

УДК 621.791.722+621.791.92

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ОДНОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

*А. И. ПОБОЛЬ, В. Г. ЗАЛЕССКИЙ*

Физико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

UDC 621.791.722+621.791.92

## **OPTIMIZATION OF ELECTRON-BEAM SURFACING MODES FOR SINGLE-LAYER COATING WHEN RESTORING PRODUCTS FROM TITANIUM ALLOYS**

*A. I. POBOL, V. G. ZALESSKI*

**Аннотация.** Исследовано влияние силы тока луча и интенсивности подачи проволоки при электронно-лучевой (ЭЛ) наплавке титанового сплава VT9 на толщину и равномерность получаемого восстанавливающего покрытия. Аддитивным методом проведено восстановление геометрии поверхности тонкостенной детали авиационной техники из VT9.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая наплавка, аддитивные технологии, титановые сплавы, восстановление поверхности, профиль поверхности.

**Abstract.** The influence of the beam current 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. The surface geometry of a thin-walled aircraft part made of VT9 was restored using the additive method.

**Keywords:** electron-beam surfacing, additive technologies, titanium alloys, surface restoration, surface profile.

**Введение.** Изделия из титановых сплавов дорогостоящие, что связано как с высокой стоимостью сырья, так и с большой трудоемкостью их механической обработки. Многие детали авиационной техники выполнены тонкостенными (с толщиной стенки около 1...5 мм) для снижения массы готового изделия. При этом 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]. Поэтому актуальной проблемой является восстановление деталей путем послойной электронно-лучевой наплавки.

Подробно исследуется технология аддитивного получения объемов из титановых сплавов при ЭЛ-наплавке проволоки [2, 3], однако не уделяется должного внимания формированию поверхности при однослойной наплавке.

*Целью работы* является 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 использовалась установка, созданная в ФТИ НАН Беларуси с использованием аппаратуры производства Prvá Zváračská (Словакия). Рабочая камера установки ЭЛ-обработки выполнена из коррозионно-стойкой стали.

Эксперименты проводились с параметрами в диапазонах, указанных в табл. 1. Интенсивность подачи проволоки – отношение длины подаваемой проволоки к длине наплавленного валика.

Табл. 1. Управляющие параметры ЭЛ-наплавки

Напряжение, кВ	Ток луча, мА	Скорость наплавки, мм/с	Интенсивность подачи проволоки, мм/мм	Величина смещения валика, мм
55	9,3...14,9	4,4	0,125...1,0	1...4

В работе использована проволока из титанового сплава ВТ9 диаметром  $1,2^{-0,12}$  мм, площадью поперечного сечения  $1,13^{-0,214}$  мм<sup>2</sup> (ГОСТ 27265–87) и листовой титан  $120 \times 90 \times 6,7$  мм.

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

**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 и 2).

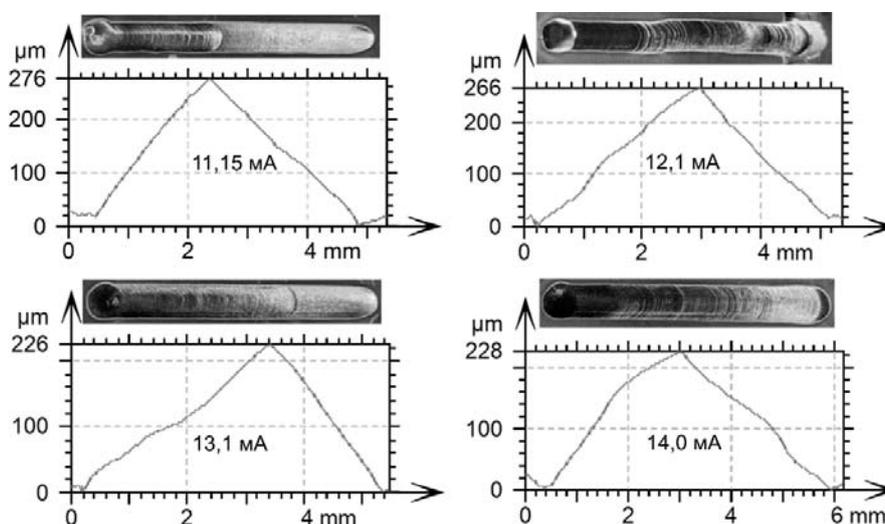


Рис. 1. Внешний вид одиночно наплавленных валиков и поперечный профиль поверхности при различных токах луча

Форма поперечного сечения валика близка к треугольной. Асимметричность объясняется отклонением места подачи наплавочной проволоки от центра пучка электронов. Увеличение силы тока луча приводит к увеличению ширины и уменьшению высоты наплавленного валика (рис. 2). Величины отклонений определены на уровне  $\pm 0,1$  мА для тока луча,  $0,1$  мм для ширины валика,  $5\%$  для высоты и площади валика.

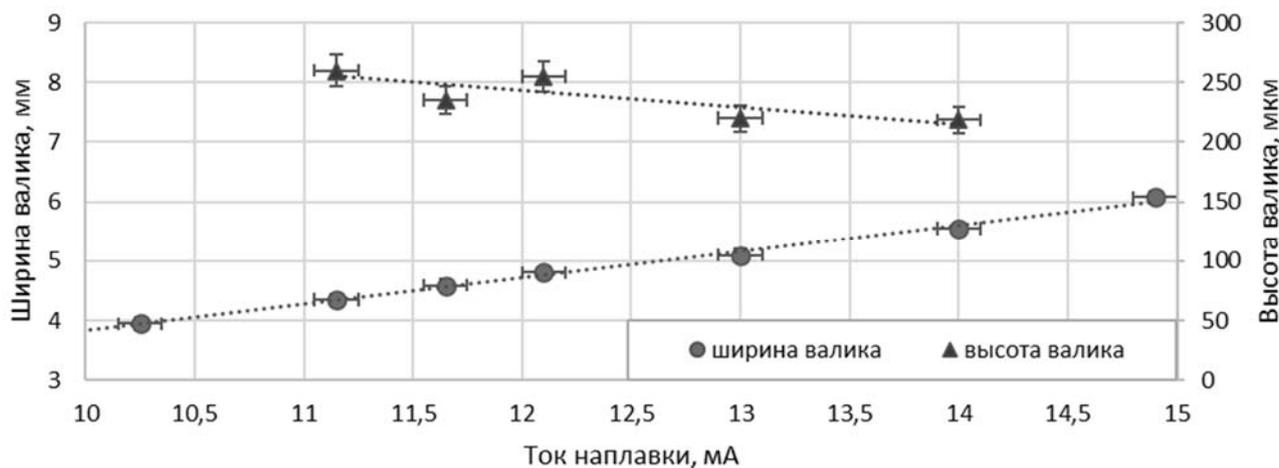


Рис. 2. Зависимость ширины и высоты одиночного валика от силы тока луча в процессе наплавки

Наиболее качественные валики с точки зрения геометрических параметров получены в диапазоне силы тока луча  $11,5 \dots 14,0$  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, вероятнее 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.

**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. 3) показывают, что с её увеличением возрастает высота наплавленного слоя (с  $50$  до  $320$  мкм), 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. Также с увеличением интенсивности подачи проволоки усиливается эффект массопереноса наплаваемого материала в более разогретую зону завершения наплавки.

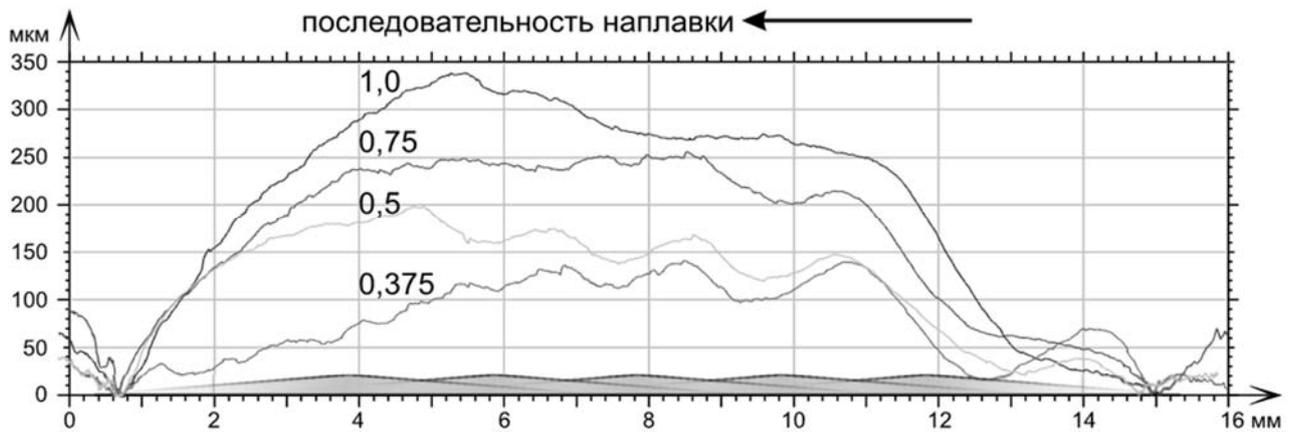


Рис. 3. Поперечные профилограммы поверхности последовательно наплавленных валков с различной интенсивностью подачи проволоки (показаны цифрами возле профилограмм)

По причине отсутствия на поверхностях образцов базовой плоскости определение нулевого уровня на профилограммах невозможно, поэтому величины высот и подрезов определены аналитически. На рис. 4 изображены ориентировочные величины высот наплавленных слоев и подрезов. Погрешности определены условно на уровне  $\pm 20$  мкм.

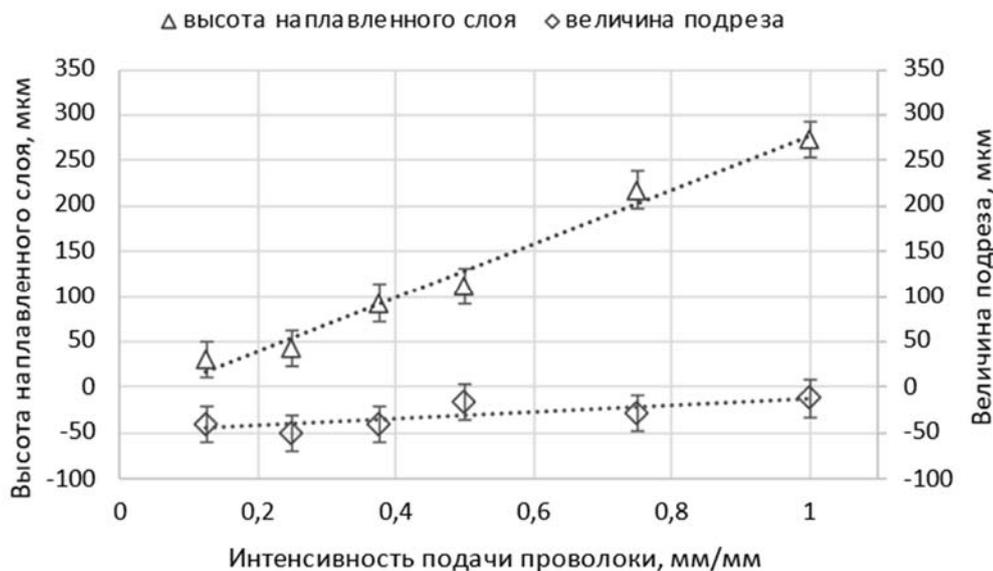


Рис. 4. Средние величины высот наплавленных слоев и подрезов

**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. 5). Подвергнутые ЭЛ-воздействию детали из ВТ9 проходят последующий двухступенчатый отжиг. В Физико-техническом институте разработана технология ионно-плазменного азотирования титановых сплавов, позволяющая дополнительно повысить стойкостно-эксплуатационные свойства восстановленного изделия.

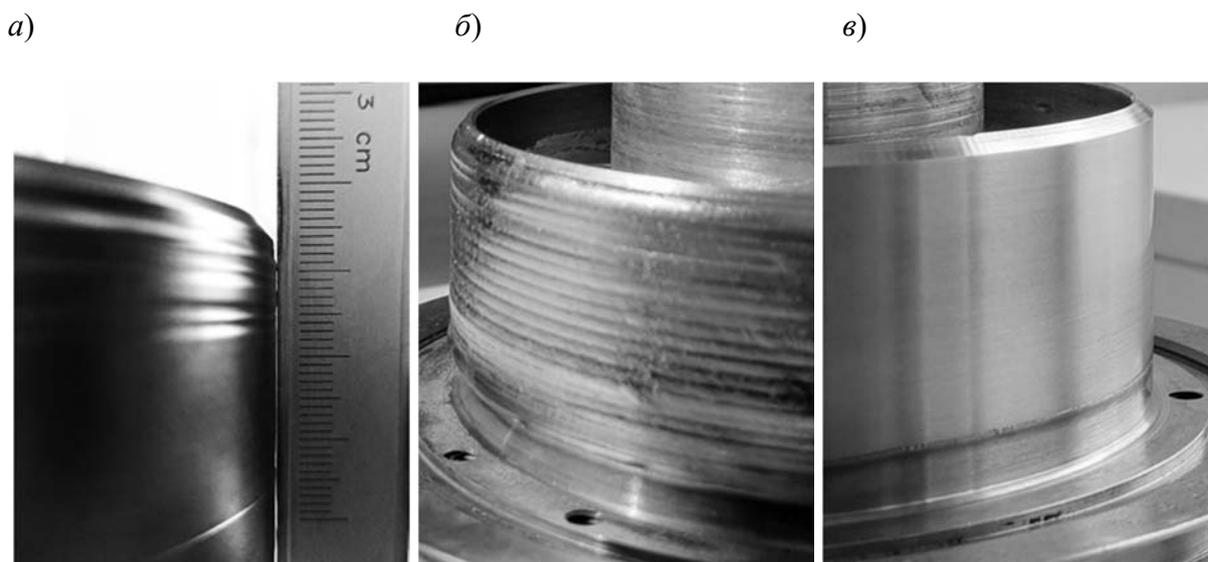


Рис. 5. Изношенная поверхность детали «Гайка 163.01» (а), деталь после ЭЛ-наплавки (б) и восстановленная деталь после токарной обработки (в)

**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...14,9мА), интенсивности подачи проволоки (0,125...1 мм проволоки на 1 мм протяженности валика).

Увеличение силы тока луча приводит к увеличению ширины и уменьшению высоты одиночно наплавленного валика. Чрезмерное снижение интенсивности подачи проволоки без корректировки энергетического воздействия приводит к увеличению волнистости поверхности и вызывает зачастую недопустимые подрезы на краях наплавленного слоя, а слишком высокая интенсивность подачи проволоки приводит к усилению эффекта массопереноса наплавленного материала в более разогретую зону завершения наплавки, что негативно сказывается на равномерности наплавленного слоя. Аддитивным методом проведено восстановление геометрии поверхности тонкостенной детали авиационной техники из ВТ9.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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.

E-mail: a.pobol@gmail.com; v.zalesski@phti.by.