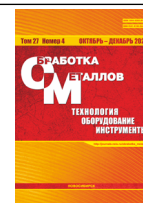




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование анизотропии свойств синтезированных металлических материалов WAAM-методом

Андрей Киричек ^{1, a}, Дмитрий Соловьев ^{2, b, *}, Александр Яшин ^{2, c}, Сергей Силантьев ^{2, d},
Артемий Аборкин ^{2, e}, Максим Новиков ^{1, f}

¹ Брянский государственный технический университет, бул. 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Россия

² Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>, avkbgtu@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>, murstin@yandex.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-3186-1300>, yashin2102@yandex.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-3524-385X>, ppdsio@yandex.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0003-4979-7164>, aborkin@vlsu.ru; ^f <https://orcid.org/0009-0000-7552-312X>, novikovmax14@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791

История статьи:

Поступила: 27 июля 2025

Рецензирование: 02 августа 2025

Принята к печати: 02 сентября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Аддитивные технологии

WAAM

Анизотропия

Прочность

Твердость

Ударная вязкость

Финансирование

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивные технологии, в частности WAAM-метод, позволяют быстро и экономично производить сложные металлические изделия. Однако при этом возникает анизотропия физико-механических свойств синтезированных материалов, которую необходимо учитывать при их дальнейшей эксплуатации. **Цель работы.** Количественная оценка анизотропии свойств материалов, полученных WAAM-методом, для повышения надежности применения изделий в ответственных конструкциях. **Методика исследования.** Экспериментальное создание образцов из низкоуглеродистой легированной стали 08Г2С, нержавеющей стали 04Х19Н9 и алюминиевого сплава АМг3 и последующее их исследование на прочность, ударную вязкость и твердость. Результаты приведены в сравнении с материалами в исходном состоянии, что позволяет рассмотреть относительную анизотропию по каждому из параметров. **Результаты и обсуждение.** Исследование показало, что для стали 08Г2С предел прочности образцов, полученных WAAM-методом, почти не отличается по направлениям, что свидетельствует о высокой изотропии (относительная анизотропия составила 1,3 %). У относительного удлинения наблюдается относительная анизотропия 33 %, у ударной вязкости 21 %, у твердости 16 %. Сталь 04Х19Н9 проявляет относительную анизотропию по пределу прочности 15,1 %, по относительному удлинению 244 %, по ударной вязкости 33 %, по твердости 4 %. У алюминиевого сплава АМг3 из-за «вертикального» направления относительная анизотропия предела прочности составила 83,6 %, а относительного удлинения – 513 %. Для ударной вязкости в зависимости от места вырезки образцов относительная анизотропия изменяется незначительно (28 %), по твердости материал можно считать изотропным. В целом наименьшая относительная анизотропия наблюдается по твердости, а наибольшая – по относительному удлинению.

Для цитирования: Исследование анизотропии свойств синтезированных металлических материалов WAAM-методом / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.В. Яшин, С.А. Силантьев, А.В. Аборкин, М.А. Новиков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 206–220. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-206-220.

Введение

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) открывают новые возможности для изготовления сложных металлических изделий. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) сочетает преимущества сварочных технологий и аддитивного производства. WAAM-метод использу-

*Адрес для переписки

Соловьев Дмитрий Львович, д.т.н., профессор
Владимирский государственный университет
им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
ул. Горького, 87,
600000, г. Владимир, Россия
Тел.: +7 920 900-46-42, e-mail: murstin@yandex.ru

ет стандартную сварочную дугу и проволоочный присадочный материал [1]. В процессе WAAM электрическая дуга плавит проволоку, которая затем оседает послойно, формируя часть детали. Преимуществами применения WAAM-метода являются высокая скорость наплавки, возможность изготовления крупногабаритных деталей и относительная экономичность [2]. Однако, как и многие АТ, основанные на послойном осаждении материала, технология WAAM обуславливает формирование анизотропии (различия по направлениям) физико-механических свойств синтезируемых материалов [3, 4]. Это достаточно важно для практического применения указанной технологии при создании ответственных сложно нагруженных деталей.

Анизотропия в материалах, полученных WAAM-методом, возникает вследствие специфики термодинамических условий процесса. Одним из таких условий является направленное тепловложение, т. е. когда дуга последовательно расплавляет проволоку, создавая локальные объемы расплава (сварочные ванны), которые быстро затвердевают. Это приводит к формированию ярко выраженной столбчато-дендритной микроструктуры [5], ориентированной обычно вверх от подложки или предыдущего слоя и радиально от центра валика [6]. Другим условием являются особенности процесса послойного наплавки, когда создается слоистая макро-структура с границами между валиками и слоями. Эти границы могут быть зонами с измененным химическим составом, размерами зерен, плотностью дефектов и остаточными напряжениями. Вдоль границ валиков или слоев возникающие дефекты (поры и непровары) могут иметь вытянутую форму и предпочтительную ориентацию [7]. При наплавке синтезированный материал испытывает сложные термические циклы, поскольку каждый вновь наплавляемый слой подвергается нижележащие слои многократному нагреву и охлаждению, что приводит к рекристаллизации, росту зерен, фазовым превращениям в ранее отложенных слоях, а также к развитию значительных остаточных напряжений из-за неравномерного нагрева и охлаждения [8].

Исследования показали, что при использовании WAAM-технологии для различных сплавов механические свойства получаемых материалов, такие как предел прочности и относительное

удлинение, часто зависят от направления изготовления. Как правило, эти характеристики оказываются выше в горизонтальном направлении по сравнению с вертикальным [9], причем разница варьируется в зависимости от материала и может достигать значительных величин [10–12]. Однако существуют технологические режимы, позволяющие обеспечить относительно изотропное поведение [13]. Кроме того, для некоторых сплавов, например магниевого AZ31, наблюдается противоположная тенденция: лучшие механические свойства выявляются в вертикальном направлении [14], что также указывает на выраженную анизотропию структуры и свойств изделий, полученных WAAM-методом.

Возможность направления свойств материала в нужную сторону позволяет оптимизировать изделие и делать его эксплуатационные свойства более эффективными.

Для управления анизотропией свойств синтезируемого материала WAAM-методом существует целый комплекс мероприятий:

- подбор режимов с пониженным тепловложением [15];
- использование импульсных или СМТ-режимов (Cold Metal Transfer) для уменьшения объема сварочной ванны и термического воздействия [16];
- применение стратегий, меняющих направление наплавки для «разбивания» столбчатой структуры [17];
- предварительный и сопутствующий подогрев подложки [18];
- термическая обработка для снятия напряжений, выравнивания структуры и достижения требуемого комплекса свойств [19];
- применение поверхностного пластического деформирования после синтеза (дробеструйная обработка) или во время синтеза (ультразвуковая обработка, накатывание роликом, ударная проковка, волновое деформационное упрочнение) каждого или нескольких слоев для измельчения зерна и разрушения столбчатой структуры, снижения пористости, а также для создания сжимающих остаточных напряжений на поверхности [20].

Целью настоящей работы является количественная оценка анизотропии механических свойств материалов, синтезированных методом WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Для

достижения поставленной цели в процессе исследования решались следующие **задачи**:

- синтез методом WAAM образцов первого порядка из трех широко применяемых в машиностроении материалов с существенно отличающимися технологическими и механическими свойствами: низкоуглеродистой легированной стали 08Г2С, нержавеющей стали 04Х19Н9 и алюминиевого сплава АМг3;

- вырезка из синтезированных образцов первого порядка для оценки механических свойств материала экспериментальных образцов второго порядка, ориентированных относительно направления движения подачи фидстока и направления синтеза;

- исследование механических свойств синтезированного материала в нескольких направлениях: предела прочности при растяжении, относительного удлинения, ударной вязкости и твердости;

- сопоставление механических свойств синтезированного материала с характеристиками исходного материала (проката), определение относительной анизотропии по каждому параметру и анализ зависимости уровня анизотропии от марки материала, направления синтеза и подачи фидстока.

Методика исследований

Для прогнозирования надежности и оптимизации процесса достижения изотропных или контролируемо-анизотропных свойств необходимо исследование анизотропии механических свойств материалов, полученных WAAM-методом. Для этого были проанализированы предел прочности, относительное удлинение при растяжении, ударная вязкость и твердость различных материалов с существенно отличающимися технологическими и механическими свойствами, которые активно используются в АТ: низкоуглеродистых сталей, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов. Для анализа были выбраны конкретные образцы из каждой категории: легированная низкоуглеродистая сталь 08Г2С, нержавеющая сталь 04Х19Н9 и алюминиевый сплав АМг3.

Предложено понятие «относительная анизотропия», которое позволяет количественно оценить не только разброс свойств по направлениям

внутри синтезированного WAAM-методом материала (классическая анизотропия), но и отклонение этих свойств в характерных направлениях от известных значений, приведенных в справочной литературе для проката из материала той же марки (исходного материала). Это позволяет:

- оценить влияние направления WAAM-синтеза и направления движения фидстока на однородность свойств материала в объеме синтезированного изделия и на отклонение свойств материала синтезированного образца от свойств проката из материала той же марки, а также степень неоднородности отклонений в зависимости от характерного направления в синтезированном объеме;

- выявить «критические» направления, где отклонение свойств от исходного материала наиболее значительно;

- дать интегральную оценку пригодности материала и технологии для ответственных применений, когда, например, высокое значение относительной анизотропии в каком-либо направлении по ключевому свойству сигнализирует о потенциальной слабости конструкции в этом направлении.

Относительная анизотропия предела прочности синтезированных образцов по сравнению с пределом прочности материала в исходном состоянии оценивалась как

$$\Delta\sigma_B = \frac{\sigma_{B0} - \sigma_B}{\sigma_B} \cdot 100 \%,$$

где σ_{B0} – значение предела прочности материала в исходном состоянии, МПа; σ_B – измеренное значение у синтезированных образцов.

Относительная анизотропия относительного удлинения синтезированных образцов по сравнению с относительным удлинением материала в исходном состоянии оценивалась как

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot 100 \%,$$

где ε_0 – значение относительного удлинения материала в исходном состоянии, %; ε – измеренное значение у синтезированных образцов.

Относительная анизотропия ударной вязкости синтезированных образцов по сравнению с ударной вязкостью материала в исходном состоянии оценивалась как

$$\Delta KCU = \frac{KCU_0 - KCU}{KCU} \cdot 100 \%,$$

где KCU_0 – значение ударной вязкости материала в исходном состоянии, %; KCU – измеренное значение у синтезированных образцов.

Относительная анизотропия твердости синтезированных образцов по сравнению с твердостью материала в исходном состоянии оценивалась как

$$\Delta HV = \frac{HV_0 - HV}{HV} \cdot 100 \%,$$

где HV_0 – значение твердости материала в исходном состоянии, %; HV – измеренное значение у синтезированных образцов.

Если величины $\Delta\sigma_b$, $\Delta\epsilon$, ΔKCU , ΔHV имеют положительные значения, то соответствующие характеристики (σ_b , ϵ , KCU , HV) материала, синтезированного WAAM-методом, хуже, чем у исходного материала. Если значения отрицательные, то характеристики WAAM-материала лучше. Общая относительная анизотропия образца первого порядка оценивалась как разница между максимальным и минимальным значением относительной анизотропии образцов второго порядка.

Для проведения исследований WAAM-методом синтезировались образцы первого порядка в форме призмы, из которых вырезались образцы второго порядка для испытаний на прочность при растяжении по ГОСТ 1497–84, на

ударную вязкость по ГОСТ 9454–78, а также для измерения твердости по Виккерсу. Для проведения испытаний на прочность и ударную вязкость образцы были расположены в синтезированных призмах согласно схемам (рис. 1, 2).

Образцы второго порядка изготавливались в вертикальном направлении (направлении синтеза) и трех горизонтальных ориентациях: параллельно направлению движения подачи фидстока в процессе синтеза, перпендикулярно и под углом 45° . Измерение твердости осуществлялось в трех плоскостях: вертикально, параллельно и перпендикулярно направлению движения подачи фидстока в процессе синтеза (рис. 3).

Измерения твердости проводились с шагом 0,3 мм по базе 10 мм. В каждом направлении выполнялось не менее трех параллельных серий таких измерений. Для каждого уровня (состоящего минимум из трех точек замера) рассчитывалось среднее значение твердости. Высота каждого синтезируемого слоя для сталей 08Г2С и 04Х19Н9 составляла 2,2 мм, для алюминиевого сплава АМг3 – 2,5 мм.

Режимы синтеза выбирались исходя из условий получения качественных образцов с минимальным количеством пор (табл. 1) [21].

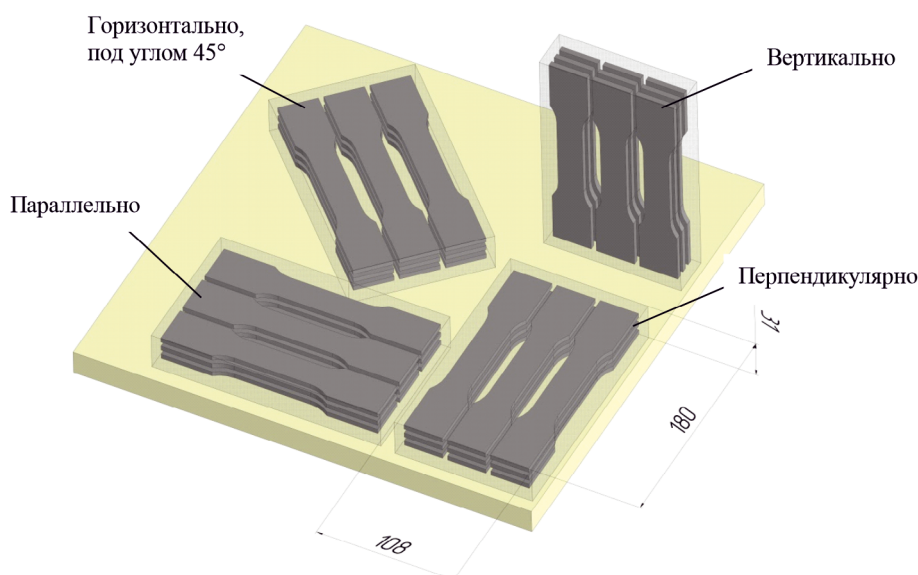


Рис. 1. Условное расположение синтезируемых образцов на подложке (направление подачи фидстока для всех образцов одинаковое)

Fig. 1. Schematic representation of synthesized samples arrangement on the substrate (welding torch direction consistent for all samples)

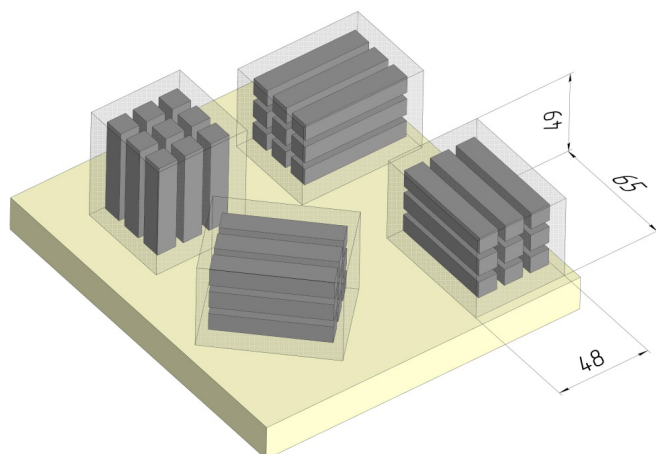


Рис. 2. Условное расположение синтезируемых образцов для испытаний на ударную вязкость на подложке (направление подачи фидстока для всех образцов одинаковое)

Fig. 2. Schematic representation of synthesized sample arrangement for impact toughness testing on the substrate (welding torch direction consistent for all samples)

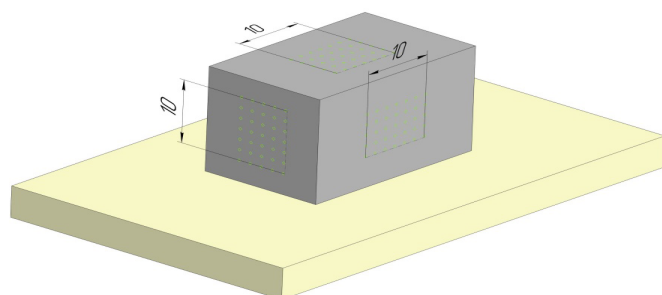


Рис. 3. Схема измерения твердости на синтезированных образцах

Fig. 3. Hardness measurement scheme for synthesized samples

Результаты и их обсуждение

Установлено, что для стали 08Г2С предел прочности образцов, полученных WAAM-методом, практически не отличается во всех направлениях расположения, он равен 486...492 МПа (табл. 2) и практически не уступает пределу прочности проката в состоянии поставки (490...510 МПа). Относительная анизотропия предела прочности составила 1,3 % (рис. 4, а). По этому параметру синтезированный материал можно считать изотропным. Относительное удлинение при расположении образца вертикально немного ниже по сравнению с горизонтальным расположением образца, соответственно 12 и 13 %, и существенно уступает значениям относительного удлинения проката из данного материала в состоянии поставки (20–30 %). Относительная анизотропия относительного удлинения составила 33 % (рис. 4, б).

Наибольшее значение ударной вязкости 192 Дж/см² зафиксировано на образцах с направлением вырезки «горизонтально, под углом 45°», наименьшее – при перпендикулярном направлении вырезки (154 Дж/см²) (табл. 2), они превосходят ударную вязкость проката из данного материала в состоянии поставки (130...162 Дж/см²). Относительная анизотропия ударной вязкости составила не более 21 % (рис. 4, в).

Наибольшее среднее значение твердости 212 HV зафиксировано в вертикальном направлении, наименьшее – в перпендикулярном (179 HV), среднее значение твердости в параллельном направлении составило 202 HV (табл. 2).

Таблица 1
Table 1

Режимы синтеза Synthesis parameters

Параметр / Parameter	Материал / Material		
	08Г2С / 0,08C-2Mn-1Si	04X19Н9 / 0,04C-19Cr-9Ni	АМг3 / 97Al-3Mg
Сила тока, А / Current strength, A	175	170	125
Напряжение, В / Voltage, V	19,6	18,3	18,7
Скорость подачи проволоки, м/мин / Wire feed rate, m/min	5,64	6,37	7,3
Скорость подачи фидстока, мм/мин / Feedstock feed rate, mm/min	1000	1000	1000
Диаметр проволоки, мм / Wire diameter, mm	1,2	1,2	1,2

Результаты исследования механических свойств синтезированного материала

Mechanical properties of synthesized materials

Материал / Material	Свойство / Property	Расположение образца второго порядка в призме / Second-order sample position within the prism	Направление вырезки образцов относительно направления движения подачи фидстока / Sample cutoff direction relative to feedstock travel direction	Исходный материал (прокат) / Source mate- rial (rolled stock)	Материал после WAAM- синтеза / WAAM-fabri- cated material	Относительная анизотропия, % / Relative anisotropy, %
08Г2С / 0.08C-2Mn- 1Si	σ_b , МПа / σ_u , МПа	Вертикально / Vertically	–	500	486	2,9
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		490	2,0
			Перпендикулярно / Perpendicular		492	1,6
			Параллельно / Parallel		487	2,7
	ε , % / ε , %	Вертикально / Vertically	–	25	10,8	131
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		12,6	98
			Перпендикулярно / Perpendicular		12,6	98
			Параллельно / Parallel		12,6	98
	KCU , Дж/см ² / KCU , J/cm ²	Вертикально / Vertically	–	146	166	–12
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		192	–24
			Перпендикулярно / Perpendicular		154	–5
			Параллельно / Parallel		168	–13
	HV , кгс/мм ² / HV , kgf/mm ²	Вертикально / Vertically	–	190	212	–10
		Горизонтально / Horizontally	Перпендикулярно / Perpendicular		179	6
			Параллельно / Parallel		202	–6
04X19H9 / 0.04 C-19 Cr-9 Ni	σ_b , МПа / σ_u , МПа	Вертикально / Vertically	–	620	534	16,1
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		614	1,0
			Перпендикулярно / Perpendicular		537	15,5
			Параллельно / Parallel		562	10,3
	ε , % / ε , %	Вертикально / Vertically	–	35	22	56
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		16,7	110
			Перпендикулярно / Perpendicular		9	300
			Параллельно / Parallel		20,1	74

Окончание табл. 2

The End Table 2

Материал / Material	Свойство / Property	Расположение образца второго порядка в призме / Second-order sample position within the prism	Направление вырезки образцов относительно направления движения подачи фидстока / Sample cutoff direction relative to feedstock travel direction	Исходный материал (прокат) / Source material (rolled stock)	Материал после WAAM- синтеза / WAAM-fabri- cated materia	Относительная анизотропия, % / Relative anisotropy, %
	KCU , Дж/ см^2 / KCU , J/cm ²	Вертикально / Vertically	–	120	177	–32
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		125	–4
			Перпендикулярно / Perpen- dicular		119	1
			Параллельно / Parallel		141	–15
	HV , кгс/мм ² / HV , kgf/mm ²	Вертикально / Vertically	–	190	355	–47
		Горизонтально / Horizontally	Перпендикулярно / Perpendicular		318	–40
			Параллельно / Parallel		336	–43
AMg3 / 97 Al-3 Mg	σ_b , МПа / σ_u , МПа	Вертикально / Vertically	–	230	129	78,3
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		230	0
			Перпендикулярно / Perpendicular		243	–5,3
			Параллельно / Parallel		220	4,5
	ε , % / ε , %	Вертикально / Vertically	–	13	2	550
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		8,55	52
			Перпендикулярно / Perpendicular		9,03	44
			Параллельно / Parallel		9,47	37
	KCU , Дж/см ² / KCU , J/cm ²	Вертикально / Vertically	–	40	17	134
		Горизонтально / Horizontally	Под углом 45° / At a 45-degree angle		16	145
			Перпендикулярно / Perpendicular		18	117
			Параллельно / Parallel		18	128
	HV , кгс/мм ² / HV , kgf/mm ²	Вертикально / Vertically	–	45	74	–39
		Горизонтально / Horizontally	Перпендикулярно / Perpendicular		74	–39
			Параллельно / Parallel		73	–39

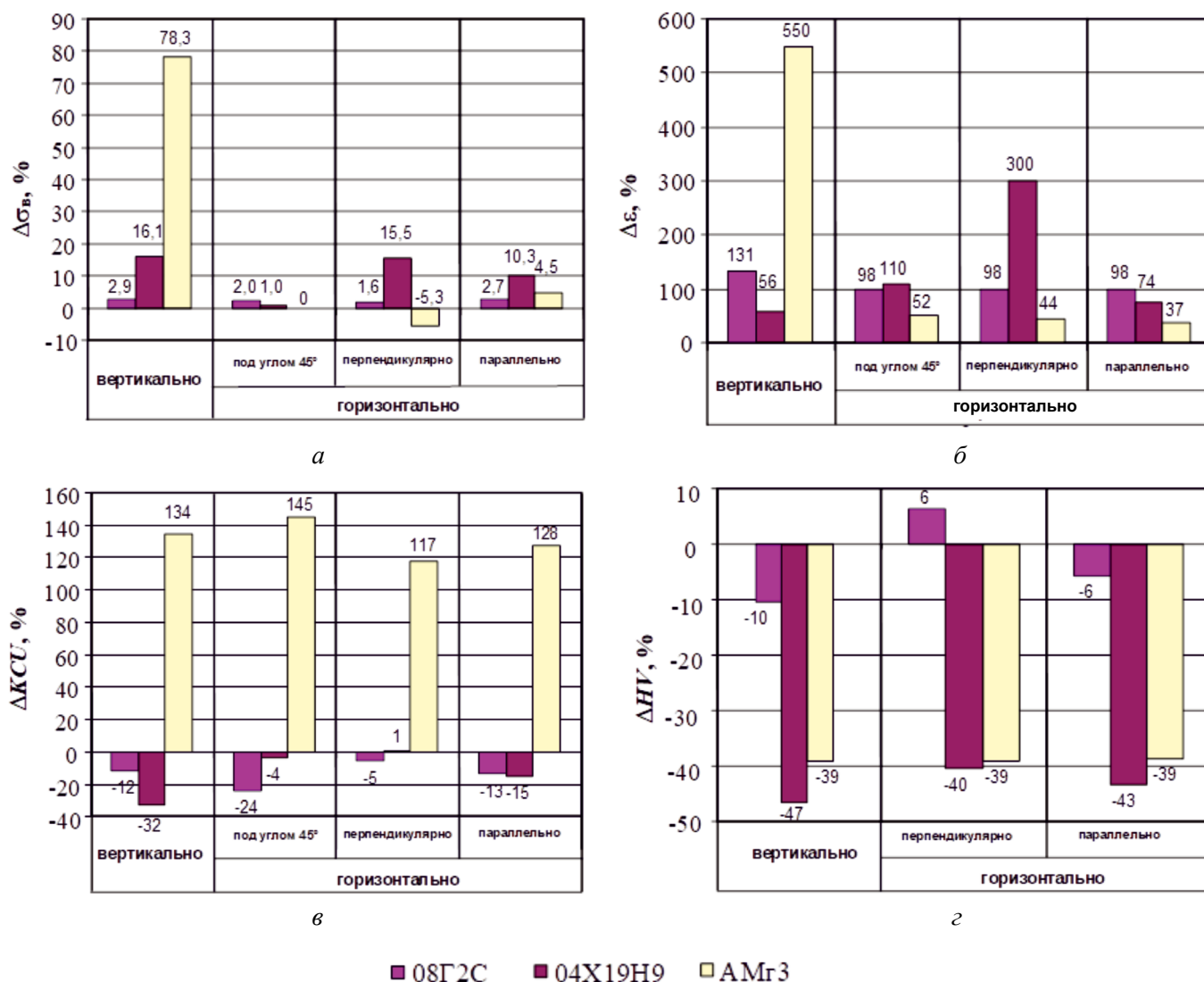


Рис. 4. Относительная анизотропия синтезированных образцов, измеренных в различных направлениях: предела прочности (а), относительного удлинения (б), ударной вязкости (в) и твердости (г)

Fig. 4. Relative anisotropy of synthesized samples measured in different directions: tensile strength (a), elongation (б), impact toughness (в), and hardness (г)

Следовательно, твердость, измеренная в перпендикулярном направлении, явно ниже, чем в параллельном и вертикальном (рис. 5, а). Полученная твердость синтезированного образца сопоставима с твердостью проката из данного материала в состоянии поставки 180...200 HV. Относительная анизотропия твердости составила 16 % (рис. 4, г).

Анализ полученных данных о твердости всех синтезируемых материалов показал, что разброс значений в каждом из трех направлений измерений сопоставим с тем, который наблюдается при измерении твердости сплавов, изготовленных литьем или прокаткой.

Для стали 04Х19Н9 максимальный предел прочности составил 614 МПа (табл. 2) при пер-

пендикулярном расположении образца, а минимальный – 534 МПа при параллельном. Полученные значения несколько уступают пределу прочности проката из данного материала в состоянии поставки (610...620 МПа). Относительная анизотропия предела прочности составила 15,1 % (рис. 4, а). Максимальное относительное удлинение 22 % зафиксировано у образца с расположением «параллельно», а минимальное значение 9 % зафиксировано при расположении образца «горизонтально, под углом 45°», что существенно уступает значениям относительного удлинения проката из данного материала в состоянии поставки (33–36 %). Относительная анизотропия относительного удлинения составила 244 % (рис. 4, б).

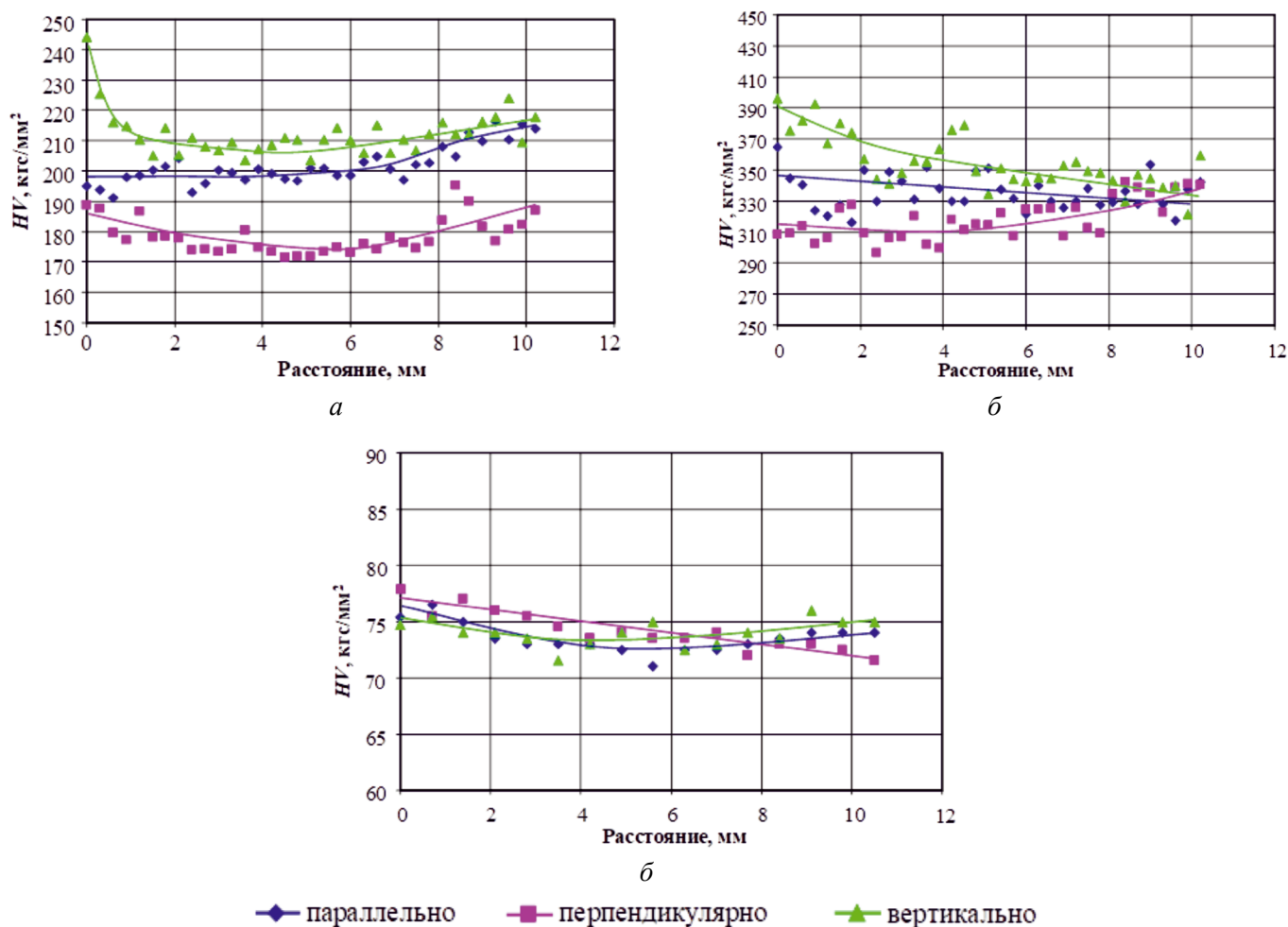


Рис. 5. Твердость синтезированных образцов, измеренная в различных направлениях: сталь 08Г2С (а), сталь 04Х19Н9 (б), алюминиевый сплав АМг3 (в)

Fig. 5. Hardness of synthesized samples measured in different directions: 0.08C-2Mn-1Si steel (a), 0.04C-19Cr-9Ni steel (б), 97Al-3Mg aluminum alloy (в)

Наибольшее значение ударной вязкости зафиксировано на образцах с направлением вырезки «вертикально» 177 Дж/см² (табл. 2), а наименьшее – при перпендикулярном направлении вырезки (119 Дж/см²), что соответствует ударной вязкости проката из данного материала в состоянии поставки (120 Дж/см²) и превосходит ее. Относительная анизотропия ударной вязкости составила 33 % (рис. 4, в).

Для нержавеющей стали 04Х19Н9, как и для стали 08Г2С, наибольшее среднее значение твердости 355 HV (табл. 2) зафиксировано в вертикальном направлении, наименьшее 318 HV – в перпендикулярном, среднее значение твердости 336 HV – в параллельном направлении. То есть твердость, измеренная в перпендикулярном направлении, ниже, чем в параллельном, и примерно на столько же ниже, чем в вертикальном (рис. 5, б). Полученная твердость синтезирован-

ного образца во всех направлениях значительно превышает твердость проката из данного материала в состоянии поставки (160...180 кгс/мм²). Относительная анизотропия твердости составила 4 % (рис. 4, з).

Для алюминиевого сплава АМг3 максимальный предел прочности 243 МПа (табл. 2) получен при перпендикулярном расположении образца, а минимальный 129 МПа – при вертикальном расположении. Предел прочности образцов, вырезанных во всех горизонтальных направлениях, в отличие от образца, вырезанного вертикально, не уступает пределу прочности проката из данного материала в состоянии поставки (200...230 МПа). Из-за вертикального направления относительная анизотропия предела прочности составила 83,6 % (рис. 4, а). Относительное удлинение при расположении образца вертикально почти в 4,5 раза ниже образцов, вы-

резанных в горизонтальных направлениях: соответственно 2 и 8,6...9,4 %. Значения относительного удлинения по всем направлениям уступают относительному удлинению проката из данного материала в состоянии поставки (13 %). Относительная анизотропия относительного удлинения составила 513 % (рис. 4, б).

Наибольшее значение ударной вязкости 18 Дж/см² (табл. 2) зафиксировано на образцах с направлением вырезки «перпендикулярно», наименьшее – при направлении вырезки «горизонтально, под углом 45°» (16 Дж/см²). Ударная вязкость в зависимости от места вырезки образцов изменяется незначительно, относительная анизотропия 28 % (рис. 4, в), однако существенно уступает ударной вязкости проката из данного материала в состоянии поставки (40 Дж/см²).

Среднее значение твердости по всем направлениям измерения было одинаковым и составило 74 HV (рис. 5, в), что превышает твердость проката из данного материала в состоянии поставки в 1,6 раза (45 HV). По твердости синтезированный материал можно считать изотропным (рис. 4, г).

Значения относительной анизотропии исследуемых материалов по пределу прочности, относительному удлинению, ударной вязкости и твердости представлены в табл. 3.

Установлено, что при синтезе WAAM-методом исследуемых металлических материалов наименьшая относительная анизотропия формируется по твердости, а наибольшая – по относительному удлинению. Наиболее изотропной по всем исследованным свойствам является

низкоуглеродистая сталь 08Г2С, а наиболее анизотропным (за счет образцов, вырезанных в вертикальном направлении) – алюминиевый сплав АМгЗ. Анизотропия стали 04Х19Н9 связана с полученными низкими значениями относительного удлинения образцов, вырезанных в горизонтальной плоскости перпендикулярно подаче горелки при наплавке.

Выводы

Проведен синтез WAAM-методом трех базовых материалов – низкоуглеродистой легированной стали 08Г2С, нержавеющей стали 04Х19Н9 и алюминиевого сплава АМгЗ, чтобы охватить материалы с существенно различающимися механическими свойствами. Найдены режимы синтеза, которые позволяют получать образцы с пределом прочности, сопоставимым с пределом прочности проката из указанных материалов.

Введено понятие относительной анизотропии как процентного отклонения свойств синтезированного материала от величин для исходного материала (проката), по которой предложено оценивать как изменение механических свойств в зависимости от направления внутри синтезированного материала, так и отклонение этих свойств от проката.

Установлено, что для стали 08Г2С наименьшая относительная анизотропия наблюдается по пределу прочности 1,3 %, наибольшая – по относительному удлинению 33 %, поэтому материал можно считать практически изотропным

Таблица 3

Table 3

Значения относительной анизотропии исследуемых материалов

Relative anisotropy values of the studied materials

Марка материала / Material grade	Относительная анизотропия, % / Relative anisotropy, %			
	предела прочности / of the ultimate tensile strength	относительного удлинения / of the elongation	ударной вязкости / of the impact toughness	твердости / of the hardness
08Г2С / 0.08C-2Mn-1Si	1,3	33	21	16
04Х19Н9 / 0.04C-19Cr-9Ni	15,1	244	33	4
АМгЗ / 97Al-3Mg	83,6	513	21	0

по прочности. Прочность синтезированной стали 08Г2С практически соответствует прочности проката, но относительное удлинение меньше в 2–2,3 раза.

Для стали 04Х19Н9 минимальный уровень относительной анизотропии выявлен по твердости – 4 %, а максимальный – по относительному удлинению, 244 %, что позволяет считать материал практически изотропным по твердости. При этом твердость синтезированной стали 04Х19Н9 близка к твердости проката, а относительное удлинение снижено в 1,5–4 раза.

Из-за вертикального направления алюминиевый сплав АМg3 демонстрирует наибольшую анизотропию по пределу прочности, 83,6 %, и по удлинению – 513 %, но по твердости она отсутствует, поэтому полученный материал можно считать изотропным по этому параметру. Сравнение с исходным материалом показывает, что твердость синтезированного материала аналогична твердости проката, предел прочности в вертикальном направлении снижен в 1,8 раза (в остальных направлениях сопоставим с прокатом), а относительное удлинение снижено в 1,4–6,5 раза относительно проката.

В целом минимальная относительная анизотропия наблюдается по твердости для всех материалов, что делает твердость наиболее стабильным параметром при WAAM-синтезе. Наиболее значимыми направлениями являются вертикальное и горизонтальное – параллельно и перпендикулярно направлению подачи фидстока при наплавке.

Список литературы

1. *Tomar B., Shiva S., Nath T.* A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 31. – P. 103739. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.
2. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing / C.R. Cunningham, J.M. Flynn, A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 22. – P. 672–686. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.020.
3. Description of anisotropic material response of wire and arc additively manufactured thin-walled stainless steel elements / N. Hadjipantelis, B. Weber, C. Buchanan, L. Gardner // *Thin-Walled Structures*. –

2022. – Vol. 171. – P. 108634. – DOI: 10.1016/j.tws.2021.108634.

4. On the anisotropy of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel parts / L. Palmeira Belotti, T.F.W. van Nuland, M.G.D. Geers, J.P.M. Hoefnagels, J.A.W. van Dommelen // *Materials Science and Engineering: A*. – 2023. – Vol. 863. – P. 144538. – DOI: 10.1016/j.msea.2022.144538.

5. Wire + Arc additive manufacturing / S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // *Materials Science and Technology*. – 2016. – Vol. 32 (7). – P. 641–647. – DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.

6. Heat sources in wire arc additive manufacturing and their impact on macro-microstructural characteristics and mechanical properties – An overview / N.A. Siddiqui, M. Muzamil, T. Jamil, G. Hussain // *Smart Materials in Manufacturing*. – 2025. – Vol. 3. – P. 100059. – DOI: 10.1016/j.smmf.2024.100059.

7. *Albannai A.I.* A brief review on the common defects in wire arc additive manufacturing // *International Journal of Current Science Research and Review*. – 2022. – Vol. 5 (12). – P. 4556–4576. – DOI: 10.47191/ijcsrr/V5-i12-19.

8. Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components / J. Sun, J. Hensel, M. Köhler, K. Dilger // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 65. – P. 97–111. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.021.

9. *Le V.Th., Mai D.S.* Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing // *Materials Letters*. – 2020. – Vol. 271. – P. 127791. – DOI: 10.1016/j.matlet.2020.127791.

10. Open-source wire and arc additive manufacturing system: Formability, microstructures, and mechanical properties / X. Lu, Y.F. Zhou, X.L. Xing, L.Y. Shao, Q.X. Yang, S.Y. Gao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 93 (5–8). – P. 2145–2154. – DOI: 10.1007/s00170-017-0636-z.

11. *Wahg Y., Chen X., Su Ch.* Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 374. – P. 116–123. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.079.

12. Исследование структуры и анизотропии механических свойств стального изделия, полученного методом послойной электродуговой проволоочной 3D-печати / И.В. Власов, А.И. Гордиенко, А.Е. Кузнецова, В.М. Семенчук // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. – 2023. – Т. 66, № 6. – С. 709–717. – DOI: 10.17073/0368-0797-2023-6-709-717.



13. Nagasai B., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. – 2021. – Vol. 30 (1). – P. 188–198. – DOI: 10.1515/jmbm-2021-0019.

14. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process / X. Yang, J. Liu, Zh. Wang, X. Lin, F. Liu, W. Huang, E. Liang // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 774. – P. 138942. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.138942.

15. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process / N.A. Rosli, M.R. Alkahari, M.F. bin Abdollah, Sh. Maidin, F.R. Ramli, S.G. Herawan // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 11. – P. 2127–2145. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.002.

16. Selvi S., Vishvakshen A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology – An overview // *Defence Technology*. – 2018. – Vol. 14 (1). – P. 28–44. – DOI: 10.1016/j.dt.2017.08.002.

17. Nguyen Q.L. Tool path planning for wire-arc additive manufacturing processes. Thesis for: Doctoral. – BTU Cottbus – Senftenberg, 2022. – DOI: 10.26127/BTUOpen-5982.

18. Effect of deposition strategies on mechanical strength of wire arc additively manufactured Inconel 625 / G.S. Rajput, M. Gor, H. Soni, V. Badheka, P. Sahlot // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 62 (13). – P. 7324–7328. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.164.

19. 3D-printed metals: Process parameters effects on mechanical properties of 17-4 P H stainless steel / F.R. Andreacola, I. Capasso, A. Langella, G. Brando // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9 (7). – P. e17698. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17698.

20. Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий / А.В. Киричек, О.Н. Федонин, А.В. Хандожко, А.А. Жирков, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов // *Научные технологии в машиностроении*. – 2022. – № 8 (134). – С. 31–38. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-31-38.

21. Влияние технологических факторов на процессы формирования параметров качества изделий, изготавливаемых WAAM-методом на основе дуговой сварки в защитных газах / Ш. Ли, Ч. Линь, А.В. Киричек, М.Н. Нагоркин, М.А. Новиков // *Научные технологии в машиностроении*. – 2025. – № 5 (167). – С. 3–14. – DOI: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.





© 2025 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>).





Anisotropy of properties in metal materials fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM)

Andrey Kirichek^{1, a}, Dmitry Solovyev^{2, b, *}, Alexander Yashin^{2, c}, Sergey Silantyev^{2, d},
Artemy Aborkin^{2, e}, Maxim Novikov^{1, f}

¹ Bryansk State Technical University, 7 50 Let Oktyabrya Bul., Bryansk, 241035, Russian Federation

² Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87 Gorkogo str., Vladimir, 600000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>,  avkbgtu@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>,  murstin@yandex.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-3186-1300>,  yashin2102@yandex.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-3524-385X>,  ppdsio@yandex.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0003-4979-7164>,  aborkin@vlsu.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0000-7552-312X>,  novikovmax14@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 July 2025

Revised: 02 August 2025

Accepted: 02 September 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Additive technologies

Wire arc additive manufacturing
(WAAM)

Anisotropy

Tensile strength

Hardness

Impact toughness

Funding

The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, as part of the basic part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under project No. FZWR-2024-0003 (No. 075-00150-24-03) "Development of a technological strategy and theoretical and experimental study of the key elements of the technology of additive synthesis of metal wire parts using the 3DMP method and wave thermo-deformation strengthening of synthesized machine parts".

ABSTRACT

Introduction. Additive manufacturing (AM) technologies, particularly wire arc additive manufacturing (WAAM), offer a rapid and cost-effective approach for producing complex metal components. However, WAAM can induce anisotropy in the resulting material's physical and mechanical properties. This anisotropy must be considered in design and application to ensure reliable performance in service. **The purpose of the work.** This study aims to quantitatively assess the anisotropy of mechanical properties in materials produced by WAAM to enhance the reliability of components used in critical applications. **Research methodology.** Samples were fabricated from low-carbon alloyed steel (0.08 C-2 Mn-1 Si), stainless steel (0.04 C-19 Cr-9 Ni), and aluminum alloy (97 Al-3 Mg) using the WAAM process. These samples were then subjected to mechanical testing to determine their tensile and impact toughness and hardness. Results were compared to those of the materials in the initial state to determine the relative anisotropy of each property. **Results and discussion.** For 0.08 C-2 Mn-1 Si steel, the tensile strength of WAAM-fabricated samples exhibited minimal variation across different orientations, indicating relatively high isotropy (relative anisotropy of 1.3 %). A relative anisotropy of 33 % was observed for elongation, 21 % for impact toughness, and 16 % for hardness. The 0.04 C-19 Cr-9 Ni stainless steel exhibited a relative anisotropy of 15.1 % for tensile strength, 244 % for elongation, 33 % for impact toughness, and 4% for hardness. The 97 Al-3 Mg aluminum alloy showed a significant relative anisotropy in tensile strength (83.6 %) and relative elongation (513 %) due to differences in the "vertical" direction. Impact toughness exhibited only slight variations (28 %) depending on sample orientation, while hardness can be considered isotropic. In general, hardness demonstrated the lowest relative anisotropy, while elongation exhibited the highest.

For citation: Kirichek A.V., Solovyev D.L., Yashin A.V., Silantyev S.A., Aborkin A.V., Novikov M.A. Anisotropy of properties in metal materials fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 206–220. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-206-220. (In Russian).

* Corresponding author

Solovyev Dmitry L., D.Sc. (Engineering), Professor
Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
87 Gorky str.,
600000, Vladimir, Russian Federation
Tel: +7 920 900-46-42, e-mail: murstin@yandex.ru

References

1. Tomar B., Shiva S., Nath T. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 31, p. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.
2. Cunningham C.R., Flynn J.M., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 22, pp. 672–686. DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.020.
3. Hadjipantelis N., Weber B., Buchanan C., Gardner L. Description of anisotropic material response of wire and arc additively manufactured thin-walled stainless steel elements. *Thin-Walled Structures*, 2022, vol. 171, p. 108634. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108634.
4. Palmeira Belotti L., van Nuland T.F.W., Geers M.G.D., Hoefnagels J.P.M., van Dommelen J.A.W. On the anisotropy of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel parts. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, vol. 863, p. 144538. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144538.
5. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + Arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32 (7), pp. 641–647. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
6. Siddiqui N.A., Muzamil M., Jamil T., Hussain G. Heat sources in wire arc additive manufacturing and their impact on macro-microstructural characteristics and mechanical properties – An overview. *Smart Materials in Manufacturing*, 2025, vol. 3, p. 100059. DOI: 10.1016/j.smmf.2024.100059.
7. Albannai A.I. A brief review on the common defects in wire arc additive manufacturing. *International Journal of Current Science Research and Review*, 2022, vol. 5 (12), pp. 4556–4576. DOI: 10.47191/ijcsrr/V5-i12-19.
8. Sun J., Hensel J., Köhler M., Dilger K. Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 65, pp. 97–111. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.021.
9. Le V.Th., Mai D.S. Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing. *Materials Letters*, 2020, vol. 271, p. 127791. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.127791.
10. Lu X., Zhou Y.F., Xing X.L., Shao L.Y., Yang Q.X., Gao S.Y. Open-source wire and arc additive manufacturing system: Formability, microstructures, and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 93 (5–8), pp. 2145–2154. DOI: 10.1007/s00170-017-0636-z.
11. Wahg Y., Chen X., Su Ch. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 374, pp. 116–123. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.079.
12. Vlasov I.V., Gordienko A.I., Kuznetsova A.E., Semenchuk V.M. Structure and mechanical properties anisotropy of a steel product manufactured by layer-by-layer electric arc wire 3D printing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2023, vol. 66 (6), pp. 709–717. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-6-709-717.
13. Nagasai B., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2021, vol. 30 (1), pp. 188–198. DOI: 10.1515/jmbm-2021-0019.
14. Yang X., Liu J., Wang Zh., Lin X., Liu F., Huang W., Liang E. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 774, p. 138942. DOI: 10.1016/j.msea.2020.138942.
15. Rosli N.A., Alkahari M.R., Abdollah M.F. bin, Maidin Sh., Ramli F.R., Herawan S.G. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 11, pp. 2127–2145. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.002.
16. Selvi S., Vishvakshen A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology – An overview. *Defence Technology*, 2018, vol. 14 (1), pp. 28–44. DOI: 10.1016/j.dt.2017.08.002.
17. Nguyen Q.L. *Tool path planning for wire-arc additive manufacturing processes*. Thesis for: Doctoral. BTU Cottbus – Senftenberg, 2022. DOI: 10.26127/BTUOpen-5982.
18. Rajput G.S., Gor M., Soni H., Badheka V., Sahlot P. Effect of deposition strategies on mechanical strength of wire arc additively manufactured Inconel 625. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 62 (13), pp. 7324–7328. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.164.
19. Andreacola F.R., Capasso I., Langella A., Brando G. 3D-printed metals: Process parameters effects on mechanical properties of 17-4 P H stainless steel. *Heliyon*, 2023, vol. 9 (7), p. e17698. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17698.

20. Kirichek A.V., Fedonin O.N., Khandozhko A.V., Zhirkov A.A., Soloviyov D.L., Barinov S.V. Gibrnidnye tekhnologii i oborudovanie additivnogo sinteza izdelii [Hybrid technologies and technical equipment for additive synthesis of products]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2022, no. 8 (134), pp. 31–38. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-31-38.

21. Li S., Lin Z., Kirichek A.V., Nagorkin M.N., Novikov M.A. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na protsessy formirovaniya parametrov kachestva izdelii, izgotavlivaemykh WAAM-metodom na osnove dugovoi svarki v zashchitnykh gazakh [Technology factors effect on the quality parameters of products manufactured by the WAAM-technique based on GMAW (gas-metal-arc-welding)]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2025, no. 5 (167), pp. 3–14. DOI: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 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>).