

Как видно из полученных результатов при использовании различных законов распределения давления расхождение между величинами приведенного коэффициента трения пренебрежимо мало и составляет 0,057...1,58 %. Это позволяет при расчетах колодочных тормозов принимать наиболее простой, с точки зрения аналитического описания, характер распределения давления по закону синуса – формула (1).

Список использованных источников:

1. Тормозные устройства: справочник / М.П. Александров, А.Г. Лысяков, В.Н. Федосеев, М.В. Новожилов. – Москва : Машиностроение, 1985. – 312 с.
2. Носко А.Л. Методика оценки изменения тормозного момента применительно к тормозам грузоподъемных машин / А.Л. Носко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 5 (686). – С. 37–44.
3. Шарков О.В. Определение приведенного коэффициента трения в контакте рабочих поверхностей барабанных тормозов / О.В. Шарков, С.И. Корягин // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 8. – С. 14–17.
4. Сакович Н.Е. Расчет тормозов / Н.Е. Сакович, С.Н. Поцепай, Т.И. Васькина // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 6 (82). – С. 60–66.
5. Ogbeide S.O. Modelling of automobile brake pad wear / S.O. Ogbeide, A. Liberty // Iconic research and engineering journals. – 2019. – Vol. 3 (4). – P. 227–239.
6. Пыжевич Л.М. Расчет фрикционных тормозов / Л.М. Пыжевич – Москва : Машиностроение, 1964. – 228 с.

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ СПЛАВЛЕНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Cu-Al-Fe НА ИХ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

А.А. Клопотов², д.ф.-м.н., проф., О.М. Утьев¹, к.т.н., доц. М. Пань^{1,а}, аспирант

*¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Томская обл., г. Томск, пр. Ленина 30*

*²Томский государственный архитектурно-строительный университет
634003, Томская обл., г. Томск, пл. Соляная 2*

E-mail: ^amenhua1@tpu.ru

Аннотация: В работе исследовано влияние методов сплавления (традиционное литьё, электронно-лучевая плавка и селективное лазерное плавление) на микроструктуру и свойства сплавов Cu-Al-Fe. Установлено, что традиционное литьё даёт низкие механические показатели (твёрдость 217±6 HV, предел прочности 422 МПа) из-за крупнозернистой структуры. Электронно-лучевая плавка улучшает свойства (твёрдость 335±10 HV, прочность 596 МПа) за счёт измельчения зерна и большого количества γ_2 -фазы, тогда как селективная лазерная плавка обеспечивает наивысшую твёрдость (344±16 HV) благодаря нанопреципитатам и мартенситу. Микроструктурный анализ выявил ключевые фазы (α , γ_2 , κ) и их зависимость от параметров процесса.

Ключевые слова: традиционное литьё, электронно-лучевая плавка, селективное лазерное плавление, сплав Cu-Al-Fe, микроструктура.

Abstract: This work studied the effect of alloying methods (traditional casting, electron beam melting and selective laser melting) on the microstructure and properties of Cu-Al-Fe alloys. It is found that traditional casting provides low mechanical properties (hardness 217±6 HV, tensile strength 422 MPa) due to the coarse-grained structure. Electron beam melting improves the properties (hardness 335±10 HV, strength 596 MPa) due to grain refinement and a large amount of γ_2 -phase, while selective laser melting provides the highest hardness (344±16 HV) due to nanoprecipitates and martensite. Microstructural analysis revealed the key phases (α , γ_2 , κ) and their dependence on the process parameters.

Keywords: traditional casting, electron beam melting, selective laser melting, Cu-Al-Fe alloy, microstructure

Введение

Эксплуатационные характеристики металлических материалов тесно связаны с их микроструктурой, а методы легирования, являясь основными средствами регулирования микроструктуры материалов, напрямую влияют на их механические, физические и химические свойства. Сплавы Cu-Al-Fe, как новый тип легкого металлического сплава с высокой прочностью и вязкостью, превосходной проводимостью и коррозионной стойкостью [1], в последние годы привлекают большое внимание в области судостроения [2], электронных устройств [3], высокотемпературных конструкционных деталей [4] и т. д. Однако полная реализация его характеристик зависит от точного контроля процесса легирования. Традиционная технология литья широко используется благодаря своей низкой стоимости и отработанности, однако присущие ей проблемы, такие как крупнозернистость и сегрегация компонентов, ограничивают улучшение характеристик материала. Быстрое развитие технологий аддитивного производства (таких как селективная лазерная плавка и электронно-лучевая плавка), эти процессы плавки высокоэнергетическим лучом благодаря их быстрому затвердеванию и характеристикам по-

слоистого формования, открывают новые идеи для получения высокопроизводительных сплавов Cu-Al-Fe. Однако механизм влияния различных процессов на структуру и свойства сплавов до конца не изучен, а взаимосвязь между параметрами процесса и свойствами материала еще требует систематического изучения.

Традиционное литье подразумевает получение сплавов посредством процесса плавления-заливки-затвердевания, который характеризуется медленной скоростью охлаждения и склонен к образованию грубых дендритов и макросегрегации элементов Al/Fe, что приводит к неравномерным механическим свойствам. Кроме того, медленное охлаждение может способствовать выделению хрупких интерметаллических соединений (таких как Cu_9Al_4 , FeAl), что снижает прочность материала. Однако этот метод является недорогим и подходит для подготовки больших объемов, а однородность структуры может быть частично улучшена путем последующей термической обработки.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) использует электронный луч в вакуумной среде для плавления металлических порошков с высоким подводом тепла и сильным проникновением для достижения низкой пористости и однородной микроструктуры. Сплав Cu-Al-Fe может образовывать градиентную структуру из-за ступенчатого температурного поля в процессе ЭЛП, обладающую как высокой прочностью и вязкостью, так и высокой термостойкостью. Однако траектория сканирования электронного луча чувствительна к улетучиванию элементов Al/Fe, и плотность энергии необходимо точно контролировать, чтобы избежать отклонения состава.

Технология селективного лазерного плавления (СЛП), основанная на послойном наплавлении высокоэнергетическим лазером, имеет сверхвысокую скорость охлаждения, что позволяет подавлять диффузию элементов и формировать тонкие метастабильные микроструктуры (такие как нанопреципитаты или пересыщенные твердые растворы), значительно повышая прочность сплава (например, увеличение твердости на 20–40 %). Однако быстрое затвердевание может легко привести к появлению остаточных напряжений и микротрещин, поэтому такие параметры, как мощность лазера и стратегия сканирования, необходимо оптимизировать для достижения баланса между плотностью и производительностью.

Данная работа основана на результатах предыдущих исследований традиционных процессов литья и электронно-лучевой плавки (ЭЛП) сплава Cu-Al-Fe [5], дополнительно представляет технологию селективного лазерного плавления (СЛП). Целью является обсуждение влияния трех методов легирования (традиционное литье/ЭЛП/СЛП) на микроструктуру и свойства сплавов Cu-Al-Fe, выявление внутренней связи между параметрами процесса и свойствами материала, а также предоставление теоретической основы и технической поддержки для оптимизации процесса получения высокопроизводительных сплавов Cu-Al-Fe.

Методика исследований

Как было представлено в предыдущей работе [5], при традиционном литье расплавились металлические блочные материалы Cu, Al, Fe чистотой 99,9 %, диаметром 3 мм и длиной 10 мм с соотношением Cu-13Al-5Fe (мас. %) в графитовом тигле индукционной печи. Полученный расплав заливался в графитовую форму, после кристаллизации получался слиток сплава. При электронно-лучевой плавке металлические порошки Cu, Al и Fe чистотой 99,9 % со средним размером частиц 500 мкм расплавились в вакууме на электронно-лучевой установке (ООО «НПК ТЭТА» 6E250) с током луча 88 мА. В технологии селективного лазерного плавления в данной работе использовались ультрадисперсные металлические порошки Cu, Al, Fe со средним размером частиц 50 мкм и чистотой 99,9 %. Мощность сканирования оборудования составляет 58 Вт, скорость сканирования – 50 мм/с, толщина слоя – 100 мкм, в итоге на подложке ВТ1 получался отпечатанный образец размером 10*10*2 мм на самостоятельно собранном лазерном 3d-принтере в ТПУ.

Оборудование, используемое для анализа и испытаний, включало следующие приборы: для наблюдения микроструктуры использовался металлографический микроскоп (AXIO Observer Alm, Carl Zeiss, Германия); Испытание на микротвердость проводилось с использованием микротвердомера DuraScan-50 (EMCO-TEST, Австрия) для определения твердости материала по Виккерсу; Испытание на прочность на растяжение проводилось с использованием универсальной испытательной машины, самостоятельно разработанной Томским политехническим университетом.

Результаты

Испытания механических свойств показывают, что свойства образцов сплава Cu-Al-Fe, полученных разными методами легирования, существенно различаются. Сплав, полученный традиционным методом литья, имеет самые слабые комплексные механические свойства: средняя твердость по Виккерсу составляет 217±6 HV, а предел прочности на растяжение – всего 422 МПа. Напротив, свойства сплава, полученного методом электронно-лучевой плавки, значительно улучшены: средняя твердость составляет 335±10 HV, а предел прочности на разрыв – 596 МПа. Испытание на растяжение прочности образца, полученного методом селективного лазерного плавления, не проводилось из-за ограничений по размеру, но их средняя твердость по Виккерсу (344±16 HV) оказалась самой высокой среди трех процессов, что указывает на лучший эффект микроупрочнения.

На рисунках 1–3 показаны микроструктурные характеристики сплавов Cu-Al-Fe, полученных методами традиционного литья, электронно-лучевой плавки (ЭЛП) и селективного лазерного плавления (СЛП) соответ-

ственно. Согласно данным предыдущих исследований [5], слиток, полученный методом электронно-лучевой плавки, и слиток, полученный методом традиционного литья, имеют в качестве основных характерных фаз α -фазу (Cu), γ_2 -фазу (Cu_9Al_4), κ -фазу (FeAl) и нераспавшуюся β -фазу (AlCu_3). Основное различие отражается в объемной доле каждой фазы и организационно-морфологических характеристиках. Стоит отметить, что образование α -фазы (твердый раствор на основе меди с ГЦК-структурой) и γ_2 -фазы (твердая и хрупкая фаза с кубической решеткой) происходит в результате эвтектоидного превращения β -фазы при температуре 565 °С ($\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$). Этот процесс фазового превращения оказывает решающее влияние на механические свойства сплава.

Образец традиционного литья (рис. 1) имеет типичную крупнозернистую структуру матрицы α -фазы, а его высокая пластичность и относительно низкие характеристики твердости согласуются с присущим α -фазе механизмом упрочнения твердого раствора.

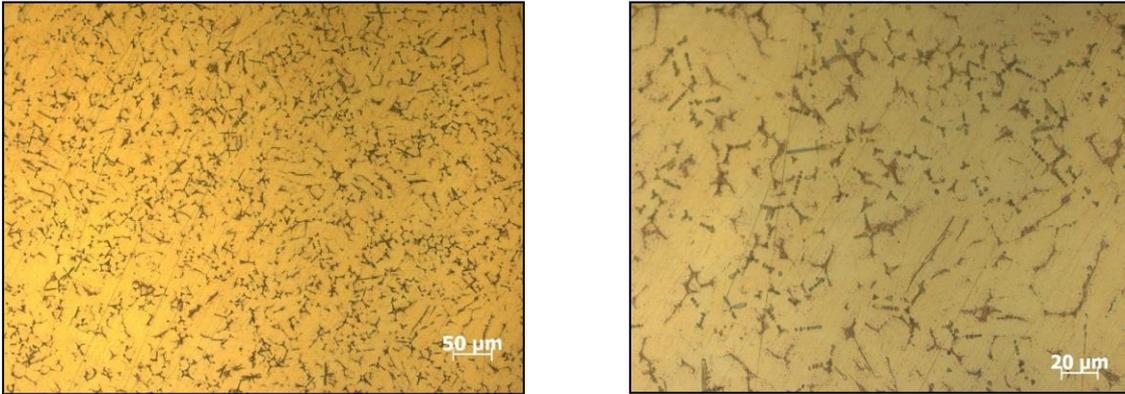


Рис. 1. Оптические изображения микроструктуры образца, полученного методом традиционного литья

По сравнению с традиционным литьём процесс электронно-лучевой плавки (рис. 2) демонстрирует значительный эффект измельчения зерна, который характеризуется: 1) размером матрицы α -фазы значительно уменьшен; 2) в области границ зерен появляется большое количество γ_2 -фазы; 3) κ -фаза равномерно распределена в матрице в виде наномасштабных черных сфер. Эту организационную эволюцию можно объяснить эффектом накопления тепла, вызванным послойным осаждением в процессе ЭЛП: когда энергия осаждения превышает критический порог, время поддержания расплавленной ванны увеличивается, что приводит к снижению скорости охлаждения, тем самым способствуя полному разложению β -фазы в эвтектоидную структуру $\alpha + \gamma_2$. В то же время низкая растворимость Fe в системе Cu-Al обуславливает гетерогенное зародышеобразование κ -фазы (интерметаллическое соединение Fe-Al) на фронте затвердевания, что еще больше препятствует укрупнению зерен. Благодаря синергетическому эффекту высоких характеристик твердости γ_2 -фазы (HV 540) и мелкозернистого упрочнения κ -фазы образца, полученные методом ЭЛП, показали прочность на растяжение примерно на 29 % выше, чем у обычных литых образцов ($\sigma = 596$ МПа против 422 МПа).

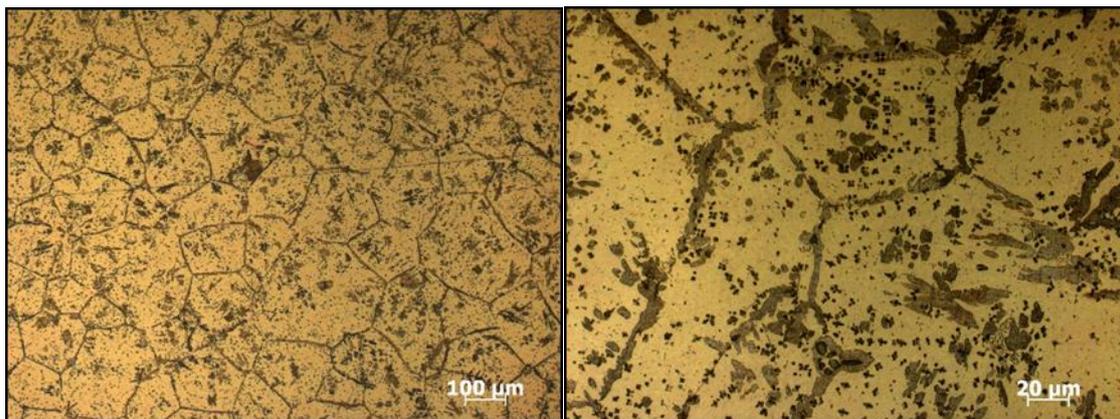


Рис. 2. Оптические изображения микроструктуры образца, полученного методом электронно-лучевой плавки

Из рисунка 3 видно, что образец сплава, полученный методом селективной лазерной плавки, обладает уникальными характеристиками неравновесной структуры затвердевания: 1) мелкая фаза нановыделения; 2) многоориентированный игольчатый термоупругий мартенсит. Образование этой сложной структуры можно объяснить характеристиками плавления высокоэнергетического пучка СЛП: 1. Высокая плотность входной

энергии приводит к локальным высоким температурам и экстремальным скоростям охлаждения, что значительно снижает коэффициенты диффузии элементов Al и Fe (особенно коэффициент диффузии Fe в Cu чрезвычайно низок, около 10^{-20} м²/с), что приводит к усилению сегрегации состава. 2. Быстрое затвердевание препятствует полному равновесию фаз, способствуя образованию наноразмерных интерметаллических соединений FeAl и CuAl₂, что повышает прочность, твердость и износостойкость материала. 3. Появление термоупругого мартенсита обусловлено снятием остаточного напряжения при быстром охлаждении, а температура его образования может быть дополнительно определена с помощью последующего анализа фазовых превращений (например, ДСК). Этот мартенсит придает сплаву память формы, но может снизить пластичность.

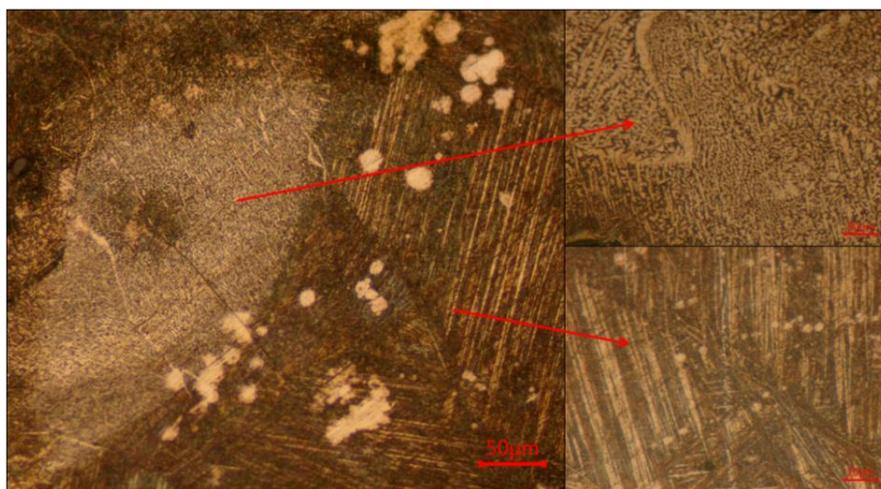


Рис. 3. Оптические изображения микроструктуры образца, полученного методом селективного лазерного плавления

Выводы

Синергетический эффект равномерного выделения γ_2 -фазы и измельчения зерна образца, полученного методом электронно-лучевой плавки, обеспечивает существенно более высокую прочность на растяжение (596 МПа) по сравнению с традиционным литьем образцом (422 МПа). Образец, полученный методом селективного лазерного плавления, имеет самую высокую твердость (344 HV) благодаря упрочняющему эффекту нанопреципитатов и мартенсита, однако испытание на растяжение не проводилось из-за ограничения размера образца. Стоит отметить, что низкая растворимость Fe в системе Cu-Al способствует выделению κ -фазы в матрице фазы, которая действует как гетерогенное ядро зародышеобразования для дальнейшего измельчения зерен, но может вызывать локальное охрупчивание. Микроструктурный анализ выявил ключевые фазы (α , γ_2 , κ) и их зависимость от параметров процесса. Результаты демонстрируют потенциал аддитивных технологий для оптимизации высокопроизводительных сплавов.

Список использованных источников:

1. A.M. Alfantazi Corrosion behavior of copper alloys in chloride media / Alfantazi A.M., Ahmed T.M., Tromans D. // Materials & Design. –2009. –Vol. 30. –P. 2425–2430. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.015>
2. C.D.S. Tuck, C.A. Powell J. Nuttall Corrosion of copper and its alloys / C.D.S. Tuck, C.A. Powell J. // Shreir's Corrosion. –2010. –Vol. 3. – P. 1937–1973. – DOI: 10.1016/B978-044452787-5.00094-9
3. Aldirmaz E. Effect of Nickel Addition on the Magnetic and Microstructural Properties of Cu-Al-Fe Alloy / E. Aldirmaz, M. Güler, E. Güler. // J Supercond Nov Magn. – 2020. – Vol. 33. – P. 755–759. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10948-019-05214-5>.
4. Raju T.N. Influence of aluminum and iron contents on the transformation temperatures of Cu-Al-Fe shape memory alloys / T.N. Raju, V. Sampath // Trans Indian Inst Met. – 2011. – Vol. 64. – P. 165–168. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-011-0032-6>
5. Пань М. Изготовление сплавов с памятью формы Cu-Al-Fe методом традиционного сплавления и литья и методом электронно-лучевой плавки / М. Пань, А.А. Клопотов, О.М. Утьев, М.П. Моторин [и др.] // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов Международной конференции. – Томск. – 2024. – С. 512–514.