ее широкое применение.

Вопрос прочности изделий, созданных с помощью АТ, является одним из наиболее острых в современном машиностроении. Эти проблемы часто возникают из-за уникальности процесса, который не всегда может гарантировать однородные механические свойства. При синтезе по WAAM-технологии в результате газовыделения, конденсации или неправильных температурных режимов создаются внутренние поры, которые становятся местами концентрации напряжений, что может приводить к

преждевременному разрушению изделия [5]. Пористость оказывает негативное влияние на эксплуатационные свойства изделия, особенно в условиях действия высоких нагрузок или агрессивной среды.

Размер зерна – еще один важный фактор, непосредственно влияющий на свойства синтезированного материала [6]. При аддитивном производстве по WAAM-технологии завышенный или недостаточно контролируемый размер зерна может привести к снижению прочности, увеличению хрупкости и ухудшению устойчивости к усталости. Слишком крупные зерна способствуют образованию слабых участков в металле, в то время как более мелкие зерна обеспечивают лучшие механические свойства благодаря эффективному барьерному действию на перемещение дислокаций.

Для повышения механических свойств металлических материалов применяются упрочняющие технологии. Современные упрочняющие технологии, как правило, включают термическое или деформационное воздействие на материал, а также нанесение покрытий на рабочие изделия. Однако, нанесением покрытий невозможно исправить объемную структуру синтезированного материала.

Известно, что термическая обработка позволяет изменить микроструктуру и улучшить механические свойства материалов, влияет на прочность, твердость, пластичность, эксплуатационные свойства изделия в целом. Например, после поверхностной закалки увеличение твердости может достигать до 200 %, а глубина упрочнения составлять до 4...5 мм, при этом в подповерхностном слое формируются как растягивающие, так и сжимающие напряжения. Однако, возможна термообработка только полностью синтезированной детали, причем ее применение целесообразно с целью снятия внутренних напряжений и проблематично с целью упрочнения вследствие сопутствующего коробления, отклонения пространственной формы изделия от заданной.

Для улучшения механических свойств материалов, созданных с помощью аддитивного производства, нашло применение горячее изостатическое прессование (ГИП),

при котором в целях упрочнения на материал воздействуют одновременно высокой температурой и давлением [7]. Высокое давление (до 200 МПа и более) инертного газа (обычно аргона), при высокой температуре (до 2000 °С) равномерно воздействует на заготовку со всех сторон. Применение ГИП помогает устранить или уменьшить дефекты, такие как поры, микротрещины и другие внутренние неоднородности, которые возникают в процессе аддитивного производства. Кроме того, ГИП позволяет улучшить механические свойства, оптимизировать микроструктуру, изменяя размеры и распределение зерен, обеспечивая лучшее сочетание прочности и пластичности. Однако, широкое применение ГИП сдерживается высокой стоимостью оборудования и большой длительностью технологического процесса.

Одним из наименее энерго- и трудоемких способов, обеспечивающих повышение твердости и мелкодисперсную структуру упрочненного слоя, является поверхностное пластическое деформирование (ППД). ППД создает сжимающие остаточные напряжения, что важно для увеличения долговечности деталей работающих в условиях действия усталостных нагрузок. Применение ППД для упрочнения полностью синтезированной детали может быть затруднено из-за сложной геометрии и, как правило, небольшой глубины упрочнения. Кроме того, малая толщина стенок синтезированного изделия ограничивает применение значительных сил деформирования. Характерная для подавляющего большинства способов ППД небольшая глубина упрочненного слоя накладывает серьезные ограничения на применимость технологии, как в процессе аддитивного синтеза, так и после него.

Созданию гибридных технологий, сочетающих WAAM-технологии с процессами ППД, длительное время препятствовало убеждение, что термическое воздействие при синтезе детали полностью устранил эффект наклепа, лишая деформационное упрочнение всякого смысла. Успешное применение ППД перед термической и химико-термической обработкой [8], положительные результаты

высокотемпературной и низкотемпературной термомеханической обработки, а также опыт электромеханической обработки, свидетельствуют о проявлении общего закона технологического наследования при формировании микроструктуры комбинированно упрочненного материала, подтверждая эффективность совмещенного деформационного и термического воздействия.

Идея послойного деформационного упрочнения синтезируемого изделия была запатентована еще в 2007 г. (патент US 20070122560 A1), предлагалось для упрочнения использовать процессы ППД – накатывание и чеканку. Так, при применении межпроходной холодной прокатки с нагрузкой 50 кН мартенситностареющей стали синтезируемой WAAM-технологией ее предел прочности был увеличен с 1410 до 1750 МПа, что соответствует стандарту для кованой стали (1760 МПа) [9]. Для упрочнения чеканкой при синтезе наплавкой образцов из сплава АМг5 использовался пневматический молот с энергией ударов 7,1 Дж. Время деформационного упрочнения составляло 60 с, 3200 ударов в минуту. Это позволило увеличить предел прочности на 20 %, предел текучести на 15 %, относительное удлинение на 20 % по сравнению с выращенным аналогичным образом неупрочненным образцом [10].

Представленные данные подтверждают, что послойное пластическое деформирование наплавляемого металла в процессе 3DMP-синтеза способствует уменьшению внутренних дефектов, выравниванию слоев, а также улучшению механических свойств синтезированных изделий. Однако обработка перечисленными способами позволяет получить небольшую глубину упрочнения, при этом эффективная глубина упрочнения с наиболее высокими параметрами качества поверхностного слоя, как правило, составляет не более 1/3 от общей глубины упрочнения, что явно недостаточно.

Наиболее широкие возможности управления параметрами качества поверхностного слоя имеет волновое деформационное упрочнение (ВДУ) в процессе статико-импульсной обработки

поверхностным пластическим деформированием (СИО ППД) [11]. При ВДУ нагружение упрочняемой поверхности осуществляется генератором импульсов, основными элементами которого является ударная система боек-волновод. При ударе бойком, волновод передает волну деформации в пятно контакта инструмента и нагружаемой поверхности, часть ее проходит в упрочняемый материал, а другая отражается от пятна контакта, проходит через ударную систему, и вновь возвращается к пятну контакта. Такой процесс происходит многократно до полного затухания ударной волны, а прямая и отраженные волны деформации будут генерировать в пятне контакта пролонгированный ударный импульс. Основным условием передачи энергии всех волн деформации, сформированных после удара в ударной системе, является жесткий контакт всех элементов системы (бойк – волновод – инструмент – упрочняемая поверхность) в течение времени, превышающем действие ударного импульса в пятне контакта. Жесткий контакт обеспечивается статическим поджатием генератора импульсов к упрочняемой поверхности. В результате, в очаге деформации – области контакта деформирующей поверхности инструмента и упрочняемой поверхности изделия генерируется пролонгированный ударный импульс, состоящий из головной и хвостовой части, передающий упрочняемому материалу максимальную долю энергии удара.

Преимуществом ВДУ является возможность адаптировать форму ударных импульсов под свойства материала, повышая КПД процесса и расширяя технологические возможности упрочнения. Результирующее воздействие на единичную область материала складывается путем интерференции прямых и отраженных волн деформации. Многократно возникающие сложные напряженно-деформированные состояния сопровождаются изменением структуры на большой глубине подповерхностного слоя. Применение ВДУ позволяет достичь глубины упрочнения до 6...10 мм при максимальной твердости до 6500 МПа. Регулирование энергии при ВДУ позволяет локально воздействовать на участки

поверхности размером от 1...2 мм до 50 мм, что обеспечивает гибкость обработки для решения различных задач. Применение ВДУ наиболее перспективно для послойного или периодического упрочнения синтезируемых деталей.

Технологический процесс гибридной WAAM-технологии с периодическим ВДУ заключается в чередовании технологических переходов аддитивного синтеза и упрочнения наплавленного слоя, осуществляется следующим образом.

Один или несколько слоев материала наплавляются на подложку, изготовленную из материала, близкого по химическому составу к материалу синтезируемой детали. Синтезированная поверхность изделия выглаживается или обкатывается деформирующим инструментом. Воздействие на синтезированный материал осуществляется деформирующей поверхностью инструмента, например, сферической или специально спрофилированной поверхностью индентора, или периферийной поверхностью цилиндрического ролика. Смонтированный на торце цилиндрического волновода инструмент поджимается к обрабатываемой поверхности с некоторым статическим усилием. Торцом бойка, как правило, цилиндрического, с заданной частотой, скоростью и энергией наносятся удары по противоположному свободному торцу волновода. Обрабатываемое изделие и деформирующий инструмент посредством движения подачи перемещаются относительно друг друга. Затем на упрочненную поверхность наплавляется следующий слой синтезируемого изделия.

Деформации подвергается еще не полностью остывший синтезированный материал, который обладает более высокими пластическими свойствами по сравнению с его же состоянием при нормальной температуре. Формирование той или иной микроструктуры материала зависит как от давления в очаге деформации и свойств материала при температуре процесса ВДУ, так и от скорости охлаждения элементарного объема, скорости нагрева, величины и времени действия температурных всплеск при синтезе последующих слоев изделия. Закономерности упрочнения приобретают термодиформаци-

онный характер. Проектирование гибридной WAAM-технологии с периодическим ВДУ требует тщательного анализа тепловых процессов, расчета температурных полей, исследования особенностей нагрева и охлаждения каждого синтезируемого слоя и готового изделия в целом.

Вследствие сложности гибридного процесса, большого количества управляемых технологических факторов как на этапе синтеза, так и на этапе упрочнения, как расчет температурных полей, так и поиск диапазонов допустимых значений параметров гибридного процесса затруднен. Оперативное решение задачи назначения рациональных технологических параметров требует создания единой модели гибридной WAAM-технологии с периодическим ВДУ.

Моделирование любого технологического процесса является достаточно сложной задачей. Построение модели гибридного процесса синтеза и ВДУ предполагает, что программные модули должны постоянно (послойно или периодически) обмениваться информацией. Проблема передачи информации об изделии при переходе от процесса синтеза к процессу упрочнения и обратно является нетривиальной задачей. Для моделирования технологических процессов предлагаются специальные программные продукты и на этапе информационного обмена между ними потеря части информации неизбежна. Проблема стоит особенно остро для передачи информации о технологических процессах, отличающихся по физическому характеру воздействия на материал исходной заготовки.

Так как процесс WAAM имеет много общего с многопроходным способом сварки, к его моделированию могут быть применены общие подходы. Анализ существующих математических моделей электродуговой сварки условно можно разделить на три группы: модель дуги; модель переноса металла при сварке и общие модели, к которым относятся модели, одновременно рассматривающие как процессы первых двух групп, так и иные модели, учитывающие другие воздействия на сварочную область после её формирования.

Анализ общих моделей показал отсутствие единых подходов к созданию комбинированных моделей наплавки и постобработки. Большинство моделей созданы в специализированном ПО, не имеющим возможности моделирования других отличающихся по физическому воздействию процессов. В основном моделирование процессов сварки и WAAM-синтеза осуществляется с применением метода конечных элементов [12, 13], программных продуктов (CAE-систем), позволяющих исследовать нелинейные быстропротекающие динамические процессы, происходящие в неупругих средах (ANSYS, COMSOL, ABAQUS и др.).

Для создания модели гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ целесообразно воспользоваться пакетом ANSYS, который имеет независимые модули, один из которых позволяет создать модель процесса WAAM-синтеза, а другой – процесса ВДУ. Для создания модели в ANSYS использовались модули Transient Thermal и Transient. ANSYS позволяет осуществлять обмен данными между модулями без потери информации, что делает систему в целом пригодной для разработки единой модели гибридного процесса.

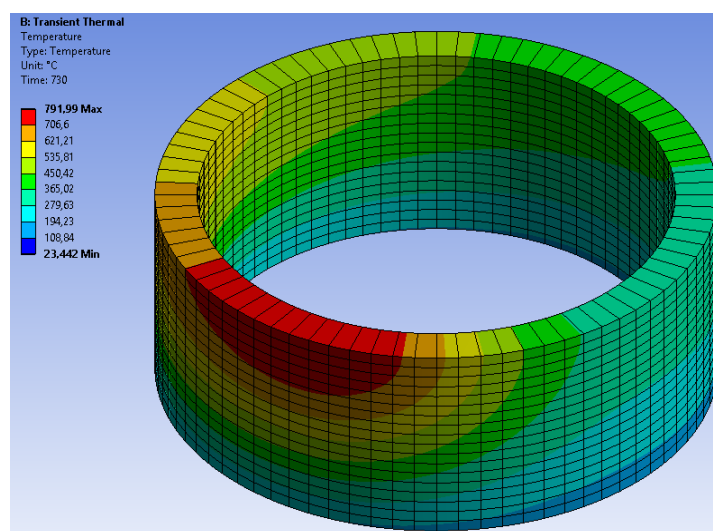
Для исследования и эффективного управления градиентом температур в пакете ANSYS построена конечно-элементная модель гибридного процесса WAAM-синтеза с периодическим ВДУ, которая позволяет установить параметры, определяющие закономерности перераспределения тепловых потоков в зависимости от условий и режимов синтеза, условий и интенсивности естественного или принудительного охлаждения, температуры окружающей среды, формы и размеров изделия.

Необходимым компонентом построения общей модели гибридного процесса WAAM-синтеза с периодическим ВДУ является создание модели материала изделия, пластические и прочностные свойства которого меняются в зависимости от температуры технологического воздействия.

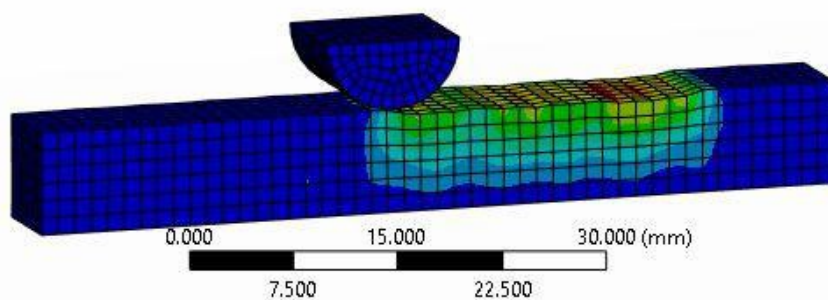
Пример визуализации распределения динамических температурных полей в процессе синтеза цилиндрической оболочки из

18 наплавляемых слоев представлен на рис. 1. В процессе моделирования варьировались значения силы тока, напряжения, коэффициента теплопроводности α , температур плавления, скорости перемещения сварочной ванны, объема элементарной ячейки, время охлаждения слоя перед нанесением последующего и др. [14]. По результатам моделирования определялась глубина слоя материала, прогревающегося до температуры рекристаллизации, и оптимальное время выдержки элементарных

объемов синтезированного металла при этой температуре. Результаты моделирования позволили выполнить расчет температурных полей, формирующихся в процессе синтеза образца и установить температурный режим при последующем ВДУ. На основании этого была проведена корректировка режимов ВДУ (энергии и частоты ударов, скорости подачи инструмента относительно синтезируемой заготовки) для последующих экспериментальных исследований.



a)



б)

Рис. 1 Моделирование гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ:

a – распределение температур при синтезе «оболочки» из 18 слоев после 10 секунд охлаждения; *б* – процесс ВДУ нескольких синтезированных слоев при температуре + 300 °C

Fig. 1. Modeling of the hybrid process of WAAM synthesis and WSH (wave strain hardening):

a – the temperature distribution during the synthesis of a "shell" of 18 layers after 10 seconds of cooling (the color scale shows the temperature in ° C); *b* – the process of WSH of several synthesized layers at a temperature of + 300 °C

Новизна разрабатываемой модели гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ заключается в применении согласованных

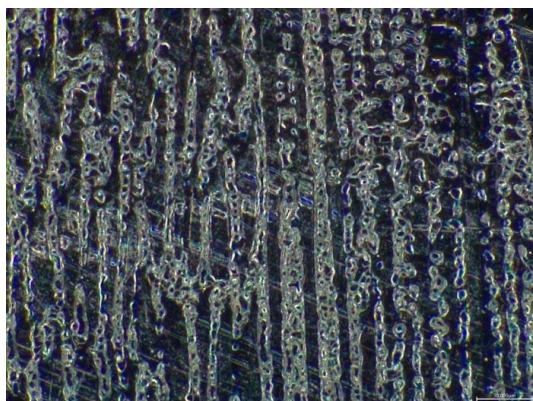
подходов при решении тепловой и механической задач в трехмерной постановке, с учетом естественно движущихся тепловых

потоков во всех моделируемых изделиях. Предлагаемый подход к моделированию процессов синтеза из проволоки с периодическим упрочнением широкой номенклатуры изделий из различных материалов может быть распространен на весь класс процессов аддитивного синтеза с периодической или постобработкой.

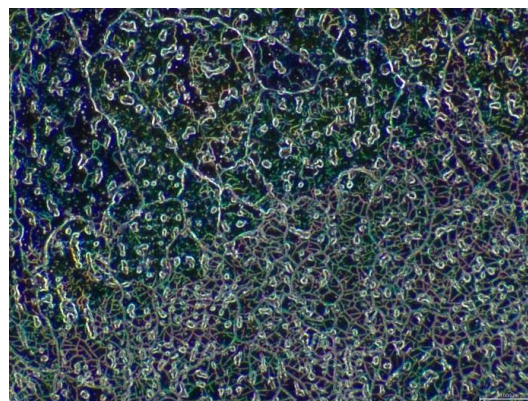
Экспериментальные исследования технологии ВДУ проводились на образцах, синтезируемых из жаропрочного сплава ЭИ868, который применяется для изготовления листовых деталей двигателей и турбин, работающих при температурах до + 1000 °С; сварочной проволоки, применяемой для наплавки деталей и сварки металлоконструкций в энергетическом машиностроении. На установке для реализации гибридной технологии синтеза по WAAM-технологии и ВДУ были изготовлены

образцы в форме цилиндрической оболочки, полученные с ВДУ и без него [15].

В результате металлографического анализа полученных образцов установлено, что микроструктура поперечного сечения, перпендикулярного оси вращения неупрочненного образца из сплава ЭИ868, имеет дендритное строение (рис. 2). Дендриты отличаются значительной длиной (свыше 800 мкм) и слабо развитыми осями второго порядка, распределенными по материалу матрицы. После ВДУ дендриты были измельчены – их размер сократился более чем в 10 раз, а мелкодисперсные частицы длиной 8...25 мкм равномерно распределены по матрице материала. Также в результате упрочнения формируется гетерогенная микроструктура, состоящая из твердых фракций, включенных в более мягкую и пластичную матрицу, более эффективная в эксплуатационных условиях.



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура (×1500) синтезированного образца (сплав ЭИ868):
а – без упрочнения; б – с ВДУ

Fig. 2. Microstructure (×1500) of the synthesized sample (alloy ES868):
а – no hardening; б – WSH

Для исследований влияния ВДУ на механические свойства синтезированного материала наплавлялись образцы из сплава ЭИ868, из которых на электроэрозионном станке вырезались образцы для испытаний на разрыв согласно ГОСТ 1497-84 и на ударную вязкость по ГОСТ 9454-78. Измерение твердости для синтезированных образцов проводилось по методу Роквелла. В результате

установлено, что применение ВДУ, по сравнению с синтезированными неупрочненными образцами позволило повысить механические свойства: твердость в 2,5 раза, предел прочности в 1,5 раза, предел текучести в 2 раза, при уменьшении относительного удлинения в 3 раза и сохранении ударной вязкости на достаточно высоком уровне (рис. 3).

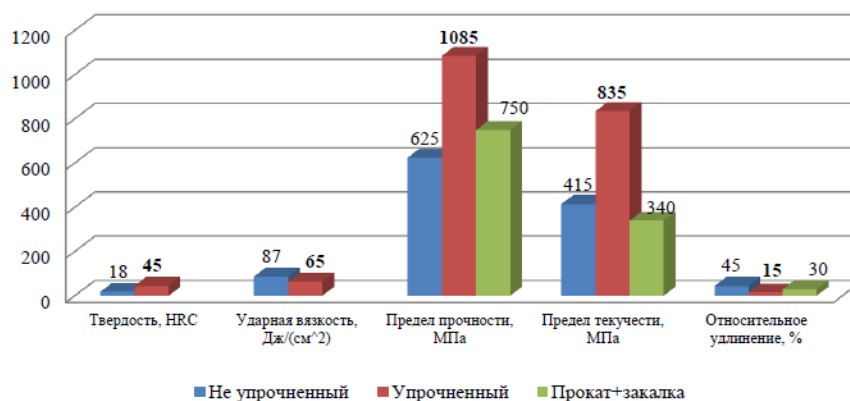


Рис. 3. Влияние ВДУ на механические свойства синтезированного образца (ЭИ868)

Fig. 3. The effect of WSH on the mechanical properties of the synthesized sample (ES868)

Выводы

Установлено, что перспективным направлением развития WAAM-технологии является использование ВДУ, позволяющей достичь высокой твердости и значительной глубины упрочнения.

Разработана конечно-элементная модель для эффективного прогнозирования результатов реализации гибридных WAAM-технологий с ВДУ, которая позволяет в режиме реального времени оценить динамику температурных полей, формирующихся в процессе синтеза изделия, и обоснованно назначать режимы ВДУ для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя.

В результате проведенных экспериментальных исследований WAAM-технологии с использованием ВДУ установлено значительное измельчение структуры синтезированного сплава, повышение ее твердости в 2,5 раза, предела прочности в 1,5 раза и предела текучести в 2 раза, при уменьшении относительного удлинения в 3 раза и сохранении ударной вязкости на достаточно высоком уровне.

Проведенные исследования позволяют считать, что дальнейшее развитие и внедрение предлагаемой и подобных технологий, будет способствовать созданию более эффективных и высококачественных изделий на всех этапах их жизненного цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tomar Bunt, Shiva S., Nath Tamesher. A review on wire arc additive manufacturing: Processing

parameters, defects, quality improvement and recent advances // Materials Today Communications, 2022. vol. 31. art. no. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739

2. Трубащевский Д.С. Аддитивные зарисовки, или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги / Воронеж: Умное Производство, 2021. 203 с.

3. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering, 2022. vol. 13. art. no. 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.

4. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // Materials Chemistry and Physics. 2023. vol. 294. art. no. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

5. Kou S. Welding Metallurgy – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2002. 461 p. DOI: 10.1002/0471434027

6. Langelandsvik G., Akselsen O.M., Furu T., Roven H.J. Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing // Materials, 2021. vol. 14 (18). p. 5370. DOI: 10.3390/ma14185370.

7. Береснев А.Г. Разумовский И.М. Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства // Аддитивные технологии. № 4 (2017). С. 50–54

8. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Федонина С.О. Проявление технологической наследственности при исследовании твердости деформационно-термически упрочненных сталей // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 8 (98). С. 25–28. DOI: 10.30987/article_5d2635cb4d7804.69744207

9. Xu X., Ganguly S., Ding J., Dirisu P., Martina F., Liu X., Williams S. W. Improving mechanical properties of wire plus arc additively manufactured maraging steel through plastic deformation enhanced aging response, Materials Science and Engineering: A, Volume 747, 2019, P. 111–118, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.114>.

10. Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки // М.Ф. Карташев, Г.Л. Пермяков, Д.Н. Трушников, М.Р. Миндибаев. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 3. С. 38–45

11. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г.

Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.

12. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 294. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

13. Suvranshu P., Susanta K.S. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021. Vol. 33. Pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.

14. Киричек А.В., Баринов С.В., Греченева А.В. Расчет температурных полей на основе конечно-элементной модели процесса аддитивного синтеза изделия // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 6. С. 113–128. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128.

15. Федонина С.О. Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термомеханическим упрочнением / Брянск. 2021. 154 с.

REFERENCES

1. Tomar Bunt, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // Materials Today Communications, 2022. vol. 31. art. no. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739

2. Trubashevsky D. S. Additivnye zaskrytki, ili resheniya dlya teh, kto ne hochet prodolyat' dengi [Additive sketches, or solutions for those who do not want to continue to lose money]. Voronezh: Smart Production, 2021. 203 p.

3. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering, 2022. vol. 13. art. no. 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.

4. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // Materials Chemistry and Physics, 2023. vol. 294. art. no. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

5. Kou S. Welding Metallurgy, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2002. 461 p. DOI:

10.1002/0471434027

6. Langelandsvik G., Akselsen O.M., Furu T., Roven H.J. Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing // Materials, 2021. vol. 14 (18). p. 5370. DOI: 10.3390/ma14185370.

7. Beresnev, A.G., Razumovsky I.M. Hot isostatic pressing for additive production. №4(2017). pp. 50–54

8. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Fedonina S.O. Manifestation of technological heredity in the study of hardness of deformation-thermally strengthened steels. 2019. № 8 (98). Pp. 25–28. DOI: 10.30987/article_5d2635cb4d7804.69744207

9. Xiangfang Xu, Supriyo Ganguly, Jialuo Ding, Philip Dirisu, Filomeno Martina, Xianwei Liu, Stewart W. Williams, Improving mechanical properties of wire plus arc additively manufactured maraging steel through plastic deformation enhanced aging response, Materials Science and Engineering: A, Volume 747, 2019, P. 111–118, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.114>.

10. Study of the effect of deformation hardening on the mechanical properties of samples of AMg5 alloy obtained by multilayer cladding // M.F. Kartashev, G.L. Permyakov, D.N. Trushnikov, M.R. Mindibaev. Bulletin of the Nosov Moscow State Technical University. 2019. T. 17. № 3. pp. 38–45

11. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Lazutkin A.G. Technology and equipment for static-pulse processing of surface plastic deformation. Library technologist. M.: Mashinostroenie, 2004. p. 288.

12. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 294. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

13. Suvranshu P., Susanta K. S. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021. Vol. 33. Pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.

14. Kirichek A.V., Barinov S.V., Grecheneva A.V. Calculation of temperature fields based on the finite element model of the additive synthesis process of the product. 2024. T. 19. № 6. pp. 113–128. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128.

15. Fedonina, S.O. Improving the Quality of Parts Synthesized from Wire by Wave Thermal Deformation Strengthening / Fedonina Svetlana Olegovna. Bryansk, 2021. 154 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.05.2025; одобрена после рецензирования 25.05.2025; принята к публикации 24.06.2025.

The article was submitted 09.05.2025; approved after reviewing 25.05.2025; assepted for publication 24.06.2025.