

**МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ 308LSI, ПОЛУЧЕННЫХ  
МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ**

Г.Д. Дронюк, А.Ю. Степанов

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Е.И. Купрекова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [gdd2@tpu.ru](mailto:gdd2@tpu.ru)

**MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF 308LSI STEEL  
OBTAINED BY DEPOSITION OF METAL WIRE**

G.D. Dronyuk, A.Y. Stepanov

Scientific Supervisor: Associate Prof., PhD E.I. Kuprekova

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [gdd2@tpu.ru](mailto:gdd2@tpu.ru)

***Abstract.** Shaped metal deposition (SMD) is a relatively new technology of additive manufacturing, which creates near-net shaped components by joining metallic materials by melting the area of a welding joint in high vacuum in the range from  $10^{-3}$  to  $10^{-6}$  mbar. In the present study, the main mechanical properties including micro-hardness and tensile properties were investigated. Single bead walls were deposited. Test pieces were machined from the deposited walls according to the National standard of Russia Federation for the mechanical tests. The tensile properties also showed dependence on the direction of the test carried out. All the examined tensile properties of the as deposited samples are close-matched properties of the as cast material.*

**Введение.** В настоящее время аддитивные технологии являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений ресурсо-эффективного производства [1]. Использование послойной аддитивной укладки порошка, проволоки или прутков путем селективного лазерного сплавления (SLM - Selective Laser Melting) или послойного наваривания материала в расплаве электронным лучом (EBDM - Electron beam Direct Manufacturing) позволяет на порядок ускорить изготовление стальных изделий и их деталей. При этом основным фактором, определяющим подходят ли аддитивно сформированные детали для практического применения или нет, являются их механические свойства. Свойства должны быть сопоставимы со свойствами изделий, полученных при литье, ковке или других традиционных методах получения металлов. На сегодняшний день основное внимание специалистов в области аддитивных технологий уделяется дизайну и созданию деталей сложной и необычной геометрии, тогда как фундаментальные вопросы, связанные с формированием структуры в локальных областях высокоскоростного нагрева и охлаждения и ее влияния на механические свойства аддитивных металлов практически не рассматриваются. В связи с этим данная работа нацелена на исследование потенциальной возможности получения сплошных образцов при электронно-лучевом наплавлении стальной проволоки и изучение механических свойств полученных объемных образцов.

**Материалы и методы исследования.** Образцы для исследований получали на опытной установке для 3d-печати по EBDM –технологии, созданной ООО «Гэта», г. Томск. Установка включает электронно-

лучевую пушку с максимальным отклонением луча  $\pm 7^\circ$  и рабочим давлением  $10^{-1}$  Па, механизм подачи проволоки и стол с компьютерным числовым программным управлением для четырех-координатного перемещения: горизонтальное (ось  $x$  и ось  $y$ ), вертикальное (ось  $z$ ) и вращательное движение. Электронный пучок фокусируется в пятно размером  $2 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$ . На рис. 1 показан внешний вид экспериментальной установки и манипулятора, а также схема подачи проволоки и ориентации пучка.

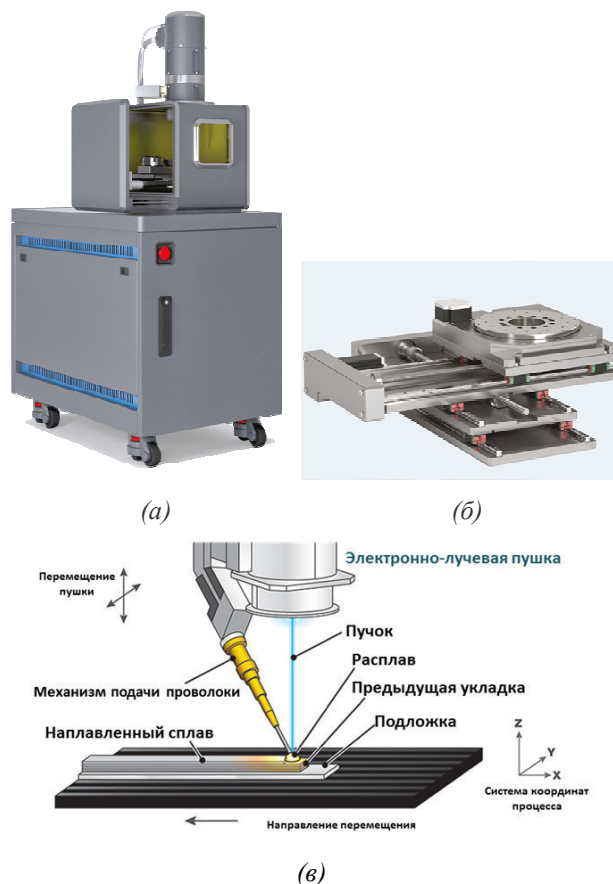


Рис. 1. Электронно-лучевая установка (а) и манипулятор (б) (ООО «Тэта», г. Томск) и схема подачи проволоки (в)

Для получения экспериментальных образцов была выбрана проволока стали нержавеющей стали 308LSi диаметром 0,8 мм, которая послойно наплавлялась на 10-миллиметровую стальную пластину с шагом (0,3-0,4) мм вдоль оси роста  $z$  (рис. 1в). Эксперимент проводили при передней подаче проволоки (рис. 1в, рис. 2) с фиксированным углом подачи  $55^\circ$  и ускоряющим напряжением 60 кВ. Электронный пучок фокусировался в пятно  $0,5 \times 0,6 \text{ мм}^2$ . В результате были получены плоские стенки высотой толщиной, соответствующей укладке проволоки одного диаметра. Из полученных стенок на электроискровом станке вырезаны образцы для механических испытаний на растяжение и определения микротвердости. Образцы на растяжение имели форму лопаток с прямоугольным сечением  $2 \times 3 \times 15 \text{ мм}^3$ . Растяжение проводили на универсальной испытательной машине LFM-125 (Walter+Bai AG, Швейцария) при комнатной температуре со скоростью  $1 \text{ мин}^{-1}$ . На образцах в форме параллелепипедов  $2 \times 5 \times 15 \text{ мм}^3$ , вырезанных вдоль и перпендикулярно направлению укладки проволоки проводили исследование фазового состава и микротвердости по Виккерсу. Испытания проводили при нагрузке 0,2 кгс в течение 20 сек на тестовой машине KB Hardwin KB 30 (производитель KB Pruftechnik, Германия). Фазовый

анализ проводился с использованием  $\text{CuK}_\alpha$  излучения в диапазоне углов -  $10-90^\circ$  с шагом сканирования  $0,0143^\circ$ , и накоплением в точке 2,149 с. Дифракционные картины регистрировали при помощи широкоугольного высокоскоростного 1280-канального детектора OneSight.

**Результаты.** Металлографические исследования показывают, что наплавленные по EBDM-технологии стенки оказываются плотными. Пор и несплошностей экспериментально не обнаружено. Наблюдается формирование зоны термического влияния (ЗТВ) после каждой укладке каждого последующего слоя. Глубина ЗТВ составляет (0,2–0,3) мм. ЗТВ формируется в центре срединной линии, проведенной через середину наплавленной стенки от ее вершины к основанию. Образование ЗТВ обусловлено тем, что в процессе печати наплаваемый материал проволоки и нагретый основной материал подложки охлаждаются с различной скоростью.

РФА показал, что в аддитивно наплавленных по EBDM-технологии стенках формируется кубическая фаза  $\text{Fe}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}$  с высоким содержанием в объеме (87 - 91 %). Параметры решетки фазы  $\text{Fe}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}$  составляют  $a \sim 3,6$  нм. Размеры кристаллитов, оцененные по ОКР, достигают 18 нм и 22 нм. Также дополнительно формируется  $\alpha\text{Fe}$ -фаза с параметром решетки  $a \sim 2,8$  нм и небольшой объемной долей (9 – 13) %.

Испытания на твердость по Виккерсу проводили на образцах двух типов: вырезанных вдоль и перпендикулярно направлению укладки проволоки. Экспериментально установлено, что твердость аддитивно сформированных образцов слабо зависит от направления укладки и изменяется в среднем от 310 до 360 HV. Эти значения коррелируют со значениями твердости литых образцов, изготовленных из стали такого же состава. Отмечается резкое уменьшение микротвердости в областях, близких к концу укладки депозита.

Испытания на растяжение аддитивно сформированных образцов показывают, что механические характеристики при растяжении таких материалов оказываются несколько ниже, чем у литых. Сопоставление полученных свойств аддитивных материалов, исследованных в работе и литых, представлено в табл.1.

Таблица 1

Механические характеристики стали 308LSi

Материал	Деформация растяжения, %	Прочность на разрыв, МПа	Предел текучести, МПа
Литой [2]	Минимум 45	505	215
Образцы, изготовленные по EBDM-технология	24 – 40	390 - 490	150 - 200

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зленко М.А. *Аддитивные технологии в машиностроении*. – М.: ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. Callister W.D., Rethwisch D.G. *Materials Science and Engineering*. – Wiley, 9th Edition, 2014. – 990 с.