



Обзор

Остаточные напряжения в изделиях аддитивного производства проволоочной дуги и методы их измерения: систематический обзор

Факада Дабало Гурмеса 1,*¹, Хирпа Гельгеле Лему 2,*²

Йосеф Вакджира Адугна

² и Месфин Демисе Харсибо 3¹ Факультет машиностроения, Технологический институт Джиммы, Университет Джиммы, Джимма, а/я² 378, Эфиопия. Департамент машиностроения, структурной инженерии и материаловедения, факультет науки и технологий, Университет Ставангера, N-4036 Ставангер, Норвегия;³ yosef.w.adugna@uis.no Факультет машиностроения, Инженерно-технологический колледж, Университет Уолкит, Велкит, а/я 07, Эфиопия; mesfine2021@gmail.com

* Корреспонденция: fd.gurmesa@stud.uis.no (FDG); hirpa.g.lemu@uis.no (HGL)

Аннотация: В этом обзоре литературы представлены углубленные исследования, проведенные в области остаточных напряжений (RS) в продуктах аддитивного производства проволоочной дуги (WAAM), с особым упором на то, как параметры процесса влияют на это явление. Мотивацией исследования является растущее внимание к технологии WAAM и наблюдение, что RS играет решающую роль в определении механического поведения и структурной целостности компонентов WAAM. Таким образом, обзор призван обеспечить лучшее понимание взаимосвязи между параметрами процесса и RS для оптимизации процесса WAAM и обеспечения долговечности конечных продуктов. В нем также обобщаются основные выводы, методы измерения, проблемы и будущие направления в этой развивающейся области. В обзоре также анализируются методики измерений, используемые для характеристики РС в изделиях WAAM в зависимости от технологических параметров. Обсуждались экспериментальные методы измерения и численный анализ RS для определения влияния RS на механические свойства. Для определения влияния RS на механические реакции продуктов WAAM. Кроме того, в нем рассматривается влияние термических циклов, скоростей охлаждения и стратегий осаждения на формирование RS. Также рассмотрена роль свойств материала, таких как теплопроводность и коэффициенты расширения, в развитии РС. Предлагая всесторонний обзор текущих тенденций и идей исследований, этот обзор служит ценным ресурсом для руководства будущими исследованиями, способствуя развитию WAAM как надежной и эффективной производственной технологии. В обзоре также подчеркивается важность междисциплинарных подходов, сочетающих экспериментальные и численные методы для решения сложных проблем RS в WAAM, с целью повышения производительности и надежности компонентов, изготовленных аддитивным способом.



Цитирование: Гурмеса, ФД; Лему, Х.Г.;

Адугна, Ю.В.; Харсибо, доктор медицинских наук Остаточный

Напряжения в добавке для дуговой сварки проволоки

Производственные продукты и методы их

измерения: систематический обзор.

Прил. Мех. 2024, 5, 420–449. <https://doi.org/10.3390/applmech5030025>

applmech5030025

Поступила: 27 апреля 2024 г.

Пересмотрено: 15 июня 2024 г.

Принято: 27 июня 2024 г.

Опубликовано: 10 июля 2024 г.

Ключевые слова: остаточные напряжения; аддитивное производство проволоочной дуги; параметры процесса; измерение остаточного напряжения ; оценка аддитивного производства проволоочной дуги



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Аддитивное производство проволоочной дуги (WAAM) — это передовой производственный процесс, который относится к аддитивному производству (AM) или 3D-печати. Это обязательный процесс производства металлов для крупных и сложных компонентов, в котором в качестве сырья используются металлические проволоки или сплавы. Кроме того, из-за высокой скорости наращивания металлургические характеристики деталей, изготовленных WAAM, такие как химический состав и фазообразование, лучше, чем у других методов AM [1–3]. Важным аспектом, который до сих пор тормозит эту технологию, является стандартизация и сертификация в рамках неразрушающего контроля деталей, что обсуждается в литературе [4]. В этом контексте не существует стандарта

отсутствие натуральных наблюдений и методов мониторинга мгновенного образования дефектов (остаточных напряжений), которые можно устранить после их образования, что приводит к отходам материалов и времени на воспроизводство. WAAM — это инновационная и универсальная технология 3D-печати с широким спектром применений и рядом преимуществ в производстве.

Ранние исследования показывают, что внедрение технологий AM в строительство потенциально может снизить затраты на рабочую силу, уменьшить отходы материалов и изготовить сложные нестандартные формы, которые обычно бросают вызов производителю, использующему традиционные методы строительства [5-7]. Однако сектор WAAM заинтересован в крупномасштабных методах с высокими скоростями осаждения AM для производства компонентов размером от сотен миллиметров до метров [8]. Он привлекает значительное внимание в промышленном производстве благодаря экономичному изготовлению крупногабаритных металлических деталей при высоких скоростях осаждения [9]. Кроме того, Уильямс и др. [10] предполагают, что WAAM является жизнеспособным претендентом на замену существующего производственного подхода, включающего твердые заготовки или обширные поковки, особенно для компонентов низкой и средней сложности.

В контексте продуктов WAAM наличие RS и деформаций, вызванных параметрами процесса, становится серьезной проблемой, поскольку они оказывают существенное влияние на качество, стоимость и точность процесса печати [11-13]. Кроме того, WAAM, который является разновидностью AM, вызывает значительный интерес со стороны всех исследователей из-за его различных преимуществ, включая его способность достигать высоких скоростей осаждения металла и производить формы, близкие к заданным, превосходя традиционные методы производства благодаря более высоким термическим остаточным напряжениям. (PC) [3,14-16]. Это новая технология аддитивного производства металлов, которая постепенно обеспечивает конкурентное преимущество по сравнению с традиционными методамиковки и литья [17]. В зависимости от источников тепла процесс WAAM подразделяется на три вида: сварка в инертном газе, дуговая сварка металлом и плазменная дуга [18,19].

Целью и необходимостью данной обзорной статьи является исследование методик измерения RS в изделиях WAAM. Примечательно, что этот обзор необходим для глубокого понимания того, как RS распределяется в продуктах WAAM и как он коррелирует с параметрами осаждения. В этом исследовании обсуждались методы исследования и измерения PC, влияние PC на характеристики материала изделий WAAM и параметры процесса, основанные как на экспериментальном, так и на численном анализе, а также смягчение PC и уточнение зернистой структуры созданных слоев. Обсуждалось улучшение на основе экспериментальных методов. В этом обзоре рассматривается влияние таких параметров процесса, как диаметр проволоки, длина сканирования с шириной, высота (толщина) валика, поведение тока дуги [20], напряжение, скорость перемещения, последовательность сварки (положение сварки) [21], типы защиты. газа и его расход на PC. Кроме того, были рассмотрены исследования влияния состояния межслойной поверхности валика и времени между проходами на форму отложения, а также того, как оно аддитивно увеличивает высоту.

Этот обзор также в первую очередь фокусируется на том, как измерить RS, изготовленный с помощью WAAM, опираясь на соответствующие данные из существующей литературы. Методами измерения RS с помощью экспериментальных подходов в основном являются нейтронография [22-24] и рентгеновская дифракция (XRD) [25-27], которые выполняются в пределах ограниченной глубины слоя печатной продукции, в то время как рентгеновская дифракция на основе синхротрона луч может проникать в металлы и сплавы на несколько миллиметров. Использовались и другие методы, такие как метод тензорезистора сверления отверстий, ультразвуковое измерение напряжения (USM), анализ шума Баркгаузена, удаление слоев (глубокое сверление), контурный метод и метод постепенного сверления отверстий, а некоторые из них еще не использовались. Важно отметить, что в этом обзоре четко разграничены те, которые использовались, и те, которые не использовались.

Формат статьи следующий: после вводного раздела в разделе 2 представлена подробная информация о материалах и методах, использованных в исследовании. Далее следуют разделы 3 и 4, в которых, соответственно, представлен обзор продуктов WAAM и обсуждается влияние RS на механические характеристики компонентов WAAM.

Раздел 5 фокусируется на объяснении стратегий смягчения последствий RS и исследует практические применения. Раздел 6 служит разделом обсуждения, предлагая подробный анализ и

интерпретация выводов. Наконец, в разделе 7 подводятся итоги статьи, излагаются ключевые моменты. точки зрения и предоставление информации о будущих направлениях исследований.

2. Материалы и методы

В настоящем обзоре основное внимание уделяется научной литературе, опубликованной за последние десять лет. который включает источники, опубликованные в основном в период с 2015 по 2024 год. Это исследование на основе структуры оценки заявления PRISMA, представленной на рисунке 1. обеспечить всесторонний охват соответствующих исследований, расследование направлено на устранение дефектов в основном на РС продукции ВААМ, основанной на множестве технологических и эксплуатационных параметры. Для достижения цели данной обзорной статьи обзор концентрируется на последних публикации (как указано на основе данных, приведенных на рисунке 2, с тематическим содержанием организованы вокруг конкретных вопросов. Поиск был ограничен источниками, имеющими эксклюзивные статьи, опубликованные на английском языке. Включает статьи в следующих научных базы данных: Scientific.net, Scopus, Elsevier, Science Direct, Web of Science, Compendia, Google Scholar, IEEE Xplore, ProQuest, Цифровая библиотека ASM, SpringerLink, Mendeley и ResearchGate, исследователь семантики, SCISPACE, PubMed, DOAJ, JSTOR, MDPI, BASE, SAGE, Тейлор и Фрэнсис и другие. Он использовал английское выражение для поиска таких слов, как Измерение AM, WAAM, RS, анализ технологических параметров, оценка качества в WAAM, Дефекты продукции WAAM, характеристика микроструктуры продукции WAAM, WAAM контроль качества, расследование WAAM RS и часто используемые дополнительные описательные условия, чтобы точно соответствовать целям обзора. Для достижения этой цели эти

Прил. Мех. 2024, 5, для ЭКСПЕРТНОЙ ОБЗОРА для составления статистических комбинаций и анализа данных нескольких исследований были использованы ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

4

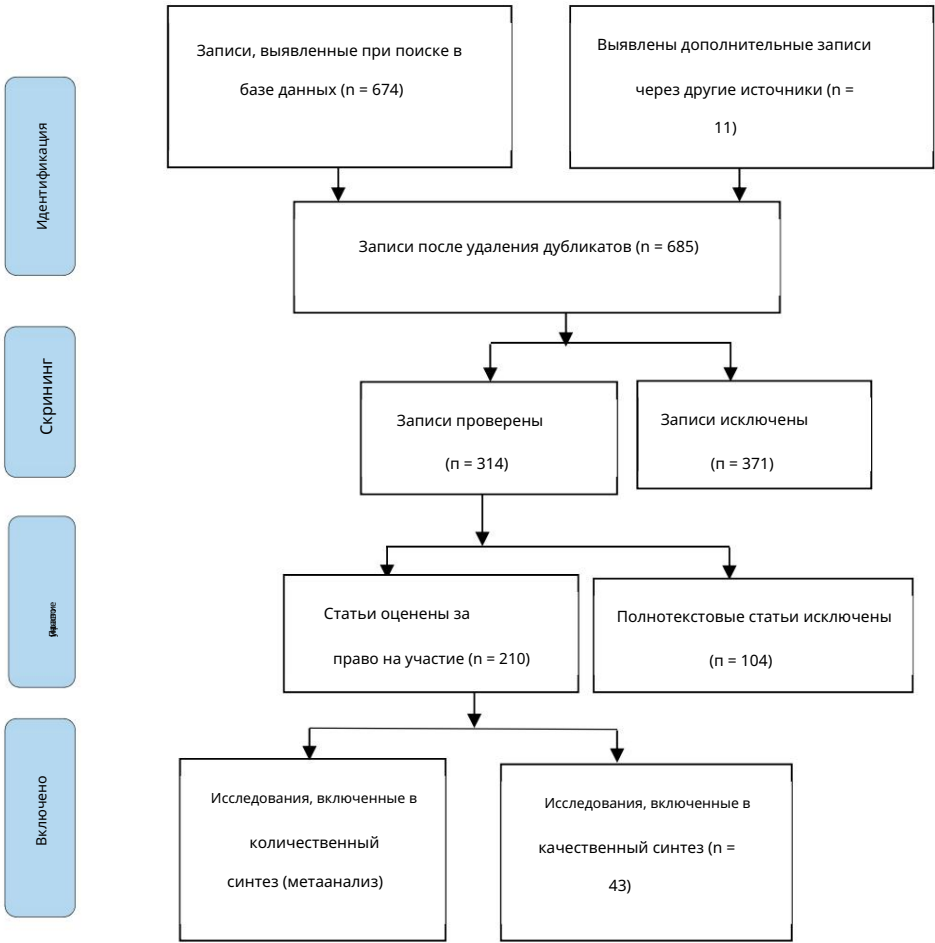


Рисунок 1. Блок-схема, иллюстрирующая процесс отбора и отбора исследований.

Рисунок 1. Блок-схема, иллюстрирующая процесс отбора и отбора исследований.



Рисунок 2. Статистические данные о публикации статей в журнале «Additive Manufacturing» (WAAM) с 2015 по 2024 год. Публикация процесса с 2015 по 2024 год.

3. Обзор процессов и продуктов WAAM. Ежегодное количество областей исследований RS в WAAM показано на рисунке 2, где показано ежегодное количество исследовательских публикаций. Гистограммы на рисунке показывают, что в этой технологии большие и сложные компоненты изготавливаются из нескольких материалов. В последние несколько лет наблюдается заметный рост исследований, связанных с RS в деталях WAAM с высокой скоростью осаждения, что является достижением, которое можно достичь с помощью традиционного AM, в чем свидетельствуют [28,29]. В этой области обычно используется большее количество цифровых технологий [28,29]. В этом случае проволока подается к сварочной горелке и плавится под действием электричества, что свидетельствует о высоком интересе к теме со стороны научного сообщества. По используются либо роботизированные, либо компьютеризированные порталы с числовым программным управлением, и, наконец, общее количество статей, прошедших проверку (включенных в эту статью), составляет 209.

3. Обзор WAAM процессов и продуктов

В этой технологии большие и сложные компоненты изготавливаются из нескольких материалов с высокой скоростью осаждения, что сложно достичь традиционными методами AM [28,29]. В этом случае проволока подается к сварочной горелке и расплавляется электрической дугой [30]. Для настройки движения процесса печати слой за слоем до желаемого внешнего вида полученных компонентов используются роботизированные или компьютеризированные станки с числовым программным управлением [10]. Цифровая 3D-модель служит основой для процесса WAAM. Использование роботизированного управления в WAAM обеспечивает мощное сочетание автоматизации и гибкости проектирования в сочетании с эффективными производственными процессами. Однако на реакцию характеристик материала изделий, изготовленных с применением аддитивной проволоки (WAAMed) влияют как автоматизированные роботы, так и компьютеризированное числовое управление для изготовления деталей и связанное с этим тепловложение [31].

По сути, этапы процесса печати в продуктах WAAM включают в себя множество действий на каждом этапе, начиная с модели САПР. Эти шаги описывают общий рабочий процесс производства компонентов с использованием WAAM, обеспечивающий эффективное и надежное производство сложных металлических деталей. Процесс WAAM будет разделен на шесть основных этапов: от подготовки файла САПР до разделения компонентов и последующей обработки. Этапы планирования процедуры, используемые WAAM для производства компонентов, показаны на рисунке 3.

По сути, RS присущ компонентам WAAM из-за различных параметров процесса, которые могут отрицательно повлиять на механические свойства, усталостную долговечность и структурную целостность деталей. Кроме того, измерение RS в структурах WAAM является сложной задачей из-за трудоемкости процесса и отсутствия достаточного разрешения [32]. Значимость понимания RS в продуктах WAAM имеет решающее значение для поддержания структурной целостности, предотвращения преждевременного выхода из строя и обеспечения механических характеристик продуктов [18,33]. Характеристики наплавленных материалов могут изменяться в процессе WAAM, влияя на развитие RS [34] в результате образования зоны термического влияния (ЗТВ) вблизи сварочной ванны [35]. Измерение RS также помогает понять, предсказать и исправить неточности размеров, вызванные искажениями, гарантируя, что продукты WAAM соответствуют желаемым допускам [36,37]. Точно так же точное знание RS важно для повышения качества продукции и обеспечения соответствия компонентов WAAM своим характеристикам. За счет сокращения

и продление срока службы дорогостоящего оборудования и техники [40,41]. Более того, он способен создавать большие и/или сложные, экономически эффективные металлические конструкции, в первую очередь благодаря превосходной скорости осаждения [3,7,30,42–47]. WAAM хорошо подходит для создания крупных металлических деталей и имеет потенциал для использования в строительной отрасли среди различных методов AM [20]. К основным преимуществам этих методов производства относятся их производительность, пригодность для промышленного применения и возможность снизить риск возникновения дефектов, сбоев, доработок и/или восстановления. Это может быть достигнуто за счет минимизации затрат и других методов AM [48,49]. минимизировать материальные отходы [36,38,39].

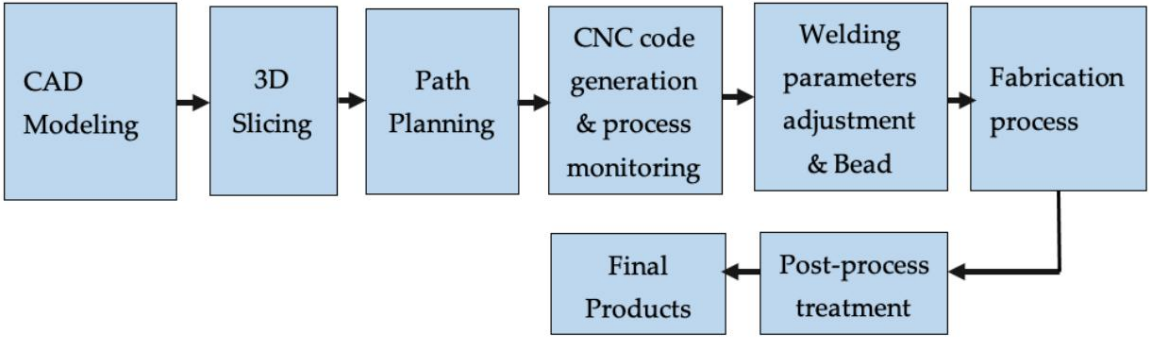


Рисунок 3. Шаги, используемые WAAM для производства компонентов.

3.1. Роботизированная система для WAAM
WAAM можно использовать для ремонта и восстановления поврежденных или изношенных компонентов и продление срока службы дорогостоящего оборудования и техники [40,41]. Кроме того, это Роботизированные системы играют важную роль в процессах WAAM, обеспечивая универсальность и высокую способность создавать большие и/или сложные, экономичные металлические конструкции, в первую очередь и автоматизация, которая позволяет точно контролировать параметры осаждения и производительность благодаря превосходной скорости осаждения [3,7,30,42–47]. WAAM хорошо подходит для создания для управления сложной геометрией [50,51]. Эти системы включают в себя современные датчики и различные металлические детали и имеют потенциал для использования в строительной отрасли, а также в различных сферах. Методы AM [20]. К основным преимуществам этих методов производства относятся их производительность, пригодность для промышленного применения и возможность снижения расхода материалов. отходов по сравнению с другими методами AM [48,49].

3.1. Роботизированная система для WAAM

Роботизированные системы играют важную роль в процессах WAAM, обеспечивая универсальность и автоматизация, позволяющая точно контролировать параметры осаждения и производительность для управления сложной геометрией [50,51]. Эти системы включают в себя современные датчики и технология автоматизации для мониторинга и корректировки параметров печати в режиме реального времени, обеспечивая стабильное качество и точное нанесение материалов. Исследование опубликовано в [52] основное внимание уделялось двум параметрам WAAM, а именно (1) скорости подачи проволоки и (2) скорости скорость движения робота и исследовали их влияние на металлургические, размерные стабильность и механические характеристики материалов. В исследовании участвовало производство тонкостенных деталей из нержавеющей стали 308L с использованием системы WAAM, проведенных в два этапа. шага. Во-первых, было исследовано влияние сварочного тока, напряжения и скорости перемещения на форму отдельных сварных валиков, и эти факторы были точно настроены для конструкции стен из стали 308L. Во-вторых, был проведен комплексный анализ влияния микроструктуры и механических характеристик стальных стенок WAAM 308L, что приводит к улучшению механических свойств, пригодных для промышленного применения. Роботизированный компоненты для процесса печати с траекторией отпечатка (рис. 4а), установка для экспериментирование (рис. 4б), а траектория инструмента для осаждения показана на рис. 4.

Генетические алгоритмы (ГА) используются для улучшения процесса выбора параметров в нанесение почти чистой формы для минимизации пустот и избыточных веществ в WAAM процесс [53]. Непрерывный процесс осаждения планируется путем проверки перекрытия условия в зонах смены роботов, чтобы избежать столкновений [54,55]. Аналогично, непрерывный Процесс осаждения тщательно планируется, проверяя области, где роботы могут перекрываться или приближаться друг к другу в зонах обмена роботами. Такое тщательное планирование осуществляется для предотвращения любые столкновения между роботами, обеспечивая плавную и безопасную работу. Роботизированный руководство будет зафиксировано на желаемой скорости сварки, что влияет на накопление тепла и приводит к вариациям CO в продуктах, а также к роботизированному наведению отслеживать процесс в WAAM, описанный на рисунке 4. Использование планирования пути было предложили [53,54] включить перекрытие бортов и повысить внутреннюю структурную стабильность за счет минимизация высоты; в конечном итоге это влияет на RS в продуктах WAAM.

стальные стены. Во-вторых, был проведен комплексный анализ влияния микроструктуры и механических характеристик стальных стенок WAAM 308L, в результате которого были улучшены механические свойства, пригодные для промышленного применения. Роботизированная композиция для процесса печати с траекторией вдавливания (рис. 4а), установкой для экспериментов (рис. 4б) и траекторией инструмента для осаждения показана на рис. 4.

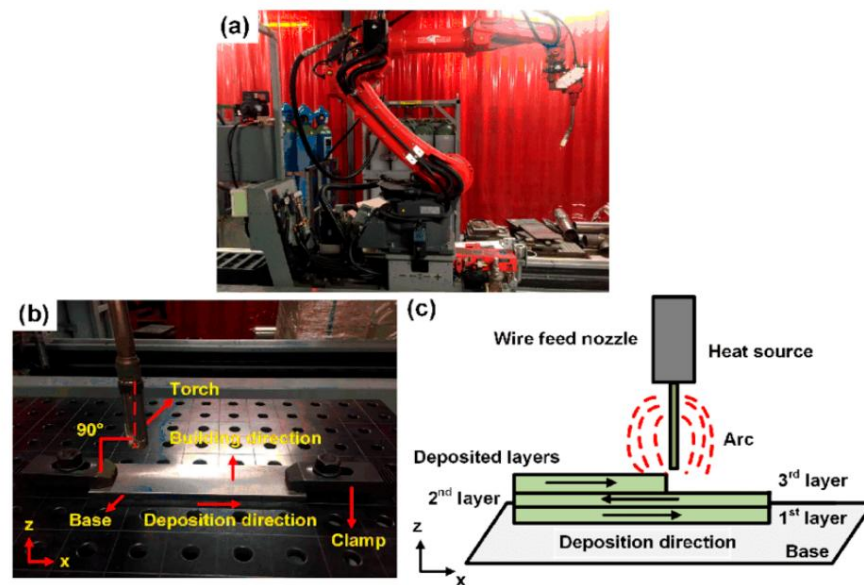


Рис. 4. (а) Конфигурация роботизированной системы WAAM, (б) установка для экспериментов, (в) путь инструмента [53]. Copyright 2019. MDPI, согласно лицензии CC BY, открытый доступ.

3.2. Остаточное напряжение в продуктах WAAMed

Остаточное напряжение (RS) является фактором, влияющим на качество сварки, которое может возникнуть из-за циклических нагрузок или напряжений, это может ускорить возникновение и распространение трещин, процесс [53]. Непрерывный процесс осаждения планируется путем проверки перекрытия, которое является причиной преждевременного выхода из строя [56]. Этот РС может возникнуть в результате различных факторов, условия в зонах смены роботов, чтобы избежать столкновений [54,55]. Аналогичным образом, непрерывность, такая как циклы нагрева и охлаждения, связанные с дифференциальным расширением во время процесса осаждения тщательно планируется путем проверки участков, где роботы могут выполнять сварочный процесс, сжатие материалов во время охлаждения и другие процессы. Ученые или пользователи должны определить, что такое оптимальное планирование, которое является оптимальным параметром [57-62]. Их анализ [63] определил, что высокие температуры являются оптимальными параметрами для обеспечения качества между слоями, а также для обеспечения безопасности. Условия осаждения будут влиять на RS. В процессе WAAM компонент будет вызывать тепловое напряжение и деформацию, поскольку температура колеблется с развитием производства [64-65]. Данная корректировка осуществляется путем контроля значений скоростей подачи проволоки и скорости перемещения. Для процесса в WAAM, описанном на рисунке 4. Планирование пути использовалось (TS). При большем подводе тепла на поверхности верхнего слоя наблюдается более низкий RS. [53-54] предполагалось обеспечить перекрытие валиков и повысить внутреннюю структурную стабильность за счет длительного охлаждения [66]. RS сварки измеряли с использованием пяти экспериментальных методов: сверление, инкрементное сверление центрального отверстия (iCHD) и контурный метод (CM) [67].

Остаточное напряжение в продуктах WAAMed, они обнаружили значительные улучшения. 3.2.

Структуры зерен и свойств материала производимых композиций в WAAM относятся к внутренним напряжениям, которые остаются заблокированными внутри детали (энты [68]). Превращение крупных удлиненных зерен в более мелкие, равномерно сформированные зерна внутри готовых компонентов [55]. Когда компонент находится в пределах RS, регулируется воздействие зерен как циклическое напряжение, так и в промежуточном слое, это достигается путем регулирования количества циклов нагрева и охлаждения, которые могут использоваться для предотвращения трещин, создаваемых действием механических характеристик материала, удовлетворенных в процессе RS может возникнуть из-за различных факторов, например, процедура WAAM изучена в [69-70]. Циклы нагрева и охлаждения, связанные с дифференциальным расширением в процессе сварки, сжатием материалов во время охлаждения и другими технологическими параметрами. 3.3. Методы измерения остаточных

По сравнению с измерением RS другими традиционными методами измерение RS в WAAM Измерение продуктов является более сложной задачей из-за сложной термической истории, микроструктурной неоднородности, геометрической сложности и необходимости использования специализированных методов измерения. Решение этих проблем требует сочетания передовых экспериментальных методов, точные стандарты калибровки и надежные инструменты моделирования. Понимание и преодоление этих проблем имеет решающее значение для обеспечения структурной целостности и производительности компонентов WAAM в практических приложениях. Обычно существует два измерения. методы РС деталей, изготовленных на WAAM, а именно экспериментальные и численные методы, которые рассматриваются и сообщаются в следующих подразделах.

3.3.1. Экспериментальные методы измерения RS в деталях WAAM

В нескольких обзорных статьях в различных типах литературы исследовались исследования RS в продуктах WAAM с использованием различных методов [71]. Первоначально эти исследования были сосредоточены на напряжении в центральных линиях поперечного сечения общей теории балки, проводя теоретический анализ эволюции напряжений вдоль этих линий, не предполагая конкретного распределения напряжений, которое считается RS. Впоследствии исследования расширились до улучшения моделей прогнозирования коробления на основе общей теории пучка [72]. Другие методы включают нейтронографию (НД) [22–24,73], рентгеновскую дифракцию (РФА) [25–27,74], контурный метод [13,75–77], методы сверления отверстий [31].), модель термомеханической связи [78], корреляция цифровых изображений (DIC) [79], сверление глубоких отверстий (DHD) [80], операндо -синхротрон и синхротронная рентгеновская дифракция (SXRД) [81,82]. Выбор методов зависит от таких элементов, как материал, размер компонента, геометрия и уровень точности, необходимый для измерения. Точное моделирование процесса имеет решающее значение для понимания и контроля RS. Например, рентгеновский анализ используется для определения размера зерен, наблюдаемых в тонких полосках и феррите бейнита, образовавшихся в результате термических циклов, а тесты на проникновение красителя используются для исследования поверхностных дефектов и коррозионного поведения компонентов WAAM [65,66,68]. ,83].

Выбор подходящего метода измерения определяется такими факторами, как доступность, разрешение, точность и желаемая глубина проникновения напряжения. В табл. 1 приведены методы измерения РР на различных материалах, а также краткое изложение экспериментальных исследований. Как видно из таблицы, наиболее используемыми методами, согласно обзору литературы, являются РФА, ND, корреляция цифровых изображений (DIC), SXRД, удаление слоев (сверление глубоких отверстий), контурный метод и инкрементное отверстие. - метод бурения.

Таблица 1. Краткое описание экспериментальных методов измерения остаточных напряжений (RS).

Методы	Материалы	Полученные результаты	Ссылки.
без даты	нержавеющая сталь 316L	В зоне плавления влияние параметров процесса на РС едва заметно.	[22]
	Сплав Fe3Al	Крупные столбчатые зерна приводят к анизотропии, а RS растягивается в направлении построения, а напряжение сжатия постепенно увеличивается от начала к концу пути осаждения.	[23]
	AA6061	RS свидетельствует о возникновении в построенных деталях растягивающих напряжений большей величины, тогда как в подложке наблюдаются меньшие сжимающие напряжения. По механическим свойствам существенных различий не обнаружено.	[59]
	2319 алюминиевый сплав	RS по направлению сборки в наплавленной стене представляет собой растягивающее напряжение, распространяющееся до пола. Межпроходные прокатные стенки уменьшили RS до повышенной прочности в продольном направлении.	[24]
	Fe3Al	RS и искажения, возникающие в результате процесса WAAM, являются серьезной проблемой, поскольку они не только влияют на допуск детали, но также могут вызвать преждевременный выход из строя конечного компонента во время эксплуатации.	[83]
	нержавеющая сталь 304L	Изменение RS в образце после внесения нового осадка. Продольное напряжение было преимущественно растягивающим, достигая своего пика на границе между основным материалом и слоями, к которым прилагались термические нагрузки.	[84]
	Инконель 625	Измерения показали, что в функционально-градиентных материалах (FGM) с прямым интерфейсом формируется более низкий RS по сравнению с FGM с плавным градиентом.	[85]
Контур и ND	Сплав Ti-6Al-4В, нержавеющая сталь	Напряжение в опорной плите варьируется RS. Параметры решетки недействительны для базовой пластины для измерений ND. Вырезание выхода без напряжений использовалось для корректировки эталонных образцов.	[73,74,86]

Таблица 1. Продолжение.

Методы	Материалы	Полученные результаты	Ссылки.
	Сплав C-276	Амплитуда растяжения RS воспринималась в направлении движения по сравнению с ориентацией сборки. Остаточная деформация в решетке выявляет РС в материале. Большая амплитуда компрессионного RS обнаружена по оси построения.	[87]
	Сплав Ал-5356	Высота луча может влиять как на уровень, так и на рисунок продольного RS как в подложке, так и в луче. Это изменение в первую очередь затрагивает поперечное RS в подложке и оказывает минимальное влияние на сам пучок.	[88]
	Г 79 5 М21 Mn4Ni1,5CrMo (EN ISO 16834-A) [89]	RS, твердость и микроструктура зависят от параметров сварки, геометрии и конструкции детали. Подвод тепла вызывает снижение прочности RS, что приводит к неблагоприятной зернистой структуре и механическому отклику.	[25]
	SS308L аустенитная нержавеющая сталь (SS)	Накопление сжимающего RS связано с повышенным тепловложением и быстрыми скоростями охлаждения. Ближе к месту сварки произошло большее напряжение, чем в других местах.	[26]
	Сплав Al-6Cu-Mn	Развитие RS указывает на то, что наиболее ответственная область образца находится вблизи подложки, где преобладают значительные растягивающие напряжения, близкие к пределу текучести материала.	[27]
	91 класс (модифицированный 9Cr-1Mo)-сталь	РС варьирует характеристики материала и его микроскопическую структуру. WAAMed ферритно-мартенситная (ФМ). Термическая обработка первоначально изготовленной стали не устранила ее анизотропные свойства.	[80]
ДВС	Инконель 625	Тепловые процессы последующей обработки могут повысить коррозионную стойкость и уменьшить RS. Измерения показали, что подход с плавным градиентом приводит к образованию вторичных фаз, таких как d-фаза (Ni3Nb) и карбиды, которые отсутствовали в методе прямого интерфейса.	[85,90]
	Мягкая сталь (AWS ЭР70С-6)	DIC использовался для наблюдения за изгибными искажениями компонентов WAAM при их освобождении от зажатых Н-профилей, а остаточные напряжения были выведены из распределения деформации, наблюдаемого в процессе разжима.	[77,91]
	Мягкая сталь (G3Si1) и аустенитная нержавеющая сталь (SS304)	RS находятся под сжатием в секции из мягкой стали и под напряжением в секции из аустенитной нержавеющей стали (SS). Эти напряжения колеблются по толщине из-за различий в скоростях охлаждения на внутренней и внешней поверхностях.	[78]
	Сверление отверстий	После ультразвуковой ударной терапии размер зерна уменьшился, а РС изготовленных деталей в BAAM после УИТ улучшились.	[76,92]
Термомеханическая муфта и Контур	Нержавеющие стали (SS) SUS308LSi	RS является растягивающим в слоях, граничащих с верхней поверхностью поверхности, сжимающим в слоях вблизи поверхности подложки и растягивающим вблизи нижней стороны подложки.	[13]

Методы измерения RS, перечисленные в таблице 1, в целом можно разделить на три категории: (1) неразрушающие; (2) полунарушающий; и (3) деструктивные упомянуты в Таблице 1 с краткими описаниями, хотя некоторые методы не применялись в прошлых исследованиях. Неразрушающие методы (NDT), такие как XRD и ND, являются распространенными высокоточными методами, и их часто предпочитают измерять RS в компонентах WAAM. Выбор методов зависит от таких основных факторов, как материал, размер компонента, геометрия и уровень точности, необходимый для измерения.

Очевидно, что из методов измерения RS ND более широко используется исследователями из-за его неразрушающего характера, который помогает поддерживать достоверность деталей , в то время как дифракция рентгеновских лучей является вторым используемым методом. Круговая диаграмма, показанная на рисунке 5 , представляет иерархию методов, используемых для измерения RS в продуктах WAAM. Упругая деформация в RS рассчитывается по изменению шага решетки [23]. При этом любой стресс,

10

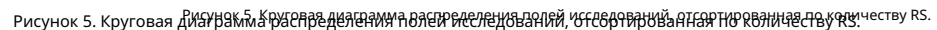


Таблица 2. Обзор сообщаемого численного анализа с использованием метода конечных элементов (МКЭ), инструментов и материалов, связанных с технологиями WAAM.

Программное		краткое описание материалов	Ссылка.
Программное обеспечение FEM		обеспечение FEM Материал . Была выполнена термомеханическая оценка стали WAAM B91. Сталь B91 (ER90S – последовательно для оценки влияния термомеханических воздействий стали B91.	Ссылка.
АНСИС 2019	АНСИС 2019	Сталь B91 (ЭР90С-B91 композит выполняются последовательно для оценки изменения остаточного напряжения	[11]
	Симуфакт (сталь)	Динамическое изменение температуры , изменения, накопление напряжения и деформации.	[11]
Simufact Добавка 2023.2	Добавка	Стали деформация имеют большое значение для применений, связанных с высокими температурами.	[40]
	2023.2 Стали	прочие деформации имеют большое значение для приложений	[40]
АБАКУС 2019	АБАКУС 2019 год	Алюминиевый сплав	Характер осаждения и скорость перемещения влияют на RS и коробление деталей WAAM.
		Алюминиевый сплав	Результаты термомеханического моделирования методом КЭ показывают, что характер осаждения и скорость перемещения влияют на RS и коробление.
		Алюминиевый сплав	Схемы обработки деталей WAAM. Результаты термомеханического RS и коробления.
		Алюминиевый сплав	Увеличение скорости движения снижает температурный градиент в осаждаемых деталях, что снижает RS и коробление. Увеличение скорости движения снижает пиковую температуру и температурный градиент при осаждении, снижающие RS.
		Использовал комплексную трехмерную модель переходной теплопередачи для расчета распределения температуры и градиента в процессе WAAM для различных [95] параметров процесса, что приводит к RS. Полученные данные о температуре были использованы в механической модели для прогнозирования RS и искажений.	[94]
		Инконель 718	

Таблица 2. Продолжение.

Программное обеспечение FEM	Материал	Резюме:	Ссылка.
АБАКУС 2010	Инконель 718	Использована комплексная трехмерная модель переходной теплопередачи для расчета распределения и градиента температуры в процессе WAAM для различных параметров процесса, что приводит к RS. Полученные данные о температуре были использованы в механической модели для прогнозирования RS и искажений.	[95]
	Углеродистая сталь	Результаты моделирования показывают, что с увеличением количества напыленных слоев максимальная температура возрастает, что приводит к RS, а средняя скорость охлаждения снижается.	[96]
	Аустенитная нержавеющая сталь (304) и низкоуглеродистая сталь (A36).	Систематически изменяя по одному механическому свойству за раз, мы изолировали влияние каждого из них на формирование RS в разнородных сварных швах. Результаты показывают, что продольное остаточное напряжение как в одинаковых, так и в разных сварных швах может быть уменьшено внутри зоны сварки на величину, эквивалентную напряжению, вызванному приложенной механической растягивающей силой, после того как растягивающая сила снимается после охлаждения.	[97]
	Сталь API X65	Именно прогнозируются термические условия и РС, позволяющие регулировать форму, микроструктуру и механические характеристики зоны сварки в сварном соединении под флюсом.	[98]
АБАКУС 2019	Конструкционная сталь Провод ЭР70С-6	Остаточное напряжение и деформация двух обширных конструкций были исследованы, что выявило весьма последовательные численные результаты и хорошее соответствие экспериментальным результатам.	[99]
	сталь ЭХ36	Влияние скорости сканирования на термические профили и RS указывает на то, что более высокие скорости сканирования приводят к снижению пиковых температур и увеличению скорости охлаждения, что приводит к увеличению объемной доли мартенсита в осаждении.	[100]
	Алюминиевый сплав	RS и деформация рассчитывались с использованием метода движущихся источников тепла (MHS) и метода сегментированной температурной функции (STF).	[101]
	Ti-6Al-4V, сталь S355JR и AA2319	Уменьшенные радиусы профиля ролика эффективно устраняют практически все растягивающие РВ вблизи поверхностей.	[32]
МСК. март 2021 г.	У309L	Повышенный RS генерируется внутри слоев осаждения, а также в середине подложки.	[102]
МСК. март 2014.2.0	Присадочная присадка G3Si1	Моделирование и проверка изменений геометрии и микроструктуры в пределах сварочных проходов проводились с использованием реальности RS, а моделирование - с использованием измерения инерции термопар.	[103]
	S316L	На отклонения RS влияют как колебания распределения температуры во время фазы замораживания, так и силы, приложенные к структуре WAAM после процесса охлаждения.	[104]
КОМСОЛ-5.4 2018	304 Нержавеющая сталь	Крупномасштабные изображения и высокоскоростные записи были использованы для построенной стены для проверки точности измерений ванны расплава и определения формы осаждения, что позволило определить RS по частям.	[105]

Дрекслер и др. В работе [106] рассмотрено численное моделирование РС и искажений, возникающих в деталях ВААМ при ткацком наплавлении. Численно прогнозируемые термические напряжения в различных слоях сварки были изображены для последующей экспериментальной оценки, проведенной в [107]. Аналогичным образом, моделирование методом конечных элементов (FE) вместе с термическим анализом позволило создать соответствующие траектории путем сегментирования трехмерного сканирования поверхности предполагаемой области ремонта [41]. Как показано на круговой диаграмме на рисунке 6 (см. также таблицу 2), большая часть численного анализа RS была исследована с использованием ABUQAS 2010 и 2019.

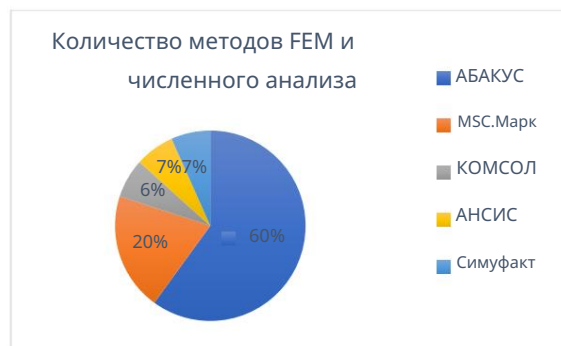


Рисунок 6. Количество публикаций по ERM, используемых для PRS в процессе WACAM, опубликованных в различных материалах.

3.4. Факторы, влияющие на РС в WAAM

Исследователи и инженеры могут охарактеризовать и понять поведение RS в WAAM.

экспериментальные методы анализа методом конечных элементов (FEA) для улучшения управления процессом сварки WAAM, discussing the advantages and disadvantages of each method, and providing a useful guide to the selection of the most appropriate method for the analysis of WAAM processes. The paper also discusses the importance of the choice of the finite element mesh, the choice of the material properties, and the choice of the boundary conditions. The paper concludes that the use of FEA is a powerful tool for the analysis of WAAM processes, and that the choice of the method and the parameters of the analysis are crucial for the accuracy of the results.

деталей, и приводит к улучшению управления процессом, качеству деталей и производительности продукции. Многие из них, которые могут влиять на RS в частях WAAM, обсуждаются в [18], а профиль, включающий параметры, которые могут влиять на RS в частях WAAM, обсуждается в [18], а профиль, позволяющий оценить общую высоту, ширину и гладкость каждой сформированной стенки, изучен, что дает оценку общей высоты, ширины и гладкости каждой из них, сгенерированных и описанных в [108]. Параметры осадки [109], тепловложение, межслоевая температура [109], тепловложение, прослойка и продолжительность стенки была изучена и описана в [108]. Параметры осадки [109], тепловложение, прослойка и продолжительность межслоевых пауз являлись значимыми факторами, влияющими на формирование [109]. Параметры осадки [109], тепловложение, прослойка и продолжительность межслоевых пауз являлись значимыми факторами, влияющими на формирование [109]. Параметры осадки [109], тепловложение, прослойка и продолжительность межслоевых пауз являлись значимыми факторами, влияющими на формирование [109].

распределение пор в сплавах алюминия 5183, напечатанных в процессе WAAM [110]. Аналогичным образом, образование и распределение пор в алюминиевых сплавах 5183, напечатанных в WAAM pro- Аналогичным образом, разные скорости сварочного хода, при которых дефекты становятся заметными, также подразумевают уступку [110]. Аналогичным образом различаются скорости сварочного перемещения, при которых становятся заметными дефекты, как скорость подачи проволоки, так и скорость перемещения в процессе сварки [111]. Напротив, субстрат также подразумевает как скорость подачи проволоки, так и скорость перемещения в процессе сварки [111]. Напротив, было обнаружено, что толщина (основания или опорной плиты) оказывает большое влияние на распределение RS. Было обнаружено, что толщина подложки (слоя или опорной плиты) оказывает основное влияние на высоту отклонения RS. Благодаря подложке предел прочности RS равен стоимости материала. Благодаря подложке в [112] обсуждалось достижение RS растяжения, равного значению предела текучести. Распределения RS как в продольном, так и в продольном направлении. Предел текучести материала обсуждался в [112]. Распределение RS в обоих продольно- поперечных направлениях указывает на то, что продольное напряжение значительно смещается при сжатии. Натяжное и поперечное направления указывают на то, что продольное напряжение значительно смещается от процесса осадки к растяжению в опорной плите [113]. сжатие во время напыления на растяжение в опорной плите [113].

Более того, более толстая подложка индуцирует больший RS, чем более тонкая. Подложка более того, более толстая подложка индуцирует большее RS, чем более тонкая. Подложка, на которую наносится расплавленная ванна (процесс печати), может быть изготовлена из 2xxx который используется для нанесения расплавленной ванны (процесс печати), может быть изготовлен из пластины из алюминиево-алюминиевого сплава размером 2xxx для сырья из алюминиевого сплава [114,115]. При прямой 3D-печати пластина из сплава для сырья из алюминиевого сплава [114,115]. В процессе прямой 3D-печати положение напечатанного образца имеет значение для качества напечатанных деталей [64]. положение напечатанного образца имеет значение для качества напечатанных деталей [64]. Это происходит потому, что расширение изотерм не достигает дна толстой пластины, в результате чего потому что расширение изотерм не достигает дна толстой пластины, что приводит к увеличению накопления тепла [116,117]. Методика контроля собственных РС и повышенное накопление тепла [116,117]. Методика управления собственными RS и искажениями сталкивается с многочисленными проблемами в продуктах WAAM, приводящими к непредсказуемым результатам. Компания сталкивается с многочисленными проблемами в продуктах WAAM, приводящими к непредсказуемой структурной целостности печатных деталей. По этой причине в некоторой литературе указывается, что Структурная целостность напечатанных деталей. По этой причине в некоторой литературе указывается, что различные параметры процесса, такие как скорость подачи проволоки, скорость перемещения, подвод тепла, путь наплавки Влияние на процесс оказывают такие параметры процесса, как скорость подачи проволоки, скорость перемещения, тепловложение, длина пути наплавки, длина, ширина и глубина (толщина) печатных компонентов [46,55,118]. ширина и глубина (толщина) печатных компонентов оказывают влияние [46,55,118]. Основные основные дефекты, возникающие в металлоизделиях из-за этих параметров в процессе WAAM, выявленными многими исследователями, являются RS, деформация, пористость, трещины и Дефекты, возникающие в металлоизделиях из-за этих параметров в процессе WAAM, выявленными многими исследователями, являются RS, деформация, пористость, трещины и Таким образом, наиболее распространенными факторами дефектов продукции WAAM являются технологические процессы. Таким образом, наиболее распространенными факторами дефектов изделий WAAM являются параметры процесса, ограничивающие применение этой технологии [119-123]. С другой стороны, недорезы и выпуклости являются распространенными дефектами, обнаруженными в продуктах WAAM, в то время как Недорезы и выпуклости являются распространенными дефектами, обнаруженными в продуктах WAAM, в то время как

Влияние условий обработки, таких как межслоевая температура, высота слоя и распределение в объеме RS, изучалось в литературе [1, 2, 12, 13]. Вальвингтен и соавторы показали, что положительный сжимающий RS, в то время как

[illegible]

напряжение, ток, скорость перемещения и высота слоя [128]. Эти параметры определяют различные аспекты процесса осаждения, включая подвод тепла, скорость охлаждения и температурные градиенты. Понимание того, как изменения этих параметров влияют на RS, жизненно важно для достижения оптимальных характеристик продукта WAAM [111]. Выбор параметров геометрии валиков в процессе WAAM необходим для оптимизации избыточных материалов и минимизации пустот, образующихся в нескольких слоях наплавления валиков. Параметры процесса и другие факторы, влияющие на РС в компонентах BAAM, обобщены и приведены в таблице 3.

Таблица 3. Факторы, влияющие на РС при аддитивном производстве проволоки.

Параметры процесса и Другие факторы	Краткое описание	Ссылки.
Свойства материала: свариваемость материалов.	Не все материалы одинаково подходят для WAAM. Для этого процесса часто требуются материалы с хорошими характеристиками свариваемости, например, с низкой склонностью к растрескиванию и хорошими свойствами плавления. Например, теплопроводность материалов, коэффициент теплового расширения и фазовые превращения могут влиять на индуцируемое RS.	[13,34,129,130]
Мощность осаждения: ток и напряжение дуги	В процессе WAAM контроль подвода тепла имеет решающее значение для предотвращения перегрева, деформации и металлургических проблем, таких как чрезмерный рост зерна или фазовые превращения. Изменения погонной энергии изменяют последствия RS для свариваемости материалов.	[25,65,66,114,130,131]
Скорость: скорость подачи проволоки, скорость сварки и скорость наплавки.	Быстрое осаждение и охлаждение могут привести к увеличению RS, особенно вблизи зоны осаждения. Быстрое затвердевание и более высокая скорость осаждения могут вызвать температурные градиенты и дифференциальные скорости охлаждения, что приводит к более высоким уровням растяжения RS. Увеличение скорости сварочного перемещения уменьшает время пребывания материала в высокотемпературной зоне и приводит к снижению величины RS.	[113,132-134]
Защитный газ: типы защитного газа и расход защитного газа	Защитный газ играет решающую роль в процессах WAAM, поскольку он защищает расплавленную сварочную ванну от атмосферных загрязнений и влияет на характеристики теплопередачи во время наплавки. Тип защитного газа, скорости потока газа, такого как аргон и гелий, и химически активные газы, такие как CO2 и O2, могут оказывать существенное влияние на образование RS в продуктах WAAM.	[3,37,135]
Расстояние сопла: расстояние от кончика сопла до рабочего места (расстояния сварочной горелки)	Расстояние до сварочной горелки в процессах WAAM может оказывать существенное влияние на RS в конечной продукции. Оптимизация расстояния между наконечником сопла и рабочим расстоянием в процессах WAAM включает в себя балансировку подвода тепла, скорости охлаждения, контроля искажений, межслойного соединения и образования дефектов для минимизации RS и обеспечения производства высококачественных деталей.	[23,24]
Положение печати: угол наклона электрода (проволоки) (θ) и высота слоя.	Положение печати влияет на рассеяние и накопление тепла, влияя на скорость охлаждения и температурные градиенты внутри детали. Положение печати влияет на поток расплавленного металла, а геометрия наплавленных валиков приводит к изменению RS.	[36,64,128,136,137]
Толщина слоя: Толщина подложки, толщина нанесения	Уменьшение толщины слоя при изготовлении WAAM может привести к сокращению термических циклов и снижению тепловложения на слой. Это может привести к снижению общего RS из-за меньших тепловых искажений и уменьшения размера ЗТВ.	[124,138]
Скорость охлаждения: время наложения слоев, время пребывания между слоями.	Быстрые циклы нагрева и охлаждения, связанные с WAAM, могут привести к развитию значительного RS и деформации изготовленных деталей. Это может отрицательно повлиять на структурную целостность и размерную точность компонентов, затрудняя достижение желаемых свойств сварного шва и, как следствие, изменение RS в печатных деталях.	[57-60,102,136]
Предварительный нагрев субстрата (Опорная плита)	Предварительный нагрев подложки в процессах WAAM дает несколько преимуществ для управления RS в конечных продуктах. Уменьшая температурные градиенты, уменьшая искажения, улучшая металлургическую связь, повышая пластичность и оптимизируя скорость охлаждения, предварительный нагрев помогает создавать детали с более низким уровнем RS и улучшенными механическими свойствами.	[96,137,138]
Геометрия детали: формы напечатанных деталей и объем деталей.	Геометрия печатных деталей в процессах WAAM существенно влияет на RS. Понимание того, как сложность формы, ориентация детали, объем и закономерности накопления материала влияют на температурные градиенты и скорости охлаждения, имеет решающее значение для управления RS и обеспечения производства высококачественных деталей с желаемыми механическими свойствами и точностью размеров в WAAM.	[9,26]
Послесварочная термообработка (ПВТ)	PWHT играет решающую роль в управлении RS в продуктах WAAM. Подвергая детали контролируемым циклам нагрева и охлаждения, PWHT может эффективно уменьшить RS, улучшить свойства материала, а также повысить общее качество и реализацию изготовленных деталей.	[1,4,60,112,139]
Шаблон сканирования	Схема сканирования играет решающую роль во влиянии на аккумуляцию тепла, скорость охлаждения при осаждении AM и, следовательно, на формирование РС.	[100]
Наполнитель проволоки: наполнитель проволоки диаметры и марка проволоки	Диаметр и марка присадочной проволоки являются двумя ключевыми факторами, которые могут существенно влиять на RS в продуктах WAAM.	Не изучен

в [141], а значения используемого диапазона объяснены в [142]. На круговой диаграмме ЭКСПЕРТИЗЫ на рисунке 7 факторы, влияющие на остаточное напряжение в деталях WAAM, отображены в виде графика. 15 проценты.



Рисунок 7. Круговая диаграмма распределения областей исследований, отсортированная по количеству факторов, влияющих на RS.

[illegible]

$$\text{Тепловая мощность (Дж/мм)} = \frac{\text{Вольт} \times \text{Ампер} \times 60}{\text{Скорость перемещения (мм/мин)}} \times A \quad (2)$$

где v — скорость движения. Вора и др. [147] исследовали, что наибольшее влияние на ширину валика оказывает напряжение, за которым следуют скорость движения и соотношение газовой смеси.

характеристики [143]. Основываясь на гипотезе диссипации энергии и связанных с ней уравнениях, различные процессы аддитивного производства, в которых используются энергетические пучки, можно сравнивать более тщательно, если они подвергаются одинаковому вложению энергии. Такое сравнение служит основой для определения исходных параметров процесса и динамической корректировки основных параметров [146]. Количество тепла, выделяемого сварочной дугой на единицу длины сварного шва, выражается в килоджоулях на миллиметр длины сварного шва (кДж/мм), как показано в уравнении (1).

$$\text{Энергия дуги (кДж/мм)} = \text{Вольт} \times \text{Ампер} = V \times I \quad (1)$$

где V — в вольтах, а I — в амперах (А). Количество тепла, выделяемого в сварочной дуге на единицу длины сварочного процесса, представлено в уравнении (2) и различными способами в соответствии со стандартом ASME IX QW-409.1 Американского общества инженеров-механиков [132].

$$\text{Тепловая мощность (Дж/мм)} = \frac{\text{Вольт} \times \text{Ампер} \times 60}{\text{Скорость перемещения (мм/мин)}} = \frac{V \times A}{v} \quad (2)$$

где v — скорость движения. Вора и др. [147] исследовали, что наибольшее влияние на ширину валика оказывает напряжение, за которым следуют скорость движения и соотношение газовой смеси.

Наплавленный слой в процессе изготовления валиков предполагается полукруглым. Скорость напыления R , на которую влияют диаметр проволоки, скорость ее подачи и плотность проволоки, выражается уравнением (3).

$$R = \frac{\pi d^2 v_p}{4} = \rho v A_{ww} \quad (3)$$

где d — диаметр проволоки, v — скорость подачи проволоки (WFS), а ρ — плотность проволоки и площадь поперечного сечения сварочной проволоки A_{ww} .

4. Влияние RS на механические свойства компонентов WAAM. Хотя WAAM

продемонстрировал свою способность производить компоненты среднего и большого размера из алюминия для автомобильной и смежных отраслей, он пока не может служить комплексным методом производства из-за практических проблем. такие как непревзойденные механические свойства и значительный RS [148]. РС существенно влияет на материалы и механические характеристики изготавливаемой детали. Например, это может повлиять на механические свойства, такие как прочность, твердость и пластичность изделий, делая их отличными от внутренних свойств материала. Высокая подача тепла в процессе WAAM приводит к снижению растягивающих напряжений внутри детали и может привести к нежелательным механическим свойствам и микроструктуре [149,150].

Микроструктурные характеристики оказывают влияние на свойства материалов изделий, изготовленных WAAM, включая уровни остаточных напряжений. Микроструктура продуктов WAAM играет решающую роль в разработке и распространении RS, что влияет на многие взаимосвязанные механические свойства. Благодаря наличию РС в изделиях WAAM, вызванных увеличением либо скорости сварки, либо параметра теплораспределения, свойства материала могут существенно варьироваться [103,151]. Результирующая микроструктура и уровень RS в WAAM напрямую коррелируют с конечными механическими свойствами. Исследования внутренней пористости сформированных шариков и их способности производить крупногабаритные компоненты демонстрируют неадекватные свойства при растяжении и усталости [152]. Эта пористость является результатом RS, влияющего на процесс затвердевания и способность газа выходить во время осаждения [153,154]. Аналогичным образом, RS может влиять на различные механические свойства изготавливаемых деталей несколькими способами, изменяя прочность, ударную вязкость, микроструктуру, усталостную долговечность, растрескивание и расслоение изделий WAAM [152,155].

RS, образующийся в процессе изготовления, заметно влияет на механические характеристики и может привести к отслоению от опорных конструкций, нежелательной деформации формы и преждевременному возникновению трещин [76]. Входные параметры, результирующая микроструктура, постпроизводственная обработка и RS оказывают существенное влияние на конечную механическую прочность.

5,5. Таким образом, они могут влиять на различные механические свойства производственных деталей несколькими способами, изменяя прочность, ударную вязкость, микроструктуру, усталостную долговечность, растрескивание и расслоение продуктов WAAM [152,155].

RS, образующийся в процессе изготовления, заметно влияет на механические характеристики и может привести к отслоению от опорных конструкций, нежелательной деформации формы и преждевременному возникновению трещин [76]. Входные параметры, результирующая микроструктура, постпроизводственная обработка и RS оказывают существенное влияние на характеристики продукции WAAM [156]. RS, образующийся в процессе изготовления, заметно влияет на механические характеристики и может привести к отслоению от опорных конструкций, нежелательной деформации формы и преждевременному возникновению трещин [76]. Входные параметры, результирующая микроструктура, постпроизводственная обработка и RS оказывают существенное влияние на характеристики продукции WAAM [156].

На рисунке 8 показаны проблемы, присущие RS в деталях WAAM, деформация и напряжение в деформированной области. Для достижения оптимальных характеристик WAAM необходимо контролировать RS. Для достижения оптимальных характеристик WAAM необходимо контролировать RS. Для достижения оптимальных характеристик WAAM необходимо контролировать RS. Для достижения оптимальных характеристик WAAM необходимо контролировать RS.

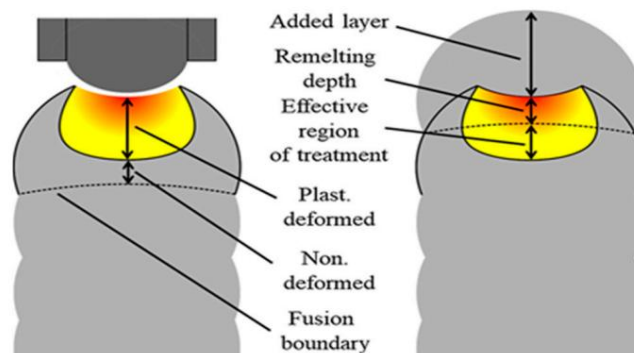


Рисунок 8. Диаграмма, иллюстрирующая явление переплавления, происходящее во время процесса осаждения [32]. Copyright 2019, согласно лицензии CC BY, доступ открыт. уступка [32]. Copyright 2019, согласно лицензии CC BY, доступ открыт.

Эксперименты по исследованию РС проводились на базе WAAM с помощью BAAM путем наплавки односторонней и двусторонней наплавки. В процессе изготовления WAAM происходит накопление тепла, которое приводит к деформации и растрескиванию. В процессе изготовления WAAM происходит накопление тепла, которое приводит к деформации и растрескиванию. В процессе изготовления WAAM происходит накопление тепла, которое приводит к деформации и растрескиванию.

В целом, понимание и контроль RS необходимы для обеспечения механического надежности, точность размеров и функциональные характеристики продукции WAAM в различных приложениях. Многие исследовательские усилия были сосредоточены на характеристике RS, разработке прогнозирующих модели и внедрение передовых технологий производства, которые имеют решающее значение для развития области WAAM и раскрытия всего его потенциала в промышленных приложениях [100]. Понимание распределения подвода тепла и его последствий, включая переходные процессы, распределение температуры, трансформация материала, накопление напряжений и деформация, имеет важное значение для применений, связанных с высокопрочными сталями. Численное моделирование может дать ценную информацию для оценки этих факторов [40]. РС и деформация существенно влияют на производительность компонентов [97]. В результате повторяющихся циклов RS оказывается ограниченным внутри компонентов, вызывая множество дефектов, таких как трещины, деформации, коробление и уменьшение срока службы компонентов [163].

5. Стратегии смягчения последствий RS в WAAM и практическое применение.

Генерация РС и искажений в частях препятствует его широкому внедрению из-за сложная история теплового наращивания, характерная для компонентов WAAM [164]. Однако, Стратегии смягчения последствий RS в различных производственных процессах в WAAM включают несколько методы сокращения или управления RS, которые могут повлиять на надежность и функциональность изготовленные компоненты. Гибридный процесс WAAM и прокатки под высоким давлением, способный Создание крупномасштабных компонентов дает мало вредных RS и искажений [165,166]. в Точно так же численные методы могут дать дополнительное понимание того, как можно

эффективно используется для уменьшения RS и создания необходимых пластических деформаций для повышения микроструктурные свойства [32]. Сочетание процесса WAAM с другим производством процессы, включая методы механической обработки или вычитания, могут помочь в удалении излишков материал. Это гибридное производство используется в промышленности медицинского оборудования для производства детали WAAM с низким напряжением и сложной геометрией или добавьте дополнительные элементы для уменьшения PC [167].

Контроль RS жизненно важен для обеспечения долговечности и надежности этих критически важных компонентов [130]. Сборник различных методов уменьшения RS и искажений в WAAM был создан, чтобы предложить план будущих достижений [168]. Конечный Моделирование элементного процесса предлагает эффективный метод изучения стратегий по смягчению этих последствий. искажения и PC [169]. Некоторые методы предусматривали обработку RS, улучшение механических свойств и устранение таких дефектов, как пористость [10,170]. Некоторые общие меры по смягчению последствий стратегии и практические применения перечислены и объяснены практическими применениями в Таблица 4.

Таблица 4. Стратегии смягчения последствий RS и практическое применение.

Методы	Материал и Стратегии	Практическое применение и результаты	Ссылки.
Межпассовая прокатка	Сплав Ti-6Al-4В	Улучшает сцепление и адгезию между последовательными слоями материал. Это также помогает перераспределять напряжения, применяя сжимающую силу. что приводит к уточнению зеренной структуры и минимизации искажений результатов RS.	[24,75,76,171]
Термическая обработка (ТО)	Сталь марки 91, Ti-6Al-4В	Постобработка HT включает контролируемые циклы нагрева и охлаждения для облегчения PC. HT широко используется в аэрокосмическом секторе для снижения уровня RS в WAAM для производства турбинных лопаток, что повышает усталостную долговечность и производительность.	[82,139,172]
Дробеструйная обработка	2319 алюминиевый сплав	Дробеструйная обработка предполагает подвергание поверхности детали бомбардировке. с небольшими, высокоскоростными частицами, чтобы вызвать сжимающие напряжения, которые противодействовать растяжению RS. Он используется в автомобильном секторе для повышения усталостная прочность элементов подвески производства WAAM.	[173,174]
Роллинг и лазер ударная обработка	Низкоуглеродистая сталь	Способы устраняют вредные растягивающие PC в верхней части стены BAAM. тем самым увеличивая усталостную долговечность и замедляя темпы роста трещин. нижняя часть стены WAAM демонстрирует улучшенные условия RS, что приводит к повышению усталостных характеристик, и все это достигается без использования поверхности прокатывающая обработка.	[175]
Роллинг	Сталь AA2319, S335JR	Увеличение нагрузок качения приводит к увеличению максимальной эквивалентной пластической деформации. а более глубокое проникновение эквивалентной пластической деформации приводит к RS.	[32]
Параметр оптимизация	Сплав Al-Cu4.3-Mg1.5	Настройка параметров процесса WAAM, таких как скорость осаждения и слой. Толщина позволяет оптимизировать условия сборки и уменьшить RS. Систематический оптимизация параметров применяется в строительной отрасли для снижения RS в крупномасштабных металлических конструкциях, напечатанных WAAM.	[36]
Выбор материала	алюминиевые сплавы	Выбор материалов с индивидуальными свойствами, например, с низким тепловым расширением. коэффициенты, могут минимизировать формирование RS во время WAAM. Специализированный материалы используются в энергетике для создания высокопроизводительных WAAM компоненты с пониженным RS.	[176,177]
Внутрипроцессный мониторинг и контроль	IN718 Суперсплав	Системы мониторинга и контроля в режиме реального времени корректируют параметры процесса во время WAAM для минимизации формирования RS. Внутрипроизводственный мониторинг и контроль используется в аэрокосмической промышленности для уменьшения изменений RS в критических компоненты двигателя.	[178]
Горячая прокатка и холодная штамповка	Сварочная проволока ЭР70С-6	Использование ребер жесткости WAAM на концах фланцев горячекатаных Показано, что двутавровые сечения приводят к созданию благоприятных растягивающих RS, которые благоприятны для структурной устойчивости, достигая максимальных значений эквивалентен пределу текучести материала.	[179]
Пининг и UIT	Титановый сплав и алюминиевый сплав	Благодаря ультразвуковой ударной обработке (UIT), очистке зерна и осуществляется рандомизация ориентации, что способствует повышению RS и механической прочности.	[180]
Роллинг	Титановые сплавы	Предлагают существенные преимущества, такие как уменьшение RS и искажений, а также как уточнение зернистой структуры.	[181]

В этом исследовании мы исследуем, как различные факторы, такие как параметры процесса, субстрат нагрев и охлаждение влияют на внешний вид шариков, образующихся во время WAAM из Inconel 625 на

материалы. Термическая обработка и дробеструйная обработка используются после завершения изготовления, тогда как мониторинг и контроль процесса — это методы снижения риска, используемые в процессе печати.

Был разработан подход для анализа формы построенной стены с упором на сталь EN 8. Кроме того, история температуры ванны расплава во время осаждения на присущей ему симметрии, чтобы обеспечить эффективное использование материала. Кроме того, он использует инфракрасный (ИК) пирометр, который можно использовать для изучения того, как эти факторы влияют на методы термографии для контроля симметрии ванны плавления [18]. Это объемная скорость охлаждения, которая, в свою очередь, влияет на геометрию валика [137,182]. Для морфологического геометрию нанесения V (м3) можно легко определить по траектории (точнее, по виду валиков, важно учитывать объем подаваемого материала и размер длина хода сварочного пути lscan (м)), скорость проволоки vw (м·с-1), диаметр детали [183]. Графики на рисунке 9 иллюстрируют распределение опубликованных работ по проволока dw (м) и скорости сварки vt (м·с-1) [26,142], как указано в уравнении (4), подходы, используемые для смягчения остаточного напряжения, и укажите частоту их применения в приложениях WAAM. На этих графиках представлены различные методы смягчения последствий (4) Процесс WAAM в сравнении с используемым количеством методов, опубликованных в статьях.

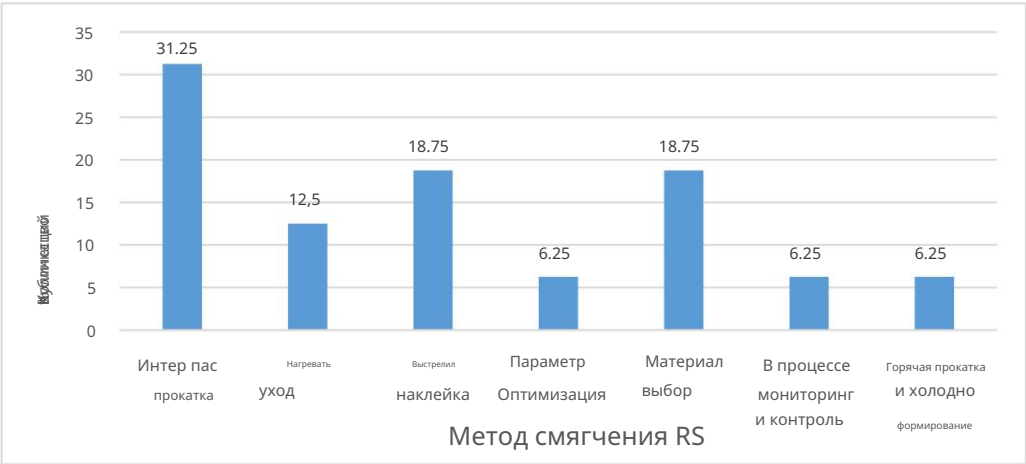


Рисунок 9. Метод смягчения последствий RS в сравнении с публикацией в процессах.

Чтобы рассмотреть различия между различными методами, необходимо рассмотреть график, на котором в качестве временных данных представлены параметры формирования и завершения производства. Для материалов, таких как прокатка, цель — использовать более высокие скорости, чтобы обеспечить для увеличения качества валика, привождения к более гладкой поверхности, а также к более высокой прочности материала. Термическая обработка и дробеструйная обработка используются для улучшения поверхности, а также для предотвращения образования дефектов. Для формирования необходимо для предотвращения образования дефектов, таких как трещины, и для обеспечения методов исследования, разработанных для формулировки формирования в процессе WAAM, как эллипсы [184,185]. Процесс WAAM позволяет создавать сложные детали путем наложения сварных швов. Крайне важно моделировать оба чтобы найти а и с в уравнении (5), необходимо определить толщину (высоту) и ширину бусинок. отдельные сварные швы и перекрытие нескольких валиков для обеспечения превосходной поверхности. подставить в уравнение параболы, чтобы найти константы а и с. Точки поворота, или качество и точность размеров изготавливаемых деталей. Все начинается с разработки моделей для одиночных сварных швов с использованием различных методов подгонки кривых [186,187].

Объемный расход выражается уравнением (8):

Прил. Мех. 2024, 5

$$= h \times$$

437
(8)

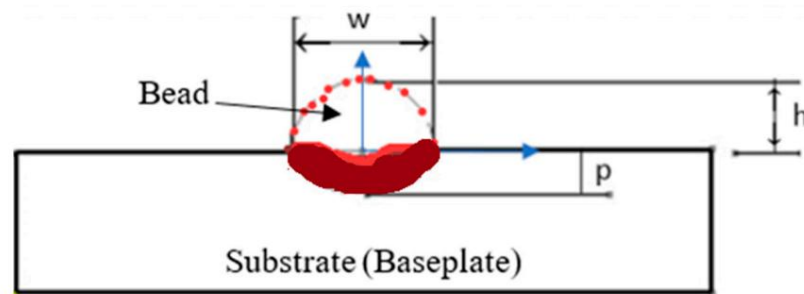


Рисунок 10. Формирование валика параболического профиля в процессе WAAM.

Геометрически это представляет собой валик, который необходим для достижения однородности обоих материалов.

высоты слоя шариков [188]. Геометрически дефектный сегмент борта или геометрический дефект, Это дефект, приводящий к образованию пустот внутри окончательной напечатанной детали из-за неполного сплавления.

между двумя перекрывающимися сегментами шариков неправильной формы [189]. Предпочтительнее писать где dw — диаметр проволоки, a — скорость проволоки. Приравнявая уравнения (8) и ту же параболу (9), ширина w валика определяется из уравнения (10). скорость.

Геометрическая конфигурация сварного валика, созданного с помощью WAAM, отличается от чем при обычных методах сварки [190,191]. Профиль валика на подложке может быть рассматривается как симметричная форма параболы, которая представлена на рисунке 10 и представлена

Из уравнения (10) замена w в уравнении (6) даст уравнение (11). в уравнении (5).

$$y = a + cx^2 \quad (5)$$

$$= h \quad (11)$$

Чтобы найти a и c в уравнении (5), необходимо определить толщину (высоту) и ширину бусинок.

подставить в уравнение параболы, чтобы найти константы a и c . Поворотные моменты для разных диаметров проволоки образующиеся шарик различаются по толщине и ширине. Для этой формы уравнения валика не существует, а значит, не существует. В параметрах сварки, поскольку результат $c < 0$, как показано на рисунке 10, а профиль валика выражается как включая угол горелки, скорость перемещения проволоки, скорость подачи присадочного материала и условия охлаждения [192]. Для параболического уравнения можно использовать уравнение (6) при определенной толщине слоя (h), ширине валика (w) и скорости горелки (v), объемный расход (Q), необходимый для полного заполнения, определяется уравнением (12). 4 часа

$$a = c; c = \frac{2h}{w^2} \quad (12)$$

Установка оптимального параметра в процессе WAAM была бы выгодна для $y = h$ — (6) постепенное наплавление наплавленных валиков послойно в АМ компонентов [193,194].

Коли и др. [128] исследовали изделия WAAM, изготовленные из проволоки SS308L диаметром 1,2 мм. Площадь валика (площадь параболического валика) относительно его геометрического параметра равна Этер, использованный для изготовления образцов. Параметры, такие как скорость сварки, ток дуги, получены из уравнения (7).

$$A = \frac{2ch}{3} \quad (7)$$

Объемный расход выражается уравнением (8):

$$Q = \frac{2}{3} \pi v w^2 \quad (8)$$

Для проволоки при течении расплавленной ванны объемный расход определяется выражением Уравнение (9).

$$Q = \frac{\pi}{4} A_{ш}^2 \cdot v_{фактическая} \quad (9)$$

где dw — диаметр проволоки, а vw — скорость проволоки. Приравнявая уравнения (8) и (9), ширина w борта определяется по уравнению (10).

$$w = \frac{3\pi d^2 v_{фактическая}}{8 \pi v t} \quad (10)$$

Из уравнения (10) замена w в уравнении (6) даст уравнение (11).

$$Q = \frac{16hvtx}{3\pi w d^2} \quad (11)$$

Для разных диаметров проволоки образующиеся шарики различаются по толщине и ширине. Однако на форму наплавленного валика сильно влияют многие параметры сварки, включая угол горелки, скорость движения проволоки, скорость подачи присадочного материала и условия охлаждения [192]. Для конкретной толщины слоя (h), ширины валика (w) и скорости горелки (vt) объемный расход (Q), необходимый для полного заполнения, определяется уравнением (12).

$$Q = vtwh \quad (12)$$

Установка оптимального параметра в процессе WAAM была бы выгодна для постепенного нанесения наплавленных валиков слой за слоем в АМ компонентах [193,194].

Коли и др. В работе [128] исследованы изделия WAAM из проволоки SS308L диаметром 1,2 мм, использованной для изготовления образцов. Такие параметры, как скорость сварки, ток дуги и скорость потока защитного газа, оказали наибольшее влияние на многочисленные реакции продуктов WAAM.

Практическое применение компонентов, напечатанных с помощью процессов WAAM, в основном применимо в автомобильной [155], аэрокосмической [195], военно-морской и оборонной [196,197] промышленности, где используются такие материалы, как алюминий, из-за их высокого качества и прочности при меньшей массе. . Как правило, WAAM широко востребован в таких отраслях, как автомобильная, аэрокосмическая, химическая, морская, атомная, судостроение и энергетика, где он используется для изготовления таких компонентов, как детали самолетов, автомобильные шасси и морские гребные винты [8,65, 88,148,151,198–204]. В процессе WAAM в этих отраслях широко использовались такие серии алюминиевых сплавов, как 2xxx (Al-Cu), 4xxx (Al-Si) и 5xxx (Al-Mg). Компоненты аэрокосмической отрасли, производимые в процессе WAAM, такие как лопатки турбин, аэродинамические профили и элементы конструкции, необходимо тщательно контролировать в RS, чтобы предотвратить преждевременный выход из строя и поддерживать высокие стандарты производительности [86,129,207,208]. WAAM также используется для производства деталей двигателя, таких как головки цилиндров и поршни [129].

6. Обсуждение

Помимо упомянутого ранее измерения RS, в компонентах WAAMed потенциально могут возникнуть определенные дефекты, связанные со сваркой. Эти измерения включают в себя множество факторов, влияющих на величины RS WAAM, которые описаны в Таблице 1 с несколькими ссылками. Включения в основном состоят из трех классификаций методов измерения ДЗ, которые обсуждаются в разделе 3.4. Из этих трех наиболее применимы неразрушающие методы измерения. Однако в больших образцах деформацию некоторых компонентов может быть трудно определить или невозможно точно идентифицировать из-за изменений разнородных RS в глубине проникновения луча света через компоненты [209]. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования для тщательного изучения RS, присутствующего в продуктах WAAM, обусловленного различными параметрами процесса. Процессы термообработки после изготовления могут существенно повлиять на устранение дефектов. Хотя многие дефекты в продуктах WAAMed можно было устранить, RS удалось минимизировать только в максимально возможной степени за счет термической обработки [137] и других процессов, упомянутых в Таблице 4.

Качество металлических компонентов, изготовленных в WAAM, серьезно зависит от ключевых параметров, таких как скорость перемещения, тепловложение, скорость подачи проволоки, направление наплавки, свойства материала и т. д., которые указаны в Таблице 1. Хотя высокое тепловложение является необходимым для достижения высокой скорости осаждения в WAAM, оно также создает такие проблемы, как RS и искажения. Поэтому управление тепловложением становится решающим, особенно при изготовлении крупных металлических компонентов с использованием WAAM, поскольку оно напрямую влияет как на скорость осаждения, так и на структурную целостность [1,47].

6.1. Проблемы и ограничения

Как и любая производственная технология, WAAM имеет свой набор проблем и ограничений при измерении и контроле RS. Его можно использовать для изготовления сложной геометрии, что затрудняет точное прогнозирование и измерение RS, особенно в сложных структурах. Продукты WAAM часто имеют неоднородную микроструктуру и свойства материала из-за быстрого затвердевания и термических циклов, возникающих во время осаждения. Такие вариации, как состав материала, зерновая структура и фазовые превращения, могут влиять на величину и распределение RS, усложняя измерения и интерпретацию. Измерение RS в продуктах WAAM сопряжено с рядом проблем из-за уникальных характеристик процесса производства и получаемых свойств материала. Например, такие методы неразрушающего контроля, как ультразвуковой контроль или рентгеновская дифракция, перспективны для измерения RS в продуктах WAAM; адаптация этих методов к уникальным характеристикам материалов и геометрии аддитивного производства представляет собой техническую проблему. Общей проблемой во время испытаний является определение глубины проникновения луча света через печатную продукцию. WAAM предполагает последовательное осаждение слоев материала, что может привести к анизотропному распределению RS.

Точное измерение и описание этих сложных структур напряжений требует передовых методов, способных анализировать изменения напряжений в разных направлениях и на глубине внутри материала [210].

Свойства и поведение различных материалов могут существенно различаться по-разному, что затрудняет разработку универсального подхода к измерению и контролю RS. Управление RS является важнейшим аспектом WAAM для обеспечения качества и производительности производимых компонентов. В WAAM существовало ограниченное количество отраслевых стандартов измерения и контроля RS. Отсутствие стандартизированных процедур может препятствовать внедрению этой технологии в критически важных приложениях. Многие исследования не могут дать конкретную величину RS. Скорее, они указывают числовые результаты и показывают характер всех операций по изготовлению WAAM путем

Количественная оценка этого РС задается не для всех параметров процесса и сварки. Например, не задаются из входных параметров такие как диаметр проволоки, направления художественной сварки, длина, ширина, толщина и объем изделий, а происходит сравнение печатных компонентов. Точно так же он не определяется параметрами, связанными со сваркой, такими как скорость сварки, сварочный газ, расход газа, напряжение, пиковые токи и защитный газ [1,4]. Методы, использованные в прошлых исследованиях для измерения RS в продуктах WAAMed, уже перечислены в таблице 2.

В другом случае на распределение и количество РВ в продуктах WAAM влияют защитный газ, виды защитного газа и расход защитного газа. Аналогичным образом, типы защитных газов с их скоростью потока, такие как аргон и гелий, и химически активные газы, такие как углекислый газ и кислород, могут оказывать существенное влияние на образование RS в продуктах WAAM [3,138,149]. Однако исследователи не определили оптимальное количество защитного газа и типы защитного газа с другими процессами и входными параметрами в процессе WAAM. Кроме того, несколькими причинами, по которым RS используется в WAAM, являются быстрый нагрев и охлаждение, многослойное осаждение, параметры процесса, фазовые превращения материала и геометрия детали.

Обзор литературы в целом показывает, что постоянные исследования и улучшения в этих областях необходимы для улучшения понимания и контроля RS в приложениях продуктов WAAM.

6.2. Будущие направления

Проблемы и ограничения контроля RS в продуктах WAAM обсуждаются в разделе 6.1. На основе измерений, мер по смягчению последствий и ограничений, обнаруженных в прошлых исследованиях, которые можно упомянуть и порекомендовать, дополнительные исследования в будущих исследованиях могут быть сосредоточены на оптимизации параметров процесса WAAM. Выясняя сложную взаимосвязь между параметрами процесса в WAAM и RS, этот обзор способствует и ведет к оптимизации процесса параметров с использованием методов измерения RS и

обеспечение надежности продукции [69]. Аналогично, некоторые методы измерения RS, которые не применялись в продуктах WAAM в прошлых исследованиях, включают:

(1) Неразрушающие методы	Ультразвуковые волны Магнитный Баркгаузен
(2) Полуразрушающие методы	Кольцевое ядро Метод глубоких отверстий Кривизна моста
(3) Деструктивные методы	Методы секционирования Соответствие требованиям по разрезанию или трещинам

С другой стороны, диаметр присадочной проволоки напрямую влияет на скорость наплавки и выделение тепла в WAAM. Проволока большего диаметра обычно приводит к более высокой скорости наплавки, но также приводит к увеличению тепловложения на единицу длины. Это повышенное тепловложение может влиять на градиенты охлаждения и градиенты тепловложения внутри осажденного материала, влияя на распространение и протяженность RS. Влияние диаметра проволоки на осаждение ванны расплава при формировании шариков описано в разделе 6 с использованием формул, представляющих взаимосвязь между высотой и шириной на протяжении всего процесса WAAM. Из-за существенного влияния размера проволоки оптимальный размер диаметров проволоки на РС в изделиях WAAM в предыдущих исследованиях не был выявлен. Также среди категорий измерения RS не изучены соответствующие методы и ограничения геометрии формованно

Поскольку прошлые исследования не включают в существующую литературу материальную зависимость, модификации методологии, область применения и связанные с ними исследовательские вопросы WAAM, для будущих исследований есть широкие возможности для изучения различных возможностей, в том числе: 1. Большинство исследователей часто использовали не -деструктивные методы, такие как XRD, ND и некоторые другие полуразрушающие и полностью деструктивные методы измерения RS в компонентах WAAM. Таким образом, будущие исследования могут выполнять перечисленные вы

2. В будущем исследователи должны определить наиболее подходящее количество и сорта защитного газа, а также другие параметры процесса и входные параметры во всех процессах WAAM.

3. Как поясняется в разделе 5, математическая формула обеспечивает конкретное формирование профиля борта и взаимосвязь диаметра проволоки с шириной и толщиной (высотой) бортов. В результате диаметр проволоки, толщина и ширина бусин могут различаться. Следовательно, распределение тепла процесса приводит к изменению РС в частях WAAM. Таким образом, будущие исследования могут быть сосредоточены на различных диаметрах проволоки, чтобы уменьшить RS в деталях WAAM с меньшим диаметром проволоки.

4. Свариваемость материалов зависит от их физических свойств, влияющих на накопление РВ в изделиях WAAM. В будущем дальнейшие исследовательские усилия должны быть направлены на изучение этих физических свойств материалов, перечисленных в Таблице 3, а также других регулируемых роботом эффектов на компоненты, изготовленные с помощью RS, через WAAM.

7. Выводы

В заключение, этот обзор литературы глубоко углубился в обширные исследования, связанные с исследованием и измерением RS в продуктах WAAM, с особым упором на влияние параметров изготовления. Значение RS в определении характеристик материала и структурной целостности компонентов WAAM подчеркивалось на протяжении всей обзорной работы. Более того, исследование предоставило всеобъемлющее резюме основных выводов, методов измерения, проблем и будущих направлений в динамической области WAAM.

В обзоре подчеркивается решающая роль RS в формировании постоянства размеров продуктов WAAM, подчеркивая необходимость точных измерений и контроля для эффективного использования. Обзорная работа, синтезирующая различные исследования, методы и методологии, позволила получить ценное представление о современном состоянии исследований в этой области. Кроме того, этот обзор служит руководством для будущих исследователей по использованию других методов измерения RS, тех, которые еще не применялись, и сравнению предыдущих методов, использованных в литературе. В частности, обзор показал, что никаких существенных

Сообщалось о работе по влиянию RS в деталях, изготовленных с использованием WAAM, на усталостную прочность и сопротивление ползучести, которые мы хотели бы рассмотреть в наших продолжающихся работах в этой области. Для измерения продуктов RS WAAMed используются экспериментальные методы, в том числе полуразрушающие (только сверление отверстий), разрушающие (контурный метод) и неразрушающие методы (такие как нейтронная кристаллография и дифракция рентгеновских лучей, корреляция цифровых изображений и синхротронное рентгеновское излучение). дифракция).

В целом, этот обзор включает изучение и измерение методов ДЗ в продуктах WAAM на основе входных параметров и других влияний продуктов ДЗ. Благодаря тщательной оценке и координации существующей литературы, этот обзор подчеркивает важность понимания факторов, влияющих и смягчающих методы RS в продуктах WAAM.

Вклад авторов: Роли авторов в этом исследовании изложены следующим образом: ФДГ придумал название и внес свой вклад в концептуализацию, методологию, исследование и подготовку оригинального проекта. HGL внесла свой вклад в концептуализацию и предоставила ресурсы, контроль, администрирование проекта, редактирование, рецензирование рукописи и обеспечение финансирования. YWA участвовала в редактировании и рецензировании рукописи. MDH также участвовал в организации и анализе данных рукописи. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной

Финансирование: Данное исследование получило поддержку инициативы INDMET в рамках гранта № 62862, который финансировался в рамках программы NORHED II.

Заявление о доступности данных: оригинальные материалы, представленные в исследовании, включены в статью, дальнейшие запросы можно направлять соответствующим авторам.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Кумар, М.Б.; Сатья, П.; Сентил, С.М. Критический обзор аддитивного производства проволоочной дугой сплавов на основе никеля: принципы, параметры процесса, микроструктура, механические свойства, эффекты термообработки и дефекты. Ж. Браз. Соц. Мех. наук. англ. 2023, 45, 1–27.
2. Тангестани, Р.; Фаррахи, ГН; Шишегар, М.; Агчехканди, БП; Гангули, С.; Мехманпараст, А. Влияние вертикальной и зажимной прокатки на распределение остаточных напряжений в компонентах, изготовленных аддитивным способом из проволоки и дуги. Дж. Матер. англ. Выполнять. 2020, 29, 2073–2084. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
3. Дерекар, К.С. Аспекты аддитивного производства проволоочной дуги (WAAM) алюминиевого сплава 5183. Доктор философии. Диссертация, Университет Ковентри, Ковентри, Великобритания, 2020 г.; стр. 1–227.
4. Родригес, Т.А.; Дуарте, В.; Миранда, РМ; Сантос, Т.Г.; Оливейра, Дж. П. Текущее состояние и перспективы аддитивного производства проволоки и дуги (WAAM). Материалы 2019, 12, 1121. [\[CrossRef\]](#)
5. Лаги, В.; Палермо, М.; Гаспарини, Дж.; Велькович, М.; Тромбетти, Т. Оценка расчетных механических параметров и частичных коэффициентов безопасности для нержавеющей стали, изготовленной с применением проволоочно-дуговой добавки. англ. Структура. 2020, 225, 111314. [\[CrossRef\]](#)
6. Каннингем, ЧР; Флинн, Дж. М.; Шокрани, А.; Дхокия, В.; Ньюман, С.Т. Приглашенная обзорная статья: Стратегии и процессы для высоких Аддитивное производство качественной проволоочной дуги. Доп. Производитель 2018, 22, 672–686. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
7. Клобкар, Д.; Балаш, С.; Башиц, М.; Джурич, А.; Линдич, М.; Щетинец, А. ВААМ и другие нетрадиционные технологии производства металлических добавок. Адв. Технол. Матер. 2020, 45, 1–9. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
8. Мэтьюз, Р.; Карандикар, Дж.; Тайлер, К.; Смит, С. Накопление остаточного напряжения в крупномасштабном аддитивном производстве проволоки Ti-6Al-4V. Тьюринг. Procedia CIRP 2024, 121, 180–185. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
9. Ву, Б.; Пан, З.; ван Дуин, С.; Ли, Х. Термическое поведение при аддитивном производстве проволоочной дуги: характеристики, эффекты и контроль. В «Сделках по интеллектуальному сварочному производству»; Спрингер: Сингапур, 2019 г.; стр. 3–18.
10. Уильямс, Юго-Запад; Мартина, Ф.; Аддисон, АС; Дин, Дж.; Пардал, Г.; Коулгроув, П. Аддитивное производство проволоки и дуги. Матер. наук. Технол. 2016, 32, 641–647. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
11. Хименес, Х.; Донг, В.; Пол, С.; Клечка, Массачусетс; То, Моделирование остаточных напряжений переменного тока с фазовым преобразованием для добавки к проволоочной дуге Производство стали Б91. ЖОМ 2020, 72, 4178–4186. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
12. Джин, В.; Чжан, К.; Джин, С.; Тиан, Ю.; Веллманн, Д.; Лю, В. Аддитивное производство нержавеющей стали с проволоочной дугой: обзор. Прил. наук. 2020, 10, 1563. [\[CrossRef\]](#)
13. Хуанг, В.; Ван, К.; Мужчина; Китано, Х. Характеристики распределения остаточных напряжений в типичных компонентах стен и труб. построен методом аддитивного производства проволоочной дугой. Дж. Мануф. Процесс. 2022, 82, 434–447. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
14. Мохан Кумар, С.; Раджеш Каннан, А.; Правин Кумар, Н.; Прамод, Р.; Шива Шанмугам, Н.; Вишну, А.С.; Чаннабасаванна, SG Микроструктурные особенности и механическая целостность функционально градиентного материала из нержавеющей стали SS321/Inconel 625, изготовленного с добавкой проволоочной дуги . Дж. Матер. англ. Выполнять. 2021, 30, 5692–5703. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

15. Кумар В.; Сингх, А.; Бишвакарма, Х.; Мандал, А. Моделирование процесса аддитивного производства металлической проволокой (Waam) Использование программного обеспечения Simufact Welding. Дж. Мануф. англ. 2023, 18, 080–085. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
16. Кнезовиц, Н.; Топик, А. Аддитивное производство проволоки и дуги (WAAM) — новое достижение в производстве. В контекстах лекций по сетям и системам; Springer International Publishing: Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, 2019 г.; Том 42, стр. 65–71.
17. Костелло, SCA; Каннингем, ЧР; Сюй, Ф.; Шокрани, А.; Дхокия, В.; Ньюман, С.Т. Современное направление направленного напыления энергии проволоочной дугой (WA-DED) как процесс аддитивного производства для производства крупных металлических компонентов. Межд. Дж. Компьютер. Интегр. Производитель 2023, 36, 469–510. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
18. Барат Кумар, доктор медицины; Маникандан, М. Оценка процесса, параметров, смягчение остаточного напряжения, последующая обработка и анализ методом конечных элементов. Моделирование технологии аддитивного производства проволокой. Международная организация металлов и материалов. Корейский инст. Встретил. Матер. 2022, 28, 54–111. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
19. Паскуаль А.; Альварес, П.; Суарес, А. Исследование процессов дуговой сварки для аддитивного производства с высокой скоростью наплавки. Процессы ЦИРП 2018, 68, 358–362.
20. Шукла, П.; Даш, Б.; Киран, Д.В.; Буккапатнам, С. Поведение дуги в процессе аддитивного производства проволоочной дуги. Производитель Procedia. 2020, 48, 725–729. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
21. Чжао, XF; Виммер, А.; Зээ, М.Ф. Экспериментальное и имитационное исследование последовательностей сварки при термическом воздействии искажения при аддитивном производстве проволоочной дуги. Rapid Prototype J. 2023, 29, 53–63. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
22. Камбон, К.; Бендауд, И.; Рукетт, С.; Сули, Ф. Тест WAAM: от параметров процесса до термического воздействия на сварной шов форма ванны, микроструктура и остаточные напряжения. Матер. Сегодня Коммун. 2022, 33, 104235. [\[CrossRef\]](#)
23. Хённиге, Дж.; Сюй, СЕ; Гангули, С.; Сюй, Х.; Кабеса, С.; Кулз, Х.; Уильямс, С. Исследование остаточных напряжений и микроструктурной эволюции в наплавленной и межпроходной катаной проволоке, а также сплаве Inconel 718, изготовленном аддитивной дугой, после обработки старением. Матер. наук. англ. А 2020, 801, 140368. [\[CrossRef\]](#)
24. Хённиге, младший; Коулгроув, Пенсильвания; Гангули, С.; Эймер, Э.; Кабра, С.; Уильямс, С. Контроль остаточного напряжения и искажений в Алюминиевая проволока + дуговое аддитивное производство с прокаткой. Добавить производителя. 2018, 22, 775–783. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
25. Шрёпфер, KWD; Вильденхайн, РС; Канненгисер, АНТ; Хенсель, АКJ Влияние процесса WAAM и аспекты проектирования об остаточных напряжениях в высокопрочных конструкционных сталях. Weld World 2023, 67, 987–996.
26. Гэн, Р.; Ду, Дж.; Вэй, З.; Сюй, С.; Ма, Н. Моделирование и экспериментальное наблюдение геометрии напыления и эволюции микроструктуры алюминиевого сплава, изготовленного проволоочно-дуговым аддитивным производством. Дж. Мануф. Процесс. 2021, 64, 369–378. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
27. Кляйн, Т.; Сперк-Эрдели, П.; Шнайдер-Броскамп, К.; Оливейра, Япония; Фариа, Г.А. Остаточные напряжения в проволоке и энергонасыщенном под действием дуги сплаве Al-6Cu-Mn (ER2319), определенные методом энергодисперсионной дифракции рентгеновских лучей высоких энергий. Встретил. Матер. Пер. А 2024, 55, 736–744. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
28. Ермакова А.; Мехманпараст, А.; Гангули, С.; Разава, Н.; Берто, Ф. Исследование механических свойств проволоки и ее разрушения при разрушении. и компоненты из низкоуглеродистой стали, изготовленные методом дуговой аддитивной обработки. Теор. Прил. Фракт. Мех. 2020, 109, 102685. [\[CrossRef\]](#)
29. Дерекар, К.С. Обзор аддитивного производства проволоочной дуги и достижений в аддитивном производстве алюминия. Матер. наук. Технол. 2018, 34, 895–916. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
30. Тасдемир, А.; Нохут, С. Обзор аддитивного производства проволоочной дуги (WAAM) в судостроительной промышленности. Морская конструкция судов. 2020, 16, 1–18. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
31. Мюллер Дж.; Грабовский, М.; Мюллер, К.; Хенсель, Дж.; Унглауб, Дж.; Тиле, К.; Клофт, Х.; Дилгер, К. Проектирование и идентификация параметров стальных стержней, изготовленных методом аддитивного производства из проволоки и дуги (WAAM), для использования в строительстве. Металлы 2019, 9, 725. [\[CrossRef\]](#)
32. Аббасзаде, М.; Хённиге-младший; Мартина, Ф.; Нето, Л.; Кашаев Н.; Коулгроув, П.; Уильямс, С.; Ключеманн, Б. Численное исследование влияния прокатки на локализованное напряжение и индукцию деформации для конструкций, изготовленных с применением добавок проволоки и дуги. Дж. Матер. англ. Выполнять. 2019, 28, 4931–4942. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
33. Песня, СС; Чен, Дж.; Цюань, Г.; Йе, Дж.; Чжао, Ю. Численный анализ и проектирование армированной проволоки, изготовленной аддитивным способом. стальная труба под осевым сжатием. англ. Структура. 2024, 301, 117294. [\[CrossRef\]](#)
34. Ву, К.; Мукерджи, Т.; ДЭА.; ДебРой, Т. Остаточные напряжения в аддитивном производстве с проволоочной дугой — Иерархия влиятельных переменных. Доп. Производитель 2020, 35, 101355. [\[CrossRef\]](#)
35. Дин, Д.; Пан, З.; Куюри, Д.; Ли, Х. Аддитивное производство металлических компонентов с подачей проволоки: технологии, разработки и будущие интересы. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2015, 81, 465–481. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
36. Джафари, Д.; Ванекер, ТНJ; Гибсон, И. Аддитивное производство проволоки и дуги: возможности и проблемы контроля качества и точность изготовленных деталей. Матер. Дес. 2021, 202, 109471. [\[CrossRef\]](#)
37. Ву, Б.; Пан, З.; Чен, Г.; Дин, Д.; Юань, Л.; Куюри, Д.; Ли, Х. Уменьшение тепловых искажений в проволоочной дуге, изготовленной аддитивным способом. Деталь Ti6Al4V с использованием активного межпроходного охлаждения. наук. Технол. Сварка. Присоединиться. 2019, 24, 484–494. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
38. Розайми, М.; Юсоф, Ф. Проблемы исследований, контроль качества и стратегия мониторинга в аддитивном производстве проволоочной дуги. Дж. Матер. Рез. Технол. 2023, 24, 2769–2794.
39. Ахмад, Б.; Чжан, Х.; Го, Х.; Фицпатрик, Мэн; Нето, LMSC; Уильямс, С. Влияние стратегий осаждения на остаток Напряжение в проволоке + дуговая добавка, изготовленная из титана Ti-6Al-4V. Металлы 2022, 12, 253. [\[CrossRef\]](#)
40. Шённеггер, С.; Мошингер, М.; Энцингер, Н. Компьютерное моделирование сварки при аддитивном производстве плазменной проволокой. Процесс обработки высокопрочной стали. Евро. Дж. Матер. 2024, 4, 2297051. [\[CrossRef\]](#)
41. Квале, П.; Ньюастад, ЕВ; Брэйн, Т.; Рен, Х. Метод быстрого моделирования терморегулирования в аддитивном производстве проволоочной дуги. ремонт тонкостенной конструкции. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2024, 132, 1573–1583. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

42. Ван, К.; Судер, В.; Дин, Дж.; Уильямс, С. Влияние размера проволоки на производство проволоки с высокой скоростью наплавки и добавок для плазменной дуги из Ti-6Al-4V. Варенье. акад. Дерматол. 2021, 288, 116842. [\[CrossRef\]](#)
43. Гупта, А.К.; Бансал, Х.; Мадан, А. Исследование процесса аддитивного производства проволоочной дуги с ЧПУ для повышения скорости наплавки и механической прочности. Адв. Робот. Автомат. 2022, 10, 9695.
44. Ананда, П.А. Приложение WAAM для компании EPC. Веб-конференция MATEC. 2019, 269, 05002. [\[CrossRef\]](#)
45. Ли, Ю.; Донг, З.; Мяо, Дж.; Лю, Х.; Бабкин А.; Чанг, Ю. Повышение точности штамповки при аддитивном производстве проволокой (BAAM): Обзор. Быстрый прототип. Дж. 2022, 29, 673–686. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
46. Чаурасия, М.; Синха, М.К. Исследования параметров процесса аддитивного производства проволоочной дуги (WAAM): обзор; Конспекты лекций по машиностроению; Springer Nature: Сингапур, 2021 г.; стр. 845–853.
47. Гаутаман, П.С.; Джеякумар, С.; Саратчандра, Д. Влияние подвода тепла на микроструктуру и механические свойства 316L Нержавеющая сталь, изготовленная методом аддитивного производства проволоочной дугой. Дж. Матер. англ. Выполнять. 2024, 33, 5536–5546. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
48. Томар, Б.; Шива, С.; Нат, Т. Обзор аддитивного производства проволоочной дуги: параметры обработки, дефекты, улучшение качества и последние достижения. Матер. Сегодня Коммун. 2022, 31, 103739. [\[CrossRef\]](#)
49. Воробаев А.; Корсмик Р.; Цибульский И. Особенности плавления и переноса присадочной проволоки в электродуговом аддитивном производстве Металлические заготовки. Материалы 2021, 14, 5077. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
50. Чен, К.; Он, Х.; Чжоу, С.; Лиан, Г.; Хуанг, Х.; Фэн, М. Прогнозирование многогранного профиля роботизированной проволоки и компонентов, изготовленных аддитивными дугами, рекурсивно с использованием анализа осесимметричной формы капли. Виртуальная физика. Прототип. 2023, 18, 1–24. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
51. Айд, А.; Валенсия, А.; Брас, Г.; Бернард, Х.; Мишо, П.; Балкан, Ю.; Алексис, Дж. Влияние параметров процесса WAAM на металлургические и механические свойства отложений Ti-6Al-4V. В книге «Достижения в области материалов, механики и производства: материалы Второй международной конференции по передовым материалам, механике и производству (АЗМ'2018), Хаммамет, Тунис, 17–19 декабря 2018 г.; Конспекты лекций по машиностроению; Springer International Publishing: Берлин/Гейдельберг, Германия, 2020 г.; стр. 26–35.
52. Май, Д.С.; Доан, ТК; Париж, Н. Engineering Science and Technology. Международный журнал. Аддитивное производство проволоки и дуги для компонентов из нержавеющей стали 308L: оптимизация параметров обработки и свойств материала. англ. наук. Технол. Межд. Дж. 2021, 24, 1015–1026.
53. Лин З.; Гулас, К.; Да, В.; Херманс, М.Дж. Получены микроструктура и механические свойства среднеуглеродистых отложений стали посредством аддитивного производства проволоки и дуги с использованием металлопорошковой проволоки. Металлы 2019, 9, 673. [\[CrossRef\]](#)
54. Песня, Г.Х.; Ли, СМ; Ким, Д.Х. Исследование планирования траектории для уменьшения ошибок по высоте пересекающихся частей в аддитивном производстве проволоочной дуги. Материалы 2021, 14, 6477. [\[CrossRef\]](#)
55. Чжоу, З.; Шен, Х.; Лю, Б.; Ду, В.; Джин, Дж.; Лин, Дж. Прогнозирование остаточных термических напряжений для непрерывных траекторий инструмента при добавлении проволоочной дуги Производство: трехуровневый метод, основанный на данных. Виртуальная физика. Прототип. 2022, 17, 105–124. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
56. Го, К.; Ли, Г.; Ли, С.; Ху, Х.; Лю, Х.; Ли, Х.; Сюй, З.; Чен, Ю.; Ли, К.; Лу, Дж.; и другие. Аддитивное производство суперсплавов на основе Ni: остаточные напряжения, механизмы образования трещин и стратегии ингибирования трещин. Нано Матер. наук. 2023, 5, 53–77. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
57. Скотти, FM; Тейшейра, Франция; да Силва, Л; де Араужо, DB; Рейс, Р.П.; Скотти, А. Управление температурным режимом в WAAM посредством CMT Усовершенствованный процесс и технология активного охлаждения. Дж. Мануф. Процесс. 2020, 57, 23–35. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
58. Ахсан, МРУ; Танвир, АНМ; Росс, Т.; Эльсави, А.; О, М.С.; Ким, Д.Б. Изготовление биметаллической аддитивной конструкции (БАМС) из низкоуглеродистой стали и аустенитной нержавеющей стали 316L с применением проволоочно-дуговой аддитивной технологии. Быстрый прототип Дж. 2020, 26, 519–530. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
59. Ву, К.; Ма, З.; Чен, Г.; Лю, К.; Безумный; Ма, С. Получение мелкой микроструктуры и неподдерживаемых выступов путем аддитивного производства с импульсной дугой с низким тепловложением. Дж. Мануф. Процесс. 2017, 27, 198–206. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
60. Думенк, Г.; Кутюрье, Л.; Курант, Б.; Пайяр, П.; Бенуа, А.; Гаутрон, Э.; Жиро, Б.; Пирлинг, Т.; Кабеса, С.; Глоаген, Д. Исследование микроструктуры, твердости и остаточных напряжений проволоки и дуги с добавкой изготовленного алюминиевого сплава 6061, для ссылки на эту версию: HAL Id: Hal-03827007. Материалы 2022, 25, 101520. [\[CrossRef\]](#)
61. Трегер, Ж.-А.; Хартманн, С.; Треутлер, К.; Почка, А.; Веслинг, В. Оптимизация параметров процесса на основе моделирования для аддитивного производства проволокой. Прог. Доп. Производитель 2024. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
62. Нагаллапати, В.; Харе, ВК; Шарма, А.; Симхамхатла, С. Активное и пассивное управление температурой в добавке для дуговой сварки проволоки Производство. Металлы 2023, 13, 682. [\[CrossRef\]](#)
63. Ахсан, М.; Со, Г.-Дж.; Фан, Х.; Лив, ПК; Мотаман, С.; Хаазе, К.; Ким, Д.Б. Влияние технологических параметров на форму валика, микроструктуру и механические свойства при аддитивном производстве проволокой и дугой высокоэнтропийного сплава Al0.1CoCrFeNi. Дж. Мануф. Процесс. 2021, 68, 1314–1327. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
64. Он, Т.; Ю, С.; Ши, Ю.; Хуанг, А. Формирование и механические свойства аддитивного производства проволоочной дуги для кронштейна морского гребного винта. Дж. Мануф. Процесс. 2020, 52, 96–105. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
65. Су, К.; Чен, Х.; Гао, К.; Ван, Ю. Влияние подвода тепла на микроструктуру и механические свойства сплавов Al-Mg, изготовленных WAAM. Прил. Серфинг. наук. 2019, 486, 431–440. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
66. Шарф-Вильденхайн, Р.; Хельсиг, А.; Хенсель, Дж.; Вандтке, К.; Шрёпфер, Д.; Кромм, А.; Канненгиссер, Т. Влияние контроля температуры на свойства и остаточные напряжения деталей из высокопрочной стали, сваренных аддитивной сваркой. Металлы 2022, 12, 951. [\[CrossRef\]](#)
67. Джавади, Ю.; Смит, М.; Венката, Калифорния; Навид, Н.; Форси, А.; Фрэнсис, Дж.; Эйнсворт, Р.; Трумэн, К.; Смит, Д.; Хоссейнзаде, Ф.; и другие. Круговое измерение остаточных напряжений в электронно-лучевом сварном соединении аустенитной нержавеющей стали 316L(N) и ферритной стали P91. Межд. Дж. Пресс. Судно. Пип. 2017, 154, 41–57.

68. Салех, Б.; Фатхи, Р.; Тиан, Ю.; Радика, Н.; Цзян, Дж.; Ма, А. Основы и достижения аддитивного производства проволоочной дуги: материалы, параметры процесса, потенциальные применения и будущие тенденции. В архивах гражданского и машиностроения; Спрингер: Лондон, Великобритания, 2023 г.; Том 23, стр. 1–71.
69. Росли, Н.А.; Алькахари, г-н; бин Абдолла, МФ; Майдин, С.; Рамли, Франция; Хераван, С.Г. Обзор влияния тепловложения на проволоочную дугу процесс аддитивного производства. Дж. Матер. Рез. Технол. 2021, 11, 2127–2145. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
70. Ли, Дж. З.; Алькахари, г-н; Росли, НАБ; Хасан, Р.; Судин, Миннесота; Рамли, Ф.Р. Обзор аддитивного производства проволоочной дуги для 3D-печати металлами Обзор аддитивного производства проволоочной дуги для 3D-печати металлами. Межд. Дж. Автомат. Технол. 2019, 13, 346–353.
71. Ву, В.; Ким, Д.-К.; Кингстон, Э.; Лузин В.; Сальвемини, Ф.; Хилл, М.Р. Влияние промежуточных слоев и стратегий сканирования на распределение остаточных напряжений по толщине в структуре ферритно-аустенитной стали, изготовленной аддитивным способом. Матер. наук. англ. А 2019, 744, 618–629.
72. Гэн, Х.; Ли, Дж.; Гао, Дж.; Лин, Х. Теоретическая модель остаточного напряжения и коробления при аддитивном производстве проволоки и дуги. Усиленные панели. Металлы 2020, 10, 666. [\[CrossRef\]](#)
73. Рукетт, С.; Камбон, К.; Бендауд, И.; Сулье, Ф. Остаточные напряжения в образцах из нержавеющей стали 316L после напыления расплавленной присадочной проволоки. В материалах ICERS 11 — 11-й Международной конференции по остаточным напряжениям, Нанси, Франция, 27–30 марта 2022 г.
74. Кумаран, М.; Сентилкумар, В.; Панике, С.; Шишир Р. Исследование остаточных напряжений при аддитивном производстве ремонтных работ с помощью процесса направленного воздействия энергии на горячекатаную стальную подложку SS316L. Матер. Сегодня Проц. 2021, 47, 4475–4478. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
75. Мишурова Т.; Сюдов, Б.; Тиде, Т.; Сизова И.; Ульбрихт, А.; Бамбах, М.; Бруно, Дж. Остаточное напряжение и микроструктура Демонстрационный гибридный образец аддитивного производства проволоочной дуги Ti-6Al-4V. Металлы 2020, 10, 701. [\[CrossRef\]](#)
76. Мартина, Ф.; Рой, М]; Сзост, бакалавр искусств; Терзи, С.; Коулгроув, Пенсильвания; Уильямс, Юго-Запад; Уизерс, Пиджей; Мейер, Дж.; Хофманн, М. Остаточные напряжения наплавленной и катаной проволоки + дуговое аддитивное производство компонентов Ti-6Al-4V. Матер. наук. Технол. 2016, 32, 1439–1448. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
77. Лю, К.; Лин, К.; Ван, Дж.; Ван, Дж.; Ян, Л.; Луо, Ю.; Ян, М. Распределение остаточных напряжений в толстых образцах, выкопанных из Большая круглая проволока плюс макет аддитивного производства дуги. Дж. Мануф. Процесс. 2020, 56, 474–481.
78. Ян, Ю.; Джин, Х.; Лю, К.; Сяо, М.; Лу, Дж.; Фан, Х.; Ма, С. Остаточное напряжение, механические свойства и морфология зерен сплава Ti-6Al-4V, полученного с помощью ультразвуковой ударной обработки и дугового аддитивного производства. Металлы 2018, 8, 934. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
79. Боруа, Д.; Девагтер, Н.; Ахмад, Б.; Нуньес, Р.; Так, Дж.; Чжан, Х.; Го, Х.; Верлинде, В.; Де Ваэле, В. Корреляция цифровых изображений для измерения остаточных напряжений по всему полю в компонентах, изготовленных с использованием проволок и дуговых присадок. Материалы 2023, 16, 1702. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
80. Рани, КУ; Кумар, Р.; Махапатра, ММ; Мулик, РС; Сверчинска, А.; Фидрич, Д.; Панди, К. Мягкая сталь, изготовленная с применением добавок для дуговой сварки, аустенитные свойства и остаточные напряжения. Материалы 2022, 15, 7094. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
81. Гао, Л.; Чуанг, АС; Кенесей, П.; Рен, З.; Балдерсон, Л.; Сан, Т. Операндо-синхротронное исследование влияния состояния плавления проволоки на микроструктуры затвердевания Inconel 718 при направленном напылении энергии с помощью проволоочного лазера. Межд. Дж. Мах. Производитель инструментов. 2024, 194, 104089. [\[CrossRef\]](#)
82. Робин, АЙК; Спроустер, диджей; Шридаран, Н.; Снид, ЛЛ; Зинкл, С. Дж. Синхротронное исследование анизотропии и микроструктуры стали марки 91, полученной с помощью дуговой сварки. Дж. Матер. Рез. Технол. 2024, 29, 5010–5021. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
83. Кумар, В.; Мандал, А.; Дас, АК; Кумар, С. Параметрическое исследование и характеристика стали, изготовленной с помощью аддитивной дуги. структуры. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2021, 115, 1723–1733. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
84. Шен, К.; Рид, М.; Лисс, К.-Д.; Пан, З.; Может.; Кююри, Д.; ван Дуин, С.; Ли, Х. Определение остаточных напряжений нейтронной дифракцией в компонентах из алюминиды железа на основе Fe3Al, изготовленных с использованием аддитивного производства с использованием проволоочной дуги (WAAM). Доп. Производитель 2019, 29, 100774. [\[CrossRef\]](#)
85. Рукетт, С.; Камбон, К.; Бендауд, И.; Кабеса, С.; Сули, Ф. Влияние добавления слоев на остаточные напряжения добавки для дуговой сварки проволоки Изготовленные образцы из нержавеющей стали. Дж. Мануф. наук. англ. 2024, 146, 1–12. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
86. Родригес, Т.А.; Фариас, ФВК; Чжан, К.; Шамсолходаи, А.; Шен, Дж.; Чжоу, Н.; Шелл, Н.; Чапек, Дж.; Полатидис, Э.; Сантос, Т.Г.; и другие. Аддитивное производство проволокой и дугой из нержавеющей стали 316L / функционально классифицированного материала Inconel 625: разработка и характеристика. Дж. Матер. Рез. Технол. 2022, 21, 237–251. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
87. Теодор Дж.; Купорье, Л.; Жиро, Б.; Кабеса, С.; Пирлинг, Т.; Фрапье, Р.; Базен, Г.; Курант, Б. Взаимосвязь между микроструктурой, остаточной деформацией и напряжением в нержавеющей сталях, легированных in situ методом аддитивного производства с двойной проволокой (D-WAAM) . Материалы 2023, 30, 101850. [\[CrossRef\]](#)
88. Кумар, М.Б.; Маникандан, М. Оценка микроструктуры, остаточных напряжений и механических свойств в различных плоскостях суперсплава на основе никеля, изготовленного с применением проволоки + дуговой добавки. Встретил. Матер. Межд. 2022, 28, 3033–3056. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
89. Сварочные материалы для сталей с пределом текучести > 460 МПа. Доступно онлайн: <https://www.welmet.cz/wp-content/uploads/2019/04/2-SM-pro-oceli-s-mez%C3%AD-kluzu-nad-460-MPa.pdf> (по состоянию на 26 июня 2024 г.).
90. Сан, Дж.; Хенсель, Дж.; Келер, М.; Дилгер, К. Остаточные напряжения в алюминиевых компонентах, изготовленных аддитивным способом проволокой и дугой. Дж. Мануф. Процесс. 2021, 65, 97–111. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
91. Родригес, Т.А.; Фариас, ФВК; Авила, JA; Мавад, Э.; Шелл, Н.; Сантос, Т.Г.; Оливейра, Дж. П. Влияние термической обработки на Inconel 625, изготовленный с помощью аддитивного производства проволоки и дуги: анализ синхротронной рентгеновской дифракции in situ. наук. Технол. Сварка. Присоединиться. 2023, 28, 534–539. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

92. Вандтке, К.; Беккер, А.; Шрёпфер, Д.; Кромм, А.; Канненгиссер, Т.; Шарф-Вильденхайн, Р.; Хельсиг, А.; Хенсель, Дж. Эволюция остаточных напряжений во время фрезерования пазов для ремонтной сварки и аддитивного производства деталей из высокопрочной стали. *Металлы* 2024, 14, 82. [\[CrossRef\]](#)
93. Ву, К.; Мукерджи, Т.; Лю, К.; Лу, Дж.; ДеБрой, Т. Остаточные напряжения и искажения при узорной печати из титана и никеля. *сплавы. Доп. Производитель* 2019, 29, 100808. [\[CrossRef\]](#)
94. Хан, Ю. Исследование методом конечных элементов аддитивного производства проволокой из алюминиевого сплава. *Прил. наук.* 2024, 14, 810. [\[CrossRef\]](#)
95. Халед, Х.; Абусальма, Дж. Параметрическое исследование остаточных напряжений в деталях, изготовленных с использованием проволоки и дуги. *Дипломная работа, Университет Олд Доминион, Норфолк, Вирджиния, США, 2020.*
96. Саадатманд, М.; Талеми, Р. Исследование термического цикла стенки из углеродистой стали, изготовленной с помощью дуговой сварки (WAAM), с использованием Численное моделирование. *Брат. Эд Интегрита Стратт.* 2020, 14, 98–104. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
97. Эйсазаде, Х.; Ачутан, А.; Голдак Дж.; Айдуи Д. Влияние свойств материала и механической растягивающей нагрузки на остаточное напряжение Формирование в ГТА 304-A36 разнородного сварного шва. *Дж. Матер. Процес. Технол.* 2015, 222, 344–355. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
98. Незамдость, М.Р.; Исфакхани, МРН; Хашеми, Ш.; Мирбозорги С.А. Исследование температурного поля и поля остаточных напряжений при сварке под флюсом методом конечных элементов и экспериментами. *Межд. Дж. Адв. Производитель Технол.* 2016, 87, 615–624. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
99. Хуан, Х.; Мужчина.; Чен, Дж.; Фэн, З.; Муракава, Х. На пути к крупномасштабному моделированию остаточных напряжений и искажений в проволоке и дуговое аддитивное производство. *Доп. Производитель* 2020, 34, 101248. [\[CrossRef\]](#)
100. Хан, Ю.С. Аддитивное производство проволоочной дуги: исследование параметров процесса с использованием мультифизического моделирования. *Материалы* 2023, 16, 7267. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
101. Цзя, Дж.; Чжао, Ю.; Донг, М.; Ву, А.; Ли, К. Численное моделирование остаточных напряжений и деформации деталей WAAM из алюминиевого сплава на основе метода температурной функции. *Пер. Китайская сварка. Инст.* 2020, 29, 1–8.
102. Фэн, Г.; Ван, НВУ; Дэн, Д.; Чжан Дж. Численное моделирование остаточных напряжений и деформации в добавке для дуговой сварки проволоки Производство. *Кристаллы* 2022, 12, 803. [\[CrossRef\]](#)
103. Граф, М.; Праджадхиана, КП; Хельсиг, А.; Манурунг, УНР; Ависус, Б. Численное моделирование аддитивного производства металлической проволоки (WAAM). В материалах конференции AIP; Издательство AIP: Лонг-Айленд, Нью-Йорк, США, 2018 г.; Том 960, с. 140010.
104. Ахмад, С.Н.; Манурунг, Ю.Х.; Мат, МФ; Мингу, З.; Джаффар, А.; Пруллер, С.; Лейтнер, М. Процедура моделирования FEM для анализа искажений и остаточных напряжений при аддитивном производстве проволоочной дуги. В серии конференций IOP: Материаловедение и инженерия; Издательство IOP : Бристоль, Великобритания, 2020 г.; Том 834, с. 012083.
105. Кадиу, С.; Куртуа, М.; Карин, М.; Беркманс, В.; Ле Массон, П. Трехмерная теплопередача, поток жидкости и электромагнитная модель холода. дуговое аддитивное производство проволоки для переноса металла (Cmt-Waam). *Доп. Производитель* 2020, 36, 101541. [\[CrossRef\]](#)
106. Дрекслер, Х.; Хаунрайтер, Ф.; Рабергер, Л.; Рейтер, Л.; Хюттер, А.; Энцингер, Н. Численное моделирование искажений и остаточных напряжений во время дугового аддитивного производства сплава ER 5183 с плетением. *BHM Bergund Hüttenmännische Monatshefte* 2024, 169, 38–47. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
107. Бонифас Е.А.; Паломек, Дж.С. Механическая модель в процессе аддитивного производства проволока + дуга. *Прог. Доп. Производитель* 2020, 5, 163–169. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
108. Рейес-Гордилло, Э.; Гомес-Ортега, А.; Моралес-Эстрелья, Р.; Перес-Баррера, Дж.; Гонсалес-Кармона, Дж.; Эскудеро-Гарсия, Р.; Альваро-Ороско, Дж. Влияние параметров холодного переноса металла при аддитивном производстве проволокой многослойных стенок Ti6Al4V. 2022. Доступно онлайн: <https://www.researchsquare.com/article/rs-1946459/v1>. (по состоянию на 26 июня 2024 г.).
109. Сильва В.Ф. Оценка свойств преформ Inconel ® 625, изготовленных по технологии WAAM. Рез. кв. 2024. Доступно онлайн: <https://www.researchsquare.com/article/rs-3591195/v1>. (по состоянию на 26 июня 2024 г.).
110. Дерекар, К.С.; Аддисон, А.; Джоши, СС; Чжан, Х.; Лоуренс, Дж.; Сюй, Л.; Мелтон, Г.; Гриффитс, Д. Влияние методов импульсного металлического инертного газа (импульсная сварка MIG) и холодного переноса металла (CMT) на растворение водорода при аддитивном производстве проволоочной дуги (WAAM) алюминия. *Межд. Дж. Адв. Производитель Технол.* 2020, 107, 311–331. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
111. Росли, Н.А.; Алькахари, г-н; Рамли, Франция; Судин, Миннесота; Майдин С. Влияние технологических параметров присадки проволоки и дуги Производство (BAAM). *Процесс. Дж. Мех. англ.* 2020, 17, 69–78. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
112. Дерекар, К.С.; Ахмад, Б.; Чжан, Х.; Джоши, СС; Лоуренс, Дж.; Сюй, Л.; Мелтон, Г.; Аддисон, А. Влияние вариантов процесса на остаточные напряжения при аддитивном производстве проволокой из алюминиевого сплава 5183. *J. Manuf. наук. англ. Пер.* 2022, 144, 071005. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
113. Юань, К.; Лю, К.; Ван, В.; Ван М. Распределение остаточных напряжений в большом образце, изготовленном методом аддитивного производства с использованием проволоочной дуги. *наук. Технол. Сварка. Присоединиться.* 2023, 28, 137–144. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
114. Фу, Р.; Тан, С.; Лу, Дж.; Цюи, Ю.; Ли, З.; Чжан, Х.; Сюй, Т.; Чен, З.; Лю, К. Аддитивное производство алюминиевых сплавов с использованием горячей проволоки. с пониженной пористостью и высокой скоростью осаждения. *Матер. Дес.* 2021, 199, 199109370. [\[CrossRef\]](#)
115. Чжан, К.; Ли, Ю.; Гао, М.; Цзэн, Х. Дуговое аддитивное производство сплава Al-6Mg с использованием холодного переноса металла с переменной полярностью. дуга как источник питания. *Матер. наук. англ. А* 2018, 711, 415–423. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
116. Корбин, диджей; Нассар, Арканзас; Ройцель, EW; Кистлер, Н.А.; Биз, АМ; Михалерис, П. Влияние параметров направленного энерговыделения на механическое искажение Ti-6Al-4V, нанесенного лазером. В материалах 27-го ежегодного международного симпозиума по изготовлению твердых форм произвольной формы — конференции по аддитивному производству SFF, Остин, Техас, США, 8–10 августа 2016 г.; стр. 670–679.
117. Сюн, Дж.; Лей, Ю.; Ли, Р. Анализ методом конечных элементов и экспериментальное подтверждение термического поведения тонкостенных деталей в аддитивном производстве на основе GMAW с различными температурами предварительного нагрева подложки. *Прил. Терм. англ.* 2017, 126, 43–52. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

118. Чжао Дж.; Цюань, GZ; Чжан, ЮК; Ма, ГГ; Цзян, Л.Х.; Дай, WW; Цзян, К. Влияние стратегии пути наплавки на остаточное напряжение и деформацию при аддитивном производстве деталей дисков с использованием проволочной дуги. Дж. Матер. Рез. Технол. 2024, 30, 2242–2256. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

119. Уэллс, Т.; Крото, М.; Буа-Брошю, А.; Левеск, Ж. Дуговое аддитивное производство алюминиевых сплавов. англ. Учеб. 2023, 43, 16. [\[CrossRef\]](#)

120. Чжан Дж.; Ван, Х.; Паддеа, С.; Чжан, Х. Поведение усталостных трещин в добавке проволоки + дуги, изготовленной из Ti-6Al-4V: Влияние микроструктуры и остаточного напряжения. Матер. Дес. 2016, 90, 551–561. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

121. Гу, Дж.; Гао, М.; Ян, С.; Бай, Дж.; Чжай, Ю.; Дин Дж. Микроструктура, дефекты и механические свойства сплава Al[сбnd]Cu4.3-Mg1.5, полученного аддитивным способом проволокой и дугой. Матер. Дес. 2020, 186, 108357. [\[CrossRef\]](#)

122. Киндерманн, Р.М.; Рой, МJ; Морана, Р.; Фрэнсис, Дж. А. Влияние микроструктурной неоднородности и структурных дефектов на механическое поведение компонентов Inconel 718, изготовленных аддитивным способом проволока + дуга. Матер. наук. англ. А 2022, 839, 142826. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

123. Йылдыз А.С.; Коч, Б.И.; Йылмаз О. Определение термического поведения в процессе аддитивного производства проволочной дуги. Производитель Procedia. 2020, 54, 233–237. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

124. Павлик Дж.; Цеслик, Дж.; Бембенек, М.; Гураль, Т.; Капаева С.; Капкенова М. О влиянии коэффициента линейной энергии/тепловложения на твердость и геометрию наплавленного валика в хромированных стрингерных покрытиях GMAW. Материалы 2022, 15, 6019. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

125. Романенко Д.; Пракаш, виджей; Кун, Т.; Мёллер, К.; Хинтце, В.; Эммельманн, К. Влияние параметров процесса DED на деформацию и остаточное напряженное состояние компонентов Ti-6Al-4V, изготовленных аддитивным способом, во время механической обработки. Procedia CIRP 2022, 11, 271–276. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

126. Му, Х.; Полден, Дж.; Ли, Ю.; Он, Ф.; Ся, Ц.; Пан, З. Послойное адаптивное управление на основе модели для аддитивного производства проволочной дуги. тонкостенных конструкций. Дж. Интелл. Производитель 2022, 33, 1165–1180. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

127. Лю, Б.; Лан, Дж.; Лю, Х.; Чен, Х.; Чжан, Х.; Цзян, З.; Хан Дж. Влияние параметров обработки при аддитивном производстве проволочной дугой нержавеющей стали 308L на формирование тонкостенной структуры. Материалы 2024, 17, 1337. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)

128. Али, М.Х.; Хан, Ю.С. Анализ методом конечных элементов влияния схемы сканирования и энергии на остаточное напряжение и деформацию в области дугового аддитивного производства стали EN36. Материалы 2023, 16, 4698. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)

129. Чен, С.; Он, Т.; Ву, Х.; Лей, Г. Синергетический эффект карбидов и остаточной деформации на механическое поведение суперсплава Ni-17 Mo-7Cr, изготовленного методом аддитивного производства с помощью проволочной дуги. Матер. Летт. 2021, 287, 129291. [\[CrossRef\]](#)

130. Винчек Дж.; Гуква, М.; Маклес, К.; Мициан, М.; Ядав А. Количество тепла, подводимое к сварному шву на единицу длины и на единицу объем. Конференция ИОП. Сер. Матер. наук. англ. 2021, 1199, 012067. [\[CrossRef\]](#)

131. Коли Ю.; Арора, С.; Ахмад, С.; Прия Юварадж, Н.; Хан, З.А. Исследования и многофакторная оптимизация параметров процесса холодного переноса металла при аддитивном производстве проволочной дуги для изготовления образцов SS308L. Дж. Матер. англ. Выполнять. 2023, 32, 2463–2475. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

132. Камбон, К.; Рукетт, С.; Бендауд, И.; Бордрей, К.; Уимпори, Р.; Соули, Ф. Термомеханическое моделирование наложенных слоев, выполненных с помощью аддитивного производства проволока + дуга и холодного переноса металла GMAW. Weld World 2020, 64, 1427–1435. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

133. Омияле, БО; Олутбаде, ТО; Абиойе, ТЕ; Фараиби, ПК. Аддитивное производство проволочно-дуговой сварки алюминиевых сплавов для аэрокосмической отрасли. и автомобильные приложения: обзор. Матер. наук. Технол. 2022, 38, 391–408. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

134. Ван Дж.; Пан, З.; Карпендер, К.; Хан, Дж.; Ван, З.; Ли, Х. Сравнительное исследование кристаллографической ориентации, выделения, фазового превращения и механического отклика богатого никелем сплава NiTi, изготовленного WAAM, при повышенных температурах нагрева подложки. Матер. наук. англ. А 2021, 800, 140307. [\[CrossRef\]](#)

135. Дин Дж.; Коулгроув, П.; Мартина, Ф.; Уильямс, С.; Викторovich, Р.; Палт, М.Р. Разработка локального экранирующего устройства с ламинарным потоком для производства проволоки + дуги. Дж. Матер. Процесс. Технол. 2015, 226, 99–105. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

136. Тонелли, Л.; Лаги, В.; Палермо, М.; Тромбетти, Т.; Ческини, Л. AA5083 (Al – Mg) пластины, полученные методом проволочно-дугового аддитивного производства: влияние ориентации образца на микроструктуру и свойства на растяжение. Прог. Доп. Производитель 2021, 6, 479–494. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

137. Чжан, К.; Шен, К.; Хуа, Х.; Ли, Ф.; Чжан, Ю.; Чжу, Ю. Влияние стратегии планирования аддитивного производства с помощью проволочной дуги на состояние остаточного напряжения в одном отдельном слое наплавки. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2020, 111, 797–806. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

138. Денлингер, ЕР; Хейгель, Дж. К.; Михалерис, П.; Палмер, Т.А. Влияние времени выдержки между слоями на деформацию и остаточное напряжение при аддитивном производстве титановых и никелевых сплавов. Дж. Матер. Процесс. Технол. 2015, 215, 123–131. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

139. Гудур, С.; Нагаллапати, В.; Павар, С.; Муввала, Г.; Симхамбхатла, С. Исследование влияния нагрева и охлаждения подложки на геометрию валика при аддитивном производстве проволочной дуги и его корреляцию со скоростью охлаждения. Матер. Сегодня Проц. 2019, 41, 431–436. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

140. Сингх, С.; Джинуп, АН; Тарун Кумар, GTА; Палани, Айова; Пол, КП; Прашант, К.Г. Влияние межслоевой задержки на микроструктуру и механические свойства стеновых конструкций, изготовленных с помощью дуговой сварки. Материалы 2021, 14, 4187. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)

141. Бермингем, МJ; Никастро, Л.; Кент, Д.; Чен, Ю.; Даргуш, М.С. Оптимизация механических свойств компонентов Ti-6Al-4V, полученных методом аддитивного производства проволока + дуга с последующей термообработкой. J. Сплавы. Сборник. 2018, 753, 247–255. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

142. Кумар, А.; Маджи, К. Выбор параметров процесса для напыления почти чистой формы при аддитивном производстве проволочной дуги. Генетический алгоритм. Дж. Матер. англ. Выполнять. 2020, 29, 3334–3352. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

143. Али, Ю.; Хенкель, П.; Хильдебранд, Дж.; Рейманн, Дж.; Бергманн, JР; Барникол-Эттлер, С. Дуговое аддитивное производство при горячей обработке. инструментальная сталь с процессом СМТ. Дж. Матер. Процесс. Технол. 2019, 269, 109–116. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

144. Лаги, В.; Палермо, М.; Тонелли, Л.; Гаспарини, Дж.; Ческини, Л.; Тромбетти, Т. Свойства на растяжение и микроструктурные особенности аустенитной нержавеющей стали 304L, полученной методом проволочно-дугового аддитивного производства. *Межд. Дж. Адв. Производитель Технол.* 2020, 106, 3693–3705. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
145. Диновицер, М.; Чен, Х.; Лалиберте, Дж.; Хуанг, Х.; Фрей, Х. Влияние параметров процесса аддитивного производства проволоки и дуги (WAAM) на геометрию и микроструктуру валика. *Доп. Производитель* 2019, 26, 138–146. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
146. Навин Сринивас, М.; Вимал, КЕК; Маникандан, Н.; Шритарананд, Г. Параметрическая оптимизация и множественное регрессионное моделирование для изготовления тонких пластин из алюминиевого сплава с использованием аддитивного производства проволокой. *Межд. Дж. Интерактив. Дес. Производитель* 2022. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
147. Завдоев А.; Позняков В.; Боден, Т.; Ким, НS; Клочков И.; Мотрунич, С.; Хитон, М.; Акьер, П.; Роганте, М.; Денисенко А.; и другие. Оптимизация параметров импульсно-дуговой сварки при аддитивном производстве проволокой для аустенитных сталей. *Межд. Дж. Адв. Производитель Технол.* 2022, 119, 5175–5193. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
148. Лу, Х.; Ли, М.В.; Ян, Х. Сравнение аддитивного производства проволочной дугой и порошковым лазером для суперсплава IN718: унифицированный подход к выбору параметров процесса на основе объемной плотности энергии. *Межд. Дж. Адв. Производитель Технол.* 2021, 114, 1517–1531. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
149. Вора, Дж.; Панди, Р.; Додия, П.; Патель, В.; Ханна, С.; Вагасия, В.; Чаудхари, Р. Изготовление многостенной конструкции посредством параметрического исследования геометрии бортов процесса WAAM на основе GMAW из SS309L. *Материалы* 2023, 16, 5147. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
150. Атаиб, Нью-Хэмпшир; Халим, Ах; Аль-Зубайди, Б. Обзор аддитивного производства проволочной дуги (WAAM) алюминиевых композитов, процесса, классификации, преимуществ, проблем и применения. *Дж. Физ. Конф. Сер.* 2021, 1973, 012083. [\[CrossRef\]](#)
151. Шарф-Вильденхайн, Р.; Хельсиг, А.; Хенсель, Дж.; Вандтке, К.; Шрёпфер, Д.; Канненгиссер, Т. Контроль температуры и влияние конструкции на свойства и сварочные напряжения в компонентах WAAM из высокопрочных конструкционных сталей. *Weld World* 2023, 67, 55–65. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
152. Чжан Дж.; Чжан, Х.; Ван, Х.; Дин, Дж.; Траоре, Ю.; Паддеа, С.; Уильямс, С. Выбор пути трещины на стыке деформируемых и проволока + дуговая добавка производства Ti-6Al-4V. *Матер. Дес.* 2016, 104, 365–375. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
153. Ян, Ю. Х.; Гуань, ЗП; Ма, ПК; Рен, МВТ; Цзя, Х.Л.; Чжао, П.; Жа, М.; Ван, НУ. Аддитивное производство проволокой для дуговой сварки нового магниевого сплава ATZM31: эволюция микроструктуры и механические свойства. *Ж. Магнес. Сплавы* 2023, 10, 44. [\[CrossRef\]](#)
154. Коли, Ю.; Юварадж, Н.; Шиванандам, А.; Випин. Контроль явления горбирования и анализ механических свойств образцов, изготовленных методом аддитивного производства проволокой Al-Si с использованием процесса холодного переноса металла. *Учеб. Инст. Мех. англ. Часть С J. Mech. англ. наук.* 2022, 236, 984–996. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
155. Цзин, Ю.; Фанг, Х.; Си, Н.; Чанг, Т.; Дуань, Ю.; Хуанг, К. Улучшение прочности на разрыв и усталостных свойств алюминиевого сплава 2319, полученного аддитивным способом, путем поверхностной лазерной ударной обработки. *Матер. наук. англ. А* 2023, 864, 144599. [\[CrossRef\]](#)
156. Чи, Дж.; Кай, З.; Ван, З.; Чжан, Х.; Чен, З.; Ли, Л.; Ли, Ю.; Пэн, П.; Го, В. Влияние термообработки в сочетании с лазерной ударной обработкой на титановый сплав Ti17, изготовленный с помощью проволоки и дуги: микроструктура, остаточное напряжение и механические свойства. *Серфинг. Пальто. Технол.* 2020, 396, 125908. [\[CrossRef\]](#)
157. Соуза, Б.М.; Козльо, FGF; Джуниор, ГММ; де Оливейра, медицинский работник; да Силва Н.Н. Термический и микроструктурный анализ соединений, изготовленных методом аддитивного производства проволокой (WAAM). *Weld World* 2024, 68, 1653–1669. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
158. Ма, Д.; Сюй, К.; Суй, С.; Тиан, Дж.; Го, К.; Ву, Х.; Чжан, З.; Ременник, С.; Шехтман, Д. Эволюция микроструктуры и механические свойства сплава Mg-Gd-Y-Zr, полученного аддитивным способом с помощью проволочной дуги, путем последующей термообработки. *Виртуальная физика. Прототип.* 2023, 18, 1–22. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
159. Шост, Б.А.; Терзи, С.; Мартина, Ф.; Буасселье, Д.; Притуляк А.; Пирлинг, Т.; Хофманн, М.; Джарвис, DJ Сравнительное исследование методов аддитивного производства: остаточное напряжение и микроструктурный анализ компонентов Ti-6Al-4V, напечатанных CLAD и WAAM. *Матер. Дес.* 2016, 89, 559–567. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
160. Кумар, А.; Маджи, К.; Шривастава, А. Исследования геометрии осаждения и механических свойств проволочной дуговой добавки Изготовлен из Inconel 625. *Int. Дж. Прецис. англ. Производитель* 2023, 24, 1483–1500. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
161. Васкес, Л.; Родригес, Миннесота; Родригес, И.; Альварес, П. Влияние термообработки после осаждения на микроструктуру и Растягивающие свойства деталей ti-6al-4v производства cmt-waam. *Металлы* 2021, 11, 1161. [\[CrossRef\]](#)
162. Гэн, Х.; Ли, Дж.; Сюн, Дж.; Лин, Х.; Чжан Ф. Оптимизация подачи проволоки для аддитивного производства на основе GTAW. *Дж. Матер. Процес. Технол.* 2017, 243, 40–47. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
163. Ли, Р.; Сюн, Дж.; Лей, Ю. Исследование развития тепловых напряжений, вызванных аддитивным производством проволоки и дуги для круглых тонкостенных деталей. *Дж. Мануф. Процес.* 2019, 40, 59–67. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
164. Гупта, НК; Ганесан, Великобритания; Караде, С.; Мехта, АК; Карунакаран, К.П. Влияние нескольких технологий на минимизацию остаточных напряжений в аддитивном производстве. В материалах ICERS 11 — 11-й Международной конференции по остаточным напряжениям, Нанси, Франция, 27–30 марта 2022 г.; п. 040150.
165. Али, М.Х.; Хан, Ю.С. Влияние фазовых превращений на стратегию сканирования при изготовлении WAAM. *Материалы* 2021, 14, 7871. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
166. Горняков В.; Сан, Ю.; Дин, Дж.; Уильямс, С. Моделирование и оптимизация гибридного процесса аддитивного производства проволочной дуги и прокатки под высоким давлением. *Матер. Дес.* 2022, 223, 111121. [\[CrossRef\]](#)
167. Горняков В. Эффективное моделирование и оценка прокатки для снижения остаточных напряжений и искажений в дуговой присадке проволоки. *Производство. Кандидат наук. Диссертация, Университет Крэнфилда, Крэнфилд, Великобритания, 2021. Том 7. с. 265.*

168. Чжан Т.; Ли, Х.; Гонг, Х.; Дин, Дж.; Ву, Ю.; Диао, К.; Чжан, Х.; Уильямс, С. Гибридное аддитивное производство проволокой и дугой и влияние процесса прокатки на микроструктуру и свойства на растяжение Inconel 718. J. Mater. Процесс. Технол. 2022, 299, 321–326. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
169. Шривастава, С.; Гарг, РК; Шарма, В.С.; Сачдева, А. Измерение и смягчение остаточного напряжения в аддитивном производстве проволоочной дуги: обзор подхода к макромасштабному континуальному моделированию. Арх. Вычислитель. Методы англ. 2021, 28, 3491–3515. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
170. Монтевеки, Ф.; Вентурини, Дж.; Сциппа, А.; Кампателли, Г. Конечно-элементное моделирование процесса производства проволоочной дуги с добавками. Procedia CIRP 2016, 55, 109–114. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
171. Банконг, Б.Д.; Абиойе, ТЕ; Олугбаде, ТО; Зухаилавати, Х.; Гбадеян, О.О.; Огеденгбе, Т.И. Обзор методов постобработки для высококачественного аддитивного производства дуговой проволоки. Матер. наук. Технол. 2023, 39, 129–146. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
172. Хённиге, младший; Коулгроув, Пенсильвания; Ахмад, Б.; Фицпатрик, Мэн; Гангули, С.; Ли, ТЛ; Уильямс, С.В. Остаточное напряжение и контроль текстуры в проволоке Ti-6Al-4V + соединения, изготовленные аддитивно дуговым способом, путем снятия напряжений и прокатки. Матер. Дес. 2018, 150, 193–205. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
173. Ли, К.; Клечка, Массачусетс; Чен, С.; Сюн, В. Аддитивное производство проволоочной дугой и оптимизация микроструктуры после термообработки и механические свойства стали марки 91. Доп. Производитель 2021, 37, 101734. [\[CrossRef\]](#)
174. Не, Л.; Ву, Ю.; Гонг, Х.; Чен, Д.; Го, Х. Влияние дробеструйной обработки на перераспределение поля остаточных напряжений при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава 2219. Материалы 2020, 13, 3169. [\[CrossRef\]](#)
175. Сан, Р.; Ли, Л.; Чжу, Ю.; Го, В.; Пэн, П.; Конг, Б.; Сан, Дж.; Че, З.; Ли, Б.; Го, К.; и другие. Контроль микроструктуры, остаточных напряжений и свойств растяжения проволоочно-дуговой добавки из алюминиевого сплава 2319, полученной методом лазерной ударной упрочнения. J. Сплавы. Сборник. 2018, 747, 255–265. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
176. Ермакова А.; Разави, Н.; Кабеса, С.; Гадалинка, Э.; Рид, М.; Парадовска, А.; Гангули, С.; Берто, Ф.; Мехманпараст, А. Влияние обработки поверхности и ориентации на скорость роста усталостных трещин и распределение остаточных напряжений в компонентах из низкоуглеродистой стали, изготовленных аддитивным способом. Дж. Матер. Рез. Технол. 2023, 24, 2988–3004. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
177. Дин, Ю.; Муньис-Лерма, Ж.А.; Траск, М.; Чжоу, С.; Уокер, А.; Брошу, М. Вопросы микроструктуры и механических свойств в аддитивном производстве алюминиевых сплавов. Миссис Булл. 2016, 41, 745–751. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
178. Бусачи А.; Эркуюнджу Дж.; Коулгроув, П.; Мартина, Ф.; Дин, Дж. Разработка производственной системы на основе WAAM для оборонного применения. Procedia CIRP 2015, 37, 48–53. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
179. Абусальма, Х.; Эйсазаде, Х.; Хейрипур, Ф.; Банн, Дж.; Айду, Д. Параметрическое исследование формирования остаточных напряжений в проволоке и дуге. Производство добавок. Дж. Мануф. Процесс. 2022, 75, 863–876. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
180. Кивелу, П.; Хуанг, К.; Ли, Дж.; Гарднер Л. Остаточные напряжения в стальных двутавровых профилях, упрочненных дуговым аддитивным производством. В Структуры; Elsevier: Амстердам, Нидерланды, 2024 г.; Том 60.
181. Ву, Б.; Пан, З.; Дин, Д.; Кюри, Д.; Ли, Х.; Сюй, Дж.; Норриш, Дж. Обзор аддитивного производства металлов проволоочной дугой: свойства, дефекты и улучшение качества. Дж. Мануф. Процесс. 2018, 35, 127–139. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
182. Коулгроув, Пенсильвания; Донохью, Дж.; Мартина, Ф.; Гу, Дж.; Прангнелл, П.; Хённиге, Дж. Применение методов объемной деформации для улучшения микроструктуры и свойств материала, а также контроля остаточных напряжений и искажений в компонентах, изготовленных аддитивным способом. Скр. Матер. 2017, 135, 111–118. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
183. Кармухилан, М.; Суд, А.К. Интеллектуальная модель процесса для прогнозирования геометрии шва в WAAM. Матер. Сегодня Проц. 2018, 5, 24005–24013. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
184. Тан, С.; Ван, Г.; Хуанг, К.; Ли, Р.; Чжоу, С.; Чжан Х. Исследование, моделирование и оптимизация аномальных участков сварных швов при аддитивном производстве проволоки и дуги. Rapid Prototyp J. 2020, 26, 183–195. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
185. Вейга, Ф.; Суарес, А.; Алдалур, Э.; Бхуджанграо, Т. Влияние режима переноса металла на симметрию геометрии валика в вааме алюминий. Симметрия 2021, 13, 1245. [\[CrossRef\]](#)
186. Дин, Д.; Пан, З.; Кюри, Д.; Ли, Х. Модель с перекрытием нескольких валиков для роботизированного аддитивного производства проволоки и дуги (WAAM). Робот Компьютер. Интегр. Производитель 2015, 31, 101–110. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
187. Гэн, Х.; Сюн, Дж.; Хуанг, Д.; Лин, Х.; Ли, Дж. Модель прогнозирования геометрического размера слоя при аддитивном производстве проволоки и дуги с использованием методологии поверхности отклика. Межд. Дж. Adv. Производитель Технол. 2017, 93, 175–186. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
188. Банаи, ЮАР; Капил, А.; Марефат, Ф.; Шарма, А. Обобщенная модель перекрытия для аддитивного производства дуговой проволоки из нескольких материалов (WAAM). Виртуальная физика. Прототип. 2023, 18, e2210541. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
189. Сурави Н.А.; Сох, Г.С. Идентификация геометрических дефектов на основе акустических характеристик при аддитивном производстве проволоочной дуги. Виртуальная физика. Прототип. 2023, 18, e2210553. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
190. Чжао, Ю.Т.; Ли, РГ; Лю, А. Оптимизация модели качества геометрии для аддитивного производства проволоки и дуги на основе адаптивного многокритериального алгоритма серого волка. Мягкий компьютер. 2020, 24, 17401–17416. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
191. Аломари, Ю.; Бирош, Монтана; Андо, М. Оптимизация ориентации деталей в процессе аддитивного производства проволоки и дуги для выпуклых изделий и невыпуклой формы. наук. Отчет 2023, 13, 2203. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
192. Вани, ЗК; Абдулла, А.Б. Управление геометрией валика в профиле, полученном аддитивным способом, — обзор. Пертаника Дж. Наук. Технол. 2024, 32, 917–942. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
193. Вора, Дж.; Парих, Н.; Чаудхари, Р.; Патель, В.К.; Парамар, Х.; Пименов Д.Ю.; Гиасин, К. Оптимизация морфологии валика для проволоочной дуги на основе GMAW из стали 2,25 Cr-1,0 Mo с использованием металлпорошковой проволоки. Прил. наук. 2022, 12, 5060. [\[CrossRef\]](#)
194. Ван, К.; Бай, Х.; Рен, К.; Фанг, Х.; Лу, Б. Комплексная модель прогнозирования геометрии валика в аддитивной проволоке и дуге. производство. Дж. Физ. Конф. Сер. 2020, 1624, 022018. [\[CrossRef\]](#)

195. Чинтала, А.; Теджасви Кумар, М.; Сатишкумар, М.; Ариважаган, Н.; Маникандан, М. Разработка технологии производства Inconel 625 в аэрокосмической отрасли с использованием процесса аддитивного производства проволокой. Дж. Матер. англ. Выполнять. 2021, 30, 5333–5341. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

196. Хамрани, А.; Буараб, ФЗ; Агарвал, А.; Джу, К.; Акбарзаде, Х. Достижения и применение многопроволочных процессов в аддитивном производстве: всесторонний систематический обзор. Виртуальная физика. Прототип. 2023, 18, e2273303. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

197. Кегинёр, А.; Рюкерт, Г.; Кортиал, Ф.; Хаскоэт, Дж. Я. Оценка аддитивного производства проволочной дуги для крупногабаритных компонентов военно-морского флота. Weld World 2018, 62, 259–266. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

198. Ли, Дж.; Цюй, К.; Панг, К.; Сюй, П.; Луо, В.; Ли, Дж. Интегрированное шасси автомобиля, изготовленное с помощью аддитивного производства проволокой и дугой: создание структуры, оптимизация радиана печати и прогнозирование производительности. Виртуальная физика. Прототип. 2024, 19, e2301483. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

199. Сингх, СР; Ханна, П. Аддитивное производство проволочной дуги (WAAM): новый процесс формирования конструкционных материалов. Матер. Сегодня Учеб. 2021, 44, 118–128. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

200. Вишнукумар, М.; Прамод, Р.; Раджеш Каннан, А. Аддитивное производство проволочной дуги для ремонта алюминиевых конструкций в морском транспорте. Матер. Летт. 2021, 299, 130112. [\[CrossRef\]](#)

201. Шах, А.; Алиев Р.; Зейдлер, Х.; Кринк, С. Обзор последних разработок и проблем в процессе аддитивного производства проволочной дуги (WAAM). Дж. Мануф. Матер. Процесс. 2023, 7, 97. [\[CrossRef\]](#)

202. Чатурведи, М.; Скутельнику, Э.; Русу, СС; Мистоди, ЛР; Михайлеску, Д.; Суббия, А.В. Аддитивное производство проволочной дуги: обзор последних результатов и проблем в области промышленного применения и определения характеристик материалов. Металлы 2021, 11, 939. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

203. Боётила, Л.Н. Соображения относительно алюминиевых сплавов, используемых в авиационной/космической промышленности, и использования добавок для дуговой сварки проволоки. производство WAAM для промышленного применения. Тест 2020, 4, 9–24.

204. Лю, Дж.; Сюй, Ю.; Ге, Ю.; Хоу, З.; Чен, С. Аддитивное производство металлических компонентов проволокой и дугой: обзор недавних исследований. события. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2020, 111, 149–198. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

205. Арана, М.; Укар, Э.; Родригес, И.; Агилар, Д.; Альварес, П. Влияние стратегии осаждения и термической обработки на механические свойства и микроструктуру 2319 алюминиевых компонентов WAAM. Матер. Дес. 2022, 221, 110974. [\[CrossRef\]](#)

206. Таплиял, С. Проблемы, связанные с аддитивным производством проволочной дуги (WAAM) алюминиевых сплавов. Матер. Сегодня Проц. 2019, 221, 112006. [\[CrossRef\]](#)

207. Чжао Ю.; Ли, Ф.; Чен, С.; Лу, З. Стратегия планирования процессов WAAM на основе блоков для сложных компонентов в форме оболочки. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2019, 104, 3915–3927. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

208. Пант, Х.; Арора, А.; Гопакумар, Г.С.; Чадха, У.; Саиди, А.; Паттерсон, А.Е. Применение аддитивного производства с проволочной дугой (WAAM) для производства компонентов аэрокосмической промышленности. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2023, 127, 4995–5011. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

209. Бахус, Н.А.; Странца, М.; Клаузен, Б.; Д'Элиа, СР; Хилл, МR; Ко, JР; Пэган, округ Колумбия; Браун, Д.В. Новое картирование объемного трехосного остаточного напряжения в образце моста, изготовленного аддитивным путем, путем сочетания энергодисперсионной рентгеновской дифракции и измерений контурным методом. Доп. Производитель 2024, 83, 104070. [\[CrossRef\]](#)

210. Гордон, СП; Хейден, резюме; Нид, ХФ; Винчи, РР; Харлоу, Д.Г. Анизотропия роста усталостных трещин, текстура и остаточные напряжения в аустенитной стали, изготовленной проволокой и дуговым аддитивным производством. Матер. наук. англ. А 2018, 115, 60–66. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.