

УДК 620.184.3

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Д.А. Гурьянов^{1,2}, Е.О. Княжев¹, А.О. Панфилов¹

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Е.А. Колубаев

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: desa-93@mail.ru

**POSSIBILITIES OF WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE TECHNOLOGY FOR
OBTAINING OF NICKEL-BASED ALLOY PRODUCTS**

D.A. Gurianov^{1,2}, E.O. Knyazhev¹, A.O. Panfilov¹

Scientific Supervisor: Prof., Dr. E.A. Kolubaev

¹Institute of Strength Physic and Material Science, Russia, Tomsk, Academic str. 2/4, 634055

²Tomsk Polytechnic University, Russia, 30 Lenina str., Tomsk, 634050

E-mail: desa-93@mail.ru

***Abstract.** In this work three types of nickel-based alloy products were obtained by wire-feed electron beam additive technology. Optimal values of wire-feed electron beam additive technology parameters were selected to ensure the formation of defect-free structure. It was found that the value of the heat input should be adjusted not only as the product height increases, but also during the formation of a single layer. This peculiarity is connected with different values and directions of temperature gradient at the beginning, in the middle and at the end of one layer. The presence of epitaxial directed growth of dendrites is explained by the fact that when a new layer is deposited, the already crystallized material is remelted repeatedly, and the underlying layers undergo periodic thermal influence. The mechanical properties of products formed from nickel-based superalloy are slightly superior to those of the original cast material. It is also shown that by wire-feed electron beam technology it is possible to restore damaged products and obtain bimetallic (nickel alloy - bronze) compositions.*

Введение. Жаропрочные сплавы на основе никеля являются необходимым материалом для производства изделий в различных областях промышленности: энергетика, авиация, космонавтика, нефтеперерабатывающая промышленность. Подобные сплавы обладают способностью сохранять необходимые значения механических свойств, сопротивление коррозии и ползучести при высоких рабочих температурах (до 1100°C) [1]. Данные свойства достигаются за счет сложной системы легирования. Современные сплавы на основе никеля содержат до 50 вес.% добавляемых элементов: хром, кобальт, вольфрам, алюминий, ниобий, титан, молибден, рений, рутений, тантал, гафний. Присутствие дорогостоящих легирующих элементов значительно повышает стоимость материала. Исходя из этого, одной из актуальных задач является снижение количества отходного материала в процессе изготовления изделий. Перспективным подходом к решению данной задачи является

применение аддитивных технологий [2]. Аддитивное производство заключается в послойном выращивании изделий, что позволяет получать детали, требующие незначительной последующей механической обработки. Одно из направлений аддитивного производства - проволочная электронно-лучевая аддитивная технология (ПЭЛАТ), выделяется на фоне других подходов высокой производительностью и ориентированностью на производство крупногабаритных изделий. Кроме того производство проволочного филамента дешевле, чем порошкового. Еще одна возможность, которую дают аддитивные технологии - это получение изделий из разнородных материалов или функционально градиентных материалов, за счет подачи нескольких филаментов в одну ванну расплава [3]. Также аддитивное производство позволяет получать изделия с направленным ростом структур, что необходимо при производстве лопаток газотурбинных двигателей и энергетических установок. Снижение стоимости изделий и конструкций возможно за счет восстановления поврежденных деталей (а не полная замена) также методами аддитивных технологий.

Исходя из выше сказанного, цель данной работы - показать особенности формирования изделий методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии, особенности образования структуры и свойств.

Экспериментальная часть. В данной работе проводили серию экспериментов по формированию изделий из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, Udimet-500 и жаропрочной бронзы БрХ методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии. Стоит отметить, что из сплава ЖС6У невозможно получить проволоку, в связи с этим данный материал использовался в виде прутков. В ходе выполнения эксперимента были получены три типа изделий: тонкие стенки из сплава ЖС6У, имитация восстановления повреждения из сплава ЖС6У и биметаллические изделия из сплавов Udimet-500 и БрХ.

При формировании первого типа изделий филамент подавался в фокус электронного луча, после формирования ванны расплава рабочий стол начинал движение, таким образом, постепенно образуя слой материала. В конце формирования слоя система подачи и электронная пушка перемещались вверх, а столик возвращался в исходное положение и процесс повторялся. Таким образом, происходило послойное выращивание изделия в виде тонкой стенки высотой 4 см и длиной 3 см. Для имитации восстановления повреждения, аналогично первому типу, формировали стенку, затем с верхней части срезали несколько слоев. Стенку помещали обратно в установку аддитивного производства и на «поврежденной» поверхности формировали еще несколько слоев. Третий тип изделий заключался в том, что сначала формировали стенку из никелевого сплава, а затем на ней же выращивали стенку из бронзы (и наоборот).

Результаты. На первом этапе выполнения работы было необходимо подобрать параметры проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии, позволяющей получать бездефектные изделия из никелевого сплава с заданной геометрией. Основные параметры ПЭЛАТ - ток электронного луча, ускоряющее напряжение и скорость перемещения рабочего стола, удобно выражать через погонную энергию (U , кДж/мм) [4]. В ходе оптимизации ПЭЛАТ процесса были установлены краевые значения U - от 0,3 до 2,7 кДж/мм. В условиях недостаточной погонной энергии происходило расслоение формируемого изделия и образование трещин, в условиях избыточной U происходит излишнее растекание материала и потеря заданной геометрии. Структура материала полученного изделия является дендритной. Дендриты растут колониями через слои в направлении аддитивного выращивания с наклоном в сторону движения электронного луча. По границам дендритов наблюдаются выделения карбидов и эвтектик. Расстояния между осями дендритов первого порядка изменяются от 9 до 40 мкм по

мере збільшення висоти изделия. При дослідженні структури перехідної області другого типу изделий (імітація відновлення пошкодження) було встановлено відсутність ядро вираженої границі між початковим матеріалом і нанесеним повторно. Перехідна область мала аналогічну (початковому матеріалу) дендритну структуру з виділеннями карбидів і евтектики. В даній області не спостерігалося дефектів і відхилень від марочного хімічного складу. Третій тип изделий був представлений біметалічеськими стенками (нікелевий сплав - бронза). Було реалізовано два варіанти стратегії печаті изделий: формування нікелевої стінки з наступним нанесенням на неї бронзи і навпаки. При нанесенні бронзового сплаву спостерігається надлишок растекання по поверхні вже закристалізованого нікелевого сплаву. Ймовірно, це пов'язано з тим, що для плавлення бронзи необхідно менше енергії, недостатньої для плавлення нікелевого сплаву. В іншій ситуації, коли спочатку формується бронзова частина, а потім на неї наноситься нікелева, не спостерігаються растекання матеріалу і втрата заданої геометрії. Структура перехідної області не містить дефектів, а вміст міді в нікелевому сплаві зникає після нанесення 5го шару.

Висновок. В роботі були отримані изделия трьох типів з нікелевого сплаву методом ПЕЛЛТ. Підібрані оптимальні значення параметрів ПЕЛЛТ процесу, забезпечують формування бездефектної структури. Встановлено, що величину погонної енергії необхідно регулювати не тільки по мірі збільшення висоти изделия, але і в процесі формування одного шару. Данна особливість пов'язана з різними величинами і напрямками температурного градієнта в початку, середині і в кінці одного шару. Наявність епітаксимального направленої росту дендритів пояснюється тим, що при нанесенні нового шару вже закристалізований матеріал переплавляється повторно, а нижче лежачі шари піддаються періодичному термічному впливу. Механічні властивості изделий сформованих з сплаву ЖС6У трохи перевищують властивості початково литого матеріалу і складають $\sigma_s = 1209,5 \pm 9,2$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1017,5 \pm 20,5$ МПа. Також показано, що методом ПЕЛЛТ можливо відновлення пошкоджених изделий і отримання біметалічеських (нікелевий сплав - бронза) композицій.

Дослідження виконано при фінансовій підтримці РФФІ в рамках наукового проекту № 20-32-90010

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yang Li, Xiaoyu Liang, Yefeng Yu. Review on Additive Manufacturing of Single-Crystal Nickel-based Superalloys // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. – 2022. – P. 100019.
2. Kindermann R.M., Roy M.J., Morana R. Effects of microstructural heterogeneity and structural defects on the mechanical behaviour of wire + arc additively manufactured Inconel 718 components // Materials Science & Engineering A. – 2022. – V. 839. – P. 142826.
3. Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Eliseev A.A. Peculiarities of Structure Formation in Copper/Steel Bimetal Fabricated by Electron-Beam Additive Technology // Russian Physics Journal. – 2019. – V. 62. – P. 1486-1494.
4. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Savchenko N.L. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – V. 99. – P. 2353–2363.