

УДК 621.791.763.2

А. О. Коротеев, В. П. Долячко, В. П. Куликов

АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ИМПУЛЬСНОЙ РЕВЕРСИВНОЙ ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

UDC 621.791.763.2

A. O. Koroteyev, V. P. Dolyachko, V. P. Kulikov

ADDITIVE TECHNOLOGY FOR PRODUCING BULKY METAL PRODUCTS BASED ON ARC WELDING WITH PULSED REVERSIBLE FEED OF FILLER WIRE

Аннотация

Исследованы особенности применения дуговых сварочных технологий для аддитивного послойного создания объемных металлических изделий. Представлены результаты анализа химического состава и механических свойств наплавки, полученной с использованием роботизированного комплекса на базе технологии Fronius CMT с реверсивной подачей присадочной проволоки.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, импульсная подача проволоки, механические испытания, спектральный опико-эмиссионный анализ, газовые смеси, наплавка.

Abstract

The features of the application of arc welding technologies for additive layer-by-layer production of bulky metal products have been investigated. The paper presents results of an analysis of the chemical composition and mechanical properties of the overlay obtained by using a robotic system based on the Fronius CMT technology with a reversible feed of filler wire.

Keywords:

additive technologies, pulsed wire feed, mechanical tests, optical emission spectral analysis, gas mixtures, overlaying welding.

В настоящее время все больший интерес вызывают технологии создания объемных твердотельных изделий способами аддитивного послойного наращивания. В отличие от традиционных, так называемых субтрактивных, технологий, предполагающих изготовление изделия путем отсекаания от заготовки «лишнего» материала, аддитивные позволяют создавать геометрию изделия послойно с минимальными его затратами [1].

Наиболее распространенным и широко используемым является метод селективного лазерного спекания SLS (Selective Laser Sintering), позволяющий

послойно создавать из специального порошкового материала объемные металлические изделия сложной геометрии. Создание таких изделий традиционными методами вызывает большие затруднения, и коэффициент использования материала в этом случае невелик.

Вместе с тем, установки для селективного лазерного спекания являются дорогостоящими и сложными устройствами. Внедрение аддитивных технологий в производственных условиях вызывает существенные затруднения.

Перспективным направлением является использование дуговых свароч-



ных технологий для послойной аддитивной наплавки металлических изделий. Наиболее распространенными среди них являются три: GMAW (Gas Metal Arc Welding) – дуговая сварка плавящимся электродом в защитном газе, GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) – дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе, PAW (Plasma Arc Welding) – плазменно-дуговая сварка. Все они относятся к WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – аддитивным технологиям с использованием дугового источника нагрева и проволочного присадочного материала [1–4].

Наибольший интерес представляет разработка аддитивных технологий на основе GMAW, т. к. такая сварка является наиболее распространенной на предприятиях Республики Беларусь и других стран благодаря своим относительно высоким производительности, степени механизации и возможностям управления процессом, а также широкой номенклатуре сварочных проволок для сварки и наплавки самых разнообразных материалов и сплавов.

Важным вопросом, в случае применения GMAW является минимизация тепловложения в основной материал. В отличие от GTAW и PAW в этом случае горение дуги происходит непосредственно между основным и присадочным материалом. В результате этого присутствует перенос электродного металла через дуговой промежуток, характер которого определяет технологические особенности процесса и сильно зависит от параметров режима и состава защитной атмосферы. Развитие современных систем управления на базе инверторных источников питания для дуговой сварки открыло возможности для управления этими параметрами с высокой частотой, что позволило осуществить контролируемый перенос электродного металла с фиксированными длительностями циклов горения дуги, образования капли расплавленного металла на торце электродной

проволоки, времени её роста и короткого замыкания с поверхностью жидкой сварочной ванны.

В наиболее полной мере осуществить контроль переноса электродного металла позволяют системы с реверсивной подачей сварочной проволоки Fronius CMT (Cold Metal Transfer). Контроль стадии короткого замыкания капли электродного металла, минимизация силы сварочного тока совместно с реверсивным движением присадочной проволоки в противоположном направлении для инерционного перехода жидкого металла в расплавленную сварочную ванну позволяют минимизировать тепловложение в основной металл и повысить коэффициент наплавки, что, как было отмечено, является базовыми условиями для эффективного применения технологии.

Несмотря на предпринимаемые попытки выполнения аддитивных наплавки для создания изделий сложной геометрии и имеющиеся в этой области результаты исследований из зарубежных источников, информации о возможностях технологии и особенностях протекающих при этом металлургических процессов недостаточно. В большинстве исследований основное внимание уделено геометрическим параметрам полученной наплавки.

При оценке эффективности технологии необходимо учитывать два параметра: возможность получения наплавки с максимально точными геометрическими параметрами, что позволит минимизировать трудоемкость последующей её обработки, и, что более существенно, соответствие свойств наплавленного материала предъявляемым к изделию требованиям по механическим свойствам и химическому составу.

В связи с этим были сформулированы следующие задачи исследований:

1) полученная заготовка должна обладать не только необходимым комплексом механических характеристик, но и постоянством этих характеристик по все-



му сечению, что обуславливается однородностью химического состава и условиями воздействия термического цикла;

2) разрабатываемая технология должна обеспечивать постоянство химического состава по сечению заготовки при отсутствии необходимости зачистки промежуточных валиков, которая существенно снижает эффективность и повышает трудоемкость;

3) зона сплавления отдельных валиков не должна быть ослабленной выделением на этом участке легкоплавких примесей и шлаковых включений, являющихся концентраторами напряжений и провоцирующими снижение меха-

нических свойств и преждевременное разрушение заготовки.

В статье приведены результаты исследований эффективности применения систем с импульсной подачей проволоки для решения поставленных задач при выполнении аддитивной наплавки с использованием наиболее распространенных отечественных сварочных присадочных материалов.

Исследования проводились с применением роботизированного комплекса Fanuc ARC Mate 100iC со сварочным оборудованием Fronius TPS 3200 CMT (рис. 1).

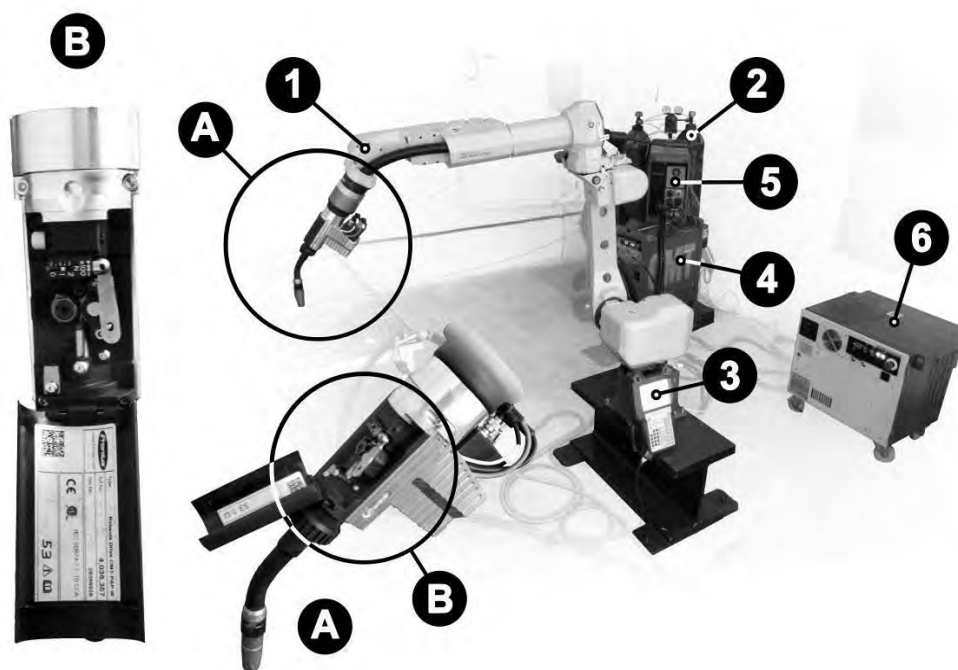


Рис. 1. Оборудование для проведения экспериментальных исследований по аддитивной наплавке: А – интегрированная сварочная горелка с подающим приводом; В – механизм реверсивной подачи проволоки Robacta Drive CMT; 1 – сварочный робот FANUC ARC Mate 100iC; 2 – баллоны с защитным газом; 3 – пульт управления роботом FANUC Robot ARC Mate 100iC; 4 – источник питания Fronius TPS 3200 с системой CMT; 5 – подающий механизм; 6 – контроллер SYSTEM R-30iB

В качестве присадочного материала использовалась наиболее распространенная сварочная проволока типа Св-08Г2С \varnothing 1,2 мм с полированной поверхностью. Основное предназначение проволоки – сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Специальное покрытие проволоки

позволяет существенно снизить коэффициент трения о токоподводящий наконечник и спираль рукава системы токоподающего механизма, что повышает эффективность использования проволоки для роботизированной сварки. Наплавка выполнялась в среде 82 % Ar + 18 % CO₂, получаемой при



помощи однопостового газового смесителя ВМ-2М. Параметры режима представлены в табл. 1.

Высота наплавленного валика за один проход составляла около 2...4 мм. После наплавки каждого валика сопло сварочной горелки смещалось роботом

по вертикальной оси вверх на 3 мм с целью поддержания постоянства значения вылета электродной проволоки. Внешний вид наплавки представлен на рис. 2. На рис. 3 представлен макрошлиф поперечного сечения наплавки.

Табл. 1. Режимы наплавки

Наименование параметра режима	Значение
Сила тока $I_{св}$, А	130...135
Напряжение на дуге U_d , В	13...20
Скорость наплавки V_n , м/ч (мм/с)	10,8 (3)
Вылет электродной проволоки, мм	10...12
Расход защитного газа Q_r , л/мин	14...15
Общее количество слоев наплавки	55

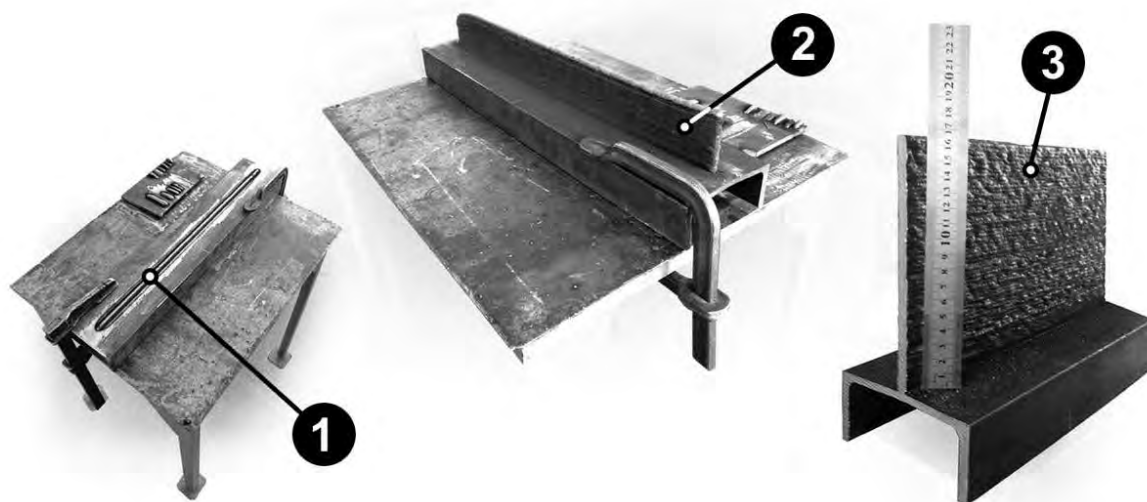


Рис. 2. Внешний вид и стадии аддитивной наплавки: 1 – первый слой наплавки; 2 – внешний вид после наплавки 16 слоев; 3 – внешний вид после наплавки 55 слоев

Постоянство химического состава наплавленного металла по сечению получаемой заготовки и чистота поверхности предыдущего слоя при наплавке последующего – главные условия при выполнении рассматриваемого вида наплавки.

При сварке и наплавке в активной газовой атмосфере (CO_2 , смеси $Ar + CO_2$), как правило, присутствует некоторое незначительное количество шлака, вы-

деляющегося на поверхности валика наплавленного металла. Это обусловлено химическими реакциями элементов раскислителей, таких как марганец и кремний, с кислородом, являющимся продуктом диссоциации углекислого газа при высоких температурах и растворившимся в сварочной ванне после вступления во взаимодействие с железом и другими элементами.



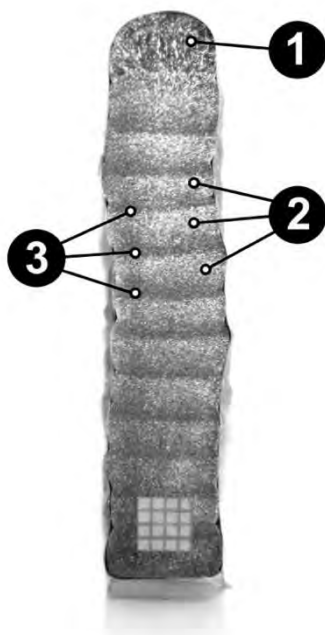


Рис. 3. Макрошлиф поперечного сечения наплавки (последние 14 проходов): 1 – последний проход наплавки (литая структура); 2 – наплавленный металл промежуточных слоев; 3 – зона сплавления отдельных валиков

Продукты таких реакций, хотя их количество невелико, как правило в виде шлака, всплывают на поверхность сварочной ванны и после её кристаллизации вызывают необходимость зачистки валика перед последующей наплавкой. В противном случае возникает большая вероятность образования дефектов в виде несплавлений из-за препятствия оксидных пленок объемному химическому взаимодействию, что является неотъемлемой стадией образования сварного соединения. Эта вероятность существенно выше в случае использования защитных газовых смесей на основе аргона ($Ar + CO_2$). Несмотря на небольшое количество углекислого газа в таких смесях (для сварки низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей около 18...20 %) и, как следствие, меньшее количество кислорода в защитной газовой атмосфере, более инертная среда оказывается более восприимчивой к шлаковым пленкам.

Вместе с тем, при сварке присут-

ствует некоторая ликвационная неоднородность. С одной стороны, наплавка последующих слоев является своего рода термообработкой для предыдущих валиков, что позволяет существенно изменить их свойства. С другой – от слоя к слою различные примеси, вытесняемые на поверхность жидкой ванны, как правило, накапливаются и химический состав непостоянен по сечению. Кроме того, легкоплавкие соединения вытесняются ростом кристаллов к центру сечения и на поверхность наплавленного валика, ослабляя эти зоны.

Для оценки постоянства химического состава авторами были проведены исследования с применением оптико-эмиссионного спектрометра Solaris GNR-SCP. Подготовка образца заключалась во фрезеровке его боковой поверхности и измерении спектральным методом химического состава наплавки. Измерения проводились по вертикальной оси с шагом 8...10 мм. Диаметр пятна измерения – около 8 мм. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4.



Табл. 2. Результаты определения химического состава наплавленного металла

Номер измерения	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
1	0,083	0,602	1,235	0,005	0,010	0,040	0,006	0,030
2	0,089	0,631	1,248	0,006	0,012	0,041	0,006	0,032
3	0,089	0,647	1,255	0,007	0,011	0,042	0,007	0,030
4	0,090	0,626	1,252	0,007	0,010	0,042	0,007	0,030
5	0,091	0,606	1,236	0,006	0,010	0,040	0,006	0,031
6	0,075	0,628	1,230	0,006	0,010	0,041	0,007	0,030
7	0,085	0,633	1,252	0,007	0,011	0,041	0,006	0,031
8	0,096	0,590	1,201	0,008	0,011	0,041	0,005	0,030
9	0,088	0,618	1,256	0,006	0,011	0,041	0,006	0,030
10	0,091	0,642	1,257	0,007	0,011	0,042	0,007	0,031
11	0,089	0,624	1,232	0,006	0,011	0,041	0,006	0,031
12	0,091	0,617	1,254	0,005	0,010	0,040	0,005	0,030
13	0,085	0,612	1,211	0,008	0,011	0,041	0,006	0,031
Средний	0,087	0,621	1,239	0,006	0,010	0,041	0,006	0,030



Рис. 4. Образец для проведения оптико-эмиссионного анализа химического состава

Как видно из полученных результатов, химический состав наплавленного металла по высоте наплавки практически однороден. Это свидетельствует о достаточных условиях для вытеснения поверхностных шлаковых пленок и отсутствии ликвационной неоднородности по мере наплавки последующих слоев. Наиболее вероятной причиной этого является создание благоприятных условий для вытеснения шлаковых пленок на боковую поверхность наплавки при наложении последующего слоя, о чем свидетельствует их наличие при анализе внешнего вида полученной наплавки.

Полученные результаты подтверждают эффективность технологии и возможности её развития. Для оценки механических свойств был проведен комплекс статических и динами-

ческих испытаний.

Основной характеристикой, определяющей механические свойства полученной заготовки, является её прочность или временное сопротивление разрыву при испытании на статическое растяжение. Этот показатель наиболее информативным и интуитивно воспринимаемым. Испытания на статическое растяжение проводились в соответствии с СТБ ЕН 895–2002. Для проведения испытаний использовалась разрывная машина РГМ 1000 М1 с компьютерной системой регистрации параметров. Внешний вид образцов до и после проведения испытаний представлен на рис. 5 и 6. Результаты испытаний приведены на рис. 7 в виде диаграмм растяжения и в табл. 3.



Рис. 5. Внешний вид образцов для проведения испытаний на статическое растяжение



Рис. 6. Образцы после испытаний на статическое растяжение

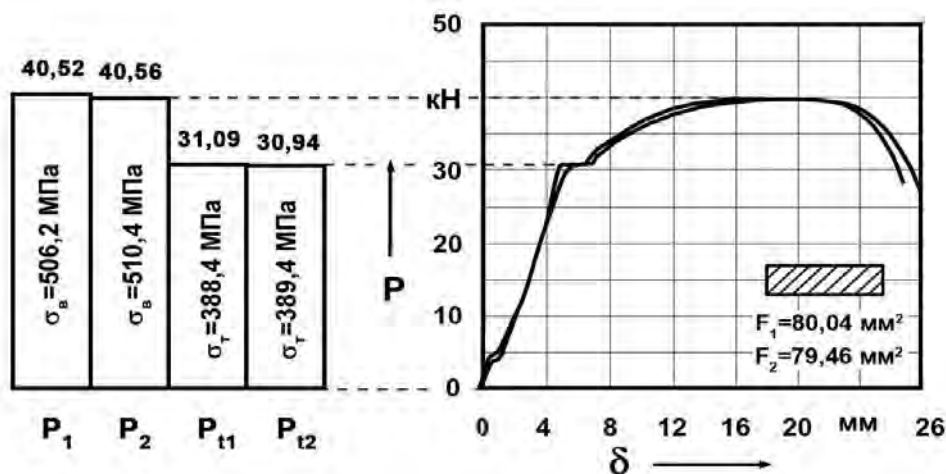


Рис. 7. Диаграмма растяжения и значения усилий, соответствующих пределам текучести и временному сопротивлению разрыву, при испытании образцов: P – прикладываемое к образцу усилие, кН; δ – удлинение образца, мм; P_1, P_2 – максимальные усилия, которые выдержали 1-й и 2-й образцы соответственно, кН; $P_{т1}, P_{т2}$ – усилия, соответствующие пределу текучести для 1-го и 2-го образца, кН



Табл. 3. Результаты механических испытаний на статическое растяжение

Номер образца	Размеры образца, мм			Результаты испытаний	
	Ширина	Толщина	Площадь поперечного сечения	Разрушающая нагрузка Р / Временное сопротивление разрыву σ_B Нагрузка, соответствующая пределу текучести R_T / Предел текучести σ_T Отношение σ_T / σ_B	Относительное удлинение, %
1п	13,8	5,8	80,04	40520 Н / 506,2 МПа (Н/мм ²) 31090 Н / 388,4 МПа (Н/мм ²) 0,77	30,8
2п	13,7	5,8	79,46	40560 Н / 510,4 МПа (Н/мм ²) 30940 Н / 389,4 МПа (Н/мм ²) 0,76	30,3

Образцы вырезались из наплавки механическим способом с использованием лентопильного станка. Окончательная доводка геометрических параметров производилась фрезерованием.

По результатам испытаний установлено, что временное сопротивление разрыву составляет 506,2 и 510,4 МПа для образцов 1п и 2п соответственно, предел текучести – 388,4 и 389,4 МПа соответственно. Полученные значения соответствуют временному сопротивлению на разрыв низкоуглеродистой (сталь 20) и низколегированной конструкционной стали (сталь 09Г2С, сталь 09ГС) и даже несколько превышают его, что свидетельствует о достаточном уровне механических свойств наплавки. При этом разрушение происходило после значительных пластических деформаций, о чем свидетельствует значение коэффициента относительного удлинения (около 30 %).

Характер поверхности разрушения однородный, со значительными утяжинами от пластической деформации.

Пластичность получаемой заготовки и её способность воспринимать заданный угол загиба без разрушений определялись по результатам испытаний на статический изгиб.

Использовались как стандартные образцы, так и образцы без фрезеровки

боковых поверхностей (то есть более жесткие условия), т. к. волнистая боковая поверхность является концентратором напряжений и может быть причиной возникновения и развития трещины.

Испытания проводились на разрывной машине РГМ 1000 М1 по схеме с изгибающей оправкой (рис. 8). Диаметр оправки составлял 16 мм, расстояние между опорами – 60 мм. Изгиб производился до параллельности сторон (угол загиба – 180°). Внешний вид образца после проведения испытаний представлен на рис. 9.

Из полученных результатов видно, что материал наплавки обладает необходимой пластичностью и способен воспринимать изгибающие нагрузки вплоть до параллельности сторон без возникновения каких-либо трещин и другого рода дефектов. Такие условия изгиба выступают важным критерием для квалификации технологического процесса. Также следует отметить, что, несмотря на концентраторы напряжений по боковым поверхностям наплавки, образования и раскрытия трещин не происходит.

Среди динамических видов испытаний наиболее информативным является испытание на ударный изгиб. Оценка показателя ударной вязкости наплавленного металла выступает необ-



ходимым условием для допуска конструкции к работе при отрицательных температурах и в условиях воздействия ударных нагрузок.

Испытания на ударный изгиб проводились с использованием маятникового копра ИО 5003-0,3 с максимальной

энергией удара 300 Дж. Образцы вырезались как вдоль направления наплавки, так и поперек с целью оценки влияния свойств зоны сплавления отдельных валиков на ударные характеристики. Внешний вид образцов представлен на рис. 10, а.

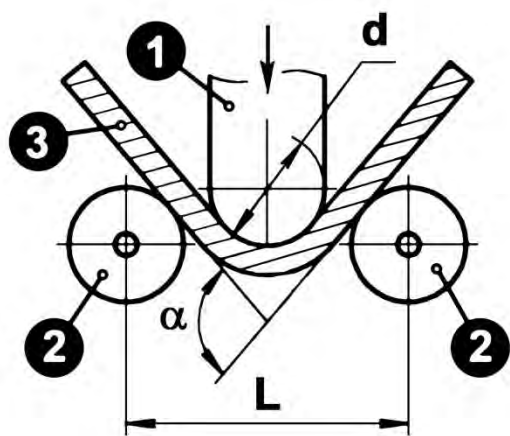


Рис. 8. Схема проведения испытаний на статический изгиб: 1 – изгибающая оправка; 2 – опорные ролики; 3 – образец для испытания; L – расстояние между роликами; d – диаметр изгибающей оправки (d = 16 мм); α – угол загиба (α = 180°)

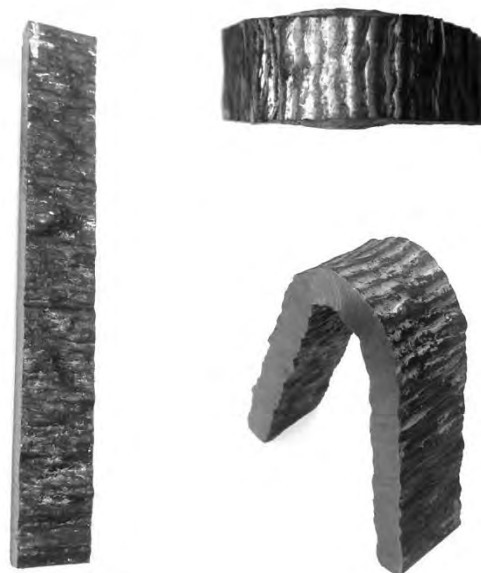


Рис. 9. Внешний вид образца до и после проведения испытаний на статический изгиб

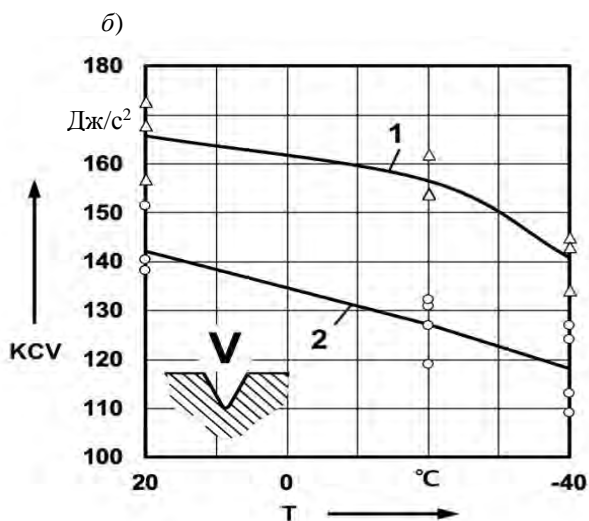
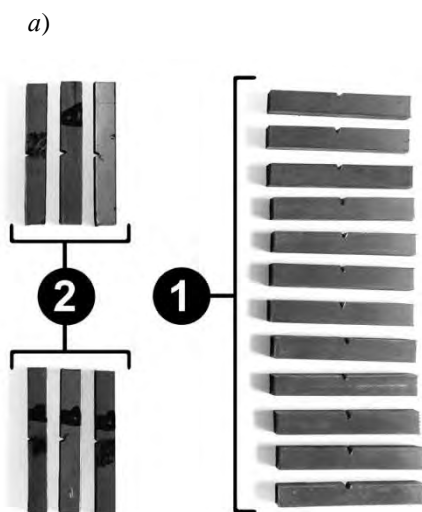


Рис. 10. Внешний вид образцов (а) и зависимость ударной вязкости от температуры испытаний и ориентации относительно направления наплавки (б): 1 – образцы с ориентацией вдоль направления наплавки (направление нанесения концентратора поперек слоев); 2 – образцы с ориентацией поперек направления наплавки (направление нанесения концентратора вдоль слоев)



По результатам испытаний получены графические зависимости ударной вязкости от температуры испытаний (рис. 10, б). Результаты позволяют судить об обеспечении необходимого уровня механических свойств полученного изделия.

Важно отметить, что направление вырезки образца оказывает влияние на значение ударной вязкости, а это связано в большей мере с особенностями формирования сварного соединения в слоях наплавки. Вместе с тем, значения, полученные для образцов, вырезанных поперек направления наплавки (удар маятникового копра направлен вдоль валиков наплавленного металла), незначительно уступают аналогичным значениям для образцов, вырезанных вдоль наплавки (см. рис. 10, б).

Таким образом, результаты исследований позволили установить, что использование рассматриваемой технологии дает возможность обеспечить не только необходимую точность наплавки, но и постоянство её химического состава и свойств по сечению заготовки. Это является важнейшим условием для дальнейшего развития и совершенствования такой технологии.

Выводы

1. При аддитивной наплавке вертикальной стенки с использованием дуговой сварочной технологии с реверсивной подачей присадочной проволоки Fronius CMT создаются необходимые условия для вытеснения продуктов реакций раскисления на боковые поверхности, при этом не затрудняются про-

цесс образования химических связей и объемное взаимодействие между отдельными валиками, что позволяет эффективно применить рассматриваемый способ без операций промежуточной зачистки, существенно повысив тем самым производительность процесса.

2. Отсутствует химическая неоднородность, а также вытеснение легкоплавких примесей и соединений к верхним слоям, что позволяет сформировать равномерную структуру и комплекс механических свойств по сечению заготовки.

3. Наличие волнообразной поверхности не вызывает существенной концентрации напряжений, что может повысить вероятность образования в местах сопряжения валиков трещин и способствовать их дальнейшему развитию в случае изгибающих нагрузок и деформаций.

4. Равномерный химический состав позволяет формировать достаточно высокие показатели механической прочности, соответствующие низкоуглеродистой и низколегированной конструкционной стали, – 500...510 МПа. Металл обладает достаточными пластическими свойствами. В то же время присутствует некоторая неоднородность свойств при испытаниях на ударный изгиб вдоль и поперек наплавки, что обусловлено формированием переходной микроструктуры в зоне сплавления отдельных валиков. Однако, несмотря на это, в обоих случаях значения энергии удара значительно превышают минимально допустимые для стали со схожим химическим составом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А. А. Осколков, Е. В. Матвеев, И. И. Безукладников, Д. Н. Трушников, Е. Л. Кротова // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – № 3. – Т. 20. – С. 90–105.
2. Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology / J. González, I. Rodríguez, J.-L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez, A. Pereira // Materials Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28–30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain. – P. 840–847.



3. **Prado-Cerqueira, J. L.** Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM) / J. L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez, A. M. Camacho // Materials Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28–30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain. – P. 895–902.

4. Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing / Iván Tabereroa, Amagoia Paskual, Pedro Álvarez, Alfredo Suárez // Materials 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23–27 April 2018, Bilbao, Spain. – P. 358–362.

Статья сдана в редакцию 20 сентября 2019 года

Артур Олегович Коротеев, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.

Валерий Петрович Долячко, ассистент, Белорусско-Российский университет.

Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Artur Olegovich Koroteyev, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.

Valery Petrovich Dolyachko, assistant lecturer, Belarusian-Russian University.

Valery Petrovich Kulikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

