



The possibility of using of ultrasonic vibrations for receiving of composite materials of immiscible in liquid state metals ("Frozen" emulsions) is analyzed.

В. О. АБРАМОВ, А. И. ГОРДИЕНКО, ФТИ НАН Беларуси

УДК 621.74

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ–СВИНЕЦ

Постановка задачи исследования

Получение композитных материалов из несмешивающихся между собой в жидком состоянии металлов («замороженных» эмульсий) является исключительно сложной задачей современной металлургии. Этим, в частности, и объясняется практически полное отсутствие литейной технологии получения подобных материалов.

В настоящее время все существующие методы управления распределением компонентов при создании композитов на основе систем, имеющих область расслоения в жидком состоянии, можно разделить на следующие группы:

- методы, в которых используются добавки специальных легирующих элементов, повышающих растворимость второго компонента в матричном расплаве;
- методы, основанные на использовании высокоскоростного затвердевания расплава;
- методы, связанные с действием механических сил, компенсирующих расслаивающее влияние силы тяжести и сил химического происхождения.

В последнем случае могут быть использованы силы электрической и магнитной природы и ультразвуковое воздействие на затвердевающий металл [1, 2]. Существующие методы получения композитов типа «замороженных» эмульсий наиболее полно отражены в работах, посвященных созданию антифрикционных материалов на основе алюминия и свинца, как наиболее перспективных для применения их в качестве подшипниковых сплавов взамен используемых на основе алюминия и олова [3]. По имеющимся литературным данным материалы системы Al–Pb обладают более высоким комплексом антифрикционных свойств, чем сплавы системы Al–Sn [4].

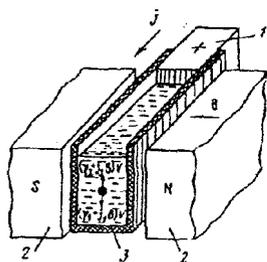
В настоящей работе рассмотрены вопросы создания литых композитных материалов на основе системы алюминий–свинец и технология их

получения с использованием ультразвука. Введение значительного количества мягких структурных компонентов, содержащих свинец, в алюминиевую матрицу существенно улучшает ее антифрикционные свойства. Однако существует проблема, препятствующая получению сплавов алюминий–свинец. Дело в том, что свинец растворяется в алюминии только при температурах, которые значительно выше температуры плавления обоих металлов, т.е. фазовая диаграмма такой системы имеет широкую область несмешиваемости в жидкой фазе (двухфазную область). Помимо этого, алюминий и свинец различаются по плотности. В результате расплавы с большим содержанием алюминия и свинца во время кристаллизации разделяются на слои, свинец концентрируется в нижней части слитка. Поэтому производство композитов из расплавов с широкой двухфазной областью, т.е. «замороженных» эмульсий, является достаточно сложной металлургической задачей. Существующие методы — порошковая металлургия, легирование сплавов компонентами, повышающими растворимость добавки свинца, высокоскоростное затвердевание — не позволяют получить материалы с высоким содержанием свинца и, следовательно, получить литые композиты с желаемым уровнем антифрикционных свойств весьма проблематично.

Методика проведения экспериментов

Подходы к решению поставленной задачи могут быть связаны с воздействием на жидкий и затвердевающий металл магнитных и электрических полей и ультразвуковой обработки.

Принципиальная схема возможного действия скрещенных магнитных и электрических полей на жидкий металл, в котором присутствуют две фазы, обладающие различной электропроводностью и плотностью, показана на рис. 1. Варьируя полярность и напряженность магнитного поля и силу тока, можно подобрать режимы, при которых



$$\vec{f}_e = \sigma [\vec{E} \times \vec{B}] = \vec{j} \times \vec{B}$$

$$\vec{j}_i = \sigma_i \vec{E}$$

$$(\gamma_2 + \vec{j}_2 \vec{B}) V = (\gamma_1 + \vec{j}_1 \vec{B}) V$$

$$\gamma_i = \rho_i g$$

Рис. 1. Принципиальная схема действия скрещенных магнитных и электрических полей на двухфазный расплав металла: 1 – электрод; 2 – электромагнит; 3 – тигель с двухфазным расплавом металла; f_e – объемная электромагнитная сила; B – вектор индукции магнитного поля; j – плотность тока; E – вектор напряженности электрического поля; σ_i – электропроводность i -й фазы; ρ_i – плотность i -й фазы; g – ускорение силы тяжести; V – объем фазы

под действием возникающей силы Лоренца свинец не будет осаждаться.

Для получения литых композитов с равномерным распределением мелкодисперсных выделений свинца необходимо воспрепятствовать коагуляции этих выделений свинца. Для этой цели могут быть использованы мощные ультразвуковые колебания, создающие в расплаве кавитацию и акустические течения. В сочетании с действием силы Лоренца ультразвуковая обработка вызывает активное перемешивание алюминия и свинца и образование дополнительных центров кристаллизации, обеспечивая равномерное распределение мелких частиц свинца по слитку.

Первоначально эксперименты проводили на лабораторной установке, принципиальная схема которой показана на рис. 2. Расплав помещали в

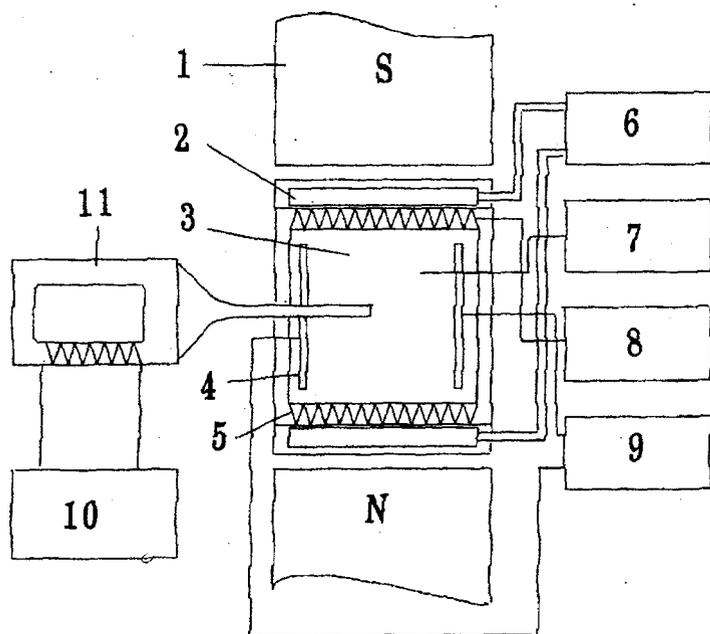


Рис. 2. Блок-схема установки для кристаллизации металлоэмульсии в магнитном и ультразвуковом поле: 1 – электромагнит; 2 – блок водяного охлаждения; 3 – тигель; 4 – электроды; 5 – электронагреватель; 6 – система водоподдачи; 7 – блок измерения температур; 8 – блок электропитания нагревательного устройства; 9 – генератор постоянного тока; 10 – ультразвуковой генератор; 11 – ультразвуковой преобразователь

специальный тигель 3 (объем 2 л), внутри которого устанавливали электроды 4, обеспечивающие прохождение через расплав электрического тока с однородно распределенной плотностью. Металл расплавляли с помощью электродов 4. Тигель 3 помещали между полюсами электромагнита 1 так, чтобы векторы электрического и магнитного полей были направлены перпендикулярно друг другу.

Перед кристаллизацией расплав нагревали до температуры 1100–1200 °С, чтобы обеспечить равномерное распределение свинца в области гомогенного раствора. Затем расплав охлаждали водой со скоростью 100 К/мин. Электрический ток и магнитное поле регулировали так, чтобы в расплаве действовала сила, достаточная для компенсации разницы плотностей алюминия и свинца. В процессе охлаждения расплава его обрабатывали ультразвуковыми колебаниями. Колебания в расплав вводили с помощью излучателя 11, изготовленного из ниобиевого сплава. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовали магнитоstrictionный преобразователь, изготовленный из железокобальтового сплава и питаемый электрическим генератором, мощностью 4 кВт, работающий в частотном диапазоне 25±1 кГц.

Для оценки уровня антифрикционных свойств материалов системы алюминий–свинец они сопоставлялись со свойствами баббита Б-83 (Sn–6%Cu–10%Sb) и сплавами АО 9-1 (Al–9%Sn–1%Cu) и АО20-1 (Al–20%Sn–1%Cu). Антифрикционные свойства полученных материалов на базе системы Al–Pb определяли в режиме сухого трения без смазки. Испытания проводили на машинах трения СНЦ-2 (скорость скольжения 1,04 м/с) при удельном давлении 1,4 МПа по схеме вал–вкладыш (ролик–обойма) в паре со сталью 45 в нетермообработанном (твердость НВ 196–200 ед.) и закаленном состояниях (твердость HRC 48–55 ед.). Для определения антифрикционных свойств алюминиево-свинцовых материалов полученные слитки предварительно отжигали при температуре 350 °С в течение 1 ч, затем прокатывали и вторично отжигали при той же температуре и времени выдержки. Тестируемые образцы имели форму дисков диаметром 45 мм, вырезанных из центральных частей слитков, с пятью бороздками, нанесенными на поверхность. Потеря массы образца и ролика в процессе тестирования использовалась как мера износа.

Результаты экспериментов

Исследование особенностей структуры полученных композитных материалов показало, что при рационально выбранных режимах литья, электрической, магнитной обработке и ультразвуковом воздействии был получен качественный слиток с относитель-

но равномерным распределением мелкодисперсных включений свинца (рис. 3). Различие в содержании свинца по высоте слитка составило 0,8–1,0%, размеры основной массы частиц свинца – 5–40 мкм. Легирование расплава оловом и медью не привело к существенному изменению характера распределения в матрице свинца – он был достаточно равномерно распределен по высоте слитка. В нижней части не наблюдалось осаждения свинца. Анализ микроструктуры показал, что легкоплавкие составляющие расположены в виде тонкой непрерывной сетки по границам зерен и дендритных ячеек. Наряду с этим в матрице наблюдаются равномерно распределенные дисперсные включения размером 5–30 мкм.

Сплавы, легированные медью, достаточно однородны по своему составу. Медь в основном кристаллизуется в форме эвтектики (Al)+Al₂Cu. Мелкие включения в матрице алюминия имеют диаметр 2–8 мкм, богаты свинцом и содержат до 12% олова. Крупные включения неправильной формы содержат в основном олово и в небольших количествах имеют зоны, обогащенные свинцом. С повышением содержания меди увеличиваются твердость и прочность сплава. Определение литейных свойств сплава Al–10%Pb–1%Sn–1%Cu показало, что линейная усадка составляет 1,75%, а объемная – 5,25%.

Введение кремния существенно меняет распределение свинца в слитке. Содержание его в

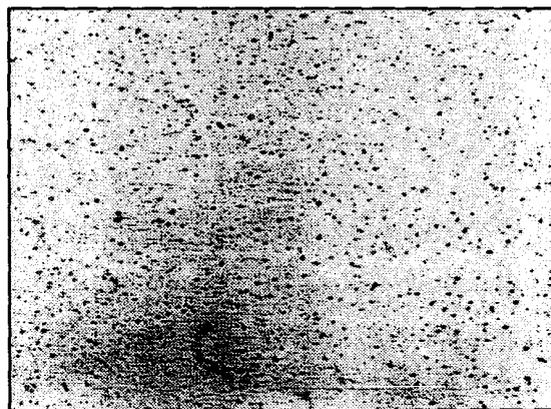


Рис. 3. Микроструктура слитка (композит Al–10%Pb–1%Sn–1%Cu). x100

центральной части значительно снижается с повышением содержания кремния. В то же время в нижней части появляется слой с повышенным содержанием свинца. В центральной части слитка свинец присутствует практически исключительно внутри частиц олова. Для объяснения этих результатов необходимо рассмотреть фазовую диаграмму системы Al–Pb–Si. Можно показать, что наблюдаемый эффект появляется из-за расширения двухфазной области системы Al–Pb–Si и повышения его текучести с увеличением содержания кремния.

Как показали эксперименты, композит Al–10%Pb–10%Sn–1%Cu имеет лучшие антифрикционные свойства, чем сплавы, не содержащие свинец (см. таблицу).

Износ деталей во фрикционной паре ролик (сталь 45)–исследуемый образец

Состав	Износ ролика, %	Износ образца, %
Al–9%Sn–1%Cu	0,069	0,116
Al–20%Sn–1%Cu	0,052	0,090
Al–10%Pb–10%Sn–1%Cu	0,050	0,071

На второй стадии работы было изготовлено и протестировано несколько подшипников скольжения. Для этой цели электромагнит и ультразвуковая установка были смонтированы в горизонтальный аппарат для полунепрерывного литья (рис. 4).

На рис. 5 показана зависимость коэффициента трения μ_t от температуры масла M14B. Обнаружено, что сплавы Al–Pb–Sn–Cu имеют меньший коэффициент трения, особенно при высоких температурах, по сравнению с промышленным подшипниковым сплавом состава Al–20%Sn–1%Cu, причем переход в режим граничного трения происходит у них при более высокой температуре.

Испытания показали, что у баббитовых вкладышей первые признаки усталостного разрушения появляются уже через 8 ч работы при максимальных удельных нагрузках до 21,2 МПа. Через 16 ч

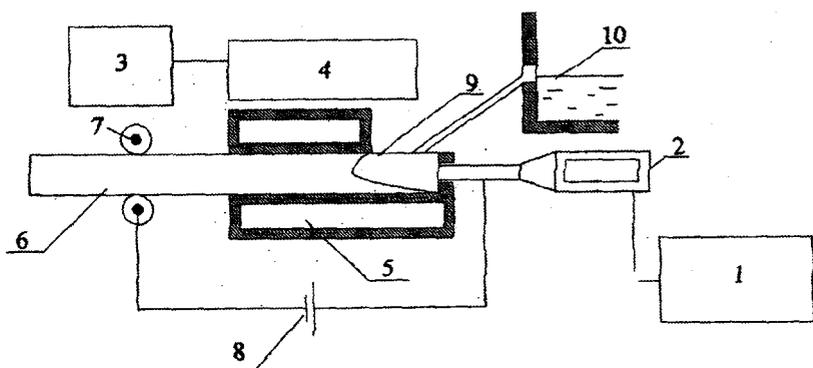


Рис. 4. Блок-схема установки для полунепрерывного литья слитков композитов системы Al–Pb: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – ультразвуковой преобразователь; 3 – источник постоянного тока для питания электромагнита; 4 – электромагнит; 5 – водоохлаждаемая литейная форма; 6 – слиток; 7 – ролик; 8 – источник постоянного тока для питания электрической системы; 9 – расплав металла; 10 – миксер с расплавом

работы поверхности вкладышей имели усталостные трещины практически по всей площади.

Вкладыши с антифрикционным слоем из композита системы Al–Pb проработали 250 ч, в том числе при максимальных удельных нагрузках

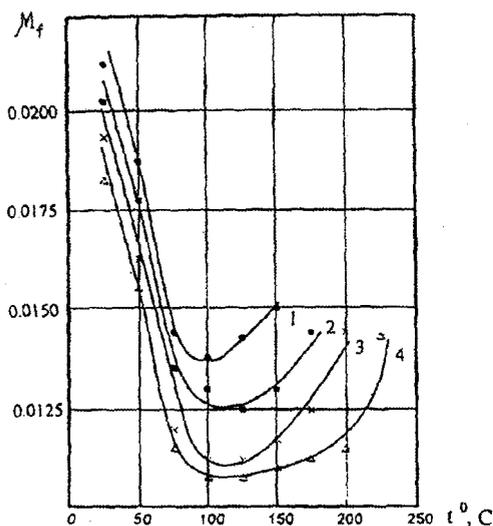


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента трения для сплавов системы Al-Sn и композитов системы Al-Pb в паре со сталью 45: 1 – сплав Al-9%Sn-1%Cu; 2 – сплав Al-20%Sn-1%Cu; 3 – композит Al-10%Pb-1%Sn-1%Cu; 4 – композит Al-10%Pb-10%Sn-3%Cu

до 42,5 МПа – 226 ч. При этом рабочие поверхности не имели следов задиров и схватывания, а также признаков начала усталостного разрушения. Износ рабочей поверхности в зоне максимального давления за период испытаний 250 ч составил в среднем 3–

4 мкм. По данным испытаний, несущая способность сплава находится в пределах 25–30 МПа.

Выводы

1. Разработаны основы ультразвуковой технологии получения литых композитных материалов на основе системы Al-10%Pb, исследована их структура, механические и антифрикционные свойства.

2. Установлено, что при рационально выбранных режимах литья, электрической, магнитной обработке и ультразвуковом воздействии получен качественный слиток с относительно равномерным распределением мелкодисперсных включений свинца (5–40 мкм).

3. Установлено, что композит Al-10%Pb-10%Sn-1%Cu имеет более высокие антифрикционные характеристики, чем сплавы системы Al-Sn.

Литература

1. Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В. и др. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М.: Янус-К, 2006.
2. Эскин Г.И., Добаткин В.И. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986.
3. Буше Н.С., Гуляев А.С., Двоскина В.А., Раков К.М. Подшипники из алюминиевых сплавов. М.: Транспорт, 1978.
4. Алиева С.Г и др. Промышленные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1984.