

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-637300>

Оригинальное исследование



Разработка и верификация моделей материалов при моделировании процессов волнового деформационного упрочнения и аддитивного синтеза (3DMP)

А.В. Киричек¹, С.В. Баринов², А.В. Яшин², С.О. Федонина¹, К.Ю. Андросов¹¹ Брянский государственный технический университет, Брянск, Российская Федерация;² Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Создание конкурентоспособных деталей машин, способных воспринимать нормативные и увеличенные эксплуатационные нагрузки, является актуальной задачей машиностроения. Развивающиеся технологии аддитивного синтеза совместно с упрочняющими технологиями позволяют создавать такие изделия, отличающиеся высокой несущей способностью. Однако для повышения эффективности данных технологий необходимо создание теоретических моделей исследуемых процессов. В статье приведены результаты первого этапа создания комплексных теоретических моделей комбинированного процесса 3DMP и волнового деформационного упрочнения (ВДУ), необходимых при проектировании технологических процессов изготовления деталей двигателей и тормозных систем автомобильной техники.

Цель работы — создание и оценка адекватности моделей материалов, применяемых при конечно-элементном моделировании процессов аддитивного синтеза с последующим упрочнением.

Методы. Создание теоретических моделей материала осуществлялось в программном комплексе ANSYS, позволяющем проводить мультидисциплинарные расчёты. Необходимые для подготовки моделей экспериментальные данные получены при испытаниях образцов на растяжение, изготовленных по стандартизованным методикам. Исследования твердости материалов проведены на автоматическом твердомере KB 30S. Оценка адекватности моделирования аддитивного синтеза проводилась по распределению температурных полей. Оценка адекватности моделей материала для процесса ВДУ осуществлялась по размерам единичных пластических отпечатков и эпюрам распределения глубины и степени упрочнения в поверхностном слое.

Результаты. Разработаны теоретические модели следующих материалов: сталь 45, нержавеющая сталь 12X18H10T, бронзовый сплав БрАЖ 9-4, титановый сплав ВТ 1-0, алюминиевый сплав В-95. Теоретические данные, полученные по результатам моделирования, имеют высокий уровень значимости. Исследования проведены для различных режимов теплового (в диапазоне от +20°C до +800°C) и деформационного воздействия. Графические результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют получить качественную оценку изучаемых процессов с требуемой точностью.

Заключение. В результате оценки адекватности разработанных моделей установлено, что расхождение эмпирических и теоретических данных не превышает 7,4%. Полученные модели материалов являются статистически значимыми и могут корректно применяться в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: аддитивный синтез; упрочнение; волна деформации; детали автомобилей; конечно-элементное моделирование; оценка адекватности моделирования.

Как цитировать:

Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В., Федонина С.О., Андросов К.Ю. Разработка и верификация моделей материалов при моделировании процессов волнового деформационного упрочнения и аддитивного синтеза (3DMP) // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 5. С. 611–618. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-637300>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-637300>

Original Study Article

Development and verification of material models in modeling of wave strain hardening and additive synthesis (3DMP) processes

Andrey V. Kirichek¹, Sergey V. Barinov², Alexander V. Yashin², Svetlana O. Fedonina¹, Kirill Yu. Androsov¹

¹ Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation;

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

ABSTRACT

BACKGROUND: The creation of competitive machine parts capable of withstanding standard and increased operational loads is a relevant task in mechanical engineering. Developing additive synthesis technologies together with strengthening technologies make it possible to create products with high load-bearing capacity. However, to improve the efficiency of these technologies, it is necessary to create theoretical models of the considered processes. The paper presents the results of the first stage of creating complex theoretical models of the combined 3DMP process and wave strain hardening (WSH) required for designing the technological processes for manufacturing engine parts and brake systems of automotive equipment.

AIM: Creation and adequacy assessment of the models of materials used in finite element modeling of additive synthesis processes with subsequent hardening.

METHODS: Theoretical models of the material were created in the ANSYS software package, which is capable of performing multidisciplinary calculations. The experimental data required for preparing the models were obtained by testing tensile samples manufactured using standardized methods. The hardness of materials was studied using the KB 30S automatic hardness tester. The adequacy of additive synthesis modeling was assessed based on the distribution of temperature fields. The adequacy of models of the material for the WSH process was assessed based on the sizes of individual plastic indentations and the distribution diagrams of the depth and degree of hardening in the surface layer.

RESULTS: Theoretical models of the following materials were created: steel 45, stainless steel 12Cr18Ni10Ti, bronze alloy CuAl8Fe3, titanium alloy VT 1-0, aluminum alloy V95. The theoretical data obtained from the modeling results have a high level of significance. The studies were conducted for various thermal (in the range from +20°C to +800°C) and deformation modes. Graphical results of theoretical and experimental studies make it possible to obtain a qualitative assessment of the studied processes with the required accuracy.

CONCLUSION: As a result of the adequacy assessment of the created models, it was found that the discrepancy between the empirical and theoretical data does not exceed 7.4%. The obtained models of materials are statistically significant and can be correctly applied in further studies.

Keywords: additive synthesis; strengthening; deformation wave; automotive parts; finite element modeling; adequacy assessment of modeling.

To cite this article:

Kirichek AV, Barinov SV, Yashin AV, Fedonina SO, Androsov KYu. Development and verification of material models in modeling of wave strain hardening and additive synthesis (3DMP) processes. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(5):611–618. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-637300>

Received: 21.10.2024

Accepted: 17.11.2024

Published online: 17.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

Технологии аддитивного производства деталей машин в автомобильной отрасли получили значительное развитие в последнее десятилетие. Одним из наиболее эффективных считается метод WAAM/3DMP — метод объёмного синтеза изделий электродуговой сваркой и наплавкой, обладающий высокой производительностью. Однако, исходя из технологических особенностей аддитивного производства, в синтезируемом изделии не удастся полностью избавиться от пор и дефектов, которые снижают его эксплуатационные характеристики [1].

Для повышения качества деталей, полученных аддитивными технологиями, в процессе синтеза возможно применение дополнительного деформационного воздействия на поверхность наплавляемого материала.

Технология волнового деформационного упрочнения (ВДУ) успешно применяется как отдельно, так и в составе комбинированных методов с целью кратного повышения параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей, работающих при различных условиях нагружения. Обладая широкими технологическими возможностями, ВДУ позволяет формировать поверхностный слой с гетерогенной структурой. Управление технологическими режимами ВДУ обеспечивает требуемые глубину, степень и равномерность упрочнения [2, 3].

Основным отличием ВДУ от известных динамических методов поверхностного пластического деформирования является наличие волновода — дополнительного звена в ударной системе. При ударе бойка по статически поджатому к очагу деформации волноводу с закреплённым на торце инструментом, в ударной системе формируется плоская акустическая волна (волна деформации). Генерирующийся ударный импульс имеет сложную форму и характеризуется наличием нескольких локальных максимумов вследствие наложения отражённых волн. Энергия удара при этом расходуется на упругопластическую деформацию поверхностного слоя обрабатываемого материала.

ВДУ успешно применяется при упрочняющей обработке поверхностей различной конфигурации из различных металлических материалов. Серьёзным резервом расширения технологических возможностей данного метода является его включение в состав комбинированных технологий, совместное применение с другими способами воздействия на материал, имеющими различную физическую природу. Так, применение 3DMP и ВДУ в составе единой комбинированной технологии для синтеза изделий, обеспечивает повышенные механические и эксплуатационные свойства, успешно себя зарекомендовало в настоящее время [4].

Однако, для широкого производственного внедрения предлагаемой комбинированной технологии необходимо проведение глубоких научных исследований. Сложность таких исследований заключается в различной физической природе каждой из технологий, а также в наличии значительного количества варьируемых технологических

параметров, оказывающих существенное влияние на конечный результат. Учитывая временные затраты, трудоёмкость и высокую стоимость экспериментальных исследований, наиболее рациональным представляется создание теоретических моделей. Имеющиеся на текущий момент теоретические модели ВДУ громоздки и имеют широкий набор ограничений, что приводит к снижению их адекватности. Кроме того, в качестве дополнительного фактора при исследовании комбинированной технологии 3DMP и ВДУ выступает температура поверхностного слоя материала, которая ранее никак не учитывалась.

Целью работы является создание комплекса теоретических моделей как самого процесса ВДУ, так и комбинированного процесса аддитивного синтеза с последующим ВДУ.

Важным условием для получения адекватных моделей является наличие четких граничных условий для каждого технологического параметра процесса, необходимостью одновременного учёта напряжённо-деформированного состояния детали и распределения тепловых полей.

МЕТОДЫ

Стремительное развитие инженерного анализа и Computer-Aided Engineering систем (CAE-систем), в частности метода конечных элементов, позволяет успешно решать мультидисциплинарные задачи высокой сложности с множеством факторов. В зависимости от назначения современные CAE-системы делятся на универсальные (ANSYS, COMSOL, ABAQUS и т.д.) и специализированные (Additive Manufacturing ESI Group, Sysweld, Qform, MSC.SuperForm, MSC.SuperForge, Deform и т.д.). Однако при выборе программы для решения поставленной задачи необходимо учитывать возможность перехода от тепловой модели к модели, работающей с механикой деформируемого твёрдого тела без потери информации [5].

Так, при исследовании быстропротекающих кратковременных процессов пластического деформирования методом конечных элементов, установлена высокая эффективность программного комплекса ANSYS при требуемом уровне адекватности полученных моделей [6, 7]. Кроме того, учитывая, что ANSYS является мультидисциплинарной платформой и позволяет совершать обмен данными между встроенными модулями без потери информации, для решения поставленной задачи выбрано данное программное обеспечение. С учётом того, что задача создания теоретической модели является многомерной и масштабной, следующим шагом необходимо корректно задать систему граничных условий и допущений для конечно-элементных моделей, обеспечивающих требуемую точность исследований.

Первым шагом при разработке конечно-элементной модели является определение типа исследуемого материала и его исходных характеристик. Корректное выполнение данного этапа в значительной степени влияет

на адекватность разрабатываемой модели комбинированной технологии. Вопрос определения и верификации моделей исследуемых материалов в среде ANSYS является актуальной научной задачей и представлен в данной статье.

Выбор модели материала осуществляется исходя из существа комбинированной технологии 3DMP и ВДУ, в процессе которой материал сначала наплавляется, переходит из жидкого состояния в твердое, а затем подвергается высокоскоростному деформационному воздействию (длительность ударного импульса составляет около 10^{-5} секунды) при повышенных температурах, вплоть до температуры рекристаллизации ($+20^{\circ}\text{C}$, $+300^{\circ}\text{C}$, ..., $+800^{\circ}\text{C}$).

Модели стандартных материалов из библиотеки ANSYS эффективны для учебных целей, однако, реальные физико-механические свойства исследуемых материалов могут в значительной степени отличаться в зависимости от особенностей технологического наследования свойств материала. Для снижения вероятности возникновения ошибки на данном этапе реальные исследуемые материалы подвергались входному контролю, определялись их физико-механические характеристики, создавался цифровой двойник каждого материала.

В качестве модели материала выбрана Multilinear Isotropic Hardening — модель, описываемая графиком «напряжение-деформация» и позволяющая более точно учитывать поведение материалов при пластической деформации в широком диапазоне температур (рис. 1).

Основными физическими и физико-механическими характеристиками, которые вносятся в модель материала Multilinear Isotropic Hardening являются плотность, предел текучести, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, зависимость деформаций от напряжений, коэффициент

термического расширения. Отличительной особенностью данной модели материала является возможность задания площадки текучести, что позволяет более точно учитывать начало упругопластической деформации материала. Предел текучести и зависимость деформаций от нагружения определялись в результате лабораторных исследований на стандартных образцах на растяжение при воздействии различных температур из указанного диапазона. Полученные данные заносились в табл. 1 модели материала.

Исследования проводились на следующих материалах: сталь 45, бронзовый сплав БрАЖ 9-4, титановый сплав ВТ 1-0, алюминиевый сплав В-95. Выбор указанных материалов обусловлен их широким применением при аддитивном синтезе ответственных деталей транспортной отрасли, в частности деталей двигателей и тормозных систем.

На первом этапе проведена верификация созданной модели материала на апробированной ранее конечно-элементной модели процесса ВДУ при температуре $+20^{\circ}\text{C}$. Основными технологическими параметрами в данной модели являются (рис. 2):

- деформирующий инструмент — стержневой ролик диаметром 10 мм и шириной 60 мм;
- энергия удара — 150 Дж;
- частота удара — 9 Гц;
- коэффициент перекрытия пластических отпечатков — 0,2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка адекватности проводилась по эпюрам распределения твердости в поверхностном слое, а также



Рис. 1. Пример зависимости напряжений от деформаций при температуре $+400^{\circ}\text{C}$ для нержавеющей стали 12ХН10Т (из библиотеки Ansys).

Fig. 1. Example of the stress-strain dependence at a temperature of $+400^{\circ}\text{C}$ for the stainless steel 12CrNi10Ti (taken from the Ansys library): Stress, MPa.

Таблица 1. Экспериментальные данные для внесения в библиотеку Ansys

Table 1. The experimental data for inclusion into the Ansys library

сталь 12Х18Н10Т, нагрев 400°C										
Деформация, мм	0	0,067	0,13	0,2	0,267	0,33	0,4	0,467	0,53	0,6
Напряжения, МПа	158,8	276,2	367,4	438,4	494,4	539,3	575,5	604,5	626,2	639,5

размерам пластических отпечатков. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными, полученными при аналогичных режимах обработки.

Основными выходными данными, полученными в результате конечно-элементного моделирования процесса пластического деформирования, являются величины деформаций Effective Strain, возникающие в узлах системы. По полученному экспериментально графику зависимости «напряжение-деформация» и по соответствующим значениям деформаций определялись величины напряжений. Далее по рассчитанным величинам напряжений пересчитывалась твёрдость материала HB по известной зависимости $HB=c\cdot\sigma$, где коэффициент c характеризует исследуемый материал [8, 9].

Для экспериментального исследования твёрдости поверхностного слоя, исследуемые образцы разрезались по центру дорожки с пластическими отпечатками, в полученном сечении выполнялась серия замеров с помощью автоматического твердомера KB 30S.

В результате сравнения размеров единичных отпечатков установлено, что погрешность моделирования составляет: стали 45 — 3%; БрАЖ 9-4 — 4,2%; ВТ 1-0 — 3,3%; В-95 — 5%.

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных твёрдости, (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; В-95) представлены на рис. 3.

Таким образом, разница значений твёрдости поверхностного слоя, полученных эмпирическим путем и по расчётным данным (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; В-95) составляет, соответственно, 7,4; 4; 3,8; 2%. Разница значений глубины упрочненного слоя для исследуемых материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; В-95) составляет, соответственно, 3; 6; 6; 2,5%.

Второй этап верификации модели материала заключался в оценке адекватности распределения тепловых полей в процессе аддитивного синтеза. В качестве объекта исследования выбрано типовое изделие «оболочка» с наружным диаметром 112,7 мм, толщиной стенки 17 мм и высотой 42 мм (рис. 4).

Исследования проводились для стали 12Х18Н10Т. Аддитивный синтез производился при следующих технологических параметрах:

- сила тока — 110 А;
- напряжение — 21 В;
- высота наплавляемого слоя — 2,34 мм;
- тепловой поток, необходимый для расплавления элементарного объема материала за секунду 24,15 Дж/(сек×мм³) [1].

Экспериментальный контроль распределения тепловых полей в процессе аддитивного синтеза производился по внешней стенке изделия при помощи тепловизора (рис. 4 и 5).

Оценка полученных данных с помощью статистических характеристик проводилась по критерию Фишера. Согласно приведённой в [10] методике расчёта получены $F_{расч} = 1,43$, из справочных таблиц $F_{крит} = 2,352$ (при уровне значимости 5%). Соотношение $F_{расч} < F_{крит}$ позволяет принять гипотезу о корректности полученных теоретических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что расхождение эмпирических и теоретических данных составляет для моделей материалов при ВДУ составляет не более 7,4%. Полученные теоретические данные попадают в доверительный интервал при уровне доверительной вероятности 95%. Таким образом, созданы и верифицированы модели материалов для комбинированного процесса 3DMP и ВДУ. Модели учитывают как распределение температурных полей в процессе 3DMP, так и влияние основных технологических параметров при обработке ВДУ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.В. Киричек — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, обработка результатов теоретических и экспериментальных данных, написание

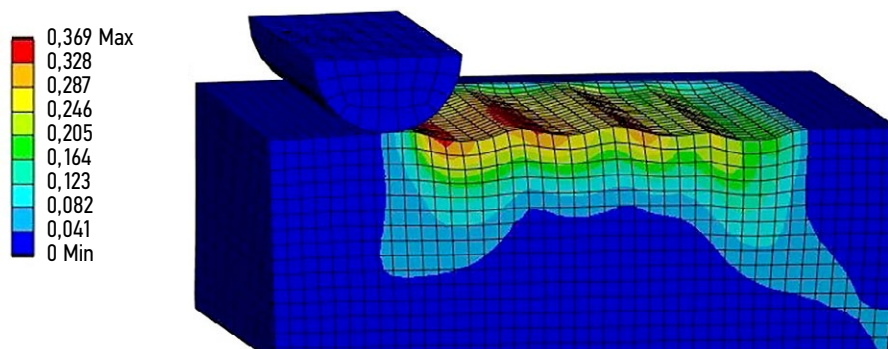


Рис. 2. Распределение деформаций в образце из материала БрАЖ 9-4 после ВДУ (цветовая шкала отображает изменение эквивалентных деформаций ϵ_{EQV} в диапазоне от 0 до 0,369 мм).

Fig. 2. Distribution of deformations in a sample made of the CuAl8Fe3 after the WSH (the color scale describes change of equivalent deformations ϵ_{EQV} in the range between 0 and 0.369 mm).

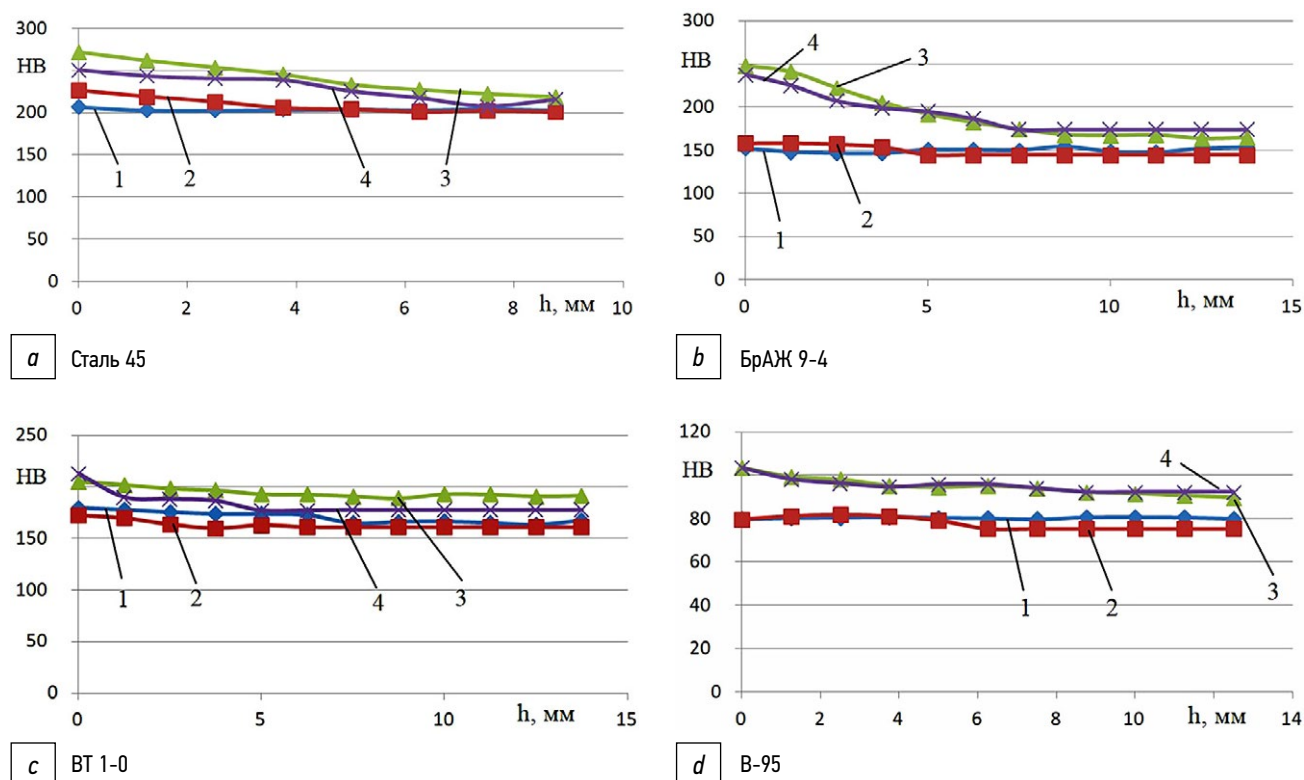


Рис. 3. Сравнение теоретических (2, 4) и экспериментальных (1, 3) зависимостей изменения твёрдости (HB , МПа) по глубине (h , мм) поверхностного слоя: 1, 2 — неупрочненного материала; 3, 4 — упрочненного с коэффициентом перекрытия отпечатков $K=0,2$.

Fig. 3. Comparison of theoretical (2, 4) and experimental (1, 3) dependencies of hardness change (HB , MPa) by depth (h , mm) of the surface layer: 1, 2 — a non-reinforced material; 3, 4 — a reinforced with an indentation overlap coefficient $K=0.2$.

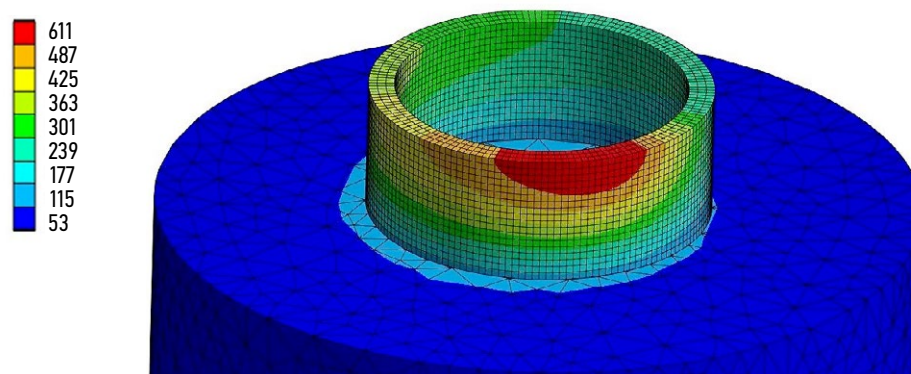


Рис. 4. Пример распределения температур в модели «оболочка» после 10 секунд остывания (цветовая шкала отображает температуру материала в $^{\circ}\text{C}$).

Fig. 4. Example of temperature distribution in the "shell" model after 10 seconds of cooling (the color scale shows the temperature of the material in $^{\circ}\text{C}$).

текста и редактирование статьи; С.В. Баринов — разработка теоретических моделей материалов в программном комплексе ANSYS, обзор литературных источников, обработка теоретических данных, написание текста статьи; А.В. Яшин — подготовка и проведение экспериментальных исследований по определению характеристик материалов, обработка экспериментальных данных, написание текста статьи; С.О. Федонина — разработка теоретической модели аддитивного синтеза, обзор литературы и анализ

литературных источников, написание текста статьи; К.Ю. Андросов — проведение экспериментальных исследований по определению распределения тепловых полей при аддитивном синтезе, обработка и анализ экспериментальных данных, написание текста статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

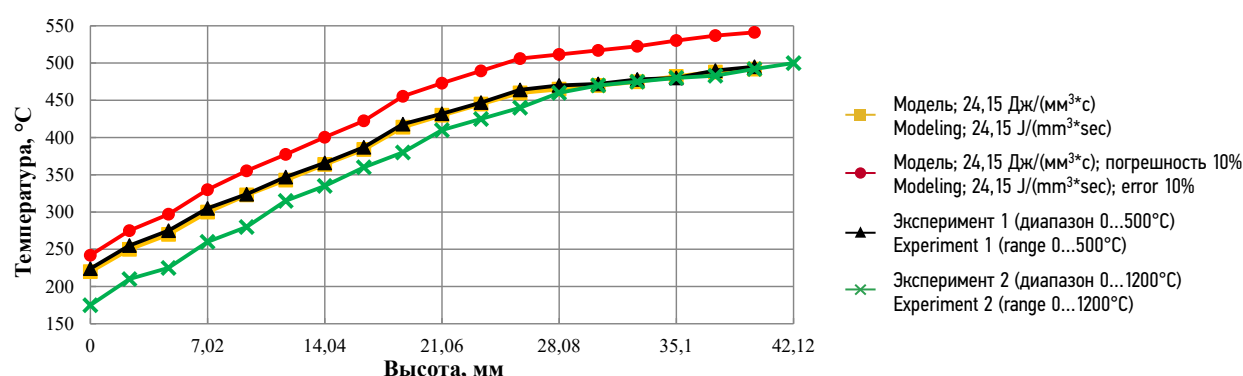


Рис. 5. Сравнение теоретических и экспериментальных данных температуры внешней стенки синтезированной детали «оболочка».
Fig. 5. Comparison of the theoretical and experimental data on the temperature of the outer wall of the synthesized "shell" part.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование и подготовка публикации финансировались за счёт средств федерального бюджета — базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по теме № 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».

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.V. Kirichek — literature review, collection and analysis of literary sources, processing of theoretical and experimental data, writing the text and editing the manuscript; S.V. Barinov — development of theoretical models of materials in the ANSYS software package, literature review, processing of theoretical data, writing the text of the manuscript; A.V. Yashin — preparation and conducting of experimental studies to determine

the characteristics of materials, processing of the experimental data, writing the text of the manuscript; S.O. Fedonina — development of a theoretical model of additive synthesis, literature review and analysis of literary sources, writing the text of the manuscript; K.Yu. Androsov — conducting experimental studies to determine the distribution of thermal fields in additive synthesis, processing and analysis of experimental data, writing the text of the manuscript. All authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, the conduct of the study and the preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The research and preparation of the publication were financed by the federal budget - the basic part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on topic No. 075-00150-24-03 "Development of a technological strategy and theoretical and experimental study of key elements of the technology of additive synthesis of parts from metal wire using the 3DMP method and wave thermodeformation hardening of the synthesized machine parts".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Treutler K., Gehling T., Scheck M., et al. Properties oriented WAAM – microstructural and geometrical control in WAAM of low-alloy steel // *Welding in the World*. 2024. Vol. 68, N. 2. P. 247–257. doi: 10.1007/s40194-023-01666-5
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004.
3. Асланян И.Р., Баринов С.В., Безъязычный В.Ф., и др. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования. Иркутск: Иркутский НИТУ, 2022. EDN: HVWXZM
4. Киричек А.В., Федонин О.Н., Хандожко А.В., и др. Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2022. № 8(134). С. 31–38. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-31-38 EDN: PHNJGX
5. Kumar V., Singh A., Bishwakarma H., Mandal A. Simulation of metallic Wire-arc additive manufacturing (WAAM) process using SIMUFACT Welding software // *Journal of Manufacturing Engineering*. 2023. Vol. 18, N. 2. P. 80–85. doi: 10.37255/jme.v18i2pp080-085
6. Макарук А.А., Хамаганов А.М., Пашков А.А., и др. Исследование напряженного состояния при обработке деталей повышенной жёсткости бойковым инструментом // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21, № 4(123). С. 39–46. doi: 10.21285/1814-3520-2017-4-39-46 EDN: YLJJFL
7. Blumenstein V., Mahalov M., Ostanin O. Simulation and Calculation of Residual Stresses in Mining Machines Components // *E3S Web of Conferences*. 2018. N. 41. doi: 10.1051/e3sconf/20184103012

8. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости. М.: Машиностроение, 1971.
9. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твёрдости. М.: Машиностроение, 1979.

10. Серафинович Л.П. Планирование эксперимента. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2006.

REFERENCES

1. Treutler K, Gehling T, Scheck M, et al. Properties oriented WAAM — microstructural and geometrical control in WAAM of low-alloy steel. *Welding in the World*. 2024;68(2):247–257. doi: 10.1007/s40194-023-01666-5
2. Kirichek AV, Solovyev DL, Lazutkin AG. *Technology and equipment for static-pulse processing of surface-plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 2004. (In Russ.)
3. Aslanyan IR, Barinov SV, Bezyazychnyy VF. *Handbook of Surface Plastic Deformation Processes*. Irkutsk: Irkutskiy NITU; 2022 (In Russ.) EDN: HVWXZM
4. Kirichek A, Fedonin O, Khandozhko A, 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
5. Kumar V, Singh A, Bishwakarma H, Mandal A. Simulation of metallic Wire-arc additive manufacturing (WAAM) process using SIMUFACT Welding software. *Journal of Manufacturing Engineering*. 2023;18(2):80–85. doi: 10.37255/jme.v18i2pp080-085
6. Makaruk AA, Khamaganov AM, Pashkov AA, et al. Study of stress standing during processing of parts of increased rigidity with a striker tool. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2017;21(4(123)):39–46 (In Russ.) doi: 10.21285/1814-3520-2017-4-39-46 EDN: YLJJFL
7. Blumenstein V, Mahalov M, Ostanin O. Simulation and Calculation of Residual Stresses in Mining Machines Components. *E3S Web of Conferences*. 2018;41. doi: 10.1051/e3sconf/20184103012
8. Del' G. Determination of stresses in the plastic region by hardness distribution. Moscow: Mashinostroenie; 1971 (In Russ.)
9. Markovets MP. *Determination of mechanical properties of metals by hardness*. Moscow: Mashinostroenie; 1979. (In Russ.)
10. Serafinovich LP. *Experimental planning: Study guide*. Tomsk: Tomsk Interuniversity Center for Distance Education; 2006 (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* Яшин Александр Васильевич,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры технология машиностроения;
адрес: Российская Федерация, 600026, Владимир,
ул. Горького, д. 87;
ORCID: 0000-0002-3186-1300;
eLibrary SPIN: 3473-4047;
e-mail: yashin2102@yandex.ru

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

Баринов Сергей Владимирович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения;
ORCID: 0000-0002-1341-446X;
eLibrary SPIN: 3565-9623;
e-mail: box64@rambler.ru

Федонина Светлана Олеговна,

канд. техн. наук,
доцент кафедры металлорежущие станки и инструменты;
ORCID: 0000-0002-0472-4845;
eLibrary SPIN: 5236-7473;
e-mail: fedonina.sv2015@gmail.com

Андросов Кирилл Юрьевич,

аспирант кафедры металлорежущие станки и инструменты,
ORCID: 0000-0002-7894-5405;
eLibrary SPIN: 6833-7985;
e-mail: androkirl@yandex.ru

AUTHORS' INFO

* Alexander V. Yashin,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology
Department;
address: 87 Gorkogo street, 600026 Vladimir, Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-3186-1300;
eLibrary SPIN: 3473-4047;
e-mail: yashin2102@yandex.ru

Andrey V. Kirichek,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Vice-Rector for Prospective Development;
ORCID: 0000-0002-3823-0501;
eLibrary SPIN: 6910-0233;
e-mail: avkbgtn@gmail.com

Sergey V. Barinov,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department;
ORCID: 0000-0002-1341-446X;
eLibrary SPIN: 3565-9623;
e-mail: box64@rambler.ru

Svetlana O. Fedonina,

Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Metal-Cutting Machines and Tools Department;
ORCID: 0000-0002-0472-4845;
eLibrary SPIN: 5236-7473;
e-mail: fedonina.sv2015@gmail.com

Kirill Yu. Androssov,

Postgraduate of the Metal-Cutting Machines and Tools Department;
ORCID: 0000-0002-7894-5405;
eLibrary SPIN: 6833-7985;
e-mail: androkirl@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author