

## 3D ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

С. В. АХОНИН, Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ, В. Ю. БЕЛОУС, И. К. ПЕТРИЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящее время 3D-печати и аддитивным технологиям уделяется много внимания в исследовательских центрах по всему миру. В связи с тем, что титан химически активный металл, электронно-лучевые технологии представляются наиболее перспективными для разработки технологии металлической 3D-наплавки деталей из сплавов на основе титана. В работе изучалась возможность создания электронно-лучевой наплавки сложной формы из технического титана. Наплавка осуществлялась с применением 2-х координатного манипулятора и перемещающегося рабочего стола, формирование детали производилось на титановой подложке, в качестве наплавочного материала использовалась титановая сварочная проволока марки ВТ1-00. Получены детали прямолинейной формы высотой 35 мм и цилиндрической формы высотой 45 мм с толщиной стенки 10 мм. Изучены структуры наплавленных слоев, отмечено отсутствие пористости металла цилиндрической и прямолинейной наплавки. Структура металла наплавленных слоев аналогична структуре литого металла технического титана ВТ1-0. Микротвердость металла детали, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой с применением сварочной проволоки ВТ1-00, соответствует уровню микротвердости литого металла технического титана ВТ1-0. Показано, что технология электронно-лучевой наплавки позволяет получать детали сложной формы из титана с однородной структурой. Библиогр. 4, рис. 9.

*Ключевые слова:* 3D-печать, электронно-лучевая 3D-наплавка, электронный луч, титан, структура

В настоящее время 3D-печати и аддитивным технологиям уделяется много внимания в исследовательских центрах по всему миру [1]. В случае изготовления металлических деталей разрабатываются технологии, согласно которым в качестве источника тепла используется лазер — т. н. SLS-технологии [2] или электронный луч. Причем компания Sciaky, специализирующаяся на разработке технологий и оборудования для сварки, разрабатывает технологию, согласно которой создание детали производится методом послойной наплавки материала в расплаве, сформированном электронным лучом — т. н. EBDM (Electron Beam Direct Manufacturing, «прямое изготовление электронно-лучевым пучком») [3].

В связи с тем, что титан является химически активным металлом, электронно-лучевые технологии в вакуумной камере, обеспечивающей надежную защиту расплавленного и остывающего металла, представляются нам наиболее перспективными для разработки технологии непосредственного создания металлических деталей из титана путем 3D-наплавки металлическими материалами [4]. В этом случае имеется возможность использовать стандартные сварочные материалы, широко применяющиеся для выполнения сварочных и наплавочных работ.

Целью работы являлось изучение возможности создания деталей из титанового сплава методом электронно-лучевой 3D-наплавки с использованием присадочных проволок на основе титана.

Электронно-лучевую 3D-наплавку проводили на модернизированной установке УЛ-144, оснащенной энергоблоком ЭЛА 60/60, специальной сварочной пушкой и специализированным подающим механизмом для подачи присадочной проволоки в электронно-лучевой камере.

В процессе работы изучалась возможность изготовления деталей двух типов: 1 — тела вращения; 2 — прямолинейной формы.

Использование тела вращения для создания 3D-деталей является более простой задачей. Проведенные исследования позволили отработать технологию 3D-наплавки с применением постоянно существующей ванны расплавленного металла. Схема процесса электронно-лучевой 3D-наплавки тела вращения представлена на рис. 1. При 3D-наплавке детали — стакана, представляющего собой тело вращения, использовалась непрерывно существующая ванна расплавленного металла. В процессе 3D-наплавки тела вращения электронно-лучевая пушка совершает перемещения в горизонтальной плоскости совместно с механизмом подачи присадочного металла в виде проволоки. Деталь формируется на водоохлаждаемой формирующей подложке, совершающей вращательное движение. По мере выполнения слоя, стол с закрепленной деталью и водоохлаждаемой формирующей подложкой опускается вниз. При этом расстояние между присадочной проволокой и катодом электронно-лучевой пушки является фиксированным и не изменяется в процессе создания всей де-

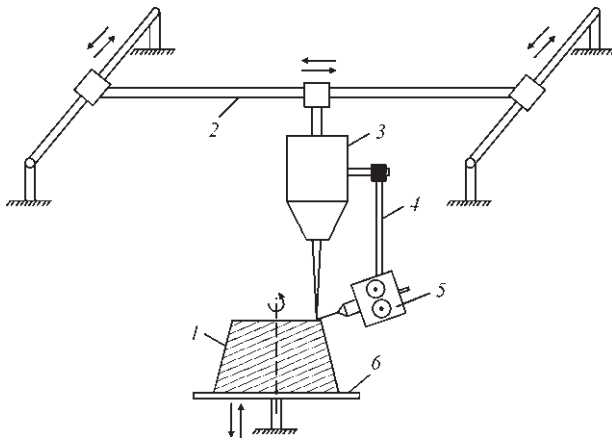


Рис. 1. Схема электронно-лучевой 3D-наплавки тела вращения с применением постоянно существующей ванны: 1 — изготавливаемое изделие; 2 — манипулятор; 3 — электронно-лучевая пушка; 4 — штанга держателя подающего механизма; 5 — подающий механизм; 6 — поворотный стол с механизмом вертикального перемещения

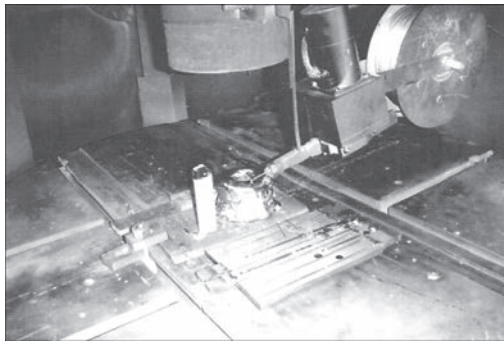


Рис. 2. Расположение детали с формой тела вращения и механизма подачи присадочной проволоки в камере электронно-лучевой установки

тали. Пример детали, имеющей форму тела вращения, представлен на рис. 2 и рис. 3.

Однако технологические возможности метода 3D-наплавки с применением постоянно существующей ванны ограничены. Гораздо больше возможностей предоставляет технология послойной 3D-наплавки с применением периодически формирующейся ванны расплавленного металла.

Экспериментально отработана техника создания детали прямолинейной формы, представляющей собой вертикальную стенку, формируемую на

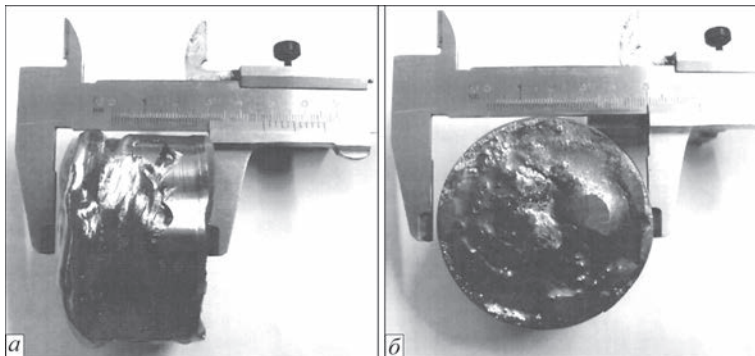


Рис. 3. Внешний вид детали с формой тела вращения: а — вид сбоку; б — вид снизу

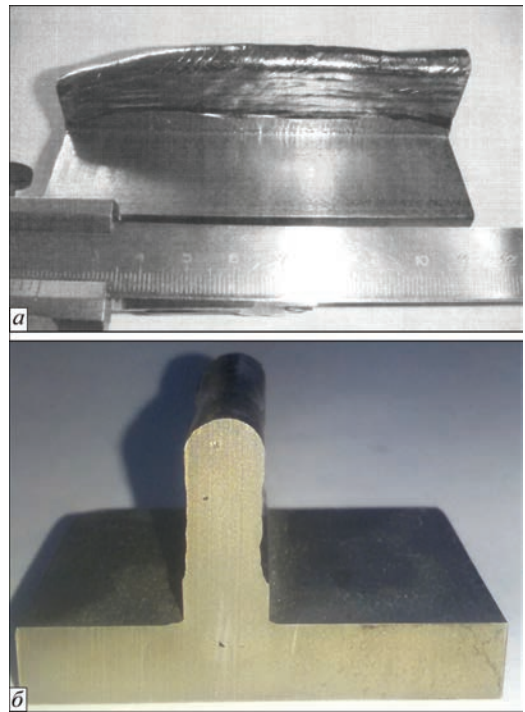


Рис. 4. Образец детали прямолинейной формы, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой с применением периодически формирующейся ванны расплавленного металла: а — внешний вид; б — поперечное сечение прямолинейной детали

металлической подкладке. При 3D-наплавке прямолинейной детали электронно-лучевая пушка и механизм подачи перемещаются в горизонтальной плоскости, при этом расстояние между присадочной проволокой и катодом электронно-лучевой пушки также является фиксированным и не изменяется в процессе создания всей детали. По мере выполнения слоя, стол с закрепленной деталью и подложкой опускается вниз. Развертка и фокусировка луча осуществлялась по специальной программе, для обеспечения требуемых размеров ванны расплавленного металла.

В случае 3D-наплавки детали прямолинейной формы после выполнения очередного слоя ванна расплавленного металла формировалась в месте старта заново. 3D-наплавка детали прямолинейной формы осуществлялась на подложку из титана марки ВТ1-00 толщиной 10 мм. Подложка при наплавке перемещалась в вертикальном направлении, а электронно-лучевая пушка и механизм подачи перемещались в горизонтальной плоскости. Количество слоев необходимых для стенки детали высотой 35 и шириной 8 мм составило 18 проходов. Подача присадочной проволоки, разведение ванны жидкого металла и перемещение ванны по поверхности формируемой детали осуществлялось по автоматической комплексной программе. Программа позволяет менять

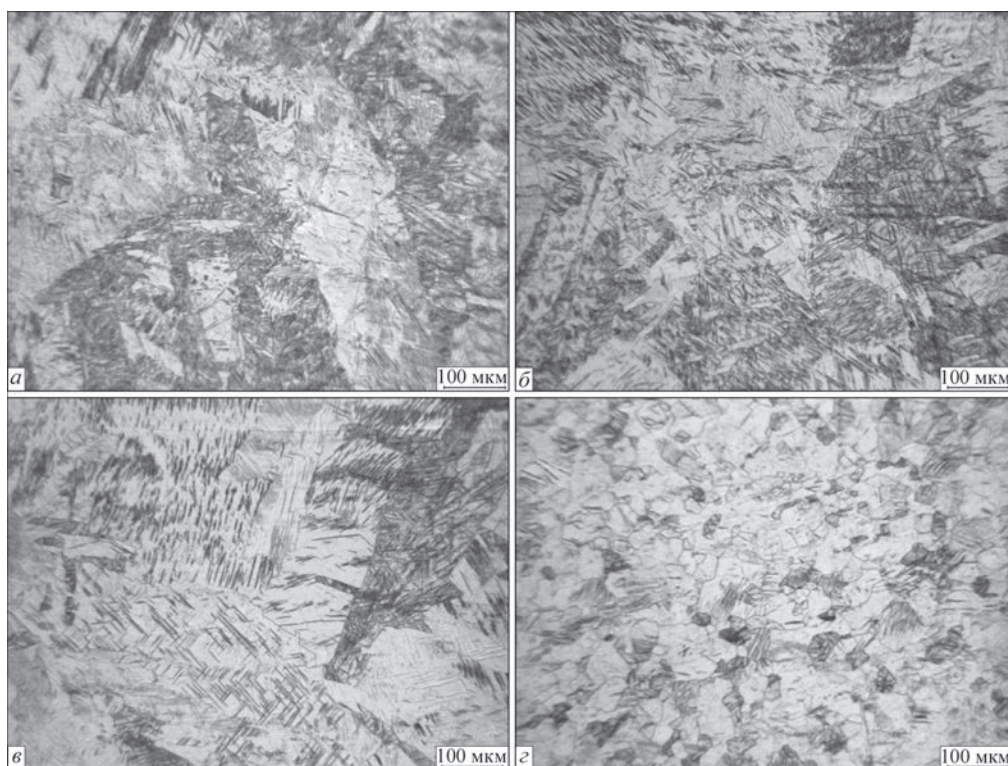


Рис. 5. Структура металла прямолинейной детали, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой: *a–в* — наплавленный металл; *г* — металл подложки

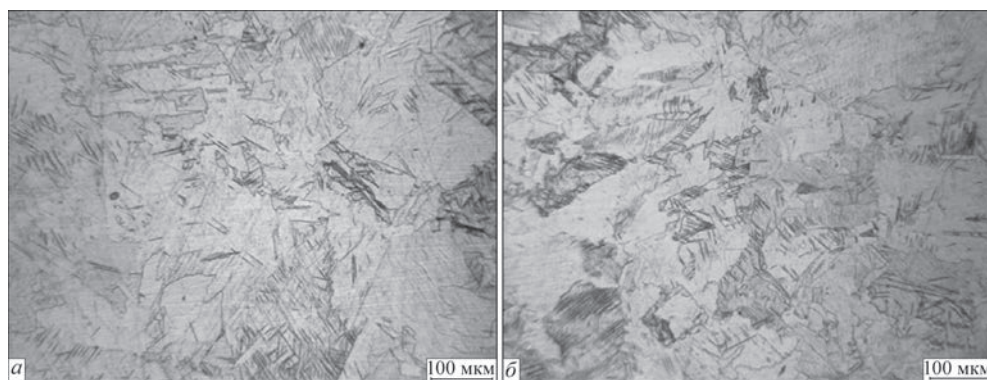


Рис. 6. Структура металла ЗТВ прямолинейной детали, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой: *a* — вблизи наплавленного металла; *б* — вблизи от металла подложки

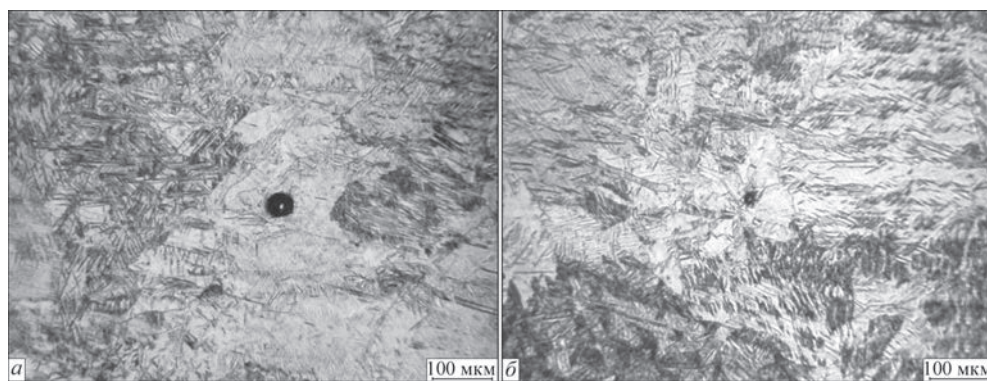


Рис. 7. Структура наплавленного металла прямолинейной детали, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой

высоту и ширину стенки формируемой детали в широких пределах. Пример детали прямолинейной формы, представлен на рис. 4.

Проведенные исследования изготовленных деталей показали, что в случае использования в ка-

честве строительного материала для электронно-лучевой 3D-наплавки сварочной проволоки ВТ1-00св, а материала подложки — технического титана ВТ1-00 толщиной 10 мм, структура наплавленных слоев аналогична структуре литого

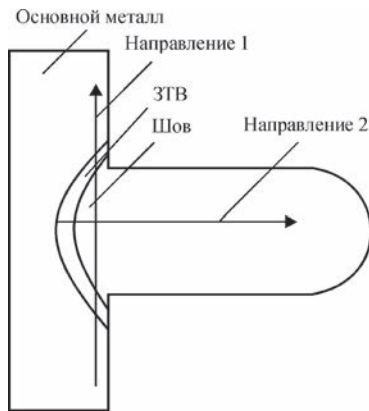


Рис. 8. Схема измерения микротвердости наплавленного металла прямолинейной детали, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой

металла базового сплава. Наплавленный металл присадочной проволокой марки ВТ1-00 состоит из крупных зерен неправильной формы с зубчатыми границами (рис. 5, *a–в*), размер зерен составляет 0,5...3 мм, большинство зерен имеют двойники. Металл подложки имеет более мелкозернистую структуру и состоит из равноосных зерен  $\alpha$ -фазы размером 10...50 мкм (рис. 5, *г*), в некоторых зернах имеют место двойники.

Несмотря на то, что наплавка осуществлялась в несколько слоев, на шлифе зоны сплавления между слоями структурно не выявляются. На рис. 6 представлены микроструктуры металла зоны термического влияния (ЗТВ) от наплавки. Участок ЗТВ, где металл в ходе наплавки претерпевал фазовую перекристаллизацию, также, как и наплавленный металл, состоит из зерен неправильной формы с зубчатыми границами. Размер зерен ЗТВ уменьшается по мере удаления от наплавленного металла (рис. 6, *a, б*). В зернах металла ЗТВ также присутствуют двойники. Характерного для электронно-лучевой сварки дефекта — микропористости, при исследовании наплавленного металла не было обнаружено. Однако при исследовании наплавленного металла прямолинейной детали сечением 10×25 мм была обнаружена одна пора диаметром около 35 мкм (рис. 7, *a*) и несколько мелких пор диаметром меньше 10 мкм (рис. 7, *б*). Других дефектов не замечено. Малое количество пор, возможно, объясняется большей длительностью существования ванны расплавленного металла по сравнению со сварочными режимами.

Измерения микротвердости наплавленного металла прямолинейной детали (рис. 8), изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой показали, что микротвердость наплавленного металла нахо-

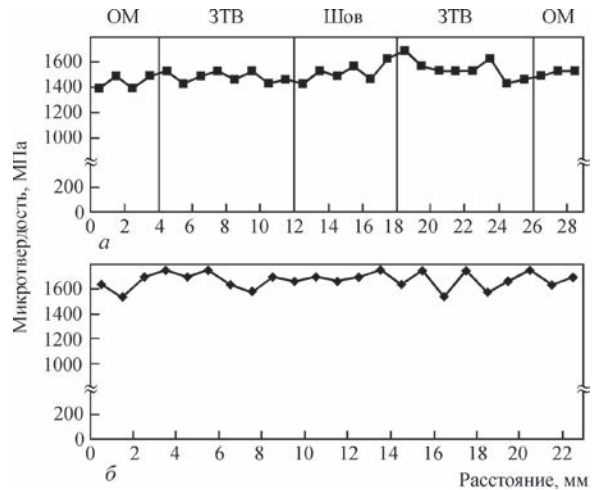


Рис. 9. Микротвердость наплавленного металла прямолинейной детали, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой: *a* — направление 1; *б* — направление 2 (см. рис. 8)

дится на уровне металла подкладки, что позволяет предположить, что механические свойства металла наплавленной детали, будут соответствовать уровню литого металла базового титанового сплава (рис. 9).

## Выводы

1. Разработана техника электронно-лучевой 3D-наплавки, позволяющая изготавливать детали двух типов с формой тела вращения и тела прямолинейной формы.
2. В случае использования в качестве базового металла титанового  $\alpha$ -сплава ВТ1-00 структура наплавленных слоев аналогична структуре литого металла базового титанового сплава.
3. Микротвердость металла детали, изготовленной электронно-лучевой 3D-наплавкой, соответствует уровню микротвердости литого металла базового титанового сплава.

1. Hideki Kyogoku. The current status and outlook for metal Additive Manufacturing in Japan / Hideki Kyogoku // Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall 2015. – Vol. 1, № 3. – P. 31–39.
2. Dutta B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, Francis H. Froes // Titanium Powder Metallurgy. – 2015. – P. 447–468.
3. Xiaoqing Wang. Scanning speed effect on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam additive manufacturing / Xiaoqing Wang, Xibing Gong, Kevin Chou // 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME. – 2015. – Vol. 1. – P. 287–295.
4. Whittaker D. Developments in the additive manufacturing of titanium at PM Titanium 2015 / D. Whittaker // Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall. – 2015. – Vol. 1, № 3. – P. 53–60.

Поступила в редакцию 19.02.2016