

# О ВЫБОРЕ ЭЛЕМЕНТА-ЛИДЕРА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ КОНТАКТНОМ ЛЕГИРОВАНИИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ ИЗ РАСПЛАВОВ ТЯЖЕЛЫХ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Ю. С. Авраамов, В. И. Кошкин, И. А. Кравченкова,  
А. Н. Кравченков, А. Д. Шляпин

*В статье рассмотрена физическая модель действия элемента-лидера в процессе поверхностного контактного легирования из двухкомпонентных расплавов. Приведено новое экспериментальное подтверждение этой модели на примере системы сплав Д16 – расплав олово-цинк. Показано, что данная модель действия элемента-лидера не применима в отношении цинка для меди. Контактное легирование из трехкомпонентного расплава (в частности, из расплава свинец-цинк-олово) нуждается в уточнении модели.*

**Ключевые слова:** сплав, твердо-жидкофазное превращение, диффузия, контактное легирование.

## Введение

Создание новых антифрикционных материалов с улучшенными свойствами является одной из актуальных задач современного материаловедения. Значительный прогресс в решении этой задачи был достигнут благодаря разработке метода поверхностного контактного легирования (КЛ) сплавов на основе алюминия и меди тяжелыми легкоплавкими компонентами из их расплава с помощью специальных добавок, названных элементами-лидерами[1]. Продолжение исследований в данном направлении показало, что расширение номенклатуры новых антифрикционных материалов требует уточнения механизма процессов контактного легирования и, в частности, обоснованного выбора элемента-лидера.

В данной работе обсуждается механизм контактного легирования и его применимость на

примере сплавов систем Al-Cu-Zn-Sn и Fe-Cu-Zn-Pb.

## Модель контактного легирования

В монографии [1], обобщающей результаты многолетних исследований твердо-жидкофазных взаимодействий в системах компонентов с ограниченной взаимной растворимостью в жидком состоянии, приводится схема (рис. 1), иллюстрирующая выбор элемента-лидера для контактного легирования сплавов на основе алюминия и меди.

На рисунке 1 во втором столбце показаны элементы, которые могут являться элементами-лидерами для элементов третьего столбца.

Выбор элементов-лидеров базируется на простой физической модели опережающей диффузии лидера, достижения солидусных концен-

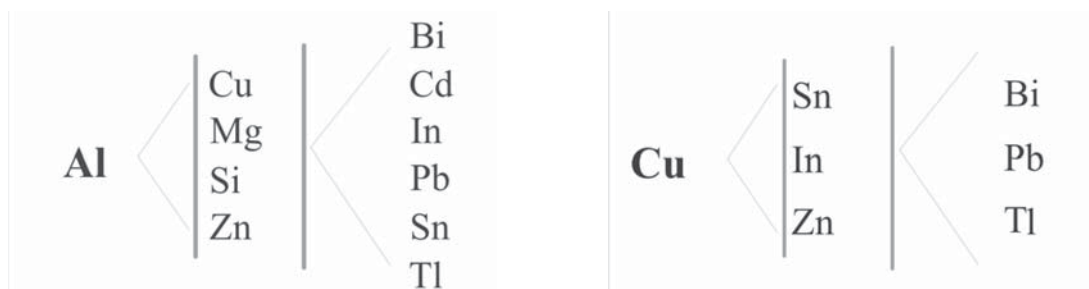


Рис. 1. Схема для выбора элементов-лидеров для легирования алюминия, меди и их сплавов различными легкоплавкими элементами

траций, локального оплавления легируемого металла или сплава и последующей миграции по жидким прослойкам основного легирующего элемента.

Пусть легируемым элементом является  $A$ , легирующим элементом –  $B$  и растворимость  $B$  в  $A$  пренебрежительно мала. В качестве элемента-лидера согласно этой модели выбирается элемент  $C$ , для которого необходимо равновесие системы  $A-C$ , и его фрагмент имеет вид, представленный на рис. 2.

Контактное легирование проводится при температуре  $T = T_0$ .

Выделим схематично один фрагмент контакта расплава  $B-C$  с твердым легируемым металлом  $A$  (рис. 3, а).

Для удобства примем расстояние  $X_s$  на схеме (см. рис. 3) равным в условном масштабе предельной растворимости  $C$  в  $A$  при  $T = T_0$ .

На рисунке 3, б представлен начальный момент контактного легирования  $A$  элементом  $B$  с помощью элемента-лидера  $C$ , и в условном масштабе показано распределение элемента  $C$  в легируемом металле  $A$  через промежутки времени  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ .

По истечении времени  $\tau_3$  приповерхностная концентрация  $C$  в  $A$  достигает значения предельной растворимости  $X_s$ . При продолжении насыщения  $A$  элементом  $C$  в момент времени  $\tau_3 + \Delta t$  в приповерхностной зоне  $A$  появят-

ся первые капли жидкой фазы состава  $X_L$  (см. рис. 3, в). Эти капли схематично изображены темными областями.

Продолжение насыщения  $A$  элементом  $C$  будет сопровождаться смещением кривой распределения элемента  $C$  вправо. При этом максимальное значение концентрации будет сохраняться на уровне  $X_s$ , а увеличение времени насыщения будет приводить к увеличению количества жидкости состава  $X_L$ .

На рисунке 3, в показана ситуация к моменту времени  $\tau_3$ , когда уже на расстоянии  $d$  от поверхности металла  $A$  установилась концентрация  $C$ , соответствующая предельной растворимости  $X_s$ .

За время  $\tau_3$  часть легирующего сплава на этом расстоянии полностью оплавилась и приняла концентрацию  $X_L$ , однако в результате интенсивного взаимодействия с основным расплавом  $B$  эта зона обогатилась элементом  $B$ , т.е.  $B$  проник в  $A$  на некоторое расстояние.

После продолжения процесса контактного легирования и охлаждения до комнатной температуры из расплава  $A-B-C$  выделяются кристаллы  $B$ . Элементы  $A$  и  $C$  образуют твердый раствор. Эту область от исходного компонента  $A$  отделяют переходные области переменной растворимости  $C$  в  $A$  (рис. 3, г).

Экспериментальное подтверждение этой модели было получено при контактном легировании железо-медного сплава свинцом из свинцово-оловянного расплава и сплава Д16 свинцом из свинцово-магниевого расплава [2]. Соответствующие макро- и микроструктура показаны на рис. 4 и 5.

### Новые элементы-лидеры

Для уточнения приведенной выше модели и расширения номенклатуры композиционных материалов, получаемых с помощью метода контактного легирования, были продолжены эксперименты в соответствии со схемой 1.

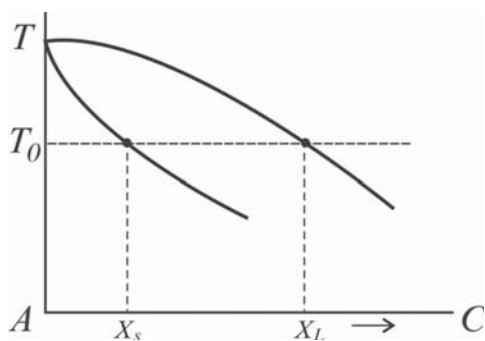


Рис. 2. Фрагмент диаграммы равновесия  $A-C$

Были изучены возможности цинка в качестве элемента-лидера для легирования сплавов на основе алюминия и меди соответственно оловом из расплава олово-цинк и свинцом из расплава цинк-свинец.

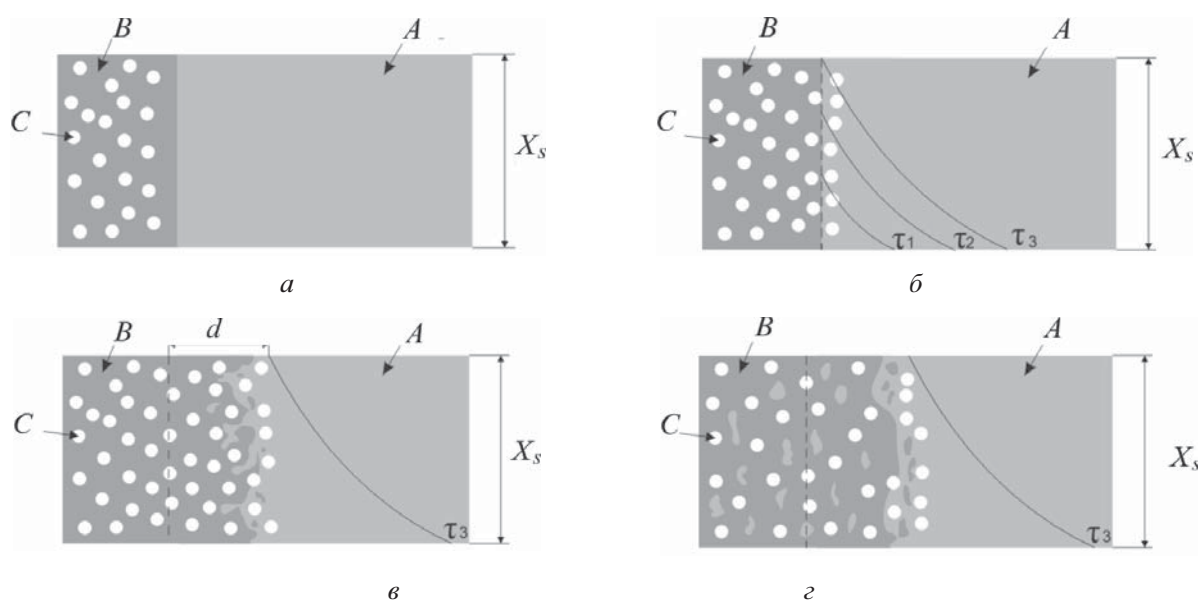
Легирование сплава Д16 оловом из расплава олово-цинк проводили при 550 °С, легирование железо-медного сплава свинцом из расплава свинец-цинк – при 800 °С. В обоих случаях при указанных температурах легирование осуществлялось из однородного однофазного жидкого раствора.

Несмотря на сходство условий контактного легирования, в рассматриваемых случаях были

получены принципиально отличающиеся результаты.

Легирование сплава Д16 оловом привело к образованию ярко выраженной микроструктуры поверхностно легированного слоя, где на фоне матрицы, представляющей собой твердый раствор меди и цинка в алюминии, видны прослойки олова со строчечными включениями интерметаллидов (рис. 6).

Легирование железо-медного сплава из расплава свинца с 15 масс.% цинка не приводит к миграции свинца в объем сплава. Более того, при температуре легирования 800 °С наблюдается интенсивное разрушение сплава железо-



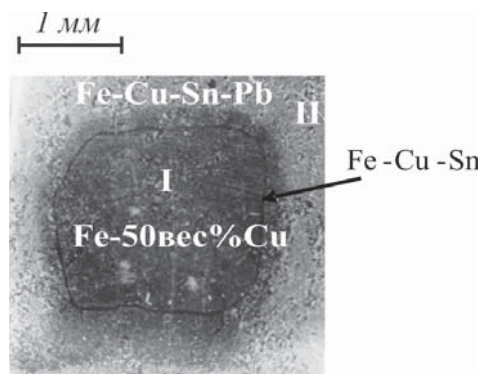
*Рис. 3. Схема контактного легирования:*

*А – легируемый металл; В – расплав легирующего элемента;*

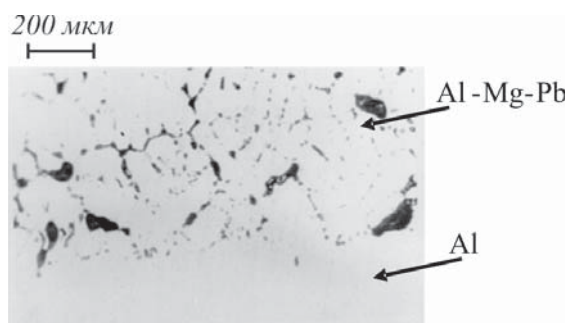
*С – элемент-лидер, растворенный в расплаве В;*

*а – перед процессом КЛ; б – изменение распределения элемента С в А с течением времени;*

*в – проникание компонента В в объем А; г – схематическое изображение зоны КЛ по механизму элемента-лидера при комнатной температуре*



*Рис. 4. Макроструктура образца сплава Fe-50% Cu, легированного свинцом при 600 °С (элемент-лидер – олово) 30 минут*



*Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя в алюминиевом сплаве, легированном свинцом с помощью элемента-лидера магния*

медь (рис. 7). На рисунке 7 в расплаве свинца хорошо видны кристаллы железа и меди, «оторванные» от основного сплава.

Эту проблему удалось решить путем добавления к расплаву свинца с цинком всего 2 масс.% олова. Этого количества олова достаточно почти для полного прекращения процесса разрушения твердого сплава (рис. 8), а при добавлении 5% олова начинает преобладать процесс миграции легирующих компонентов и элементов-лидеров в железо-медный сплав (рис. 9).

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Строго говоря цинк не полностью удовлетворяет требованиям к элементу-«лидеру» по отношению к меди, поскольку при температуре легирования 800 °С он не может раствориться в меди до солидусной концентрации, а повышение температуры легирования невозможно из-за испарения цинка. Олово, добавленное в расплав при данной температуре, избирательно диффундирует из расплава в медь, насыщая ее до солидусной концентрации и вызывая тем самым локальное оплавление меди. Наличие в расплаве цинка, активно растворяющемся в меди, несомненно, ускоряет этот процесс. Далее по жидким каналам медно-оловянно-цинкового расплава вглубь железо-медного сплава устремляется свинец, что хорошо видно на приведенных рисунках.

Таким образом, приведенная выше модель действия элемента-лидера не применима в отношении цинка для меди, что и подтверждает ее справедливость. Что касается медных сплавов,

то, по-видимому, в каждом конкретном случае необходимо анализировать соответствующую тройную диаграмму. Совместное действие олова и цинка нуждается в уточнении модели.

### Заключение

В работе была уточнена физическая модель действия элемента-лидера в процессе поверхностного контактного легирования из двухкомпонентных расплавов. Рассмотренная модель полностью подтверждается на примере системы сплав Д16 – расплав олово-цинк в отношении цинка, как элемента-лидера.

В ходе исследований было выяснено, что модель действия элемента-«лидера» не применима в отношении цинка для меди. Контактное легирование из трехкомпонентного расплава (в частности, из расплава свинец-цинк-олово) нуждается в уточнении модели.

### Список литературы

1. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии. – М: Интернаука, 2002. – 371 с.
2. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Теоретические основы, технология и свойства сплавов на основе несмешивающихся компонентов: учеб. пособ. – М.: МГИУ, 2002. – 376 с.

Материал поступил в редакцию 11.01.2010

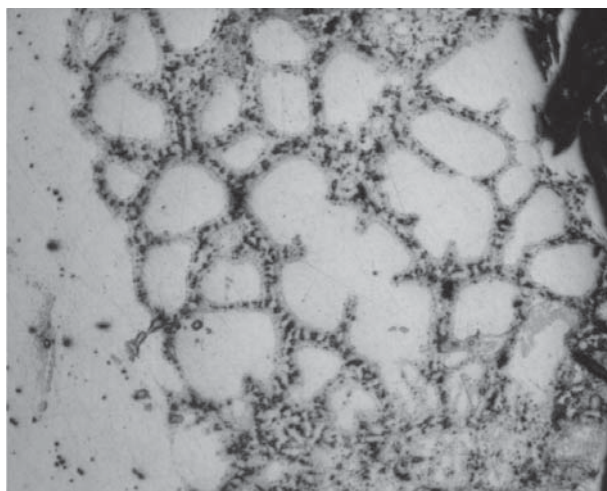


Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя в сплаве Д16, полученного контактным легированием из расплава олова и цинка

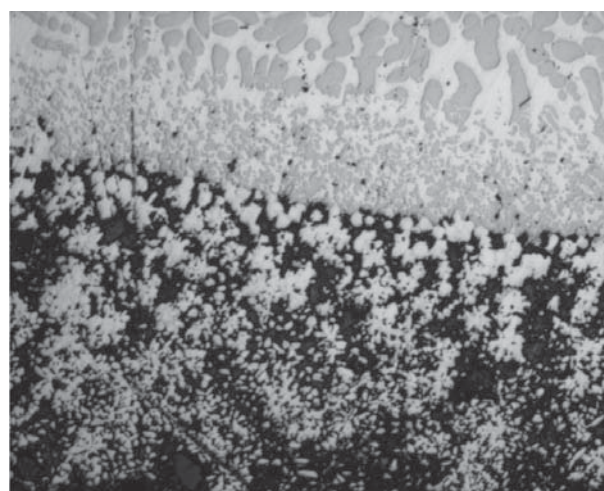


Рис. 7. Зона контактного взаимодействия расплава Pb-15%Zn, 800 °С, 30 минут

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>АВРААМОВ</b><br><b>Юрий Серафимович</b><br><br>E-mail: <a href="mailto:ashliapin@list.ru">ashliapin@list.ru</a><br>Тел. 8(495)675-61-92                    | Доктор технических наук, профессор, президент ГОУ МГИУ, заслуженный деятель науки РФ. Вице-президент Международной академии менеджмента, академик международной академии наук Высшей школы, академик международной академии транспорта, член международного союза экономистов. Область научных интересов – металловедение, физика металлов и композиционных материалов. Автор и соавтор более 300 научных трудов, в том числе 40 авторских свидетельств на изобретение и 8 монографий. |
| <b>КОШКИН</b><br><b>Валерий</b><br><b>Иванович</b><br><br>E-mail: <a href="mailto:koshkin@msiu.ru">koshkin@msiu.ru</a><br>Тел. 8(495)620-39-68                | Доктор физико-математических наук, профессор. Профессор кафедры материаловедения и ТКМ ГОУ МГИУ. Область научных интересов – физическое материаловедение. Автор более 50 научных трудов.                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>КРАВЧЕНКОВА</b><br><b>Ирина</b><br><b>Александровна</b><br><br>E-mail: <a href="mailto:iri540@yandex.ru">iri540@yandex.ru</a><br>Тел. 8(495)620-39-68      | Заведующая межкафедральной лабораторией материаловедения в машиностроении МГИУ. Соискатель кафедры материаловедения и ТКМ ГОУ МГИУ. Область научных интересов – материаловедение и композиционные материалы. Автор (соавтор) 4 научных трудов.                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>КРАВЧЕНКОВ</b><br><b>Антон Николаевич</b><br><br>E-mail:<br><a href="mailto:akravchenkov64@yandex.ru">akravchenkov64@yandex.ru</a><br>Тел. 8(495)620-39-68 | Аспирант кафедры материаловедения и ТКМ МГИУ. Область научных интересов – металловедение и композиционные материалы. Автор (соавтор) 6 научных трудов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>ШЛЯПИН</b><br><b>Анатолий</b><br><b>Дмитриевич</b><br><br>E-mail: <a href="mailto:ashliapin@list.ru">ashliapin@list.ru</a><br>Тел. 8(495)675-61-92         | Доктор технических наук, профессор. Проректор по научной работе МГИУ, заведующий кафедрой материаловедения и ТКМ МГИУ. Область научных интересов – металловедение, физика металлов и композиционных материалов. Автор и соавтор более 130 научных работ, из них 7 монографий, 35 авторских свидетельств и патентов.                                                                                                                                                                    |