



*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].

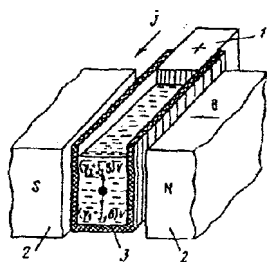
В настоящей работе рассмотрены вопросы создания литых композитных материалов на основе системы алюминий–свинец и технология их

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;  $\sigma_i$  – электропроводность  $i$ -й фазы;  $\rho_i$  – 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

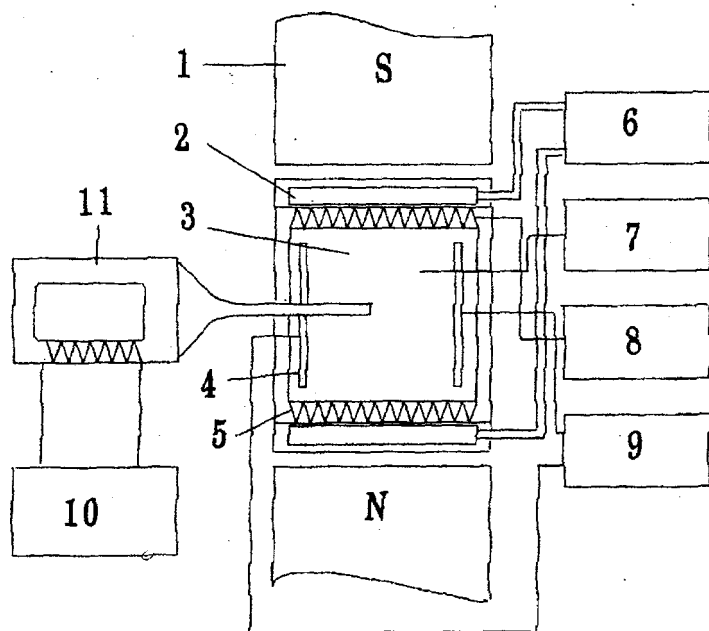


Рис. 2. Блок-схема установки для кристаллизации металлоэмульсии в магнитном и ультразвуковом поле: 1 – электромагнит; 2 – блок водяного охлаждения; 3 – тигель; 4 – электроды; 5 – электронагреватель; 6 – система водоподдачи; 7 – блок измерения температур; 8 – блок электропитания нагревательного устройства; 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 расплаве вводили с помощью излучателя 11, изготовленного из ниобиевого сплава. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовали магнитострикционный 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)+Al<sub>2</sub>Cu. 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

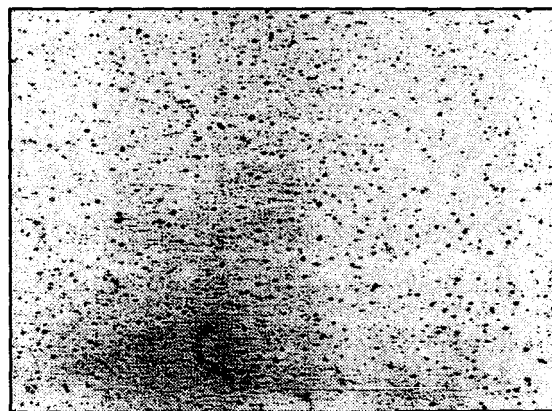


Рис. 3. Микроструктура слитка (композит Al–10%Pb–1%Sn–1%Cu). x100

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  $\mu_t$  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

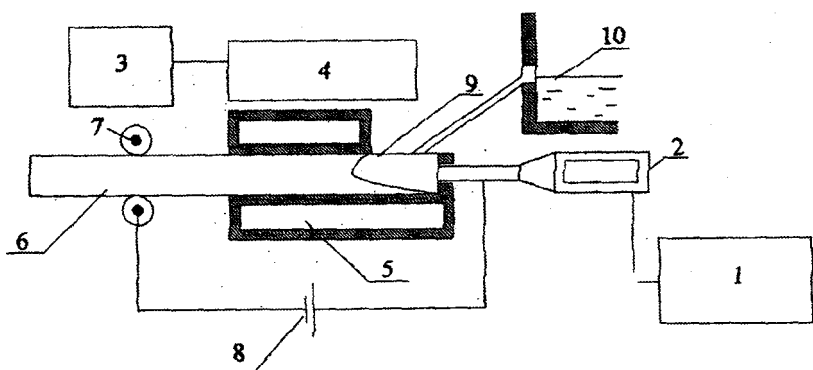


Рис. 4. Блок-схема установки для полунепрерывного литья слитков композитов системы Al–Pb: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – ультразвуковой преобразователь; 3 – источник постоянного тока для питания электромагнита; 4 – электромагнит; 5 – водоохлаждаемая литейная форма; 6 – слиток; 7 – ролики; 8 – источник 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

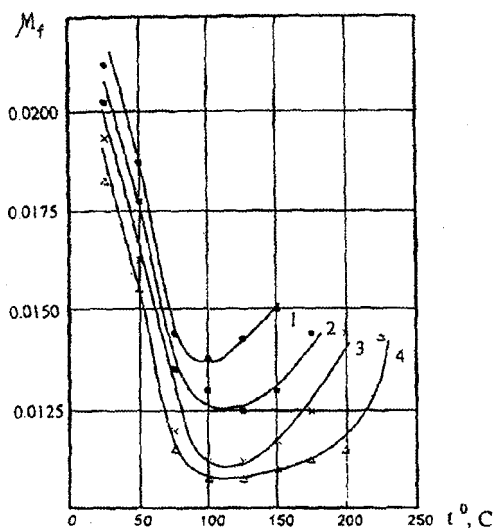


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента трения для сплавов системы Al-Sn и композитов системы Al-Pb в паре со сталью 45: 1 – сплав Al-9%Sn-1%Cu; 2 – сплав Al-20%Sn-1%Cu; 3 – композит Al-10%Pb-1%Sn-1%Cu; 4 – композит Al-10%Pb-10%Sn-3%Cu

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.