



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Оценка качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки

Юлия Карлина^{1, а, *}, Владимир Конюхов^{2, б}, Татьяна Опарина^{2, с}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>, jul.karlina@gmail.com; ^б <https://orcid.org/0000-0001-9137-9404>, konyukhov_vyu@mail.ru;

^с <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>, martusina2@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.002

История статьи:

Поступила: 14 сентября 2024
Рецензирование: 08 октября 2024
Принята к печати: 17 октября 2024
Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Аддитивное производство
Электродуговое выращивание
WAAM
Проволока
Структура
Ультразвуковое упрочнение
Твёрдость
Предел текучести
Поры
Газ

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивное производство – это технология, которая позволяет печатать трехмерные (3D) компоненты слой за слоем в соответствии с цифровыми моделями. Полностью отличаясь от традиционных методов изготовления, таких как литье,ковка и механическая обработка, аддитивное производство представляет собой процесс изготовления, близкий к чистой форме, который может значительно расширить свободу проектирования и сократить время выполнения производства. Проблемы обработки материалов в Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) обусловлены достижением показателей производительности, связанных с геометрическими, физическими и материальными свойствами. Жесткие допуски и строгие требования к целостности поверхности не могут быть достигнуты путем использования автономных технологий AM. Поэтому детали WAAM обычно требуют некоторой постобработки для соответствия требованиям, связанным с отделкой поверхности, размерными допусками и механическими свойствами. Не удивительно, что интеграция AM с технологиями постобработки в одно- и много-установочные решения по обработке, обычно называемые гибридными AM, стала очень привлекательным предложением для промышленности. **Цель работы:** провести оценку качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки. **Методы исследования.** Для наплавки валиков выращиваемой стенки использовался робототехнический комплекс, в состав которого входят источник питания, блок управления, проволокоподающий механизм и горелка. Для ультразвуковой обработки применяли установку «Шмель». Для металлографических исследований использовали оптический и электронный микроскоп. Для выбора оптимальной скорости подачи проволоки и вольт-амперной характеристики была выполнена наплавка на каждой регулировочной ступени скорости подачи проволоки и напряжения. Были проведены механические испытания на статистическое растяжение, анализ химического состава и металлографические исследования. **Результаты и обсуждение.** Газовая пористость является типичным дефектом, который возникает в процессе WAAM и должен быть устранен, поскольку он отрицательно влияет на механические свойства. Первоначально газовая пористость приводит к снижению механической прочности детали из-за повреждений от образования микротрещин. Кроме того, она часто приводит к тому, что осажденный слой имеет худшие усталостные свойства из-за пространственного распределения различных по форме и размеру структур. В наших экспериментах мы установили, что оптимальным показателем является диапазон скоростей подачи проволоки в 5...6 м/мин. Увеличение расхода защитного газа в пределах 8...14 л/мин позволяет снизить пористость в наплавленном металле практически до нуля. Механические свойства наплавленных валиков показывают, что среднее значение предела текучести после механической обработки выше, чем у образцов без обработки. Полученные данные из этих экспериментов хорошо согласуются с данными, представленными в литературе. Результаты настоящего исследования могут быть использованы в реальных технологических процессах WAAM.

Для цитирования: Карлина Ю.И., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Оценка качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 75–91. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-75-91.

Введение

Достижения технологии аддитивного производства (AM) расширили области ее применения, и AM становится жизнеспособным вариантом для производства полностью функциональных металлических деталей [1–3]. Фактически металлическое AM в настоящее время

*Адрес для переписки

Карлина Юлия Игоревна, к.т.н., научный сотрудник
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, 26,
129337, г. Москва, Россия
Тел.: +7 914 879-85-05, e-mail: jul.karlina@gmail.com

применяется в различных отраслях народного хозяйства [3–5]. Одним из способов АМ является технология проволоочно-дугового выращивания (Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM). Среди всех существующих методов АМ аддитивное производство с использованием проволоки и дуги (WAAM) известно как относительно недорогой метод, который обеспечивает самые высокие скорости осаждения [1–5]. По этой технологии процесс осаждения осуществляется на открытом воздухе с использованием роботизированного манипулятора с закрепленной сварочной горелкой и локализованной экранированной зоной [5–15].

Важной задачей в обеспечении структурной целостности компонентов WAAM является оценка влияния процессов сварки, встроенных в технологию WAAM, на механические свойства и свойства разрушения по сравнению с данными, полученными из деформированного материала. Технология WAAM позволяет создавать детали со сложной топологически оптимизированной геометрией, с внутренними полостями, которые невозможно изготовить с помощью традиционных производственных процессов. Однако в большинстве случаев жесткие допуски и строгие требования к целостности поверхности не могут быть достигнуты путем использования автономных технологий АМ. Поэтому детали WAAM обычно требуют некоторой постобработки для соответствия требованиям, связанным с отделкой поверхности, размерными допусками и механическими свойствами.

В большинстве работ, посвященных аддитивному производству, описана интеграция АМ с технологиями постобработки в одно- или многоустановочные решения по обработке, обычно называемые гибридными АМ. Гибридные АМ стали очень привлекательным предложением для промышленности, что увеличило количество работ НИОКР [5–15] с целью развития этого направления. Комбинация аддитивных и субтрактивных методов предлагает возможный метод преодоления этой присущей процессу проблемы. Важно еще понимать, и это показано в многочисленных работах [10–18], что детали АМ могут содержать пустоты или поры из-за захваченного газа или неполного сплавления во время процесса печати и это может ослабить структурную целостность компонента.

В работах [4–9] указывают на пример, который был реализован в процессе Shape Deposition Manufacturing (SDM) в Стэнфордском университете и в процессе Controlled Material Buildup (CMB), разработанном в ИТТ Аachen. В этих процессах каждый слой наносится в виде почти чистой формы с использованием термического напыления, в основном лазерной наплавки. Затем слой дополнительно формируется фрезерованием с ЧПУ до чистой формы перед добавлением следующего слоя. В процессах SDM верхняя и боковые поверхности каждого слоя обрабатываются, а затем защищаются путем добавления медной опорной структуры. Эта опорная структура затем удаляется с помощью процесса травления, когда деталь готова.

В работе [4] авторы разработали аналогичный подход, 3D-сварку и фрезерование, используя WAAM вместо лазерной наплавки для более быстрого и экономичного нанесения отдельных валиков. В процессе 3D-сварки и фрезерования обычная газовая дуговая сварка металлическим электродом применяется для нанесения отдельных валиков рядом друг с другом. В зависимости от параметров сварки, таких как скорость и мощность, толщина валика варьируется от 0,5 до 1,5 мм. При нанесении слоя его верхняя поверхность обрабатывается для получения гладкой поверхности с определенной толщиной для дальнейшего нанесения. Сочетание этого процесса с торцевым фрезерованием дает явное преимущество в установке толщины слоя от 0,1 до 1 мм. Когда последовательность осаждения и торцевого фрезерования завершена, в той же установке применяется финишная обработка поверхности для удаления оставшихся ступенек на поверхности и повышения точности, близкой к чистой форме металлической детали. До настоящего времени механические свойства и микроструктура углеродистых сталей WAAM не были всесторонне охарактеризованы.

Для устранения этого пробела в знаниях авторами работ [19–22] была проведена комплексная серия испытаний на растяжение на пластинах из стали WAAM нормальной и высокой прочности, а также исследована микроструктура обеих марок стали. В работах [23, 24] были исследованы наплавленные стенки из малоуглеродистой стали на вязкость разрушения и показано преимущество метода WAAM.

В работах [22, 23] обобщаются некоторые аспекты применения процесса WAAM, касающиеся источника сварочного тепла, используемого исследователями.

Некоторые исследователи пробовали применять для WAAM способ дуговой сварки металлическим электродом в газовой среде (GMAW) [23, 24] в качестве основного инструмента для наплавки из-за его преимуществ, таких как относительно низкое разбрызгивание металла, независимое управление источником тепла и системой подачи проволоки в сочетании с дополнительной механической обработкой [25]. Другие родственные процессы, в которых плазменная горелка используется вместо GTAW, – это гибридное плазменное напыление и фрезерование (HPDM) и быстрое прототипирование на основе микроплазменной дуговой сварки (MPAW) [26, 27]. Во всех рассмотренных выше процессах осаждения металла точный контроль высоты слоя остается проблемой из-за волнообразной природы многопроходного наплавления. Чтобы получить компоненты с точной толщиной слоя, некоторые исследователи объединили фрезерование и наплавление [4–6, 25]. Эти гибридные процессы выполняют операцию фрезерования поверхности после каждого слоя, чтобы обеспечить z-точность. 3D-сварка и фрезерование, разработанные в [4, 5], объединяют наплавление GMAW с обычным процессом фрезерования для производства вставок для литья под давлением [7–12].

В работах [28–30] предлагают дополнительно использовать ультразвуковую обработку изделий, полученных по технологии WAAM. По мнению авторов, это позволит повысить механические свойства выращенных изделий. Многие параметры ультразвуковой дополнительной обработки в процессе WAAM пока еще не оптимизированы и зависят от типа оборудования, частоты, амплитуды и др.

В то же время интеграция традиционных субтрактивных технологий с WAAM может обеспечить улучшенную экономию материалов и энергии по сравнению с чистыми субтрактивными подходами. Фактически компоненты WAAM, как правило, демонстрируют высокую структурную целостность, когда параметры процесса оптимизированы, поэтому необходимо выполнять только операции механической обра-

ботки. Кроме того, ожидается, что при гибридной технологии будет очень небольшая глубина деформации поверхности. Синергетическая интеграция блока наплавки с ЧПУ-станком независимо от его марки и возраста является ключевым аспектом в гибридной технологии. Интеграция должна быть выполнена таким образом, чтобы наплавка могла действовать как дополнительная функция, не нарушая другие возможности ЧПУ-станка. Во время интеграции изменения в механических и электрических системах производятся без необходимости какой-либо фирменной информации от производителя станка или разработчика системы управления. Однако имеются механические проблемы: первая – это монтаж сварочной горелки сбоку головки шпинделя, чтобы управление наплавкой осуществлялось через тот же контроллер ЧПУ; вторая – необходимость подобрать подходящий механизм для отвода избыточного тепла, выделяемого во время сварки; третья – нужно принять соответствующие меры предосторожности для защиты элементов машины от случайного попадания брызг. Отдельно возникают проблемы с электрикой и управлением:

- 1) включение/выключение сварочно-наплавочного агрегата через программу ЧПУ;
- 2) простое и быстрое переключение между режимом наплавки и обычным режимом ЧПУ;
- 3) исключение любого прямого электрического контакта между контроллером ЧПУ и сварочным агрегатом.

Важно понимать, что серийного оборудования для осуществления комплексной (гибридной аддитивной технологии) пока не выпускается, а все работы, выполненные в этой области, связаны с модернизацией станков с ЧПУ, что не всегда оправдано с экономической точки зрения. Относительно простым с методологической точки зрения и требующим минимальных финансовых затрат на оборудование является подход, основанный на использовании отдельно технологии WAAM с другими методами обработки, которые доступны для более широкого круга исследований, с целью изучения свойств полученных материалов. В этой работе представлено исследование характеристик обработки металла, нанесенного методом WAAM с дополнительной механической и ультразвуковой обработкой.

Цель работы: провести оценку качества и механических свойств слоев металла, получаемых из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки.

Материалы и методы исследований

В качестве источника питания для механизированной наплавки в среде защитных газов использовался однофазный аппарат-инвертор КЕМРПИ Kempromat 1701. В качестве защитного газа использовали смесь аргона (80 %) и CO₂ (20 %). Сварочная проволока – Св-08Г2С с медным покрытием диаметром 1,0 мм. Параметры процесса выращивания слоев (рис. 1, а) были определены для обеспечения оптимальной производительности и времени охлаждения между последовательными осаждениями слоев. Количество проходов было определено 5. После каждого прохода проводили механическую обработку поверхности наплавленного валика. Далее осуществляли визуальный контроль с использованием лупы (увеличением 10 крат) для оценки качества поверхности. После контроля наплавлялся новый слой (рис. 1, б).

Вариативными параметрами были скорость подачи проволоки и расход защитного газа. Расход газа при проведении экспериментов выбирали в диапазоне 8...12 л/мин. Это необходимо было сделать с целью оценки влияния данного параметра на пористость. При этом другие параметры – ток, скорость подачи проволоки, скорость наплавки – были постоянными. Ультразву-

ковая обработка проводилась на последнем слое наплавки в течение 1, 5, 10, 15 минут с использованием установки «Шмель Мг».

Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 1497–84. Всего было вырезано по три образца из стальной стенки, изготовленной по стандартной технологии WAAM и гибридной WAAM. Ударная вязкость (КСУ) определялась в соответствии с ГОСТ 9454–78 и ГОСТ 6996. Для этого были подготовлены три образца, вырезанные из стальной стенки, изготовленной по стандартной технологии WAAM и гибридной WAAM. После завершения испытаний на ударный изгиб поверхности разрушения испытываемых образцов были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JIB-Z4500-SEM для сравнения основных видов разрушения, связанных с различными технологиями формирования.

Для микроструктурного анализа металлографические образцы были извлечены из стенки вдоль направлений выращивания, отполированы в соответствии со стандартными процедурами до чистоты поверхности 1 мкм, протравлены 4%-м водным раствором азотной кислоты и исследованы с помощью оптического микроскопа «МикроМед 2». Измерения твердости проводились в разных местах и ориентациях стенки, включая нижнюю, среднюю и верхнюю зоны, с использованием микротвердомера Shimadzu HBR-VU-187 с нагрузкой 200 г и временем выдержки 15 с.

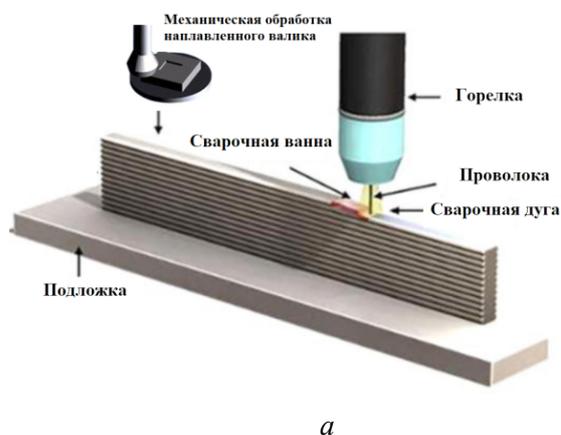


Рис. 1. Схема процесса наплавки валиков (а) и пластина с наплавленными валиками (б)
 Fig. 1. Schematic diagram of the bead surfacing process (a) and a plate with surfaced beads (б)

Результаты исследований

На рис. 2, 3 представлены результаты влияния скорости подачи проволоки и расхода защитного газа на пористость металла. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5 на рис. 2 показано количество валиков наплавки. На рис. 3 показано влияние расхода защитного газа на пористость. Видно, что с увеличением расхода пористость в наплавленном металле снижается до нуля.

На рис. 4 показаны результаты влияния механической зачистки после каждого слоя наплавки на качество поверхности и геометрические размеры валика наплавки. Видно, что использование механической обработки влияет на высоту валика наплавки и качество шва (рис. 5).

Микроструктура материала наплавленных валиков, показанная на рис. 6, состоит из полигонального феррита (PF) и межзеренного пластинчатого перлита (P).

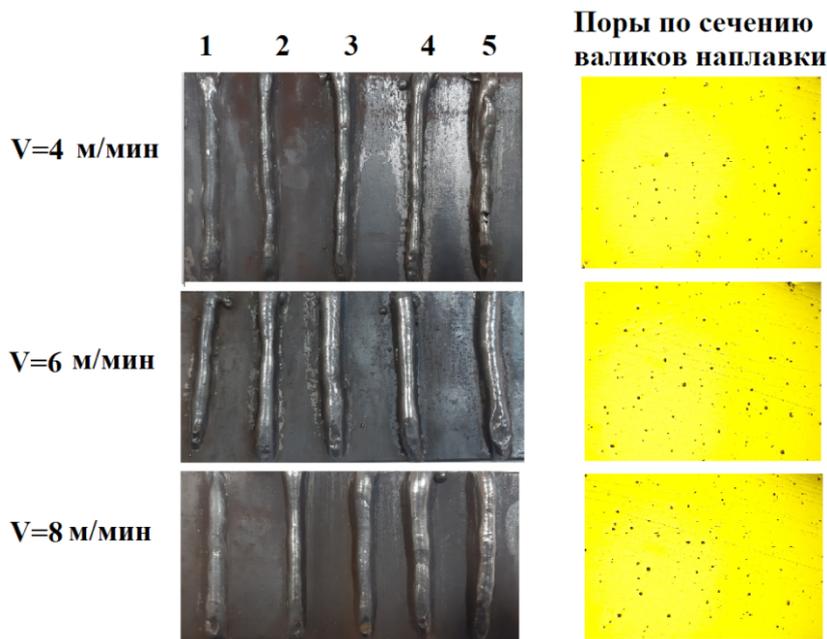


Рис. 2. Влияние скорости подачи проволоки на пористость по сечению валика наплавки

Fig. 2. Effect of wire feed speed on porosity across the surfaced bead cross section

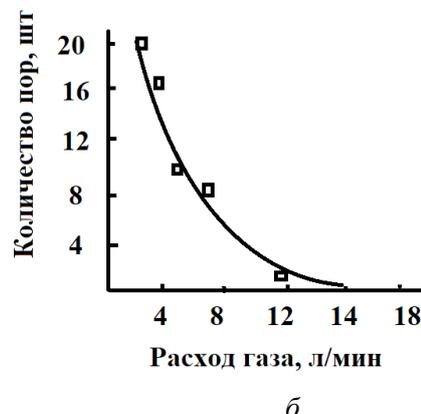
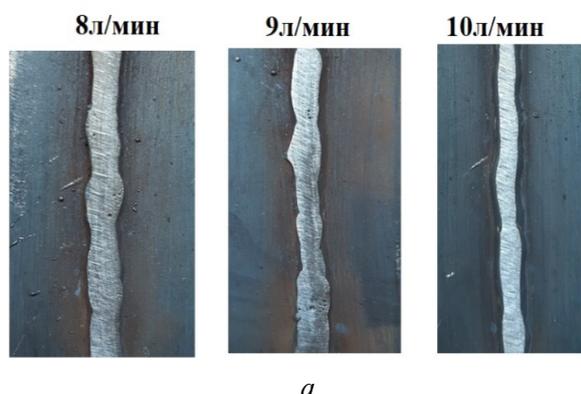


Рис. 3. Влияние расхода защитного газа на пористость в наплавленном валике (а) и график зависимости количества пор от расхода газа (б)

Fig. 3. Effect of shielding gas flow rate on porosity in surfaced beads (a) and a graph of the dependence of the number of pores on the gas flow rate (b)

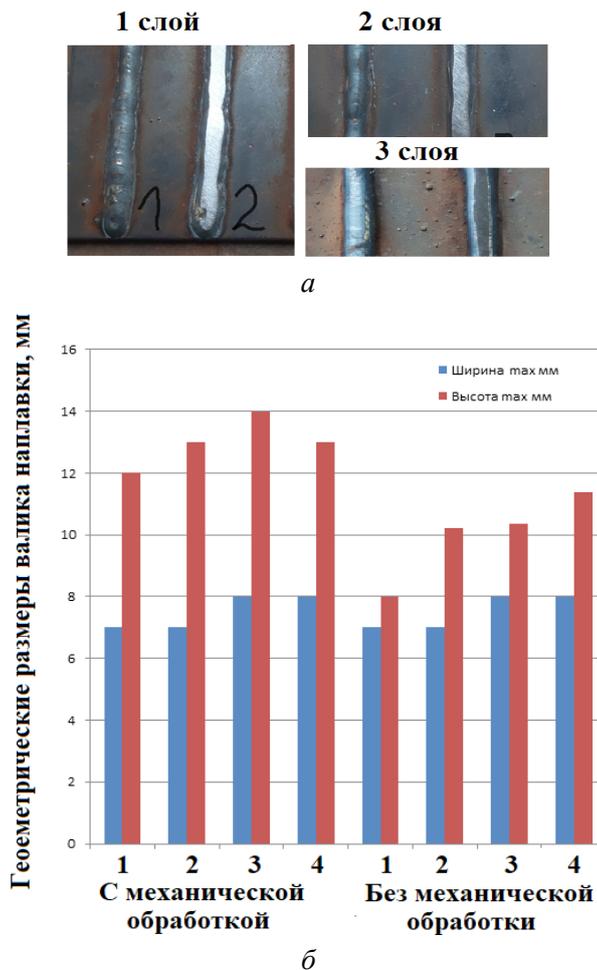


Рис. 4. Внешний вид наплавленных валиков с механической обработкой и без нее:

а – 1, 2, 3 прохода; *б* – влияние механической обработки на геометрические параметры валика наплавки в зависимости от количества проходов (1, 2, 3, 4 – количество проходов)

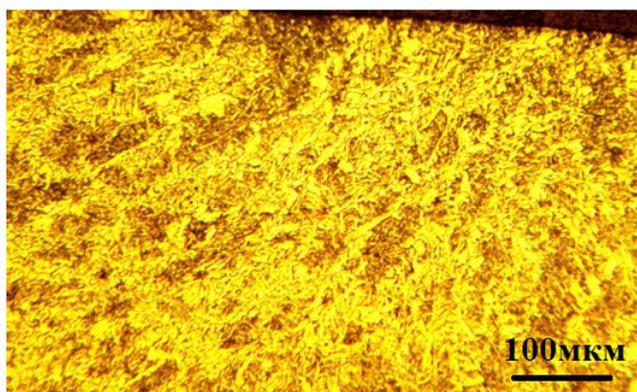
Fig. 4. Outside appearance of surfaced beads with and without machining:

а – 1, 2, 3 passes; *б* – the effect of machining on the geometric parameters of the surfaced bead depending on the number of passes (1, 2, 3, 4 – number of passes)

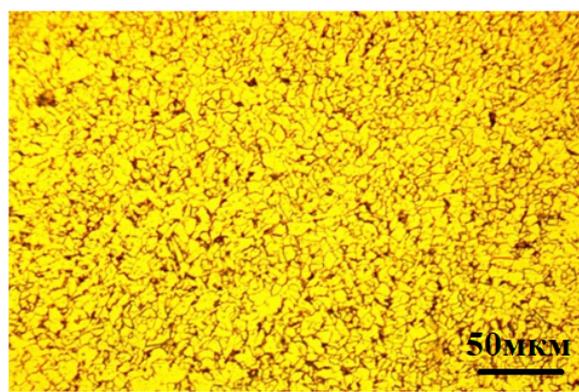


Рис. 5. Оценка качества сварного шва после механической обработки после каждого прохода

Fig. 5. Assessment of weld quality after machining after each pass



а



б

Рис. 6. Микроструктура металла в районе стыка после отпуска

Fig. 6. Microstructure of metal in the joint area after tempering

В табл. 1, 2 представлены результаты испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб. Видно, что механическая обработка повышает предел текучести и выносливости наплавленного металла по сравнению результатами без обработки. Значения ударной вязкости тоже отличаются, когда используется дополнительная механическая обработка. На фрактографиях изломов (рис. 7, б) видно, что в образцах без механической обработки присутствуют поры, что снижает значения ударной вязкости.

Результаты испытаний ультразвуковой обработки верхнего валика представлены на рис. 8. Следы пластической деформации видны на снимке микроструктуры (рис. 8, а). Время обработки влияет на значения микротвердости (рис. 8, б).

Результаты и их обсуждение

Согласно многочисленным работам, посвященным аддитивному производству с использованием дуговой сварки (WAAM) [2–10, 18–28], для получения превосходного качества наплавленного металла без каких-либо дефектов необходим тщательный выбор и реализация комбинации параметров процесса, таких как диаметр проволоки, скорость подачи проволоки, скорость перемещения, сварочное напряжение, сварочный ток, расстояние от сопла до изделия, угол горелки защитного газа и шаговое расстояние. Основная проблема технологии WAAM заключается в решении вопроса о том, следует ли увеличить скорость осаждения наплавленного металла или уменьшить распределение подвода

Таблица 1

Table 1

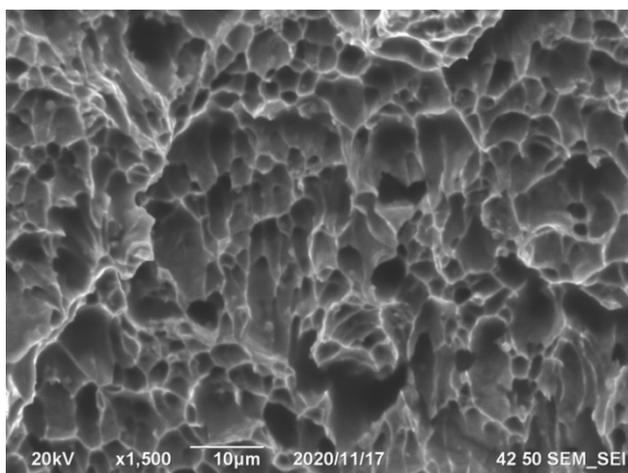
Результаты испытаний на статическое растяжение

Results of static tensile tests

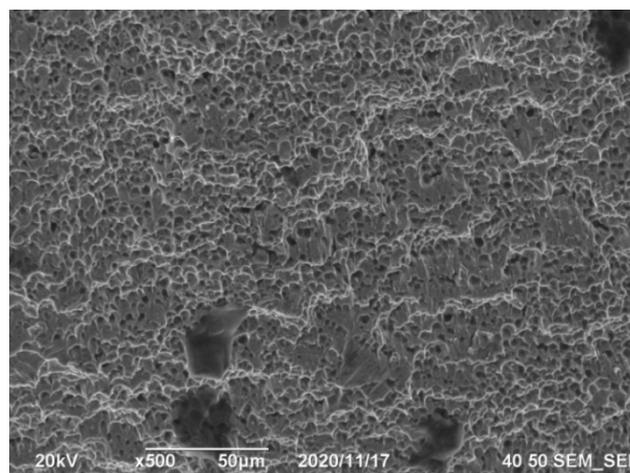
Клеймо (номер) образца / Specimen identification mark	Температура испытаний, °C / Test temperature, °C	Предел текучести, σ_T ($\sigma_{0.2}$) МПа / Yield strength, σ_y ($\sigma_{0.2}$) МПа	Временное сопротивление, σ_B , МПа / Ultimate strength, σ_u , МПа	Относительное удлинение, δ_5 (δ_{10}), % / Relative elongation, δ_5 (δ_{10}), %
1	20	364; 356; 361	474; 479; 481	16,75; 17,01; 16,82
2 с механ. обработкой	20	404; 410; 412	518; 522; 527	33,25; 33,01; 32,48
Сталь 09Г2С (ГОСТ)		265	430	21
Сталь 09Г2С Факт	20	275; 270; 278	435; 431; 440	22,01; 22,12; 22,34

Результаты испытаний на ударный изгиб
Results of impact bending tests

Клеймо (номер) образца / Specimen identification mark	Температура испытаний, °С / Test temperature, °С	Геометрические размеры образца / Geometric dimensions of the specimen			Работа разрушения (KU), кг/см / Work of fracture (KU), kg/cm	Ударная вязкость (KCU), Дж/см ² / Impact strength, (KCU), J/cm ²	Примечание / Note
		Ширина, мм / Width, mm	Высота, мм (в месте нанесения надреза) / Height, mm (at the point of incision)	Площадь поперечного сечения, см ² / Cross-sectional area, cm ²			
4	20	9,95	7,94	0,790	15,6	183,5	Наплавка
5	20	9,94	7,9	0,785	14,8	194,7	
6	20	10,01	7,92	0,792	21,5	255,7	Наплавка с механической обработкой
7	20	9,96	7,95	0,791	21,2	268,3	
Сталь 09Г2С (ГОСТ)	20					Не менее 59	
Сталь 09Г2С (Факт)	20					115	



а



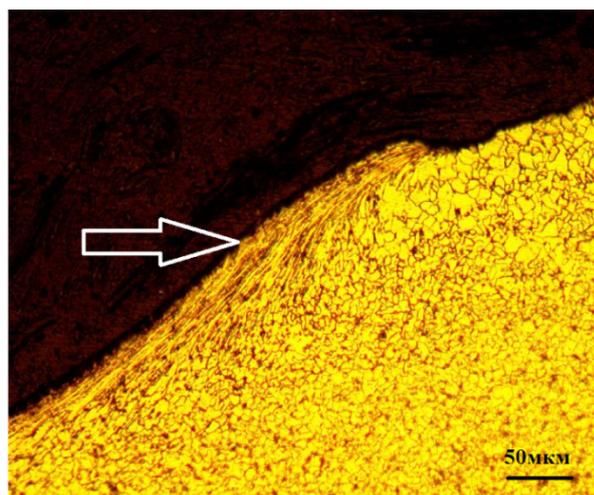
б

Рис. 7. Фрактография изломов с механической обработкой (а) и без нее (б)

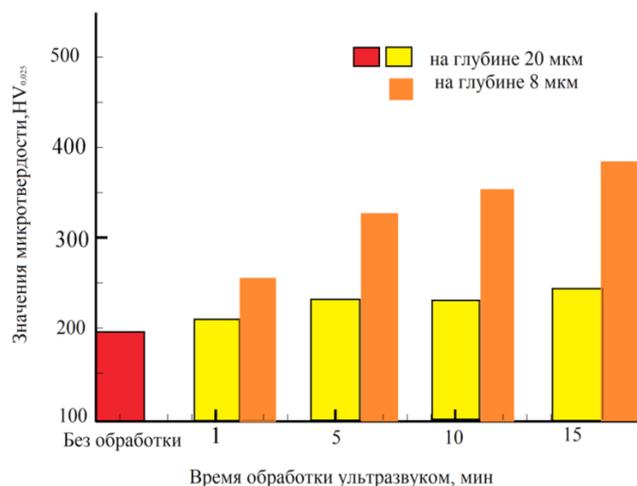
Fig. 7. Fracture analysis of specimens with machining (a) and without (b)

тепла. Это обусловлено тем, что скорость подачи проволоки тесно связана с необходимым подводом тепла [15–20] для ее расплавления. В наших экспериментах мы установили, что оптимальным показателем является диапазон

скоростей подачи проволоки 5...6 м/мин. В то же время мы видим, что при таких параметрах возникает еще один фактор, который необходимо учитывать, – пористость валика наплавки (см. рис. 2).



a



б

Рис. 8. Результаты ультразвукового упрочнения верхнего валика (а) и распределение твердости в поверхностном слое (б)

Fig. 8. Results of ultrasonic hardening of the top bead (a) and hardness distribution in the surface layer (b)

Известно, что газовая пористость является типичным дефектом, который возникает в процессе WAAM и должен быть устранен, поскольку он отрицательно влияет на механические свойства [23, 24]. Первоначально газовая пористость приводит к снижению механической прочности детали из-за повреждения от образования микротрещин. Кроме того, она часто приводит к тому, что осажденный слой имеет худшие усталостные свойства из-за пространственного распределения различных по форме и размеру структур [24].

Другим фактором, способствующим образованию пористости в слоистой структуре, является преобладание поверхностных загрязнителей в сырье, таких как влага, примеси и жир. Газовые поры обычно захватываются в самом верхнем слое зоны сплавления и распределяются по направлению к верхней части затвердевшей расплавленной ванны. Когда тонкие оксидные пленки быстро образуются на поверхности расплавленной ванны, они легко поглощают молекулярный водород и влагу из воздуха, что затем увеличивает количество водорода, присутствующего в верхней части каждого слоя. В результате обычно больше захваченного водорода и мелких микропор находится в зоне линии сплавления каждого слоя; они могут расти и объединяться в более крупные поры при воздействии высоких температур. Следовательно, более крупные поры часто наблюдаются вдоль зоны линии

сплавления между слоями. Пористость является одним из наиболее распространенных и нежелательных дефектов, который сильно ухудшает такие свойства сварных швов, как прочность и усталость.

Результаты нашего исследования показывают, что скорость потока защитного газа влияет на качество детали. Увеличение скорости потока газа снижает пористость в пределах исследуемого диапазона. Испытания трека одиночного сканирования, проведенные в исследовании [24], показывают, что даже при треках одиночного сканирования геометрия ванны расплава существенно зависит от условий потока защитного газа. В наших экспериментах (рис. 3) видно, что увеличение расхода защитного газа в пределах 8...14 л/мин позволяет снизить пористость в наплавленном металле практически до нуля. Поры, захваченные газом, имеют сферическую форму (рис. 3). Поры развиваются в течение всего времени процесса из-за захвата газа, пересыщения растворенных газов и химической реакции внутри расплавленной ванны, что приводит к образованию газообразных продуктов [23, 24]. Когда равновесное давление газа превышает сумму его гидростатического, атмосферного и капиллярного давлений, существует большая вероятность зарождения запертых газовых дырок. Зарождение пор приводит к вакансиям [18, 21], позволяя пересыщенным газам проникать в расплавленную ванну. Когда происходит бы-

строе охлаждение, места зарождения пор могут быть захвачены расплавленной ванной. С другой стороны, более медленные скорости охлаждения позволяют этим порам увеличиваться и иногда объединяться с соседними порами. В дальнейшем предложенное нами механическое шлифование позволяет еще больше снизить пористость металла за счет удаления дефектного слоя после наплавки, а также за счет удаления окисленного металла (рис. 4, 5).

В наших экспериментах зафиксировано, что скорость подачи проволоки влияет на характеристики наплавленного валика, включая высоту шва, ширину шва и угол контакта (рис. 4, б). Влияние скорости подачи проволоки на ширину шва сложно контролировать. Первоначально ширина нанесенного валика достигает максимального значения, но затем начинает уменьшаться по мере увеличения скорости подачи проволоки. Это связано с тем, что угол контакта продолжает увеличиваться со скоростью подачи проволоки, поэтому недостаточное смачивание оказывает отрицательное воздействие на валик наплавки. Ток и напряжение дуги являются другими важными элементами в процессе оптимизации WAAM. Это основные параметры управления процессом, которые регулируют количество подаваемого и рассеиваемого тепла, тем самым влияя на осаждение сварного шва. Важно предотвратить неравномерное осаждение валиков и плохую шероховатость поверхности. Кроме того, чрезмерный приток тепла может привести к повторному расплавлению ранее осажденных слоев, что отрицательно скажется на микроструктуре, размерах валика и его механических характеристиках. Важно оптимизировать ток и напряжение для повышения общей эффективности процесса. Это позволяет получить оптимальное количество тепла, необходимое для расплавления металлов в процессе WAAM. Тем самым минимизируются дефекты, такие как волнистая морфология поверхности, неравномерные отложения слоев и время, необходимое для последующей обработки.

Микроструктура материала наплавленных валиков, показанная на рис. 6, состоит из полигонального феррита (PF) и межзеренного пластинчатого перлита (P), что согласуется с работами других авторов по WAAM с низкоуглеродистыми проволоками [25]. Поэтому ана-

лиз размера зерна был выполнен на материале WAAM на основе микрофотографий (рис. 6, б). Размер зерна составил 25...35 мкм по сравнению с традиционной сваркой проволокой Св-08Г2С [24, 25]. Размер зерна обычно увеличивается по мере роста валиков с увеличением расстояния от основной пластины; это происходит из-за более медленного охлаждения вдали от пластины из-за уменьшающегося влияния эффекта теплоотвода [3–5, 22].

В WAAM затвердевание представляет собой серьезную проблему обработки материалов из-за продвижения микроструктуры, содержащей крупные столбчатые зерна.

Механические свойства наплавленных валиков представлены в табл. 1. Видно, что дополнительная механическая обработка каждого валика повышает механические свойства.

В табл. 2 представлены результаты испытаний на ударную вязкость образцов. Значения ударной вязкости с дополнительной механической обработкой выше благодаря устранению пористости наплавленного металла (рис. 7).

Результаты ультразвукового упрочнения последнего наплавленного слоя показали (рис. 8), что оно может сгладить профиль вершины шва, улучшить его микроструктуру, повысить микротвердость и ввести полезное сжимающее остаточное напряжение в поверхностный слой. Известно, что дополнительная обработка сварных швов позволяет создать сжимающие напряжения в поверхностном слое и тем самым повысить усталостную прочность [28, 29]. В работе [28] показано, что остаточное сжимающее напряжение было создано в области ультразвукового воздействия на глубине 1,5...1,7 мм и ширине 15 мм.

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что использование промежуточной операции механической обработки наплавленного валика повышает качество металла, а финишная операция ультразвуковой обработки верхнего валика (закрывающего процесс аддитивного выращивания) увеличивает твердость поверхностного слоя. Согласно результатам исследований [28, 29] установлено, что ультразвуковая обработка сварных швов и наплавленных валиков снижает количественные значения технологических остаточных напряжений. В наших дальнейших исследованиях

мы продолжим исследование по этому вопросу с целью уточнения оптимальных параметров обработки.

Заключение

1. Установлена зависимость между геометрическими размерами наплавочных валиков и пористостью в металле с использованием механической обработки между проходами и без. Показано, что металл, сформированный новым комбинированным процессом WAAM, обладает более высоким комплексом механических свойств по сравнению с металлом, получаемым по традиционной технологии WAAM.

2. Установлено, что значения предела текучести и предела прочности на растяжение металла, сформированного комбинированным процессом WAAM, на 15–30 % выше значений, получаемых традиционным процессом WAAM. Значения ударной вязкости при испытаниях на ударный изгиб металла, сформированного комбинированным процессом WAAM, выше на 15–25 %, чем значения, получаемые традиционным процессом WAAM.

3. Показано, что ультразвуковое упрочнение последнего наплавленного слоя оказывает положительное воздействие за счет повышения микротвердости поверхностного слоя металла и создания в нем сжимающих напряжений.

Список литературы

1. ISO/ASTM 52900. Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary / F42 Committee. – West Conshohocken, PA, 2021. – URL: <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm> (accessed: 23.10.2024).

2. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // *International Materials Reviews*. – 2012. – Vol. 57 (3). – P. 133–164. – DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.

3. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges / T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T. Nguyen, D. Hui // *Composites, Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

4. Song Y.A., Park S. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process // *Journal of Materials Processing*

Technology. – 2006. – Vol. 171 (1). – P. 35–40. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.062.

5. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

6. Ahn D.G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2021. – Vol. 8 (2). – P. 703–742. – DOI: 10.1007/s40684-020-00302-7.

7. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 84. – P. 1001–1029. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.

8. A review of various materials for additive manufacturing: recent trends and processing issues / M. Srivastava, S. Rathee, V. Patel, A. Kumar, P.G. Koppad // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 21. – P. 2612–2641. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.015.

9. Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments / J.M. Flynn, A. Shokrani, S.T. Newman, V. Dhokia // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 101. – P. 79–101. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007.

10. Multi-material additive manufacturing: a systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials / A. Nazir, O. Gokcekaya, K.M. Billah, O. Ertugrul, J. Jiang, J. Sun, S. Hussain // *Materials & Design*. – 2023. – Vol. 226. – P. 111661. – DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111661.

11. New trends in 4D printing: a critical review / S. Vatanparast, A. Boschetto, L. Bottini, P. Gaudenzi // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13 (13). – P. 7744. – DOI: 10.3390/app13137744.

12. Study of the effect of nanomodifiers from silicon production wastes on morphological form of gray cast iron graphites / A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.D. Kolosov, Y.I. Karlina // *CIS Iron and Steel Review*. – 2021. – Vol. 21. – P. 64–69. – DOI: 10.17580/cisir.2021.01.11.

13. Bead shape control in wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti-6Al-4V / C. Wang, W. Suder, J. Ding, S. Williams // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 68. – P. 1849–1859. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.07.009.

14. A review of WAAM for steel construction – manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions / S.I. Evans, J. Wang, J. Qin, Y. He, P. Shepherd, J. Ding // *Structures*. – 2022. – Vol. 44. – P. 1506–1522. – DOI: 10.1016/j.istruc.2022.08.084.

15. *Kawalkar R., Dubey H.K., Lokhande S.P.* Wire arc additive manufacturing: a brief review on advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys // *Materials Today: Proceedings.* – 2022. – Vol. 50. – P. 1971–1978. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.329.
16. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // *Metals.* – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.
17. Recent advances on high-entropy alloys for 3D printing / C. Han, Q. Fang, Y. Shi, S.B. Tor, C.K. Chua, K. Zhou // *Advanced Materials.* – 2020. – Vol. 32 (26). – P. 1903855. – DOI: 10.1002/adma.201903855.
18. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment / M. Diao, C. Guo, Q. Sun, F. Jiang, L. Li, J. Li, D. Xu, C. Liu, H. Song // *Materials Science and Engineering: A.* – 2022. – Vol. 857. – P. 144044. – DOI: 10.1016/j.msea.2022.144044.
19. Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes / C. Hodonou, M. Balazinski, M. Brochu, C. Mascle // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2019. – Vol. 103. – P. 1509–1517. – DOI: 10.1007/s00170-019-03613-5.
20. Process selection charts based on economy and environment: subtractive or additive manufacturing to produce structural components of aircraft / C. Hodonou, O. Kerbrat, M. Balazinski, M. Brochu // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing.* – 2020. – Vol. 14. – P. 861–873. – DOI: 10.1007/s12008-020-00663-y.
21. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels / C. Huang, P. Kyvelou, R. Zhang, T.B. Britton, L. Gardner // *Materials & Design.* – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110544.
22. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM) / A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, V.V. Kondratyev, A.I. Karlina // *CIS Iron and Steel Review.* – 2021. – Vol. 22. – P. 66–71. – DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.12.
23. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components / A. Ermakova, A. Mehmanparast, S. Ganguly, N. Razavi, F. Berto // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* – 2020. – Vol. 109. – P. 102685. – DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102685.
24. Study of impact strength of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM) / A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, V.V. Kondratyev, Yu.I. Karlina // *CIS Iron and Steel Review.* – 2022. – Vol. 24. – P. 67–73. – DOI: 10.17580/cisirs.2022.02.10.
25. Porosity reduction in metal with hybrid wire and arc additive manufacturing technology (WAAM) / A.I. Karlina, V.V. Kondratyev, A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, E.A. Yamshchikova // *CIS Iron and Steel Review.* – 2024. – Vol. 27. – P. 91–95. – DOI: 10.17580/cisirs.2024.01.14.
26. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material / P. Kyvelou, H. Slack, D.D. Mountanou, M.A. Wadee, T.B. Britton, C. Buchanan, L. Gardner // *Materials & Design.* – 2020. – Vol. 192. – P. 108675. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108675.
27. Microstructure and mechanical properties of medium carbon steel deposits obtained via wire and arc additive manufacturing using metal-cored wire / Z. Lin, C. Goulas, W. Ya, M.J.M. Hermans // *Metals.* – 2019. – Vol. 9 (6). – P. 673. – DOI: 10.3390/met9060673.
28. Review: The metal additive-manufacturing technology of the ultrasonic-assisted wire-and-arc additive-manufacturing process / Y. Cao, Y. Zhang, W. Ming, W. He, J. Ma // *Metals.* – 2023. – Vol. 13. – P. 398. – DOI: 10.3390/met13020398.
29. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review / S. Kumar, C.S. Wu, G.K. Padhy, W. Ding // *Journal of Manufacturing Processes.* – 2017. – Vol. 26. – P. 295–322. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027.
30. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off / M.G. Shtayger, A.E. Balanovskiy, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina, Yu.I. Karlina A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012190. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.
31. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, A.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012138. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.
32. Wire and arc additive manufactured steel: tensile and wear properties / C.V. Haden, G. Zeng, F.M. Carter III, C. Ruhl, B.A. Krick, D.G. Harlow // *Additive Manufacturing.* – 2017. – Vol. 16. – P. 115–123. – DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.010.
33. Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components / P. Dirisu, S. Ganguly, A. Mehmanparast, F. Martina, S. Williams // *Mater-*

als Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 765. – P. 138285. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138285.

34. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyskin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126 (1). – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

35. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / E.A. Efremkov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebea, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.

36. *Martyushev N.V., Skeebea V.Yu.* The method of quantitative automatic metallographic analysis // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803 (1). – P. 012094. – DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.

37. *Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V.* Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194 (2). – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

38. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeebea, P.Yu. Skeebea, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87 (8). – P. 082061. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

39. *Скиба В.Ю.* Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

40. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях

гибридной технологии электрохимической обработки коррозионностойких сталей / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

41. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebea, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

42. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, V.V. Kondrat'ev, V. Van Huy, A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012013. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.

43. Capability enhancement of production of activating fluxes for arc welding using ultradispersed products of silicon waste processing / N.N. Ivanchik, A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, I.A. Sysoev, A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012035. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012035.

44. *Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A.* Studying the microstructure, phase composition, and wear resistance of alloyed layers after laser surface melting of low-carbon steel 20 // Metallurgist. – 2024. – Vol. 68. – P. 757–766. – DOI: 10.1007/s11015-024-01782-7.

45. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting / A.I. Karlina, Y.I. Karlina, V.V. Kondratiev, R.V. Kononenko, A.D. Breki // Crystals. – 2023. – Vol. 13 (12). – P. 1696. – DOI: 10.3390/cryst13121696.

Конфликт интересов

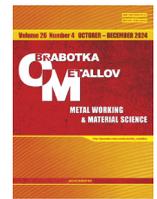
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Assessment of the quality and mechanical properties of metal layers from low-carbon steel obtained by the WAAM method with the use of additional using additional mechanical and ultrasonic processing

Yulia Karlina^{1, a, *}, Vladimir Konyukhov^{2, b}, Tatiana Oparina^{2, c}

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>, jul.karlina@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0001-9137-9404>, konyukhov_vyu@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>, martusina2@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 September 2024

Revised: 08 October 2024

Accepted: 17 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Additive Manufacturing

Wire and arc additive manufacturing

WAAM

Wire

Structure

Ultrasonic hardening

Hardness

Yield strength

Pores

Gas

ABSTRACT

Introduction. Additive manufacturing is a technology that enables three-dimensional (3D) components to be printed layer by layer according to digital models. Completely different from traditional manufacturing methods such as casting, forging, and machining, additive manufacturing is a near net shape manufacturing process that can greatly enhance design freedom and reduce manufacturing runtime. The material processing challenges in Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) are related to achieving performance metrics related to geometric, physical, and material properties. Tight tolerances and stringent surface integrity requirements cannot be achieved by utilizing stand-alone AM technologies. Therefore, WAAM parts typically require some post-processing to meet requirements related to surface finish, dimensional tolerances and mechanical properties. It is therefore not surprising that the integration of AM with post-processing technologies into single and multi-setup machining solutions, commonly referred to as hybrid AM, has become a very attractive proposition for industry. **The purpose of the work** is to evaluate the quality and mechanical properties of the resulting metal layers of mild steel by WAAM method using additional mechanical and ultrasonic processing. **Research Methods.** To conduct the experiments, a set of welding equipment was used — a single-phase inverter device *KEMPPi Kempomat 1701*, designed for welding with wire in shielding gases. A mixture of argon and carbon dioxide (80 % argon and 20 % CO₂) was used as a shielding gas. *SV-08G2S* (0.8 C-2 Mg-Si) wire was used as the surfacing material. A plate made of steel *St3* with overall dimensions 150×100×5 mm was used as a base for surfacing. The surface of the plate before surfacing was thoroughly cleaned from the layer of oxides, oil, rust and other contaminants. For this purpose mechanical cleaning of the surface was used with *BOSCH* abrasive wheel with a diameter of 125 mm diameter and a grit size of 120. Before surfacing the surface of the product was degreased with white spirit. The gas flow rate was set at 8 dm³/min. To select the optimal wire feed rate and volt-ampere characteristic, surfacing was performed at each adjustment step of wire feed rate, and voltage. Mechanical statistical tensile tests, chemical composition analysis and metallographic studies were also performed. **Results and Discussion.** Gas porosity is a typical defect that occurs during the WAAM process and should be eliminated because it adversely affects the mechanical properties. Initially, gas porosity leads to a reduction in the mechanical strength of the part due to damage from microcrack formation. In addition, it often causes the surfaced layer to have worse fatigue properties due to the spatial distribution of different shape and size structures. In our experiments we found that a wire feed speed range of 5–6 m/min is optimal. Increasing the flow rate of shielding gas in the range of 8–14 l/min allows reducing porosity in the surfaced metal to almost zero. The mechanical properties of the surfaced beads show that the average value of yield strength after machining is higher than that of unprocessed specimens. The data obtained from these experiments are in good agreement with those reported in the literature. The presented results can be used in real WAAM technological processes.

For citation: Karlina Yu.I., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Assessment of the quality and mechanical properties of metal layers from low-carbon steel obtained by the WAAM method with the use of additional using additional mechanical and ultrasonic processing. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 75–91. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-75-91. (In Russian).

* Corresponding author

Karlina Yulia I., Ph.D. (Engineering), Research Associate
National Research Moscow State Construction University,
Yaroslavskoe shosse, 26,
129337, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 914 879-85-05, e-mail: jul.karlina@gmail.com

References

1. ISO/ASTM 52900. *Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary*. F42 Committee. West Conshohocken, PA, 2021. Available at: <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm> (accessed 23.10.2024).
2. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57 (3), pp. 133–164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
3. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites, Part B: Engineering*, 2018, vol. 143, pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
4. Song Y.A., Park S. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 171 (1), pp. 35–40. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.062.
5. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 35, pp. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
6. Ahn D.G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, vol. 8 (2), pp. 703–742. DOI: 10.1007/s40684-020-00302-7.
7. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 84, pp. 1001–1029. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.
8. Srivastava M., Rathee S., Patel V., Kumar A., Koppad P.G. A review of various materials for additive manufacturing: recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 2612–2641. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.015.
9. Flynn J.M., Shokrani A., Newman S.T., Dhokia V. Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 101, pp. 79–101. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007.
10. Nazir A., Gokcekaya O., Billah K.M., Ertugrul O., Jiang J., Sun J., Hussain S. Multi-material additive manufacturing: a systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*, 2023, vol. 226, p. 111661. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111661.
11. Vatanparast S., Boschetto A., Bottini L., Gaudenzi P. New trends in 4D printing: a critical review. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (13), p. 7744. DOI: 10.3390/app13137744.
12. Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Kolosov A.D., Karlina Y.I. Study of the effect of nanomodifiers from silicon production wastes on morphological form of gray cast iron graphites. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 21, pp. 64–69. DOI: 10.17580/cisr.2021.01.11.
13. Wang C., Suder W., Ding J., Williams S. Bead shape control in wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, pp. 1849–1859. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.07.009.
14. Evans S.I., Wang J., Qin J., He Y., Shepherd P., Ding J. A review of WAAM for steel construction – manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions. *Structures*, 2022, vol. 44, pp. 1506–1522. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.08.084.
15. Kawalkar R., Dubey H.K., Lokhande S.P. Wire arc additive manufacturing: a brief review on advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 50, pp. 1971–1978. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.329.
16. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.
17. Han C., Fang Q., Shi Y., Tor S.B., Chua C.K., Zhou K. Recent advances on high-entropy alloys for 3D printing. *Advanced Materials*, 2020, vol. 32 (26), p. 1903855. DOI: 10.1002/adma.201903855.
18. Diao M., Guo C., Sun Q., Jiang F., Li L., Li J., Xu D., Liu C., Song H. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 857, p. 144044. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144044.
19. Hodonou C., Balazinski M., Brochu M., Mascle C. Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 1509–1517. DOI: 10.1007/s00170-019-03613-5.

20. Hodonou C., Kerbrat O., Balazinski M., Brochu M. Process selection charts based on economy and environment: subtractive or additive manufacturing to produce structural components of aircraft. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2020, vol. 14, pp. 861–873. DOI: 10.1007/s12008-020-00663-y.
21. Huang C., Kyvelou P., Zhang R., Britton T.B., Gardner L. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels. *Materials & Design*, 2022, vol. 216, p. 110544. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110544.
22. Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Kondratyev V.V., Karlina A.I. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 66–71. DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.12.
23. Ermakova A., Mehmanparast A., Ganguly S., Razavi N., Berto F. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, vol. 109, p. 102685. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102685.
24. Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Kondratyev V.V., Karlina Yu.I. Study of impact strength of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2022, vol. 24, pp. 67–73. DOI: 10.17580/cisirs.2022.02.10.
25. Karlina A.I., Kondratyev V.V., Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Yamshchikova E.A. Porosity reduction in metal with hybrid wire and arc additive manufacturing technology (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2024, vol. 27, pp. 91–95. DOI: 10.17580/cisirs.2024.01.14.
26. Kyvelou P., Slack H., Mountanou D.D., Wade M.A., Britton T.B., Buchanan C., Gardner L. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material. *Materials & Design*, 2020, vol. 192, p. 108675. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108675.
27. Lin Z., Goulas C., Ya W., Hermans M.J.M. Microstructure and mechanical properties of medium carbon steel deposits obtained via wire and arc additive manufacturing using metal-cored wire. *Metals*, 2019, vol. 9 (6), p. 673. DOI: 10.3390/met9060673.
28. Cao Y., Zhang Y., Ming W., He W., Ma J. Review: The metal additive-manufacturing technology of the ultrasonic-assisted wire-and-arc additive-manufacturing process. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 398. DOI: 10.3390/met13020398.
29. Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 26, pp. 295–322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027.
30. Shtayger M.G., Balanovskiy A.E., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina A.I., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012190. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.
31. Balanovskiy A.E., Shtayger M.G., Karlina A.I., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.
32. Haden C.V., Zeng G., Carter F.M., Ruhl C., Krick B.A., Harlow D.G. Wire and arc additive manufactured steel: tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 16, pp. 115–123. DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.010.
33. Dirisu P., Ganguly S., Mehmanparast A., Martina F., Williams S. Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 765, p. 138285. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138285.
34. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshkin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126 (1), p. 012016. DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.
35. Efremenkov E.A., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Grechneva M.V., Olisov A.V., Ens A.D. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (1), p. 5. DOI: 10.3390/app12010005.
36. Martyushev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803 (1), p. 012094. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.
37. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194 (2), p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.



38. Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Skeebe P.Yu., Khlebova I.V. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87 (8), p. 082061. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

39. Skeebe V.Yu. Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

40. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Issledovanie protsessa avtomaticheskogo upravleniya smenoi polyarnosti toka v usloviyakh gibridnoi tekhnologii elektrokhimicheskoi obrabotki korroziionostoikikh stalei [Investigation of the process of automatic control of current polarity reversal in the conditions of hybrid technology of electrochemical processing of corrosion-resistant steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

41. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264. DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

42. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Kondrat'ev V.V., Van Huy V., Karlina A.I. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.

43. Ivanchik N.N., Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Sysoev I.A., Karlina A.I. Capability enhancement of production of activating fluxes for arc welding using ultradispersed products of silicon waste processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012035.

44. Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A. Studying the microstructure, phase composition, and wear resistance of alloyed layers after laser surface melting of low-carbon steel 20. *Metallurgist*, 2024, vol. 68, p. 757–766. DOI: 10.1007/s11015-024-01782-7.

45. Karlina A.I., Karlina Y.I., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Breki A.D. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting. *Crystals*, 2023, vol. 13 (12), p. 1696. DOI: 10.3390/cryst13121696.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).