

Акулова С.Н., Мышкина А.В., Варушкин С.В., Неулыбин С.Д., Кривоносова Е.А., Щицын Ю.Д., Ольшанская Т.В. О влиянии схем плазменной наплавки на формирование структуры и свойств титанового сплава // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 75–83. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.09

Akulova S.N., Myshkina A.V., Varushkin S.V., Neulybin S.D., Krivonosova E.A., Shchitsyn Yu.D., Olshanskaya T.V. About influence of plasma surface schemes on the formation of the structure and properties of titanium alloy. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 75–83. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.09

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 3, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.09

УДК 621.791

С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.В. Варушкин, С.Д. Неулыбин,
Е.А. Кривоносова, Ю.Д. Щицын, Т.В. Ольшанская

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О ВЛИЯНИИ СХЕМ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ
НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Аддитивные процессы – это инновационные технологические процессы, применение которых значительно сокращает количество этапов современного производства. В настоящее время учеными активно изучаются вопросы создания изделий с использованием различных технологий наплавки, вопросы структурообразования наплавленных слоев и зависимости состава наплавленного материала от режимов наплавки.

Несмотря на активное развитие методов аддитивного послойного формирования заготовок и изделий из металлических материалов, до настоящего времени полностью не решены вопросы снижения тепловложения в изделие при формировании слоев, возможности обработки материалов разных классов, снижения дефектности наплавленного материала, обеспечения требуемых свойств. Структура и свойства слоистых материалов во многом определяются особенностями теплопередачи в изделие при наплавке, в том числе при работе с активными материалами, к которым относится титан и его сплавы. Титановые сплавы обладают рядом структурных особенностей, в частности формированием вытянутых крупных зерен бета-фазы, которые могут образовываться вследствие длительного нахождения металла в области повышенных температур, и появлением крупных мартенситных фаз, образованию которых способствует высокая скорость охлаждения. Особенности структуры титановых сплавов необходимо учитывать в технологиях наплавки при формировании физико-механических свойств.

Рассмотрено влияние различных способов плазменной наплавки на структуру и свойства двухфазного титанового сплава при аддитивном формировании заготовок. Нарращивание заготовок осуществлялось плазменной наплавкой в камере с контролируемой атмосферой по однодуговой и двухдуговой схемам. Качественное формирование заготовок из титанового сплава с получением стабильных геометрических характеристик возможно при плазменной наплавке проволочного материала дугой прямого действия прямой полярности. Использование технологической камеры, заполненной инертным газом, позволяет обеспечивать наиболее эффективную защиту расплавленного и нагретого титанового сплава от воздействия окружающей среды.

Результаты исследований показали, что применение двухдуговой схемы плазменной наплавки в контролируемой атмосфере позволяет снизить суммарное тепловложение по сравнению с однодуговой схемой при обеспечении аналогичной производительности и стабильности процесса.

Ключевые слова: аддитивные технологии, титановые сплавы, плазменная наплавка, макроструктура, микроструктура, фазовый состав, микротвердость, механические свойства, схема, камера.

S.N. Akulova, A.V. Myshkina, S.V. Varushkin, S.D. Neulybin,
E.A. Krivonosova, Yu.D. Shchitsyn, T.V. Olshanskaya,

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ABOUT INFLUENCE OF PLASMA SURFACE SCHEMES ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY

Additive processes are innovative technological processes, the use of which significantly reduces the number of stages of modern production. At present, scientists are actively studying the issues of creating products using various surfacing technologies, issues of structure formation of deposited layers and the dependence of the composition of the deposited material on surfacing modes.

Despite the active development of methods for the additive layer-by-layer formation of workpieces and products from metallic materials, the issues of reducing heat input into the product during the formation of layers, the possibility of processing materials of different classes, reducing the defectiveness of the deposited material, ensuring the required properties have not been fully resolved so far. The structure and properties of layered materials are largely determined by the features of heat transfer to the product during surfacing, including when working with active materials, which include titanium and its alloys. Titanium alloys have a number of structural features, in particular, the formation of elongated large grains of the beta phase, which can form as a result of the long-term presence of the metal in the region of elevated temperatures and the appearance of large martensitic phases, the formation of which is facilitated by a high cooling rate. The peculiarities of the structure of titanium alloys must be taken into account in surfacing technologies in the formation of physical and mechanical properties.

The paper considers the influence of various methods of plasma surfacing technology on the structure and properties of a two-phase titanium alloy during additive formation of blanks. The workpieces were built up by plasma surfacing in a chamber with a controlled atmosphere according to a single-arc and double-arc scheme. High-quality formation of blanks from a titanium alloy with obtaining stable geometric characteristics is possible by plasma surfacing of a wire material with a direct arc of direct polarity. The use of a technological chamber filled with an inert gas makes it possible to provide the most effective protection of the molten and heated titanium alloy from the effects of the environment.

The research results showed that the use of a two-arc plasma cladding scheme in a controlled atmosphere can reduce the total heat input in comparison with a single-arc scheme while ensuring the same productivity and process stability.

Keywords: additive technologies, titanium alloys, plasma surfacing, macrostructure, microstructure, phase composition, microhardness, mechanical properties, circuit, chamber.

Введение

В настоящее время происходит активное развитие методов аддитивного послойного формирования заготовок и изделий из металлических материалов [1–7]. Однако пока остаются нерешенными вопросы снижения тепловложения в изделие при формировании слоев, возможности обработки материалов разных классов, снижения дефектности наплавленного материала, обеспечения требуемых свойств [8–14]. Плазменная наплавка как одна из высокоэффективных ресурсосберегающих технологий занимает ведущее место среди современных процессов формирования заготовок из различных материалов. Сущность процесса плазменной наплавки заключается в нанесении расплавленного присадочного порошкового или проволоочного материала на металлическую поверхность в виде покрытия. Источником нагрева служит сжатая дуга, которая горит между электродом плазмотрона и изделием. Разработано большое количество способов плазменной наплавки, при которых наплавленное изделие включается в электрическую цепь (наплавка плазменной дугой) или является нейтральным (наплавка плазменной струей). Главными задачами плазменной наплавки являются изготовление новых деталей и изделий со специальными свойствами поверхности и восстановление размеров бракованных и изношенных деталей за счет нанесения на них покрытий. Покрытия должны обладать значительной плотностью и прочно-

стью сцепления с изделием, для обеспечения работоспособности в условиях высоких динамических, знакопеременных нагрузок при возможном коррозионном, высокотемпературном или ином воздействии. Тип наплавленного металла выбирают, опираясь на условия эксплуатации рабочих поверхностей наплаваемых деталей. В качестве присадочных материалов используются порошки, проволоки, пасты, литые прутки, пластины и др. [15]. Выбор оптимальной технологии и режимов наплавки зависит от свойств основного и наплаваемого материала, габаритов и конфигурации обрабатываемых изделий и ряда других факторов.

В работе рассматриваются варианты наплавки по однодуговой схеме с нейтральной присадочной проволокой и по двухдуговой схеме. Типы схем плазменной наплавки представлены на рис. 1.

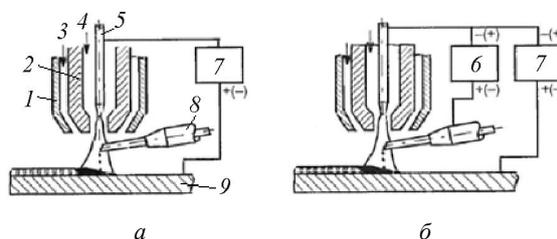


Рис. 1. Схемы плазменной наплавки с присадкой одной проволоки: *а* – плазменной дугой с нейтральной присадочной проволокой; *б* – комбинированной (двойной) дугой; 1 – защитное сопло; 2 – формирующее сопло; 3 – защитный газ; 4 – плазмообразующий газ; 5 – электрод; 6, 7 – источники питания косвенной дуги и дуги прямого действия; 8 – проволока; 9 – изделие

Способ наплавки двойной плазменной дугой с токоведущей присадочной проволокой наиболее надежен, производителен и универсален, а также во многих случаях обеспечивает меньшее проплавление основного металла [15].

Технология наплавки двухдуговым плазмотроном была рассмотрена в научной работе при исследовании плазменной порошковой наплавки двухдуговым плазмотроном [16]. По результатам исследований данной научной работы было показано, что мощность, выделяемая в плазме независимой дуги и непосредственно не передаваемая обрабатываемому изделию, может быть достаточна для расплавления наплавляемого материала, что дает возможность при необходимости уменьшить эффективную мощность плазмотрона и тем самым уменьшить тепловложение в изделие. Выбор оптимальных токов плазменной наплавки, обеспечивающих при заданной толщине наплавляемого слоя минимальную погонную энергию, ведет к уменьшению термических деформаций обрабатываемого изделия, вызванных наплавкой.

Титан и его сплавы при обработке активно взаимодействуют с окружающей средой. При работе с такими активными материалами, как титан и его сплавы, предъявляют особые требования к качеству защиты от воздействия окружающей среды в процессе наплавки заготовки. Ввиду этого необходимо наличие защиты материала от воздействия окружающей среды. Кроме этого, титановые сплавы обладают некоторыми структурными особенностями, которые могут стать существенным недостатком в технологиях наплавки при формировании физико-механических свойств [17–21]. При наплавке материала возможно развитие физической неоднородности материала, а именно рост зерна, который может сыграть существенно отрицательную роль при формировании свойств материала готового изделия.

Целью работы является исследование влияния схем плазменной наплавки на формирование физико-механических свойств наплавленного материала.

Технологии, исследовательские методики и материалы

В данной работе в качестве подложки и наплавляемого материала использовался титановый сплав системы Ti–Al–V. Рассматриваемый титановый сплав является ($\alpha+\beta$)-сплавом. Химический состав сплава приведен в табл. 1¹. Наплавка производилась проволокой ВТбсв на подложку ВТб.

¹ ГОСТ 19807–91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки (с изм. № 1). Введ. 1991–07–17. 16 с.

При работе с активными материалами, к которым относится титан и его сплавы, особые требования предъявляются к качеству защиты от воздействия окружающей среды в процессе выращивания заготовки.

Таблица 1

Химический состав сплава

Сплав	Ti	Al	V	Si	Fe	O	H	N	C	Примесей
Титановый сплав	Основа	3,5–4,5	2,5–3,5	До 0,1	До 0,15	До 0,12	До 0,003	До 0,04	До 0,05	Прочих 0,3

Для проведения исследований по формированию образцов плазменной наплавкой в атмосфере инертных газов использовалась технологическая камера, снабженная многокоординатным столом для позиционирования изделия при наплавке.

На первом этапе исследования было выполнено экспериментальное определение режимов плазменной наплавки, обеспечивающих стабильность геометрических характеристик валика по его длине, для однодугового и двухдугового процессов.

Следующим этапом была осуществлена наплавка вертикальных стенок для каждой схемы процесса. Послойное охлаждение при наплавке не производилось. Размеры полученных стенок были приближены к следующим размерам в миллиметрах: 230×8×80 (Д×Ш×В).

При однодуговой плазменной наплавке источник питания работал в режиме обеспечения пологопадающей вольт-амперной характеристики.

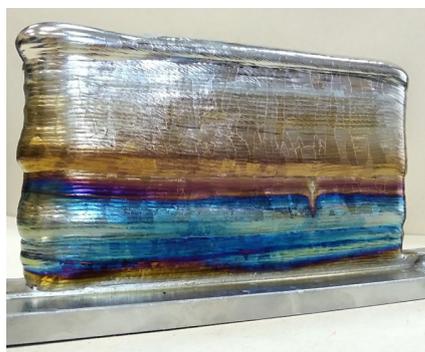
При осуществлении плазменной наплавки по двухдуговой схеме было использовано два независимых источника питания, как показано на рис. 1. В процессе наплавки происходило горение одновременно двух дуг – между электродом плазмотрона и проволокой и между электродом плазмотрона и изделием. Для равномерного плавления присадочной проволоки в условиях колебания дугового промежутка режим источника питания в цепи «электрод плазмотрона – проволока» обеспечивал постоянство протекающего тока. Для снижения колебаний ширины наплавляемого валика в условиях колебания дугового промежутка источник питания в цепи «электрод плазмотрона – изделие» работал в режиме обеспечения пологопадающей вольт-амперной характеристики.

Для обеспечения стабильного процесса ток и напряжение дуги снижались по мере увеличения высоты наплавляемой стенки. Остальные параметры режима оставались неизменными: скорость подачи проволоки $V_{\text{пп}} = 1,7$ м/мин; скорость наплавки

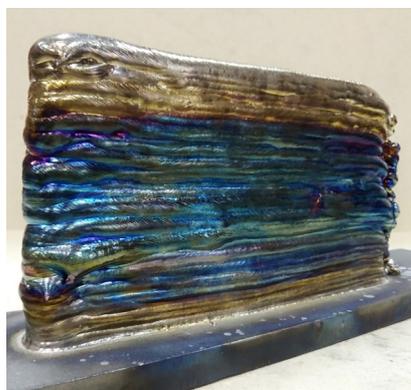
$V_{\text{нап}} = 18$ м/ч; расход плазмообразующего газа $Q_{\text{пл}} = 3$ л/мин.

Следует отметить, что снижение общей мощности теплового источника при однодуговом процессе ограничивалось потребностью плавления проволоки, в то время как сплавление валика с предыдущими слоями осуществлялось и при меньшем тепловложении. При двухдуговом процессе возможно раздельное регулирование тепловложения в проволоку и в наплавляемый участок для обеспечения потребностей плавления проволоки и сплавления валика с предыдущими слоями.

Внешний вид стенок, полученных многослойной плазменной наплавкой в контролируемой атмосфере по однодуговой (а) и двухдуговой (б) схемам осуществления процесса, представлен на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Внешний вид стенок, полученных многослойной плазменной наплавкой в контролируемой атмосфере по однодуговой (а) и двухдуговой (б) схемам осуществления процесса

Для оценки снижения тепловложения в изделие при наплавке с применением двухдуговой схемы сравнивались режимы аналогичных слоев, полученных при наплавке по однодуговой и двухдуговой схемам.

Сварочная дуга является мощным концентрированным источником теплоты. Электрическая энергия, потребляемая дугой, в основном превра-

щается в тепловую энергию. Полная тепловая мощность зависит от силы сварочного тока и напряжения дуги. Снижение тепловложения в изделие можно оценить по величине тепловой мощности дуги, определяемой параметрами режимов плазменной наплавки – напряжением на дуге и током плазменной дуги.

Мощность источника при наплавке по двухдуговой схеме будет определяться суммарной мощностью от двух источников питания:

$$Q = I_{\text{ип1}} U_{\text{ип1}} + I_{\text{ип2}} U_{\text{ип2}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{ип1}}$ и $I_{\text{ип2}}$ – ток плазменной дуги источников питания 1 и 2, А; $U_{\text{ип1}}$ и $U_{\text{ип2}}$ – напряжение на дуге источников питания 1 и 2, В.

Снижение мощности теплового источника приводит к изменению условий нагрева и охлаждения, что напрямую влияет на структуру формируемого наплавляемого материала и, следовательно, на его физико-механические свойства.

Физико-механические свойства материала наплавленных стенок исследовались путем проведения металлографических исследований, механических испытаний на статический разрыв и определения микротвердости. Испытания на растяжение проводились в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 1497–84. Испытания на определение значения ударной вязкости по Шарпи проводились в соответствии с рекомендациями стандарта ГОСТ 9454–78 с использованием маятникового копра Instron MPX 450.

Результаты исследований

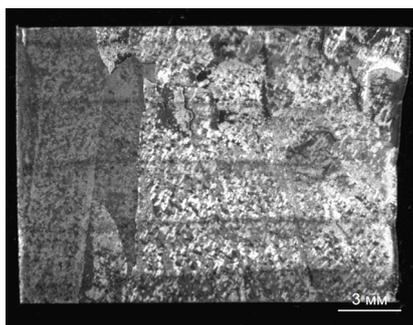
Исследование процесса плазменной наплавки титанового сплава в камере с контролируемой атмосферой

При выполнении многослойной плазменной наплавки по однодуговой схеме было отмечено избыточное тепловложение в наплавляемый участок. При этом снижение тепловложения приводило к недостатку тепла для плавления проволоки и процесс прерывался. В частности, не удалось получить стабильного процесса наплавки при мощности источника менее 3,3 кВт.

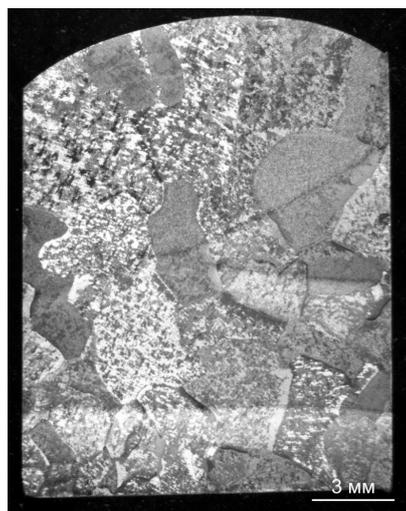
Предварительные исследования показали возможность стабильного ведения процесса многослойной плазменной наплавки в контролируемой атмосфере по двухдуговой схеме. Независимое регулирование тепловложения в присадочную проволоку при двухдуговом процессе позволило снизить суммарную мощность теплового источника по сравнению с однодуговым процессом. Стабильный процесс наплавки без внутренних дефектов сплавления слоев удалось получить при суммарной

мощности комбинированного теплового источника 2,6 кВт. При этом двухдуговой процесс требует повышенного тепловложения в подложку при выполнении первого слоя, что может быть объяснено меньшей плотностью энергии в области наплавки по сравнению с однодуговым процессом.

В результате проведения анализа макроструктуры и микроструктур шлифов были выявлены особенности формирования структуры наплавленного металла. Сравнительный анализ макро- и микроструктуры шлифов образцов, наплавленных с использованием двух технологий наплавки, показан на рис. 3, 4.



a



б

Рис. 3. Макроструктура наплавленного образца в поперечном сечении: *a* – наплавка по схеме с нейтральной присадочной проволокой; *б* – наплавка двойной дугой

На макроструктуре наплавленного материала, полученного плазменной наплавкой по однодуговой схеме, в поперечном сечении прослеживается слоистое строение материала – границы слоев видны как узкие темные горизонтальные полоски, а также транскристаллитная кристаллизация (кристаллографическая ориентация зерен через несколько слоев наплавки).

На макроструктуре наплавленного материала, полученного плазменной наплавкой по двухдуговой схеме, транскристаллитный рост первичных β -зерен происходит не более чем через два слоя, переход между слоями виден, но выражен нечетко.

Для исследования микроструктуры полученных образцов были выполнены серии снимков полей зрения внутри наплавленного слоя и на границах между первичными β -зернами. Для более детального исследования были зафиксированы поля зрения при разном увеличении ($\times 200$, $\times 500$, $\times 1000$). Фрагменты характерных микроструктур рассмотренных полей зрения приведены на рис. 4.

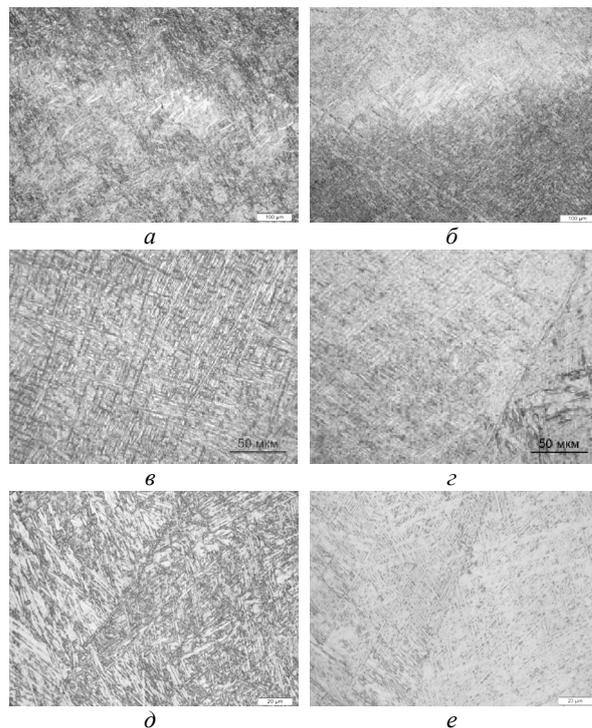


Рис. 4. Фрагменты микроструктуры наплавленного металла на поперечном шлифе (увеличение $\times 200$, $\times 500$, $\times 1000$): *a*, *в*, *д* – наплавка по однодуговой схеме; *б*, *г*, *е* – наплавка двойной дугой

Структура наплавленного металла является двухфазной. Структура сплава состоит из кристаллов α -фазы, внедренных в матрицу β -фазы. Кристаллы α -фазы имеют линзовидную (игольчатую) и сфероидальную формы. Обе модификации обладают полезными свойствами, поэтому подбор рекомендуемых режимов направлен на получение в образцах обеих модификаций α -фазы. Анализ фрагментов микроструктур, представленных на рис. 4, показывает, что структура образцов, полученных при наплавке по однодуговой схеме, преимущественно пластинчатая, превращенная β -структура, в которой присутствует β -зерно с расположенными в нем α -колониями. Микроструктура

материала наплавки, полученного по двухдуговой схеме, является смешанной, или дуплексной структурой, состоящей из первичной α -фазы и превращенной β -матрицы, ориентация α - и β -фаз – в виде характерного плетения, а также выявлено присутствие α -фазы сфероидальной формы небольших размеров. При этом четко выявляются границы исходной β -фазы, зерно которой достаточно крупное (до нескольких миллиметров), в материале сплава, полученного по однодуговой схеме; наблюдаемый размер зерен сплава, полученного наплавкой по двухдуговой схеме, существенно меньше (см. рис. 3).

Сравнивая структуру металла, наплавленного по двум рассматриваемым технологическим схемам, следует отметить, что в микроструктуре металла в обоих случаях по границам первичных β -зерен наблюдается выделение α' -фазы. Внутриверное строение игольчатое, наблюдается характерная ориентировка микроструктуры «корзинчатого» типа. В переходной зоне между слоями происходит распад α' -мартенсита и частичная коагуляция α -фазы.

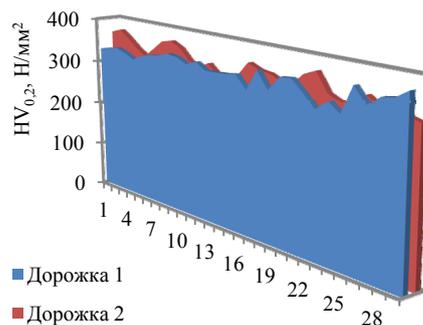
При плазменной наплавке по однодуговой схеме с нейтральной присадочной проволокой размеры исходных зерен β -фазы от 0,5 до 2–3 мм, размеры внутриверных пластинок корзинчатого плетения α - и β -фаз – от 10 до 80 мкм. Наблюдаются также отдельные иглы (скорее всего остаточной α' -фазы) размером до 150 мкм (рис. 5). Такое формирование структуры материала образцов, полученных двумя технологиями, можно обосновать влиянием тепловложения в процессе формирования заготовки.



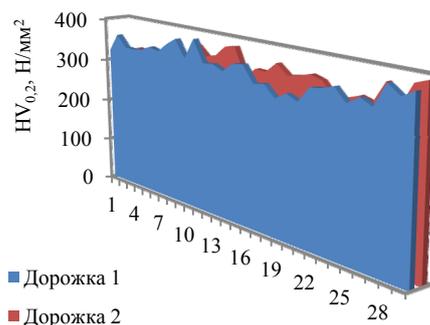
Рис. 5. Отдельные иглы остаточной α' -фазы

На рис. 6 приведено распределение микротвердости вдоль дорожек измерений.

Обработка результатов измерений показывает незначительное изменение микротвердости по глубине наплавки по двухдуговой схеме. Распределение микротвердости близкое к однородному. Среднее значение микротвердости материала наплавки по схеме 1 составляет $HV_{0,2} = 3426,9 \text{ Н/мм}^2$, по схеме 2 – $HV_{0,2} = 3845,6 \text{ Н/мм}^2$.



а



б

Рис. 6. Изменение микротвердости вдоль дорожек: а – наплавка по однодуговой схеме; б – наплавка двойной дугой

Результаты механических испытаний наплавленного металла, полученного при плазменной наплавке по однодуговой схеме с нейтральной присадочной проволокой, показали, что пластичность наплавленного металла находится на достаточно высоком уровне, вместе с тем прочностные характеристики имеют относительно невысокие значения.

В табл. 2 приведены результаты испытания механических свойств материала, полученного при плазменной наплавке в камере с контролируемой атмосферой без послойного охлаждения и при плазменной наплавке в камере с контролируемой атмосферой по двухдуговой схеме наплавки.

Таблица 2

Механические свойства сплава, полученного при плазменной наплавке

Технология наплавки	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	ψ , %
Плазменная наплавка по однодуговой схеме с нейтральной присадочной проволокой	725–778	5,8–6,2	14,6–19,5
Двухдуговая плазменная наплавка	815–875	7,7–10,9	21,3–31,6

Технология двухдуговой наплавки в камере на прямой полярности позволяет получить наплавленный материал с достаточно высоким уровнем механических свойств.

Выводы

Результаты исследований показали, что применение двухдуговой схемы плазменной наплавки в контролируемой атмосфере позволяет снизить суммарное тепловложение по сравнению с однодуговой схемой. В настоящей работе тепловложение при двухдуговой плазменной наплавке было обеспечено на 21 % ниже, чем при однодуговой схеме.

Результаты исследования структуры материала показали влияние тепловложения в процессе наплавки. Микроструктура образцов, полученных при наплавке по однодуговой схеме, преимущественно пластинчатая, превращенная β -структура, в которой присутствует β -зерно с расположенными в нем α -коллониями. Микроструктура материала наплавки, полученного по двухдуговой схеме, является смешанной, состоящей из первичной α -фазы и превращенной β -матрицы, ориентация α - и β -фаз – в виде характерного плетения, а также выявлено присутствие α -фазы сфероидальной формы небольших размеров, что является благоприятным фактором, поскольку обе модификации α -фазы обладают полезными свойствами.

Результаты исследования показывают незначительное изменение микротвердости по глубине наплавки по двухдуговой схеме. Однако среднее значение микротвердости при использовании данной технологии на 10 % выше, чем при использовании однодуговой схемы.

Материал, наплавленный по двухдуговой схеме, в среднем показал предел прочности на 12 %, а пластические свойства на 55 % выше, по сравнению с материалом, наплавленным одной плазменной дугой.

Результаты механических испытаний наплавленного металла, полученного при плазменной наплавке по однодуговой схеме с нейтральной присадочной проволокой, показали, что пластичность наплавленного металла находится на достаточно высоком уровне, вместе с тем прочностные характеристики имеют невысокие значения.

Таким образом, применение технологии плазменной наплавки в камере с контролируемой атмосферой с использованием двухдуговой схемы на прямой полярности тока позволяет обеспечить получение материала изделия с высоким уровнем механических свойств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/511, Министерства науки и высшего образования РФ по Государственному заданию FSNM-2020-0028 и Российского фонда фундаментальных исследований совместно с Пермским краем (проект № 20-48-596006 р_НОЦ_Пермский край).

Список литературы

1. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: A Review // J. Mater. Eng. Performance. – 2014. – Vol. 23, no. 6. – P. 917–928.
2. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing / Yicha ZHANG, Alain Bernard, Ramy Harik, K.P. Karunakaran // J. of Intelligent Manuf. – 2015. – Vol. 5. – P. 34–48.
3. Юрьева А.В., Ковальчук А.Н. Введение в плазменные технологии и водородную энергетику: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – 90 с.
4. Incorporating grain-level residual stresses and validating a crystal plasticity model of a two-phase Ti–6Al–4V alloy produced via additive manufacturing / K. Kapoor, Y.S.J. Yoo, T.A. Book, J.P. Kacher, M.D. Sangid // J. Mech. Phys. Solids. – 2018. – Vol. 121. – P. 447–462.
5. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement / Wu Bintao, Pan Zengxi, Ding Donghong, Cuiuri Dominic, Li Huijun, Xu Jing, Norrish John // Journal of Manuf. Proc. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139.
6. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review // Mater. Des. – 2019. – Vol. 164. – P. 107552.
7. Design for wire + arc additive manufacture: design rules and build orientation selection / Lockett Helen, Ding Jialuo, Williams Stewart, Martina Filomeno // J. of Eng. Design. – 2017. – Vol. 28(7-9). – P. 568–598.
8. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – М., 2015. – 220 с.
9. Плазменная многослойная наплавка / Ю.Д. Щицын [и др.] // Сварка и диагностика: сб. докл. междунар. форума, г. Екатеринбург, 24–25 ноября 2015 г. – Екатеринбург, 2015. – С. 149–156.
10. Шаповалов К.П., Макаренко Н.А., Грановская Л.А. Совершенствование способа плазменной наплавки с боковой подачей присадочной проволоки // Автоматическая сварка. – 2012. – № 2. – С. 57–59.
11. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+arc additively manufactured features for microstructural refinement / Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle, Kamal Eytayo, Ioan Stan, Punyawee Sukrongpang, Antoine Crochemore, Zsolt Pinter // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 21. – P. 340–349.

12. Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing / Markus Hirtler, Angelika Jedynak, Benjamin Sydow, Alexander Sviridov, Markus Bambach // MATEC Web of Conferences (ICNFT 2018). – 2018. – Vol. 190. – 02005.

13. Martina F., Williams S.W., Colegrove P.A. Improved microstructure and increased mechanical properties of additive manufacture produced Ti-6Al-4V by interpass cold rolling // 24th International Free form abrication Symposium. – Austin, Texas, USA, 2013.

14. Переpletчиков Е.Ф. Способы плазменной наплавки, применяемые в странах СНГ // Сварщик. – 2004. – № 3. – С. 9–14.

15. Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка (обзор) // Сварочное производство. – 2007. – № 2. – С. 32–40.

16. Ермаков С.А., Соснин Н.А., Тополянский П.А. Особенности плазменной порошковой наплавки двухдуговым плазмтроном // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 9-й практ. конф., г. Санкт-Петербург, 10–13 апреля 2007 г. – СПб., 2007. – Ч. 1. – С. 94–101.

17. Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys / E.A. Krivonosova, Yu.D. Schitsin, D.N. Trushnikov, A.V. Myshkina, S.N. Akulova, S.D. Neulybin, A.Yu. Dushina // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63, no. 1–2. – P. 197–205. DOI: 10.1007/s11015-019-00810-1

18. Формирование структуры и свойств сплава системы алюминий–магний–скандий в аддитивных технологиях плазменной наплавки с послойным деформационным упрочнением / Ю.Д. Щицын, Е.А. Кривоносова, Т.В. Ольшанская, С.Д. Неулыбин // Цветные металлы. – 2020. – № 2. – С. 89–94.

19. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов / МГТУ им. Баумана. – М., 2018. – 549 с.

20. Сварка плавлением титанового сплава BT18У / В.И. Лукин, Е.Н. Иода, М.Д. Пантелеев, А.А. Скупов // Труды ВИАМ. – 2015. – № 5. – С. 1–13.

21. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар [и др.]. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.

References

1. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: A Review. *Journal Mater. Eng. Performance*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 917–928.

2. Yicha ZHANG, Alain Bernard, Ramy Harik, Karunakaran K.P. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manuf.*, 2015, vol. 5, pp. 34–48.

3. Iur'eva A.V., Koval'chuk A.N. Vvedenie v plazmennye tekhnologii i vodorodnuiu energetiku [Introduction to Plasma Technology and Hydrogen Energy]. Tomsk, 2014, 90 p.

4. Kapoor K., Yoo Y.S.J., Book T.A., Kacher J.P., Sangid M.D. Incorporating grain-level residual stresses and

validating a crystal plasticity model of a two-phase Ti-6Al-4V alloy produced via additive manufacturing. *Journal Mech. Phys. Solids*, 2018, iss. 121, pp. 447–462.

5. Wu Bintaο, Pan Zengxi, Ding Donghong, Cuiuri Dominic, Li Huijun et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of manufacturing processes*, 2018, no. 35, pp. 127-139.

6. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Mater. Des.*, 2019, iss. 164, p. 107552.

7. Lockett Helen, Ding Jialuo et al. Design for Wire + Arc Additive Manufacture: design rules and build orientation selection. *Journal of Engineering Design*, 2017, no. 28(7-9) pp. 568–598.

8. Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: posobie dlia inzhenerov [Additive Technology in Mechanical Engineering: Handbook for Engineers for engineers]. Moscow, 2015, 220 p.

9. Iu.D. Shchitsyn et al. Plazmennaiа mnogosloinaia naplavka [Plasma-based multilayer surfacing]. *Svarka i diagnostika*. Ekaterinburg, 2015, pp. 149–156.

10. Shapovalov K.P., Makarenko N.A., Granovskaia L.A. Sovershenstvovanie sposoba plazmennoi naplavki s bokovoi podachei prisadochnoi provoloki [Improving the method of plasma surfacing with lateral feeding of the filler wire]. *Avtomaticheskaiа svarka*, 2012, no. 2, pp. 57–59.

11. Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle et al. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 2018, no. 21, pp. 340–349.

12. Hirtler M., Jedynak A., Sydow B., Sviridov A., Bambach M. Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. *MATEC Web of Conferences 190, ICNFT*, 2018, p. 6.

13. Martina F., Williams S.W., Colegrove P.A. Improved microstructure and increased mechanical properties of additive manufacture produced Ti-6Al-4V by interpass cold rolling. *24th International Free form abrication Symposium, Austin, Texas, USA*, 2013, pp. 490-496.

14. Perepletchikov E.F. Sposoby plazmennoi naplavki, primeniaemye v stranakh SNG [Plasma surfacing methods used in CIS countries]. *Svarshchik*, 2004, no. 3, pp. 9–14.

15. Gladkii P.V., Perepletchikov E.F., Riabtsev I.A. Plazmennaiа naplavka (obzor) [Plasma surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2007, no. 2, pp. 32–40.

16. Ermakov S.A., Sosnin N.A., Topolianskii P.A. Osobnosti plazmennoi poroshkovoi naplavki dvukhdugovym plazmotronom [Features of double-arc plasma powder surfacing]. *Tekhnologii remonta, vosstanovleniia i uprochneniia detalei mashin, mekhanizmov, oborudovaniia, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki: materialy 9-i prakticheskoi konferentsii*. Saint-Petersburg, 2007, part 1, pp. 94–101.

17. Krivonosova E.A., Schitsin Yu.D., Trushnikov D.N., Myshkina A.V., Akulova S.N., Neulybin S.D., Dushina A.Yu. Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys. *Metallurgist*, 2019, vol. 63, no. 1–2, pp. 197–205. DOI 10.1007/s11015-019-00810-1

18. Shchitsyn Iu.D., Krivonosova E.A., Ol'shanskaya T.V., Neulybin S.D. Formirovanie struktury i svoystv splava sistemy aluminii–magnii–skandii v additivnykh tekhnologiiakh plazmennoi naplavki s posloinym deformatsionnym uprochneniem [Structure and Properties of an Aluminum-Magnesium-Scandium System in Additive Technology of Plasma Cladding with Layer-by-Layer Deformation Hardening]. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 2, pp. 89–94.

19. Makarov E.L., Iakushin B.F. Teoriia svarivayemosti staley i splavov [Theory of weldability of steels and alloys]. MG TU imeni Bauman. Moscow, 2018, 549 p.

20. Lukin V.I., Ioda E.N., Panteleev M.D., Skupov A.A. Svarka plavleniem titanovogo splava VT18U [Fusion welding of titanium alloy VT18U]. *Trudy VIAM*, 2015, no. 5, pp. 1–13.

21. Borisova E.A., Bocharov G.A. et al. Titanovye splavy. Metallografiya titanovykh splavov [Titanium alloys. Metallography of titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 464 p.

Получено 06.08.2021

Опубликовано 30.09.2021

Сведения об авторах

Акулова Светлана Николаевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: veta-ru@yandex.ru.

Мышкина Альбина Васильевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: albina_myshkina@mail.ru.

Варушкин Степан Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, инженер кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

Неульбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник центра коллективного пользования «Центр аддитивных технологий» Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: sn-1991@mail.ru.

Кривоносова Екатерина Александровна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и тех-

нологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: svarka@pstu.ru.

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: tvo66@rambler.ru.

About the authors

Svetlana N. Akulova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: veta-ru@yandex.ru.

Albina V. Myshkina (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: albina_myshkina@mail.ru.

Stepan V. Varushkin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Engineer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

Sergey D. Neulybin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Researcher, Shared Knowledge Center “Additive Technology Center”, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: sn-1991@mail.ru.

Ekaterina A. Krivonosova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.

Iurii D. Shchitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: svarka@pstu.ru.

Tatiana V. Olshanskaya (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: tvo66@mail.ru.