

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ СПЛАВОВ CU-AL-FE МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

М. ПАНЬ<sup>1</sup>, Ц. ЧЖАН<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университетE-mail: [menhua1@tpu.ru](mailto:menhua1@tpu.ru)

Сплавы с памятью формы – это интеллектуальные металлические материалы, которые претерпевают фазовые изменения при механическом напряжении или изменении температуры. Сплавы с памятью формы обычно состоят из двух или более элементов, в основном это сплавы с памятью формы на основе Ni-Ti, сплавы с памятью формы на основе Cu и сплавы с памятью формы на основе Fe. Среди них сплавы с памятью формы на основе Cu привлекают внимание благодаря хорошему эффекту памяти формы, хорошей электро- и теплопроводности, контролируемому фазовому переходу и низкой цене (всего 10 % от сплавов на основе Ni-Ti). Эти уникальные свойства привели к широкому использованию этого сплава в медицине, аэрокосмической, автомобильной и других областях.

В последние годы некоторые ученые пытались ввести элементы Fe в сплавы Cu-Al с памятью [1, 2] и обнаружили, что элементы Fe оказывают положительное влияние на улучшение свойств сплавов с памятью формы на основе Cu-Al, таких как высокая устойчивость к деформации, высокая температура фазового превращения и т. д. Однако на данном этапе не проводилось систематического исследования влияния элементов Fe на сплавы с памятью формы на основе Cu-Al и механизма их действия, что в определенной степени ограничивает развитие этого нового типа сплавов. Таким образом, поиском наиболее подходящих методов плавки этого сплава является важная задача.

Цель работы – представить результаты по созданию сплавов методом электронно-лучевой плавки из металлических материалов Cu, Al и Fe.

Электронно-лучевая плавка – это технология, которая преобразует кинетическую энергию высокоскоростных электронных лучей в тепловую энергию и использует тепловую энергию в качестве источника тепла для плавления металла в высоком вакууме. В условиях высокого вакуума катод нагревается высоковольтным электрическим полем и испускает электроны, которые собираются в пучок. После прохождения через анод электронный пучок с помощью фокусирующих и отклоняющих катушек точно бомбардирует слиток и материал внутри кристаллизатора, заставляя металл плавиться и образовывать расплавленный бассейн. Затем металл застывает, и получается непосредственно металлическая деталь или заготовка. Метод электронно-лучевой плавки характеризуется высокой температурой плавления (до 3000 °C в вакууме), регулируемой мощностью печи и скоростью нагрева, а также высокой способностью к удалению примесей с высокой и низкой плотностью, благодаря чему слитки не расслаиваются. Таким образом, данная технология может быть использована для получения многокомпонентных расплавов с тугоплавкими и высокоплавкими металлами.

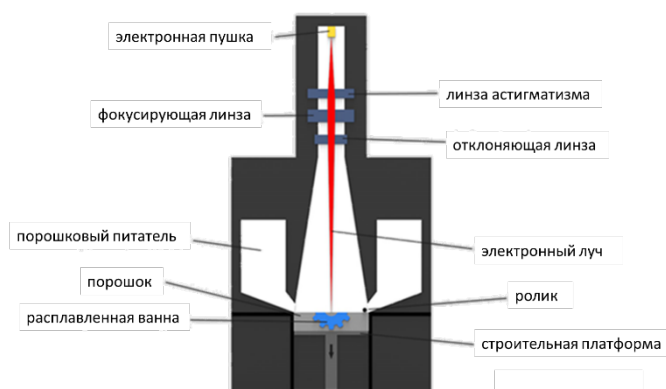


Рисунок 1. Схема электронно-лучевой плавильной печи

В отличие от печного сплавления компонентов смеси в виде лигатуры, изученного нами ранее [3] в данном случае использовались порошковые материалы. Медный порошок чистоты 99,5 % (марка ПМС-1, по ГОСТ 4960-2009), алюминиевый порошок чистоты 99,99 % (марка ПА-ВЧ, по ТУ 1791-99-020-98), и железный порошок чистоты 99,99 % (марка ОСЧ 6-2, по ТУ 6-09-058-08-009-262-92) используются в качестве сырья при электронно-лучевой плавке. Сначала смешанный металлический порошок  $82\text{Cu}-13\text{Al}-5\text{Fe}$  загружается в тигель и помещается в камеру для плавления, после чего происходит охлаждение и затвердевание металла, получается слиток сплава. В процессе электронно-лучевой плавки материал расплавляется в вакууме электронно-лучевой установки (ООО "НПК ТЭТА" 6Е250) с током пучка 70 мА, при ускоряющем напряжении 60 кВ и рабочем вакууме  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. Процесс плавления осуществлялся послойно при сканировании со скоростью 10 мм/с.

Испытание на микротвердость проводилось на разных высотах слитка, и результат показал, что средняя твердость верхнего слоя составила 397 HV, а твердость нижней части - 341 HV. Из рисунка 2 видно, что верхний слой слитка содержит больше темных структур со значением микротвердости 540 HV, тогда как в нижней части меньше темных структур, а светлые структуры имеют твердость 299 HV, что более высокое значение твердости верхнего слоя.

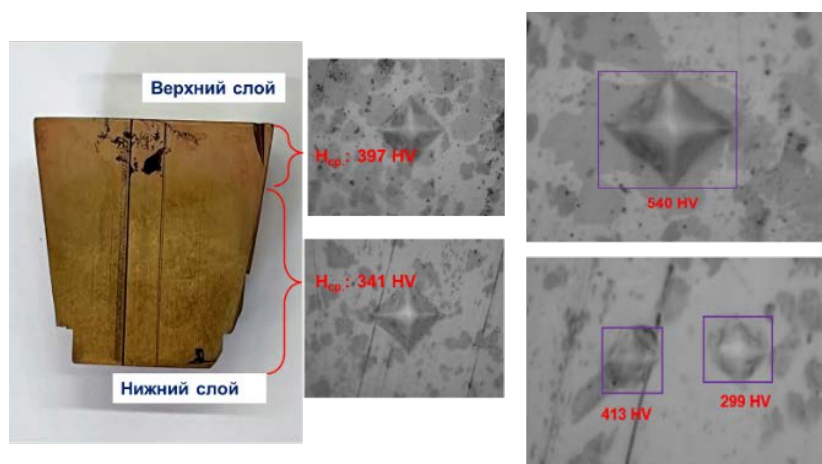


Рисунок 2. Твердость на разных высотах и в разных структурах

На рисунке 3 показаны оптические микроструктуры и распределения по размерам зерен образцов на разных высотах. Из рисунков 3(а) и (в) также видно, что верхний слой содержит больше темных структур, и наблюдается значительное изменение структуры от верхней части слитка к нижней, с переходом от крупных равноосных кристаллов в нижней части к более мелким равноосным кристаллам в верхней части. Это связано с низкой температурой поверхности подложки и быстрой скоростью охлаждения во время начального процесса осаждения, что препятствует эвтектоидному распаду  $\beta$ -фазы,  $\alpha$ -фаза перекристаллизовывается и растет в ходе повторяющихся термоциклов. По мере продолжения процесса осаждения, в результате постепенного накопления тепла, температура в камере повышается, а скорость охлаждения в верхней части уменьшается, что способствует эвтектоидному распаду  $\beta$ -фазы  $\rightarrow \alpha + \gamma$ -фазы и образованию мелких равноосных кристаллов в верхней части. При этом средний размер зерна в верхнем слое составляет  $157 \pm 41$  мкм, а средний размер зерна в нижней части –  $265 \pm 47$  мкм.

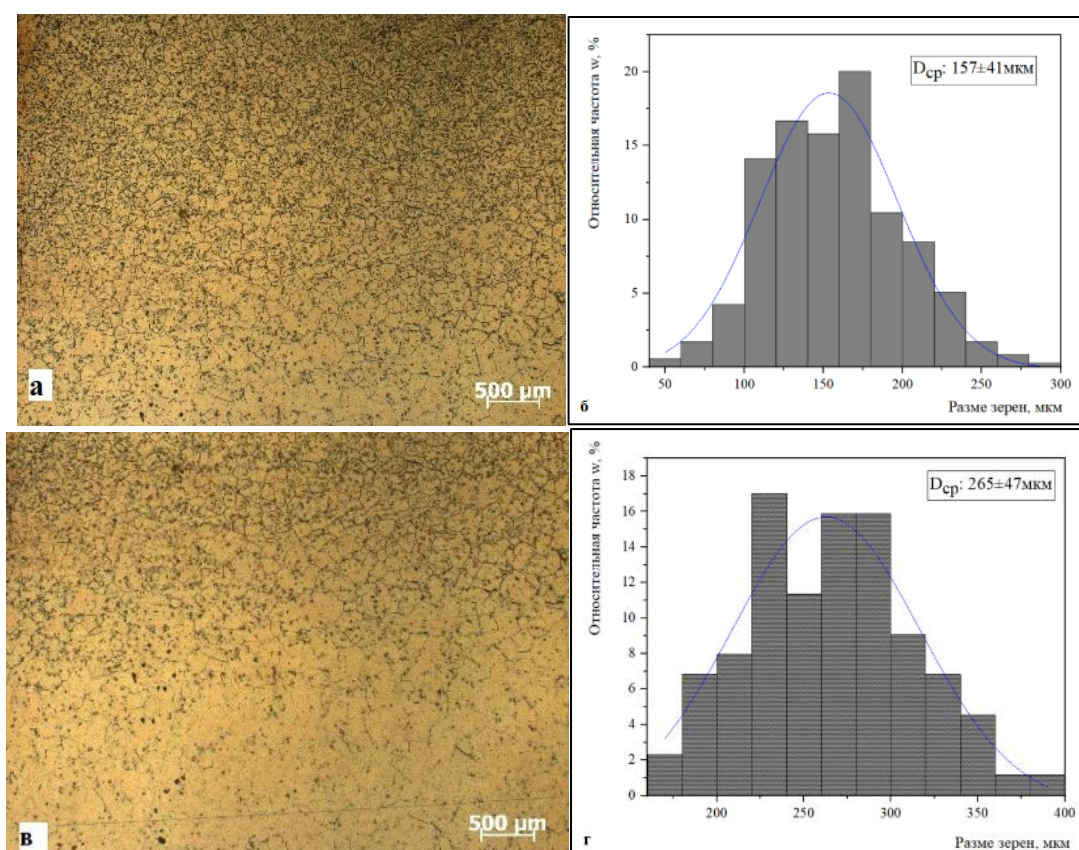


Рисунок 3. Микроструктура верхнего слоя образца (а), распределение размеров зерна верхнего слоя (б), микроструктура в нижней части образца (в), распределение размеров зерна в нижней части образца (г)

Получение сплава системы Cu-Al-Fe и изучены особенности структуры и свойства сплава в условиях послойного электронно-лучевого сплавления.

Работа выполнена по проекту Томского политехнического университета ПИШ НИР-2024-016. Авторы благодарны В.А Клименову, А.А. Клопотову, О.М. Утьеву, М.А. Химич, И.Л. Стрелковой, М.П. Моторину.

### Список литературы

1. Raju T., Sampath V. Effect of ternary addition of iron on shape memory characteristics of Cu-Al alloys // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2011. – Vol. 20. – P. 767–770.
2. Yang S., Su Y., Wang C., Liu X. Microstructure and properties of Cu-Al-Fe high-temperature shape memory alloys // Materials Science and Engineering B. – 2014. – Vol. 185. – P. 67–73.
3. Пань М., Клопотов А.А., и др. Изготовление сплавов с памятью формы Cu-Al-Fe методом традиционного сплавления и литья и методом электронно-лучевой плавки // Сборник трудов Международной конференции, Томск, 09-12 сентября 2024 года. –Томск, – 2024. – С. 512–514.