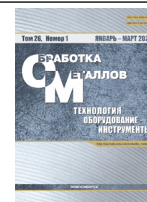




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





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



Исследование изменения геометрических параметров образцов, наплавленных методом GMAW при воздействии на электрическую дугу продольного магнитного поля

Вадим Куц^а, Алексей Олешицкий^б, Александр Гречухин^{с, *}, Игорь Григоров^д

Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>,  kuc-vadim@yandex.ru; ^б  <https://orcid.org/0000-0002-1097-8323>,  oav46@yandex.ru;

^с  <https://orcid.org/0000-0003-2037-6905>,  agrechuhin@mail.ru; ^д  <https://orcid.org/0000-0001-6207-8194>,  grigorov.igor@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.92

История статьи:

Поступила: 28 ноября 2023

Рецензирование: 07 декабря 2023

Принята к печати: 28 декабря 2023

Доступно онлайн: 15 марта 2024

Ключевые слова:

Электрическая дуга

Аддитивные технологии

Наплавление

Отклонение

Геометрические параметры

Магнитное поле

Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе представлены результаты исследования процесса аддитивного формообразования электрической дугой с аксиальной подачей стальной присадочной проволоки в среде защитных газов (технология GMAW) при дополнительном воздействии на электрическую дугу внешнего продольного магнитного поля. **Цель работы:** экспериментальное исследование влияния продольного магнитного поля при аддитивном формообразовании электрической дугой с аксиальной подачей присадочной проволоки из конструкционных сталей в среде защитных газов на изменение геометрических характеристик наплавленных слоёв. **Методы исследования.** Изготовление образцов выполнялось на 5-координатной аддитивной установке, созданной на базе станка с ЧПУ. Параметры режима наплавки: напряжение 17,5 В; ток 55 А; проволока диаметром 1,2 мм; материал проволоки Св-08Г2С; скорость подачи проволоки 2267 мм/мин; ориентировочный диаметр валика 3,0 мм; длина валика 50 мм; количество проволоки на один валик 312,5 мм; количество слоёв при наплавке стенки – пять; режим работы магнита: переменный ток с частотой 50 Гц; напряжение 30 В; измеренная магнитная индукция 5,7 мТл; начальная высота магнита над подложкой 10 мм; вылет электрода 10 мм; защитный газ – сварочная смесь CO₂-Ar; давление газа (расход) 0,15 МПа. **Результаты и обсуждение.** Проведенное экспериментальное исследование показало, что воздействие продольного магнитного поля статистически значимо повлияло на изменение размеров единичных наплавленных слоёв, а именно вызвало увеличение их ширины на 34,1 % с рассчитанным показателем значимости, близким к нулю, и уменьшение высоты на 20,2 % с рассчитанным показателем значимости $2,7 \cdot 10^{-5}$; статистически значимо повлияло на изменение габаритных размеров образцов, состоящих из пяти слоёв, а именно ширина образцов увеличилась на 11,2 % с рассчитанным показателем значимости $4,3 \cdot 10^{-3}$, а высота образцов уменьшилась на 10,3 % с рассчитанным показателем значимости $6,3 \cdot 10^{-5}$; не оказало статистически значимого влияния на изменение величины отклонения от прямолинейности в вертикальном направлении для боковых стенок образцов с рассчитанным показателем значимости 0,3277; не оказало статистически значимого влияния на изменение погрешности ширины стенок образцов с показателем значимости 0,098.

Для цитирования: Исследование изменения геометрических параметров образцов, наплавленных методом GMAW при воздействии на электрическую дугу продольного магнитного поля / В.В. Куц, А.В. Олешицкий, А.Н. Гречухин, И.Ю. Григоров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 6–21. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-6-21.

Введение

В настоящее время широкое применение нашли технологии аддитивного производства изделий, основанные на плавлении исходного материала, среди которых можно выделить технологию GMAW, или технологию аддитивного

производства электрической дугой с аксиальной подачей присадочной проволоки из различных металлических материалов в среде защитных газов. Эта технология характеризуется высокой производительностью формирования изделий и обладает широкой универсальностью, что объясняет большой интерес к ее применению в различных отраслях промышленности и является основной причиной большого количества научных работ в этой области [1–7]. Основными факторами, сдерживающими расширение области

*Адрес для переписки

Гречухин Александр Николаевич, к.т.н., доцент
Юго-Западный государственный университет,
ул. 50 лет Октября, 94,
305040, г. Курск, Россия

Тел.: 8 (47122) 2-26-69, e-mail: agrechuhin@mail.ru

применения данной технологии, является невысокая точность формируемых деталей, характеризующаяся большой величиной погрешности формы (иногда более 10 мм), а также неоднородная структура материала получаемых изделий, что отрицательно сказывается на физико-механических свойствах материалов и, как следствие, на эксплуатационных свойствах готовых изделий [1–7]. Одним из направлений исследования в этой области является осуществление процесса наплавки с дополнительным воздействием на электрическую дугу внешнего магнитного поля, которое принято разделять на продольное [8–18] и поперечное [19–29], что нашло своё применение при повышении качества процессов различных видов электродуговой сварки и наплавки. Во множестве работ было установлено, что под воздействием магнитного поля повышается скорость расплавления проволоки, улучшается микроструктура, уменьшается глубина и площадь зоны проплавления, что благоприятно сказывается на качестве сварных соединений [8–29]. В работах [8, 12, 14, 16, 18] также было отмечено, что воздействие продольного магнитного поля приводит во вращение вокруг своей оси столб дуги и стягивает его, уменьшая сечение столба дуги; дуга становится более жесткой, а нагрев – более концентрированным, что улучшает технологические свойства дуги и повышает качество процесса сварки и сварных швов.

Однако, несмотря на положительное воздействие продольного магнитного поля на качество сварки, проведенный анализ работ в рассматриваемой области показал, что процесс аддитивного формообразования электрической дугой с аксиальной подачей стальной присадочной проволоки в среде защитных газов при дополнительном воздействии на электрическую дугу, в частности, продольного магнитного поля был исследован недостаточно [30–35].

Например, малоизученным является вопрос об изменении геометрических характеристик единичных наплаваемых слоев и формируемых таким способом образцов с применением проволоки из конструкционных сталей.

Поэтому *целью настоящей работы* является экспериментальное исследование влияния продольного магнитного поля при аддитивном формообразовании электрической дугой с аксиальной подачей присадочной проволоки из

конструкционных сталей в среде защитных газов на изменение геометрических характеристик наплаваемых слоёв, а именно на изменение размеров единичных наплаваемых слоёв; изменение габаритных размеров образцов, состоящих из нескольких слоев; изменение величины отклонения от прямолинейности в вертикальном направлении для боковых стенок образцов; изменение погрешности ширины стенок образцов.

Методика исследований

Для проведения данного исследования на кафедре машиностроительных технологий и оборудования Юго-Западного государственного университета была разработана установка на базе станка с ЧПУ, реализующая технологию GMAW, или технологию аддитивного формирования изделий электрической дугой с аксиальной подачей присадочной проволоки в среде защитных газов (рис. 1).

Разработанная установка состоит из последовательной кинематической цепи, включающей в себя алюминиевое основание (раму) 1 с закрепленными на нем линейными направляющими 2, по которым с помощью шарико-винтовой передачи и шаговых моторов 3 приводятся в движение следующие части: вдоль оси X (координата X) – стол станка с ЧПУ 4 с расположенным на нём поворотным столом 5, вдоль оси Y (координата Y) – модуль оси Z 6, вдоль оси Z (координата Z) – подающий механизм 7. Поворотный стол обеспечивает вращение заготовки относительно оси Y (угловая координата B) и вращение заготовки относительно оси Z (угловая координата C). Управление станком осуществляется с помощью блока управления 8, включающего в себя плату управления Arduino Mega 2560 с надстройкой Ramps 1.6 (прошивка grbl-Mega-5X), шесть драйверов шаговых двигателей ТВ 6600 и блок питания с параметрами 12 В, 30 А. Для реализации управляющих программ используется открытое ПО GrblGru_v5.1.0. Разработанная установка обеспечивает одновременную 5-осевую наплавку (5-осевую непрерывную обработку). Подающий механизм 7 состоит из шагового мотора, прижима и стальных роликов, подающих сварочную (наплавочную) проволоку от катушки 9 через стальную трубку к сварочной головке в зону сварки (наплавки). На сварочной

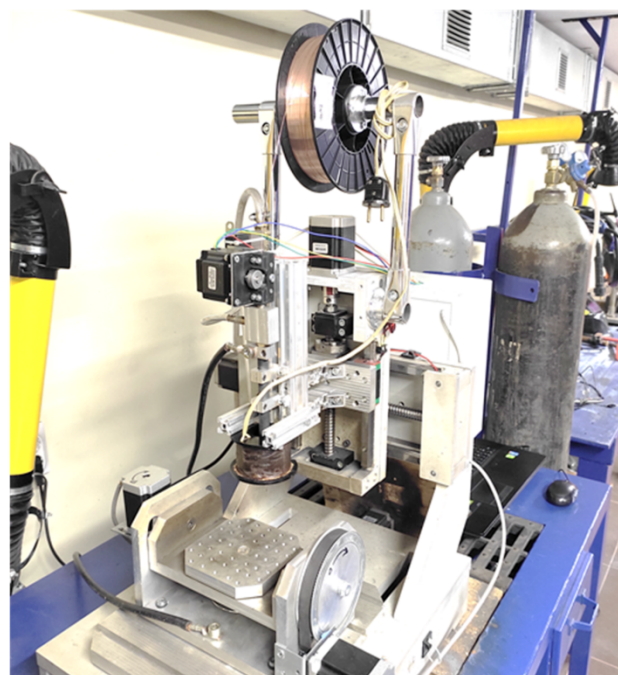
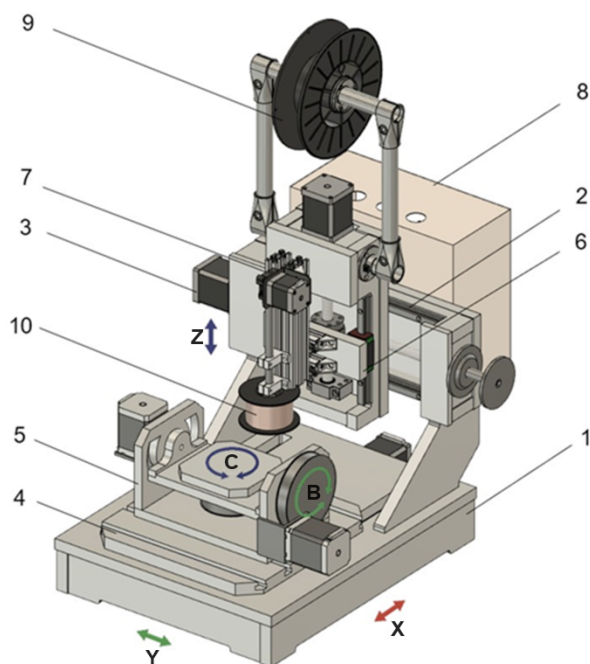


Рис. 1. Установка для проволоочно-дугового аддитивного производства на базе станка с ЧПУ: 1 – рама; 2 – линейные направляющие; 3 – шаговый мотор; 4 – стол станка с ЧПУ; 5 – поворотный стол; 6 – модуль оси Z; 7 – подающий механизм; 8 – блок управления; 9 – катушка; 10 – электромагнит

Fig. 1. Machine for wire-arc additive manufacturing on the basis of CNC machine:

1 – frame; 2 – linear guides; 3 – stepper motor; 4 – CNC machine table; 5 – rotary table; 6 – Z-axis module; 7 – feeding mechanism; 8 – control unit; 9 – coil; 10 – electromagnet

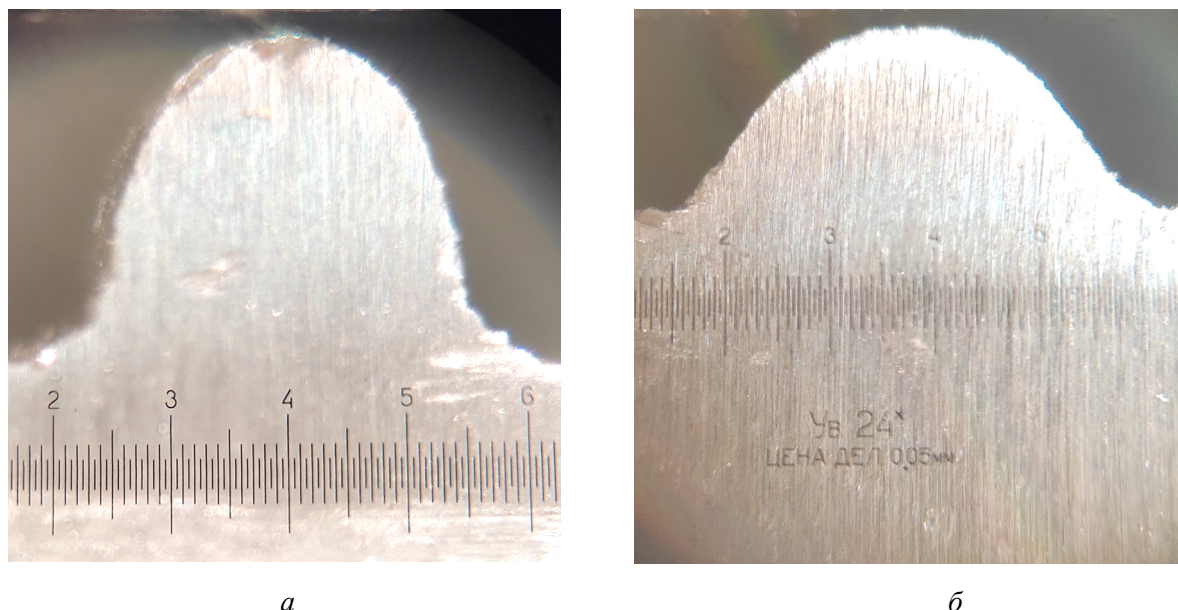
головке закреплен электромагнит 10. В качестве источника тока использовался сварочный полуавтомат КЕДР MIG-160GDM.

Исследование влияния продольного магнитного поля на изменение геометрических размеров наплавляемых слоёв осуществлялось путем наплавки проволоки диаметром 1,2 мм из материала Св-08Г2С. Режимы наплавки для данной проволоки и в соответствии с методикой, описанной в работе [26], были приняты следующие: напряжение 17,5 В; сила тока 55 А; скорость подачи проволоки 2267 мм/мин; ориентировочный диаметр валика 3,0 мм; длина валика 50 мм; количество проволоки на один валик 312,5 мм; вылет электрода 10 мм; защитный газ – сварочная смесь $\text{CO}_2\text{-Ar}$; давление газа (расход) 0,15 МПа.

Для создания продольного магнитного поля использовался электромагнит, состоящий из стального сердечника с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 4 мм, а также обмотки, изготовленной из проволоки ПЭТВ-2 диаметром 0,72 мм с количеством витков 1200. Предварительно экспериментальным путем было

установлено, что процесс наплавки проходит стабильно при подключении электромагнита к переменному синусоидальному току частотой 50 Гц и напряжением 30 В с начальной высотой магнита над подложкой 10 мм, поэтому в дальнейшем наплавку образцов выполняли при этих режимах. Измерение, выполненное с помощью миллитесламетра портативного универсального ТПУ, показало, что при данных режимах электромагнита в точке расплава проволоки магнитная индукция не превышает 5,7 мТл.

При исследовании влияния продольного магнитного поля на размеры единичных слоёв было наплавлено шесть образцов – три без воздействия продольного магнитного поля и три при воздействии на электрическую дугу магнитным полем, создаваемым катушкой индуктивности. Наплавленные образцы были разрезаны в трех местах и по плоскости разреза предварительно зачищены. Размеры единичных слоёв, их ширина и высота, измерялись с помощью микроскопа МПБ-2 (рис. 2) при 24-кратном увеличении с ценой деления шкалы 0,05 мм (рис. 2).



а

б

Рис. 2. Сечение единичных наплавленных слоев:

а – без продольного магнитного поля; б – с продольным магнитным полем

Fig. 2. Cross-section of single surfaced layers:

а – without longitudinal magnetic field; б – with longitudinal magnetic field

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения размеров единичных наплавленных слоёв приведены в табл. 1.

Обработка полученных данных при исследовании влияния продольного магнитного поля на изменения ширины и высоты единичных наплаваемых слоев выполнялась в программе Statistica на основе расчета t -критерия для независимых выборок (рис. 3).

Из полученных результатов следует, что воздействие созданного магнитного поля вызвало статистически значимое изменение размеров единичных наплаваемых слоев. Так, ширина слоя увеличилась на 34,1 % (значение рассчитанного t -критерия равно $-9,585$, и вероятность того, что ширина слоёв не различается, близка к нулю, $p \approx 0$), а высота на-

плавленного слоя уменьшилась на 20,2 % (значение рассчитанного t -критерия равно $-5,799$, и вероятность того, что высота слоев не различается, равна $p \approx 2,7 \cdot 10^{-5}$). В таблице (рис. 3, а) также представлены результаты расчета F -критерия, на основе которого можно сделать вывод, что дисперсии размеров единичных наплавленных слоёв статистически значимо не отличаются. Так, рассчитанный F -критерий для дисперсий ширины равен 3,9 с рассчитанным показателем значимости 0,0714, а F -критерий для дисперсий высоты равен 2,65 с рассчитанным показателем значимости 0,1899; рассчитанные показатели значимости превышают принятый уровень значимости, равный 0,05.

Для исследования влияния продольного магнитного поля на изменение габаритных раз-

Таблица 1

Table 1

Результаты измерения размеров единичных наплавленных слоёв, мм

Results of measuring the dimensions of single surfaced layers, mm

Без магнитного поля	Ширина	3,00	3,00	3,10	2,90	3,10	3,30	3,00	2,80	2,90
	Высота	2,85	2,25	2,50	2,50	2,20	2,30	2,70	2,70	2,55
С магнитным полем	Ширина	4,40	4,40	4,20	3,65	3,70	4,20	4,10	3,80	3,90
	Высота	1,80	2,00	2,05	1,95	2,00	2,20	2,20	1,85	1,95

Переменная	Т-критерии; Группир.: Mag (Таблица данных1)										
	Среднее 2	Среднее 1	t-знач.	сс	p	N набл. 2	N набл. 1	Ст.откл. 2	Ст.откл. 1	F-отн. дисперс.	p дисперс.
b	3,011111	4,038889	-9,58536	16	0,000000	9	9	0,145297	0,286986	3,901316	0,071411
h	2,505556	2,000000	5,79900	16	0,000027	9	9	0,222829	0,136931	2,648148	0,189944

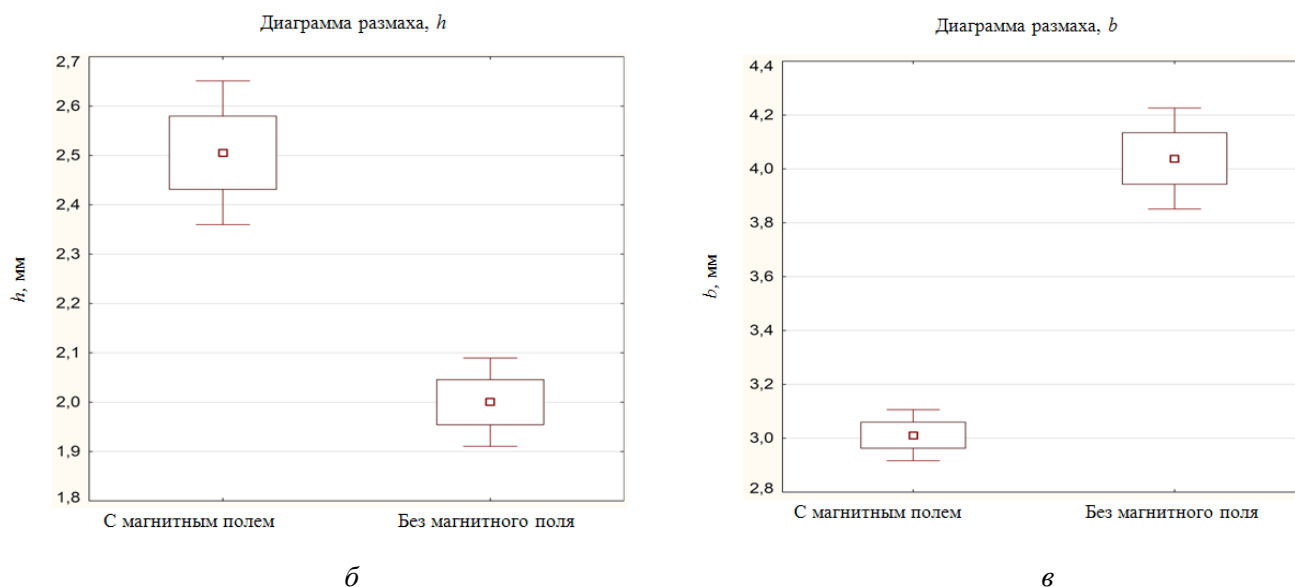
a


Рис. 3. Анализ влияния продольного магнитного поля на изменение размеров единичных наплавленных слоев:

a – таблица результатов расчета *t*-критерия; *б* – диаграмма размахов для высоты единичного слоя; *в* – диаграмма размахов для ширины единичного слоя

Fig. 3. Analysis of the effect of a longitudinal magnetic field on the change in dimensions of single surfaced layers:

a – table of the results of *t*-criterion calculation; *б* – box plot for the height of a single layer; *в* – box plot for the width of a single layer

меров и геометрической погрешности наплавленных слоёв была выполнена наплавка шести образцов, состоящих из пяти вертикальных слоёв – три без воздействия продольного магнитного поля и три при воздействии на электрическую дугу магнитным полем, создаваемым катушкой индуктивности (рис. 4).

Оценка габаритных размеров наплавленных образцов осуществлялась по параметрам наибольшей ширины и высоты в рассматриваемых сечениях. На рис. 5 показана схема измерения наибольшей ширины (b_{\max}) и высоты (h_{\max}) образцов, наплавленных без воздействия продольного магнитного поля (рис. 5, *a*) и при воздействии продольного магнитного поля (рис. 5, *б*).

В табл. 2 представлены результаты измерения габаритных размеров наплавленных образцов.

Результаты расчета *t*-критерия для независимых выборок по результатам измерения габаритных размеров наплавленных образцов (табл. 2) представлены на рис. 6.

Из полученных результатов (рис. 6) следует, что габаритные размеры образцов, состоящих из пяти слоёв, наплавленных без магнита, имеют статистически значимое отличие от размеров образцов, наплавленных при воздействии магнитного поля, а именно: ширина образцов увеличилась на 11,2 % с рассчитанным *t*-критерием, равным $-3,22$, и показателем значимости $4,3 \cdot 10^{-3}$, а высота образцов уменьшилась на 10,3 % с рассчитанным *t*-критерием, равным $5,36$, и показателем значимости $6,3 \cdot 10^{-5}$. Результаты расчета *F*-критерия (рис. 6, *a*) показали, что дисперсии габаритных размеров наплавленных образцов статистически значимо

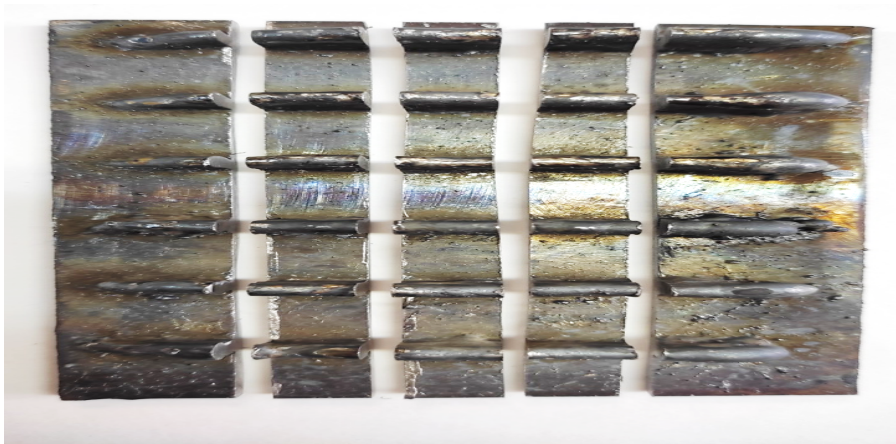


Рис. 4. Напавленные и разрезанные образцы, состоящие из пяти слоев
 Fig. 4. Surfaced and cut specimens consisting of five layers

Рис. 5. Схема измерения наибольшей ширины и высоты образцов, напавленных без воздействия продольного магнитного поля (а) и при воздействии продольного магнитного поля (б)

Fig. 5. Scheme for measuring the greatest width and height of the specimens surfaced:
 а – without influence of a longitudinal magnetic field;
 б – with influence of a longitudinal magnetic field

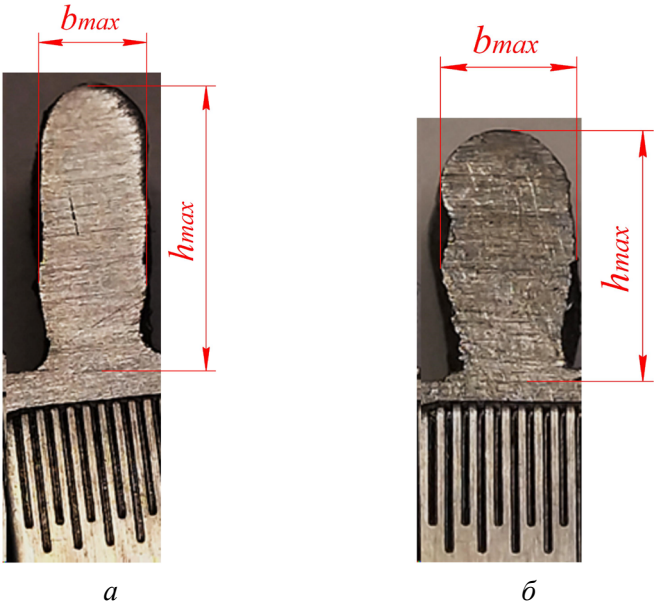


Таблица 2
 Table 2

Результаты измерения наибольшей ширины и высоты напавленных образцов
 Results of measuring the greatest width and height of the surfaced specimens

	Образец					
	1	2	3	4	5	6
	Без магнитного поля			С магнитным полем		
	b_{\max} , мм					
Сечение 1	4,7	4,2	3,7	4,3	5,1	4,5
Сечение 2	4,3	3,8	3,7	4,7	4,4	4,5
Сечение 3	4,2	4,1	3,9	4,4	4,3	4,5
	h_{\max} , мм					
Сечение 1	9,0	8,7	9,3	8,1	8,4	7,6
Сечение 2	8,8	8,3	9,3	8,1	8,4	8,2
Сечение 3	9,2	9,1	9,6	7,9	8,6	7,6

Переменная	Т-критерии; Группир.: mag (Таблица данных5)										
	Группа 1:1 Группа 2:2										
	Среднее 1	Среднее 2	t-знач.	сс	p	N набл. 1	N набл. 2	Ст.откл. 1	Ст.откл. 2	F-отн. дисперс.	p дисперс.
bmax	4,066667	4,522222	-3,32008	16	0,004332	9	9	0,327872	0,248886	1,735426	0,452583
hmax	9,033333	8,100000	5,36383	16	0,000063	9	9	0,387298	0,350000	1,224490	0,781478

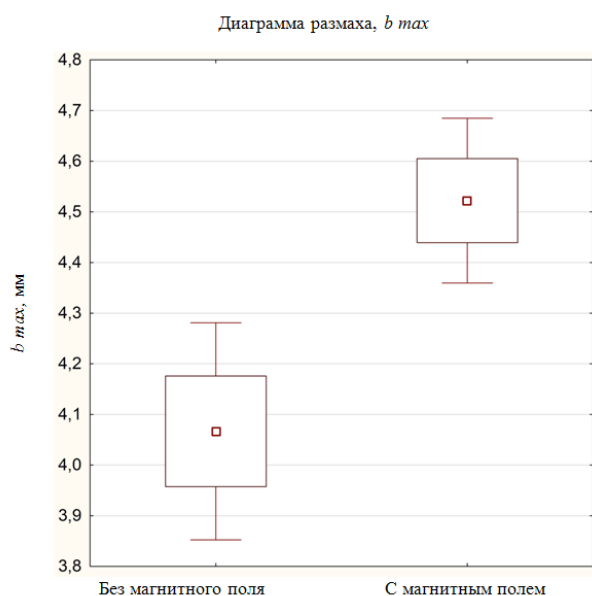
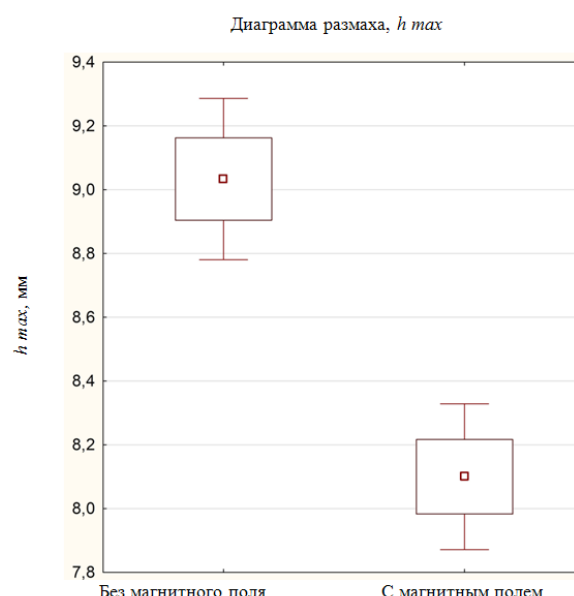
a

б

в

Рис. 6. Результаты анализа влияния продольного магнитного поля на изменение габаритных размеров наплавленных образцов:

a – таблица результатов расчета *t*-критерия; *б* – диаграмма размаха для ширины образцов; *в* – диаграмма размаха для высоты образцов

Fig. 6. Results of the analysis of the influence of the longitudinal magnetic field on the change of the overall dimensions of the surfaced specimens:

a – table of *t*-criterion calculation results; *б* – box plot for the width of the specimens; *в* – box plot for the specimens' height

не отличаются и рассчитанные показатели значимости превышают принятый уровень значимости, равный 0,05.

Изменение геометрической погрешности наплаваемых слоёв оценивали по величине отклонения от прямолинейности боковых стенок образца в вертикальном направлении для заданного сечения, а также по погрешности ширины образца. На рис. 7 показана схема измерения величины отклонения от прямолинейности, которое выполнялось для левой стенки образца EFL_1 и правой стенки EFL_2 , а в дальнейших расчетах использовалась величина отклонения от прямолинейности, имеющая наибольшее значение:

$$EFL = \max(EFL_1, EFL_2).$$

Результаты измерения отклонения от прямолинейности представлены в табл. 3.

На рис. 8 представлены результаты статистического сравнения величины отклонения от прямолинейности с помощью *t*-критерия.

Из полученных результатов (рис. 8) следует, что отклонения от прямолинейности в вертикальном направлении для боковых стенок образцов, наплавленных без магнита, не имеют статистически значимого отличия от образцов, наплавленных при воздействии магнитного поля, с рассчитанным *t*-критерием, равным $-1,0097$, и показателем значимости 0,3277, что превышает принятый уровень значимости 0,05. Исходя из величины рассчитанного *F*-критерия, дисперсия отклонения от

Рис. 7. Схема измерения отклонения от прямолинейности образцов, наплавленных без воздействия продольного магнитного поля (а) и при воздействии продольного магнитного поля (б)

Fig. 7. Scheme for measuring the deviation from straightness of the specimens surfaced:

a – without the influence of a longitudinal magnetic field; *b* – under the influence of a longitudinal magnetic field

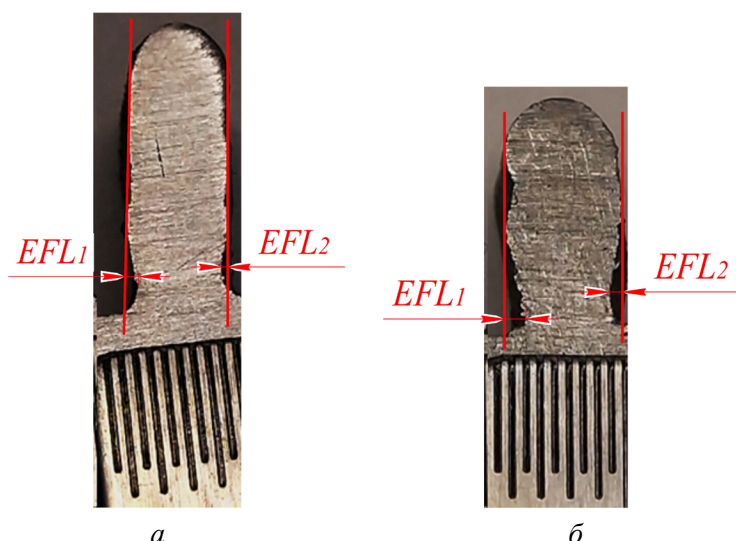


Таблица 3

Table 3

Результаты измерения отклонения от прямолинейности боковых стенок образцов в вертикальном направлении для заданного сечения

Results of measuring the deviation from straightness of the side walls of the specimens in the vertical direction for a given section

Образец		Сечение	EFL_1 , мм	EFL_2 , мм	EFL , мм
Без магнитного поля	1	1	0,24	0,19	0,24
		2	0,38	0,22	0,38
		3	0,48	0,41	0,48
	2	1	0,25	0,77	0,77
		2	0,13	0,17	0,17
		3	0,25	0,58	0,58
	3	1	0,18	0,14	0,18
		2	0,68	0,17	0,68
		3	0,2	0,29	0,29
С магнитным полем	4	1	0,24	0,31	0,31
		2	0,24	0,3	0,3
		3	0,08	0,44	0,44
	5	1	0,28	0,53	0,53
		2	0,64	0,55	0,64
		3	0,77	0,15	0,77
	6	1	0,47	0,21	0,47
		2	0,34	0,48	0,48
		3	0,45	0,65	0,65

прямолинейности боковых стенок наплавленных образцов также статистически не отличается с рассчитанным показателем значимости 0,3496.

С целью сравнения величин погрешности ширины стенки образцов для каждого образца было выполнено измерение ширины в семи точ-

ках, имеющих разную высоту, по схеме, представленной на рис. 9.

В табл. 4 показаны результаты измерения ширины наплавленных образцов.

Для проведения анализа было выполнено сравнение дисперсий ширины образцов, напла-

Переменная	Т-критерии; Группир.: Mag (Таблица данных7)										
	Группа 1:1										
	Группа 2:2										
	Среднее	Среднее	t-знач.	сс	p	N набл.	N набл.	Ст.откл.	Ст.откл.	F-отн.	p
	1	2				1	2	1	2	дисперс.	дисперс.
EFL	0,418889	0,510000	-1,00968	16	0,327677	9	9	0,220876	0,156525	1,991270	0,349589

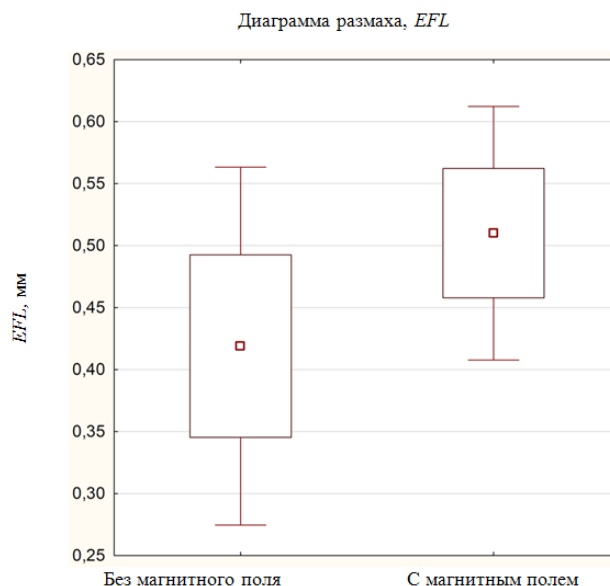
a

б

Рис. 8. Результаты анализа влияния продольного магнитного поля на изменение отклонения от прямолинейности боковых стенок наплавленных образцов в вертикальном направлении:

a – таблица результатов расчета *t*-критерия; *б* – диаграмма размаха отклонений от прямолинейности

Fig. 8. Results of the analysis of the influence of the longitudinal magnetic field on the change of deviation from straightness of the side walls of the surfaced specimens in the vertical direction:

a – table of *t*-criterion calculation results; *б* – box plot of deviations from straightness

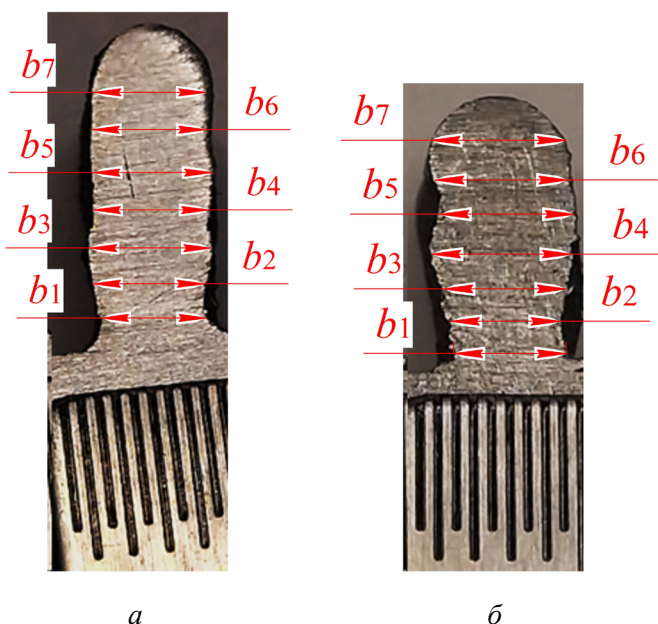


Рис. 9. Схема измерения ширины образцов, наплавленных без воздействия продольного магнитного поля (*a*) и при воздействии продольного магнитного поля (*б*)

Fig. 9. Scheme for measuring the width of the surfaced specimens:

a – without the influence to a longitudinal magnetic field;
б – under the influence of a longitudinal magnetic field

Результаты измерения ширины наплавленных образцов в различных точках
Results of measuring the width of surfaced specimens at various points

Образец		Сечение	Ширина b_p , мм						
			1	2	3	4	5	6	7
Без магнитного поля	1	1	3,47	3,47	3,59	3,65	3,75	3,86	3,50
		2	2,88	3,35	3,63	3,76	4,01	3,95	3,06
		3	2,89	3,61	3,97	4,16	4,15	4,07	3,40
	2	1	2,89	3,51	3,81	3,99	4,06	3,99	3,74
		2	3,46	3,46	3,61	3,74	3,74	3,46	2,51
		3	3,16	3,64	3,70	3,85	3,85	3,58	2,67
	3	1	3,38	3,51	3,51	3,54	3,54	3,45	3,07
		2	2,83	3,32	3,58	3,70	3,70	3,48	2,87
		3	3,12	3,26	3,30	3,27	3,28	3,26	2,69
С магнитным полем	4	1	4,95	4,13	3,83	3,52	3,86	4,09	3,70
		2	4,16	4,08	4,06	3,89	3,95	3,69	2,95
		3	4,95	4,08	3,83	3,75	4,05	4,19	3,13
	5	1	5,06	4,67	4,00	4,13	3,93	3,78	3,61
		2	3,65	3,78	3,61	3,63	3,82	3,70	2,99
		3	2,96	3,44	3,78	3,99	4,05	3,92	3,03
	6	1	3,78	4,00	3,85	3,85	3,85	3,60	2,87
		2	3,43	3,48	4,14	4,19	4,13	4,10	3,11
		3	2,97	3,52	4,29	4,42	4,29	4,23	3,31

ленных без магнитного поля и при воздействии магнитного поля, с применением F -критерия (рис. 10).

Из полученных результатов следует (рис. 10), что погрешность ширины стенок образцов, наплавленных без магнитного поля и при воздействии продольного магнитного поля, статистически не различается; величина рассчитанного F -критерия равна 1,5275 с показателем значимости 0,098, что превышает принятый уровень значимости.

Выводы

Проведенное экспериментальное исследование геометрических характеристик наплавленных образцов показало, что воздействие продольного магнитного поля:

– вызвало статистически значимое изменение размеров единичных наплавляемых слоёв,

а именно увеличение их ширины на 34,1 % с рассчитанным показателем значимости, близким к нулю, и уменьшение высоты на 20,2 % с рассчитанным показателем значимости $2,7 \cdot 10^{-5}$;

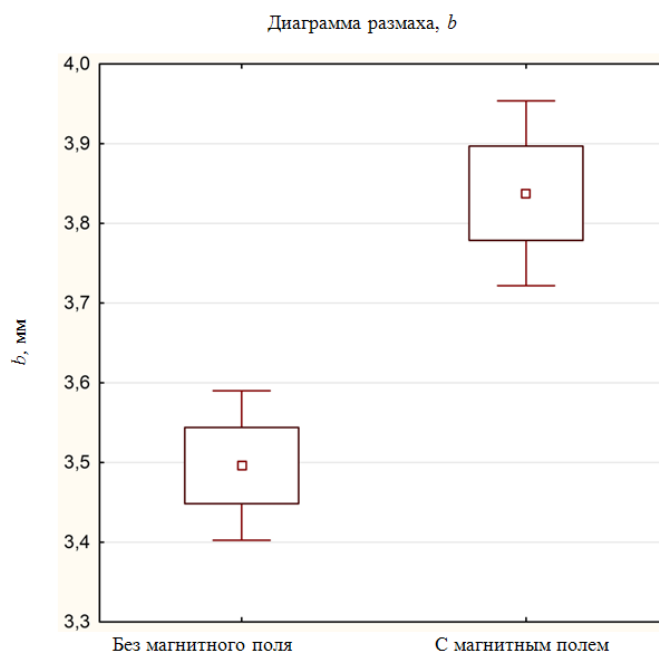
– вызвало статистически значимое изменение габаритных размеров образцов, состоящих из пяти слоёв, а именно ширина образцов увеличилась на 11,2 % с рассчитанным показателем значимости $4,3 \cdot 10^{-3}$, а высота образцов уменьшилась на 10,3 % с рассчитанным показателем значимости $6,3 \cdot 10^{-5}$;

– не оказало статистически значимого влияния на изменение величины отклонения от прямолинейности в вертикальном направлении для боковых стенок образцов с рассчитанным показателем значимости 0,3277;

– не оказало статистически значимого влияния на изменение погрешности ширины стенок образцов с показателем значимости 0,098.

Т-критерии; Группир.: Маг (Таблица данных9)											
Группа 1:1											
Группа 2:2											
Переменная	Среднее 1	Среднее 2	t-знач.	сс	p	N набл. 1	N набл. 2	Ст.откл. 1	Ст.откл. 2	F-отн. дисперс.	p дисперс.
b	3,496190	3,837778	-4,49016	124	0,000016	63	63	0,379811	0,469411	1,527467	0,097940

a



б

Рис. 10. Результаты анализа влияния продольного магнитного поля на погрешность ширины стенок наплавленных образцов:

a – таблица результатов расчета F-критерия; б – диаграмма размаха отклонений

Fig. 10. Results of analysis of the influence of the longitudinal magnetic field on the walls width error of surfaced specimens:

a – table of F-criterion calculation results; б – box plot of deviations

Список литературы

1. Прогнозирование геометрии слоя при дуговом аддитивном производстве Р-GMAW из алюминиевых сплавов / А.И. Куракин, И.Г. Струков, Я.П. Скобляков, В.М. Карпов, Е.И. Ефимов // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2-1 (60). – С. 245–252. – DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.030.
2. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осколков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников, Е.Л. Кротова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90–105. – DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11.
3. Study of the effect GMAW and SMAW welding combination with WAAM method / Jatmoko, A. Hanifah, M.A. Pratama, F.M. Rohimsyah // SPECTA Journal of Technology. – 2023. – Vol. 7 (2). – P. 549–555. – DOI: 10.35718/specta.v7i2.938.
4. Jafari D., Vaneker T., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Materials & Design. – 2021. – Vol. 202. – P. 109471. – DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
5. Reduction of energy input in wire arc additive manufacturing (WAAM) with gas metal arc welding (GMAW) / P. Henckell, M. Gierth, Y. Ali, J. Reimann, J.P. Bergmann // Materials. – 2020. – Vol. 13 (11). – P. 2491. – DOI: 10.3390/ma13112491.
6. Размышляев А.Д., Агеева М.В., Лаврова Е.В. Измельчение структуры металла при дуговой наплавке под воздействием продольного магнитного поля // Автоматическая сварка. – 2019. – № 2. – С. 25–28. – DOI: 10.15407/as2019.02.03.

7. Размышляев А.Д., Миронова М.В., Лещенко А.И. Повышение качества стыковых соединений при дуговой сварке в продольном магнитном поле // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 24. – С. 190–196.

8. Миронова М.В. Влияние индукции продольного магнитного поля на проплавление основного металла при дуговой наплавке // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 25. – С. 141–146.

9. Черных А.В. Особенности плавления и движения электродного металла при дуговой сварке во внешнем постоянном продольном магнитном поле // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 4 (28). – С. 103–113.

10. Размышляев А.Д., Дели А.А., Миронова М.В. Влияние продольного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при электродуговой наплавке под флюсом // Автоматическая сварка. – 2007. – № 6 (650). – С. 31–35.

11. Recent developments in the design, development, and analysis of the influence of external magnetic-field on gas-metal arc welding of non-ferrous alloys: review on optimization of arc-structure to enhance the morphology, and mechanical properties of welded joints for automotive applications / P. Sharma, S. Chattopadhyaya, N. Singh, A. Kumar, S. Sharma, C. Li, V. Kumar, S. Wojciechowski, G. Krolczyk, S.M. Eldin // Heliyon. – 2022. – Vol. 8 (12). – P. e11812. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11812.

12. The effect of applying magnetic fields during welding AISI-304 stainless steel on stress corrosion cracking / F.F. Curiel, R. García, V.H. López, M.A. García, A. Contreras, M.A. García // International Journal of Electrochemical Science. – 2021. – Vol. 16 (3). – P. 210338. – DOI: 10.20964/2021.03.31.

13. 3D numerical study of external axial magnetic field-controlled high-current GMAW metal transfer behavior / L. Xiao, D. Fan, J. Huang, S. Tashiro, M. Tanaka // Materials. – 2020. – Vol. 13. – P. 5792. – DOI: 10.3390/ma13245792.

14. Effect of a magnetic field applied during fusion welding on the fatigue damage of 2205 duplex stainless steel joints / J. Rosado-Carrasco, U. Krupp, V. López, A. Gierler, M. Garcia-Rentería, J. González-Sánchez // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 121. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.12.022.

15. Размышляев А.Д., Агеева М.В. Влияние поперечного магнитного поля на структуру металла шва при электродуговой сварке стали 12X18H9T // Ин-

новационные технологии в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, Юрга, 24–26 мая 2018 г. – Юрга: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 8–11.

16. Размышляев А.Д., Ярмонов С.В., Выдмыш П.А. Влияние частоты поперечного магнитного поля на производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2014. – № 28. – С. 140–144.

17. Особенности проплавления основного металла при дуговой наплавке с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова, С.В. Ярмонов, П.А. Выдмыш // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 24. – С. 185–190.

18. Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова, К.Г. Кузьменко, П.А. Выдмыш // Автоматическая сварка. – 2011. – № 5 (697). – С. 48–51.

19. Effect of external magnetic field on the forming, microstructure and property of TC4 titanium alloy during the directed energy deposition arc additive manufacturing / Y. Bao, H. Sun, X. Cai, S. Lin, C. Chen // Crystals. – 2023. – Vol. 13 (2). – P. 235. – DOI: 10.3390/cryst13020235.

20. Preparation and characterization of CMT wire arc additive manufacturing Al-5%Mg alloy depositions through assisted longitudinal magnetic field / Y. Hu, F. Chen, S. Cao, Y. Fan, R. Xie // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 101. – P. 576–588. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.05.104.

21. Effect of auxiliary longitudinal magnetic field on overlapping deposition of wire arc additive manufacturing / Z. Shan, Y. Wang, H. Song, J. Huang, Z. Haiou, X. Chen, C. Huang, R. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 125. – P. 1383–1401. – DOI: 10.1007/s00170-022-10609-1.

22. Effect of external magnetic field on morphology and microstructure of wire arc additive manufacture / H. Zhao, Y. Li, Y. Sun, Z. Dong, H. Liu, A. Babkin, Y. Chang // Journal of Materials Science. – 2022. – Vol. 58. – P. 1769–1782. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-1234284/v1.

23. Comparative investigation of wire arc additive manufacturing of Al-5%Mg alloy with and without external alternating magnetic field / W. Zhao, Y. Zhao, X. Zhang, J. Chen, W. Ou // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. –

Vol. 119. – P. 2571–2587. – DOI: 10.1007/s00170-021-08466-5.

24. Effect of magnetic field on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing / Y. Wang, X. Chen, Q. Shen, C. Su, Y. Zhang, S. Jayalakshmi, A. Singh // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 64. – P. 10–19. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.008.

25. Effect of the metal transfer mode on the symmetry of bead geometry in WAAM aluminum / F. Veiga, A. Suarez, E. Aldalur, T. Bhujangrao // Symmetry. – 2021. – Vol. 13. – P. 1245. – DOI: 10.3390/sym13071245.

26. Бабенко Э.Г. Технологические процессы сварки, наплавки, обработки сплавов резанием и давлением. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011. – 105 с.

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



Investigation of changes in geometrical parameters of GMAW surfaced specimens under the influence of longitudinal magnetic field on electric arc

Vadim Kuts^a, Alexey Oleshitsky^b, Alexander Grechukhin^{c,*}, Igor Grigorov^d

Southwest State University, 94, 50 let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>,  kuc-vadim@yandex.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1097-8323>,  oav46@yandex.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0003-2037-6905>,  agrechuhin@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-6207-8194>,  grigorov.igor@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 November 2023

Revised: 07 December 2023

Accepted: 28 December 2023

Available online: 15 March 2024

Keywords:

Electric arc

Additive technologies

Surfacing

Deviation

Geometric parameters

Magnetic field

Funding

The work was carried out within the framework of the implementation of the development program of FGBOU VO "Southwestern State University" of the project "Priority 2030".

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the results of research of additive manufacturing process by electric arc with axial feeding of steel filler wire in protective gas environment (GMAW technology) with additional influence of external longitudinal magnetic field on electric arc. **Purpose of work:** an experimental study of the effect of a longitudinal magnetic field during additive manufacturing by an electric arc with axial feed of filler wire made of structural steels in a shielding gas environment on the change in the geometrical characteristics of the layers being surfaced. **Research Methods.** The manufacturing of specimens was carried out on a 5-axis additive machine based on a CNC machine. Surfacing was carried out in the following modes: voltage 17.5 V; current 55–65 A; wire diameter 1.2 mm; wire material Sv-08G2S; wire feed rate 2,267 mm/min; approximate roll diameter 3.0 mm; roll length 50 mm; number of wires per one roll 312.5 mm; number of layers when surfacing the wall 5; magnet operation mode: alternating current with frequency 50 Hz, voltage 30 V; measured magnetic induction 5.7 mTl; initial height of the magnet above the substrate 10 mm; electrode stickout 10 mm; shielding gas: welding mixture CO₂-Ar; gas pressure (flow rate) 0.15 MPa. **Results and discussion.** The conducted experimental study showed that the effect of longitudinal magnetic field had a statistically significant effect on the change in the dimensions of the singular, namely an increase in the width of the layers being surfaced by 34.1 %, with a calculated significance index close to zero, and a decrease in height by 20.2 %, with a calculated significance index equal to 2.7×10^{-5} . The effect of longitudinal magnetic field had a statistically significant effect on the change of the overall dimensions of the specimens consisting of five layers, namely, the width of the specimens increased by 11.2 % with a calculated significance index of 4.3×10^{-3} , and the height of the specimens decreased by 10.3 % with a calculated significance index of 6.3×10^{-5} . The effect of longitudinal magnetic field had no statistically significant effect on the change of the vertical deviation from straightness for the side walls of the specimens, with a calculated significance index of 0.3277, and had no statistically significant effect on the change of the error of the width of the walls of the specimens, with a significance index of 0.098.

For citation: Kuts V.V., Oleshitsky A.V., Grechukhin A.N., Grigorov I.Y. Investigation of changes in geometrical parameters of GMAW surfaced specimens under the influence of longitudinal magnetic field on electric arc. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 6–21. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-6-21. (In Russian).

References

1. Kurakin A.I., Strukov I.G., Skoblikov Ya.P., Karpov V.M., Efimov E.I. Prognozirovaniye geometrii sloya pri dugovom additivnom proizvodstve P-GMAW iz alyuminiyevykh splavov [Prediction of bead layer geometry in P-GMAW wire arc additive manufacturing of aluminium alloys]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2023, no. 2-1 (60), pp. 245–252. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.030.
2. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Peredovye tekhnologii additivnogo proizvodstva metallicheskikh izdelii [Advanced technologies for additive manufacturing of metal product]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye*,

* Corresponding author

Grechukhin Alexander N., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Southwest State University,
 94, 50 let Oktyabrya str.,
 305040, Kursk, Russian Federation
 Tel.: +7 (47122) 2-26-69, e-mail: agrechuhin@mail.ru

materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90–105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11.

3. Jatmoko, Hanifah A., Pratama M.A., Rohimsyah F.M. Study of the effect GMAW and SMAW welding combination with WAAM method. *SPECTA Journal of Technology*, 2023, vol. 7 (2), pp. 549–555. DOI: 10.35718/specta.v7i2.938.

4. Jafari D., Vaneker T., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 2021, vol. 202, p. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.

5. Henckell P., Gierth M., Ali Y., Reimann J., Bergmann J.P. Reduction of energy input in wire arc additive manufacturing (WAAM) with gas metal arc welding (GMAW). *Materials*, 2020, vol. 13 (11), p. 2491. DOI: 10.3390/ma13112491.

6. Razmyshlyaev A.D., Ageeva M.V., Lavrova E.V. Izmel'chenie struktury metalla pri dugovoi naplavke pod vozdeistviem prodol'nogo magnitnogo polya [Refinement of metal structure in arc surfacing under the effect of longitudinal magnetic field]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2019, no. 2, pp. 25–28. DOI: 10.15407/as2019.02.03. (In Russian).

7. Razmyshlyaev A.D., Mironova M.V., Leshchenko A.I. Povyshenie kachestva stykovykh soedinenii pri dugovoi svarke v prodol'nom magnitnom pole [Quality increase of butt joints at arc welding in longitudinal magnetic field]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2012, no. 24, pp. 190–196.

8. Mironova M.V. Vliyanie induktsii prodol'nogo magnitnogo polya na proplavlenie osnovnogo metalla pri dugovoi naplavke [Influence of longitudinal magnetic field induction on the base metal penetration at arc surfacing]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2012, no. 25, pp. 141–146.

9. Chernykh A.V. Osobennosti plavleniya i dvizheniya elektrodno metalla pri dugovoi svarke vo vneshnem postoyannom prodol'nom magnitnom pole [Peculiarities of melting and movement of electrode metal at arc welding in external constant longitudinal magnetic field]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2012, no. 4 (28), pp. 103–113.

10. Razmyshlyaev A.D., Deli A.A., Mironova M.V. Vliyanie prodol'nogo magnitnogo polya na proizvoditel'nost' rasplavleniya provoloki pri elektrodugovoi naplavke pod flyusom [The effect of a longitudinal magnetic field on the melting performance of wire during submerged arc welding]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2007, no. 6 (650), pp. 31–35.

11. Sharma P., Chattopadhyaya S., Singh N., Kumar A., Sharma S., Li C., Kumar V., Wojciechowski S., Krolczyk G., Eldin S.M. Recent developments in the design, development, and analysis of the influence of external magnetic-field on gas-metal arc welding of non-ferrous alloys: review on optimization of arc-structure to enhance the morphology, and mechanical properties of welded joints for automotive applications. *Heliyon*, 2022, vol. 8 (12), p. e11812. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11812.

12. Curiel F.F., García R., López V.H., García M.A., Contreras A., García M.A. The effect of applying magnetic fields during welding AISI-304 stainless steel on stress corrosion cracking. *International Journal of Electrochemical Science*, 2021, vol. 16 (3), p. 210338. DOI: 10.20964/2021.03.31.

13. Xiao L., Fan D., Huang J., Tashiro S., Tanaka M. 3D numerical study of external axial magnetic field-controlled high-current GMAW metal transfer behavior. *Materials*, 2020, vol. 13, p. 5792. DOI: 10.3390/ma13245792.

14. Rosado-Carrasco J., Krupp U., López V., Gierler A., Garcia-Rentería M., González-Sánchez J. Effect of a magnetic field applied during fusion welding on the fatigue damage of 2205 duplex stainless steel joints. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 121. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.12.022.

15. Razmyshlyaev A.D., Ageeva M.V. [The effect of a transverse magnetic field on the structure of the seam metal during electric arc welding of steel 12X18H9T]. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii [Innovative technologies in mechanical engineering]*. Proceedings of the IX International scientific and practical conference, Yurga, 24–26 May 2018. Tomsk, TPU Publ., 2018, pp. 8–11. (In Russian).

16. Razmyshlyaev A.D., Yarmonov S.V., Vydmish P.A. Vliyanie chastoty poperechnogo magnitnogo polya na proizvoditel'nost' rasplavleniya elektrodnoi provoloki pri dugovoi naplavke pod flyusom [The effect of the frequency of the transverse magnetic field on the melting performance of the electrode wire during submerged arc welding]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2014, no. 28, pp. 140–144.



17. Razmyshlyayev A.D., Mironova M.V., Yarmonov S.V., Vydmysh P.A. Osobennosti proplavleniya osnovnogo metalla pri dugovoi naplavke s vozdeistviem poperechnogo magnitnogo polya [Features of the penetration of the base metal during arc welding under the influence of a transverse magnetic field]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2012, no. 24, pp. 185–190.

18. Razmyshlyayev A.D., Mironova M.V., Kuz'menko K.G., Vydmysh P.A. Proizvoditel'nost' rasplavleniya elektrodnoi provoloki pri dugovoi naplavke pod flyusom s vozdeistviem poperechnogo magnitnogo polya [Efficiency of melting of electrode wire in submerged-arc surfacing with influence of transverse magnetic field]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2011, no. 5 (697), pp. 48–51. (In Russian).

19. Bao Y., Sun H., Cai X., Lin S., Chen C. Effect of external magnetic field on the forming, microstructure and property of TC4 titanium alloy during the directed energy deposition arc additive manufacturing. *Crystals*, 2023, vol. 13 (2), p. 235. DOI: 10.3390/cryst13020235.

20. Hu Y., Chen F., Cao S., Fan Y., Xie R. Preparation and characterization of CMT wire arc additive manufacturing Al-5%Mg alloy depositions through assisted longitudinal magnetic field. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 101, pp. 576–588. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.05.104.

21. Shan Z., Wang Y., Song H., Huang J., Haiou Z., Chen X., Huang C., Li R. Effect of auxiliary longitudinal magnetic field on overlapping deposition of wire arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 125, pp. 1383–1401. DOI: 10.1007/s00170-022-10609-1.

22. Zhao H., Li Y., Sun Y., Dong Z., Liu H., Babkin A., Chang Y. Effect of external magnetic field on morphology and microstructure of wire arc additive manufacture. *Journal of Materials Science*, 2022, vol. 58, pp. 1769–1782. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1234284/v1.

23. Zhao W., Zhao Y., Zhang X., Chen J., Ou W. Comparative investigation of wire arc additive manufacturing of Al-5%Mg alloy with and without external alternating magnetic field. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 119, pp. 2571–2587. DOI: 10.1007/s00170-021-08466-5.

24. Wang Y., Chen X., Shen Q., Su C., Zhang Y., Jayalakshmi S., Singh A. Effect of magnetic field on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 64, pp. 10–19. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.008.

25. Veiga F., Suarez A., Aldalur E., Bhujangrao T. Effect of the metal transfer mode on the symmetry of bead geometry in WAAM aluminum. *Symmetry*, 2021, vol. 13, p. 1245. DOI: 10.3390/sym13071245.

26. Babenko E.G. *Tekhnologicheskie protsessy svarki, naplavki, obrabotki splavov rezaniem i davleniem* [Technological processes of welding, surfacing, processing of alloys by cutting and pressure]. Khabarovsk, FESTU Publ., 2011. 105 p.

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>).