



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-101-107>
УДК 621.791.722+621.791.92

Поступила 10.07.2022
Received 10.07.2022

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ НА ТОЛЩИНУ И РАВНОМЕРНОСТЬ ОДНОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. И. ПОБОЛЬ, В. Г. ЗАЛЕССКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: alex.pobol@gmail.com

Исследовано влияние силы тока луча, расстояния между валиками наплавленного материала и интенсивности подачи проволоки при электронно-лучевой (ЭЛ) наплавке титанового сплава VT9 на толщину и равномерность получаемого восстанавливающего покрытия. С ростом силы тока луча происходит увеличение ширины и уменьшение высоты наплавленного слоя. Оптимальным расстоянием между валиками следует считать смещение, не превышающее ширину валика. Точным дозированием интенсивности подачи проволоки возможно в широком диапазоне управлять высотой наплавленного слоя. Равномерность наплавки обеспечивается сбалансированностью энергетического воздействия. Химический состав наплавленного слоя отвечает требованиям нормативных документов по содержанию примесных газов для изделий из материалов медицинского назначения, получаемых аддитивными технологиями. Результаты исследования использованы при восстановлении поверхности элемента шасси авиационной техники.

Ключевые слова. Электронно-лучевая наплавка, аддитивные технологии, титановые сплавы, восстановление поверхности, профиль поверхности.

Для цитирования. Поболь, А. И. Влияние режимов электронно-лучевой наплавки на толщину и равномерность однослойного покрытия при восстановлении изделий из титановых сплавов / А. И. Поболь, В. Г. Залесский // Литие и металлургия. 2022. № 4. С. 101–107. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-101-107>.

INFLUENCE OF ELECTRON-BEAM SURFACING MODES ON THICKNESS AND UNIFORMITY OF SINGLE-LAYER COATING WHEN RESTORING PARTS MADE OF TITANIUM ALLOYS

A. I. POBOL, V. G. ZALESKI, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: alex.pobol@gmail.com

The influence of the beam current, the distance between the beads of the clad material and the wire feeding intensity during electron-beam (EB) surfacing of titanium alloy VT9 on the thickness and uniformity of the resulting restoring coating was investigated. As the beam current strength increases, the width of the deposited layer increases and the height decreases. The optimal distance between the beads should be considered an offset that does not exceed the width of the bead. It is possible to control the height of the deposited layer in a wide range by precise dosing of the wire feed intensity. The uniformity of surfacing is ensured by a balanced energy impact. Chemical composition of the clad layer meets the requirements of normative documents on the content of impurity gases for products from medical materials, obtained by additive technologies. The results of the study are used in the restoration of the surface of the landing gear element of aviation equipment.

Keywords. Electron-beam surfacing, additive technologies, titanium alloys, surface restoration, surface profile.

For citation. Pobol A. I., Zaleski V. G. Influence of electron-beam surfacing modes on thickness and uniformity of single-layer coating when restoring parts made of titanium alloys. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 4, pp. 101–107. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-101-107>.

Введение

Изделия авиационной техники, как правило, дорогостоящие, а объемы удаленного с поверхности изделия при его эксплуатации металла зачастую невелики. Восстановление таких деталей – актуальная проблема. Она может быть решена путем наплавки тонкого слоя металла на изношенные участки изделия.

Например, ОАО «558 авиационный ремонтный завод» заинтересован в восстановлении дорогостоящих изношенных деталей авиационной техники из сплавов титана различных марок. Многие из них

выполнены тонкостенными (с толщиной стенки порядка 1–5 мм) для кардинального снижения массы готового изделия. Критическим фактором получения качественных изделий из титановых сплавов является защита материала от активных газов. Повышенное содержание кислорода, азота и водорода в титане ведет к снижению механических свойств (ударной вязкости и пластичности), образованию пор и в комбинации с образованием хрупких закалочных структур холодных трещин [1]. Учитывая очень высокую активность титана и его сплавов, ЭЛ нагрев является единственным вариантом реализации методов послойной наплавки. При этом необходимо обеспечить строго локализованный нагрев, прецизионную подачу в зону расплавления количества тепла и материала. Подробно исследуется технология аддитивного получения объемов из титановых сплавов при ЭЛ наплавке проволоки в [2, 3], однако не уделяется должного внимания формированию поверхности при однослойной наплавке.

Цель настоящей работы – оптимизация метода ЭЛ наплавки для получения слоев требуемой толщины на изношенных участках тонкостенных изделий из титановых сплавов.

Материалы, оборудование и методики исследования

Для исследований методов ЭЛ обработки образцов материалов в режиме наплавки покрытий использовали установку, созданную в ФТИ НАН Беларуси с использованием аппаратуры производства Prvá Zváračská (Словакия). Рабочая камера установки ЭЛ обработки выполнена из коррозионностойкой стали.

Эксперименты проводили с параметрами в диапазонах, приведенных в таблице. Под интенсивностью подачи проволоки следует понимать отношение длины подаваемой проволоки к длине наплавленного валика.

Управляющие параметры ЭЛ наплавки

Напряжение, кВ	Ток луча, мА	Смещение тока фокусировки, мА	Скорость наплавки, мм/с	Интенсивность подачи проволоки, мм/мм	Величина смещения валика, мм
55	9,3–14,9	+30	4,4	0,125–1,0	1–4

В работе использовали проволоку из титанового сплава ВТ9 диаметром $1,2^{-0,12}$ мм, площадью поперечного сечения $1,13^{-0,214}$ мм² (ГОСТ 27265–87) и листовой титан 120×90×6,7 мм.

Для перемещения образцов и опытной детали внутри вакуумной камеры применяли 4-координатную систему перемещения на базе системы числового программного управления (Purelogic, РФ), шариковых передач и наклонно-поворотного стола с шаговыми двигателями. Дискретность позиционирования составляет не более 50 мкм. Точный, дозированный ввод материала в зону наплавки проводили 4-роликовым механизмом подачи проволоки, модифицированным шаговым двигателем. Управляющая программа описывается при помощи стандартных команд G-code.

Шлифы для проведения металлографических исследований изготавливали с использованием комплекса для пробоподготовки компании «Metkon», Турция. В качестве травителя для титанового сплава применяли раствор 2 мл HNO₃ и 2 мл HF, 96 мл дистиллированной воды (травитель № 1 Шрадера). Время травления – 5–10 с [4]. Исследования микроструктуры проводили на микроскопе МИ-1 с CCD камерой разрешением 5 Мпикс.

Исследование профиля поверхности проводили с помощью цифрового профилографа-профилометра Syrtronic 25 (Taylor Hobson, Великобритания) по стандарту ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Обработку данных выполняли в комплектном программном обеспечении TalyProfileLite 7.1.7106. Использовали диапазон датчика 300 мкм; разрешение 0,01 мкм; длина трассы 16 и 25 мм.

Элементный состав примесных элементов в наплавленном слое исследовали методом газоразрядной оптической спектроскопии (GD OES) [5] при помощи оптико-эмиссионного спектрометра тлеющего разряда GD-Profilier 2 (HORIBA Scientific, Франция), оснащенного функцией дифференциального интерферометрического профилирования (DiP), которая позволяет проводить прямое измерение глубины как функции времени с нанометрической точностью.

Исследование режимов ЭЛ наплавки одиночных валиков

Исследованы геометрические характеристики, профиль поверхности и внешний вид одиночно наплавленных валиков, полученных при интенсивности подачи проволоки 0,5 мм на 1 мм валика (рис. 1, 2). Форма поперечного сечения валика близка к треугольной. Асимметричность объясняется отклонением места подачи наплавочной проволоки от центра пучка электронов.

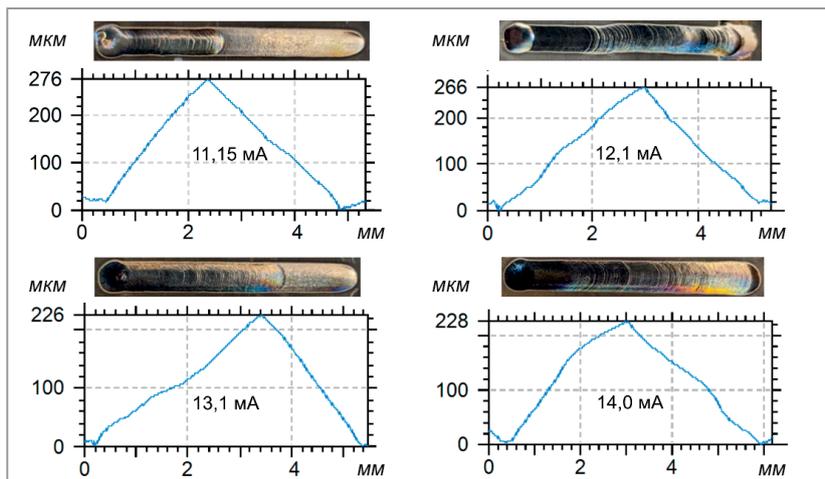


Рис. 1. Внешний вид одиночно наплавленных валиков и поперечный профиль поверхности при различных токах луча

Увеличение силы тока луча приводит к увеличению ширины и уменьшению высоты наплавленного валика (рис. 2). Расчетная площадь поперечного сечения одиночно наплавленного валика составляет 0,53–0,63 мм², что свидетельствует о незначительном расходе материала проволоки на испарение. Величины отклонений определены на уровне $\pm 0,1$ мА для тока луча, 0,1 мм для ширины валика, 5% для высоты и площади валика.

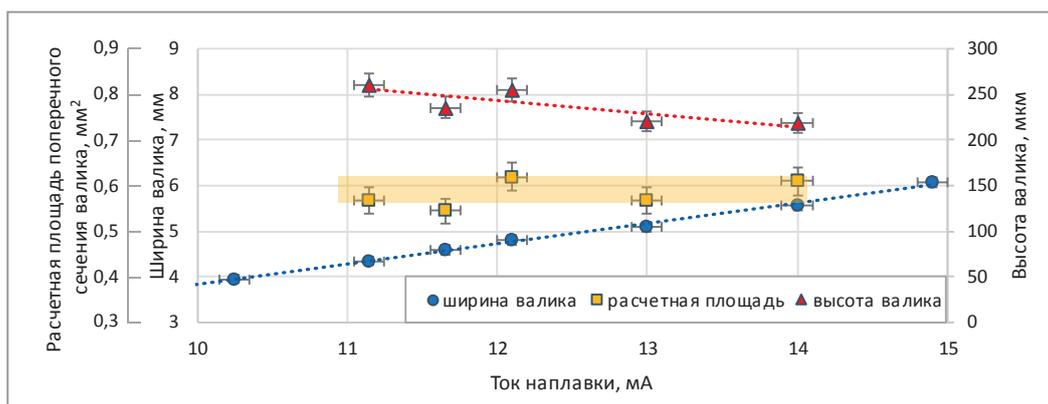


Рис. 2. Зависимость ширины, высоты и расчетной площади поперечного сечения одиночного валика от силы тока луча в процессе наплавки

Наиболее качественные валики с точки зрения геометрических параметров получены в диапазоне силы тока луча 11,15–14,0 мА. При значениях силы тока 9,3 и 10,25 мА наблюдаются такие дефекты, как неравномерность высоты валиков, прерывание наплавленного слоя, образование отдельных крупных капель, что, скорее всего, связано с недостаточной для равномерного плавления проволоки энергией. При значении силы тока 14,9 мА происходит слишком интенсивный ввод энергии и стабильность толщины наплавленного валика нарушается. Искажение траектории и повышенная чешуйчатость валика вызваны ручной корректировкой отклонения луча в процессе поиска его оптимального положения относительно проволоки. Одно из наибольших затруднений, влияющих на геометрию и качество наплавленного валика, является настройка положения пучка электронов относительно наплавляемой проволоки. Применение специализированных систем должно обеспечивать стабильность качества изделий при электронно-лучевой наплавке [6]. В отсутствии такой системы увеличение диаметра пучка электронов путем увеличения тока фокусировки позволяет минимизировать брак, однако снижает возможную детализацию наплавки.

Исследование формы поверхности наплавленного слоя при наложении валиков

Для того чтобы промоделировать возможную форму поверхности при наложении отдельных валиков, проведена последовательная наплавка каждого последующего валика с увеличивающимся смещением на расстояние 1–4 мм с шагом 0,5 мм. Профилограммы поверхности и структуры поперечного сечения наплавленных слоев (рис. 3) показали, что толщина наплавленного слоя находится в диапазоне 50–250 мкм.

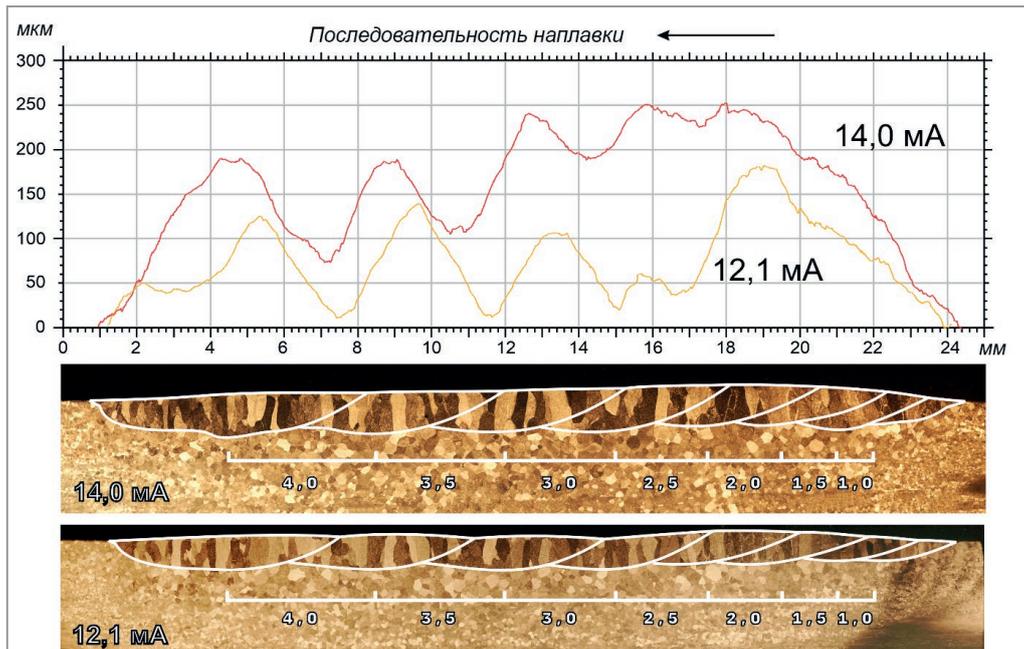


Рис. 3. Профилограммы поверхности и структуры поперечного сечения наплавленных слоев (панорамный снимок, $\times 50$), полученные ЭЛ наплавкой с увеличивающимся расстоянием между валиками (с обозначенными границами зон переплава и величинами смещений)

Материал проволоки равномерно перемешивается с материалом подложки. Толщина зоны переплава составляет 1200–1600 мкм. Направленная кристаллизация расплава приводит к возникновению достаточно крупных столбчатых зерен преимущественно вертикальной ориентации шириной до 200 мкм и длиной, приблизительно равной высоте зоны переплава. Размер зерен в зоне термического влияния составляет 40–200 мкм и постепенно уменьшается к зоне основного материала до исходной мелкозернистой структуры. В наплавленном слое и зоне термического влияния пористости не наблюдается.

Показано, что с увеличением величины смещения между наплавленными валиками возрастает волнистость профиля, а с увеличением тока луча – равномерность наплавленного слоя. Малая величина смещения (менее 2 мм) вызывает рост высоты слоя. Смещение валиков на величину 3 мм и более приводит к появлению впадин между валиками. По результатам исследований за оптимальное смещение валика принято значение, не превышающее ширины одиночно наплавленного валика.

Исследование равномерности получаемого покрытия при различной интенсивности подачи проволоки

Проведены исследования влияния интенсивности подачи титановой проволоки на равномерность получаемого покрытия. Использовано смещение 2 мм, ток луча 13,1 мА. Поперечные профилограммы поверхности последовательно наплавленных валиков с различной интенсивностью подачи проволоки (рис. 4) показывают, что с ее увеличением возрастает высота наплавленного слоя (с 50 до 320 мкм),

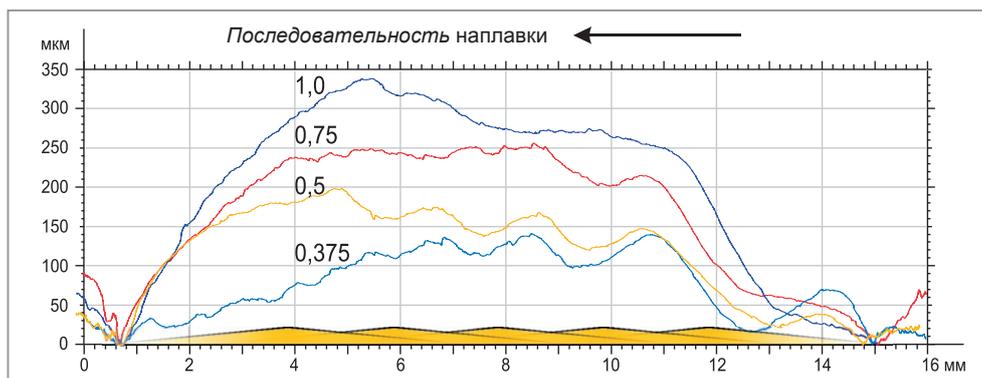


Рис. 4. Поперечные профилограммы поверхности последовательно наплавленных валиков с различной интенсивностью подачи проволоки (показаны цифры возле профилограмм)

снижается волнистость поверхности и величины подрезов основного металла в начале и конце зоны наплавки. При этом для различной интенсивности подачи проволоки волнистость имеет схожую периодичность, а впадины соответствуют максимальной плотности энергии луча.

По причине отсутствия на поверхностях образцов базовой плоскости определение нулевого уровня на профилограммах невозможно, поэтому величины высот и подрезов определены аналитически. На рис. 5 показаны ориентировочные величины высот наплавленных слоев и подрезов. Погрешности определены условно на уровне ± 20 мкм.

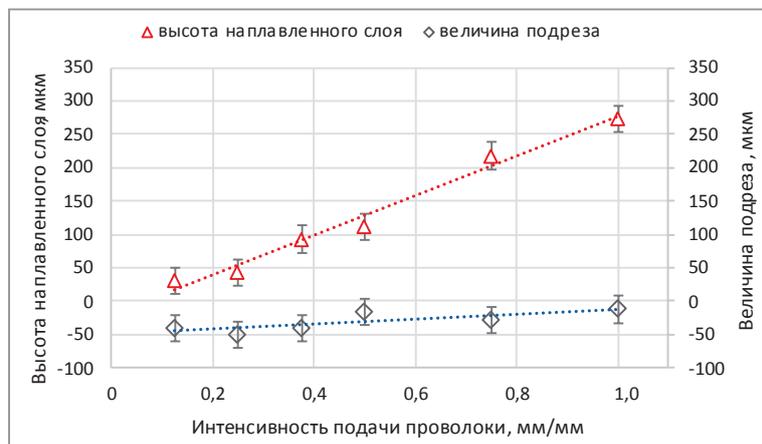


Рис. 5. Средние величины высот наплавленных слоев и подрезов

Исследование содержания примесных элементов в наплавленном слое

Распределение примесных элементов в наплавленном слое (рис. 6) позволяет наглядно оценить снижение концентрации азота вплоть до уровня ниже чувствительности метода (менее 0,001 %) на расстоянии 30–35 мкм от поверхности. Уровень содержания водорода достигает допустимых 0,015 мас. % на расстоянии более 50 мкм от поверхности. Следовые концентрации кислорода, углерода и кремния зафиксированы только в поверхностном слое менее 0,3 мкм и не отображены на рисунке.

Суммарная концентрация других обнаруженных примесных элементов (P, S) не превышает 0,015 мас. %. Полученные наплавленные объемы по содержанию примесных газов соответствуют нормативным документам для изделий из материалов медицинского назначения (Ti-6Al-4V), изготавливаемых с помощью порошковых лазерных или электронно-лучевых аддитивных технологий¹.

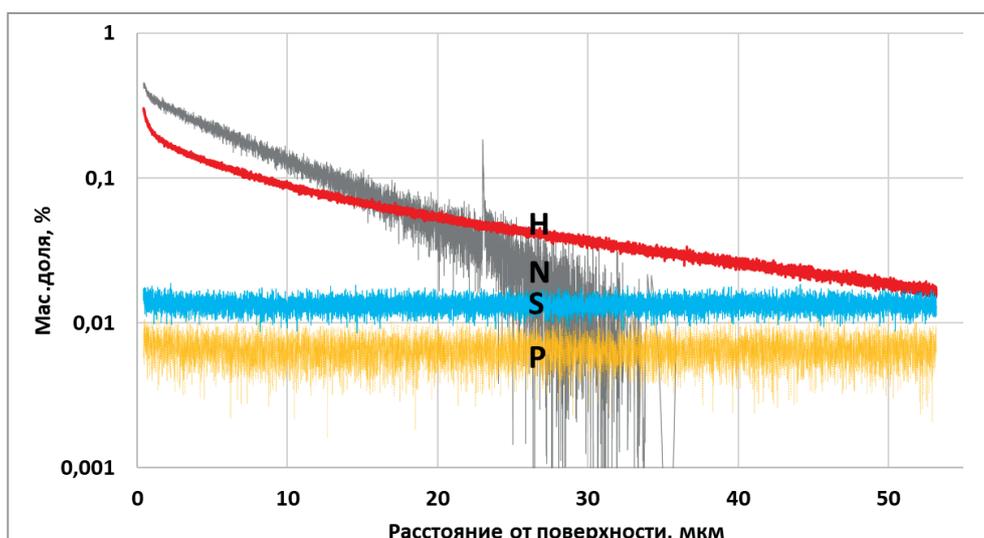


Рис. 6. Распределение примесных элементов в наплавленном слое

¹ ASTM F1472 Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56400).

Восстановление опытной детали авиационной техники

Результаты исследования способствовали выбору оптимального режима ЭЛ наплавки для восстановления детали «Гайка КТ 163.011» – элемента шасси самолетов МиГ и СУ различных модификаций (рис. 7). Подвергнутые ЭЛ воздействию детали из ВТ9 проходят последующий двухступенчатый отжиг. В Физико-техническом институте НАН Беларуси разработана технология ионно-плазменного азотирования титановых сплавов, позволяющая дополнительно повысить стойкостно-эксплуатационные свойства восстановленного изделия.

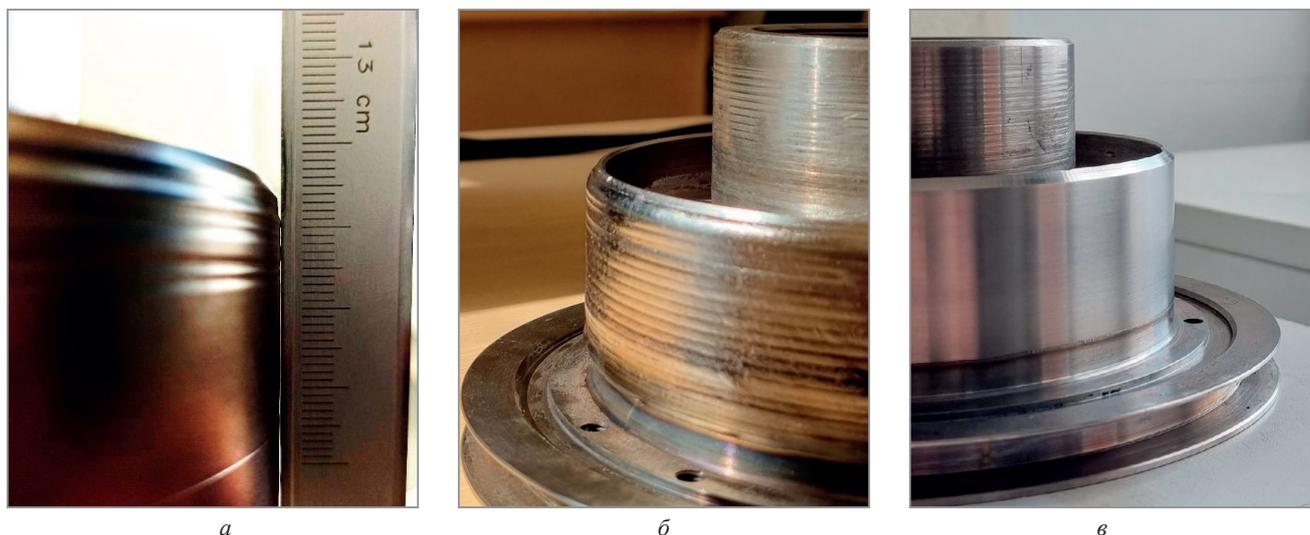


Рис. 7. Изношенная поверхность детали «Гайка 163.01» (а), деталь после ЭЛ наплавки (б) и восстановленная деталь после токарной обработки (в)

Выводы

Выполнены исследования режимов ЭЛ наплавки титановой проволоки ВТ9 на основу из сплава ВТ9 с получением одиночных валиков и сплошных слоев при различающихся силе тока луча (9,3–14,9 мА), интенсивности подачи проволоки (0,125–1,0 мм проволоки на 1 мм протяженности валика), расстоянии между валиками наплавленного материала (1–4 мм).

Увеличение силы тока луча приводит к увеличению ширины и уменьшению высоты одиночно наплавленного валика. Точная, дозированная подача проволоки с использованием системы ЧПУ с шаговыми двигателями позволяет в широком диапазоне управлять толщиной наплавленного слоя с возможностью использовать проволоку различного сечения. Для получения равномерного по толщине слоя величина смещения не должна превышать половину ширины одиночного валика. Чрезмерное снижение интенсивности подачи проволоки без корректировки энергетического воздействия приводит к увеличению волнистости поверхности, а также вызывает зачастую недопустимые подрезы на краях наплавленного слоя. Аддитивным методом получены равномерные сплошные однослойные восстанавливающие наплавленные объемы на плоских и цилиндрических поверхностях толщинами 25–270 мкм. Проведено восстановление геометрии поверхности тонкостенной детали авиационной техники из ВТ9.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hrivnak, I.** Theory of Weldability of metals and alloys / I. Hrivnak. Elsevier Science Publisher, 1991. 372 p.
2. Titanium Alloy Repair with Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing Technology / P. Wanjara [et al.] // Adv. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 2019. P. 3979471-1-23.
3. Electron beam additive manufacturing with wire-analysis of the process / M. S. Węglowski [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1960. P. 140015-1-6.
4. **Беккерт, М., К. Х.** Справочник по металлографическому травлению: Пер. с нем. 2-е изд. К. Х. Беккерт, М. М.: Металлургия, 1988. 400 с.
5. **Nelis, T.** Glow discharge optical emission spectroscopy: A practical guide / T. Nelis, R. Payling. Cambridge: The royal society of chemistry. 2003. 224 p.
6. **Варушкин, С. В.** Управление электронно-лучевой наплавкой проволочным материалом по параметрам тормозного рентгеновского излучения: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2019. 133 с.

REFERENCES

1. **Hrivnak I.** Theory of weldability of metals and alloys. *Elsevier Science Publisher*, 1991, 372 p.
2. **Wanjara P.** Titanium Alloy Repair with Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing Technology. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2019, Vol. 2019, P. 3979471.
3. **Węglowski M.S.** Electron beam additive manufacturing with wire-analysis of the process. *AIP Conference Proceedings*, 2018, Vol. 1960, P. 140015.
4. **Bekkert M., K. H.** *Spravochnik po metallograficheskomu travleniyu [Metallographic Etching Handbook]*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, 400 p.
5. **Nelis T., Payling R.** *Glow discharge optical emission spectroscopy: A practical guide*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2003, 224 p.
6. **Varushkin S.V.** *Upravlenie elektronno-luchevoj naplavkoj provolochnym materialom po parametram tormoznogo rentgenovskogo izlucheniya: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk.* [Control of electron-beam surfacing with wire material according to the parameters of X-ray bremsstrahlung: dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Perm', 2019, 133 p.