

5. Лясс А. М. Быстротвердеющие формовочные смеси. – М.: Машиностроение, 1979. – 255 с.

6. Лившиц М. Л. Технологический анализ и контроль производства лаков и красок. – М.: Высш. шк., 1980. – 216 с.

7. Лебян Ю. П., Кукуй Д. М. Определение скорости твердения связующих материалов // Литейное производство. – 1979. – № 4. – С. 12–13.

8. Лебян Ю. П., Кукуй Д. М. Исследование и разработка комплексных устройств для контроля связующих и смесей // Тез. докл. II Всесоюзн. науч.-техн. съезда литейщиков. – Л., 1983. – С. 189–190.

УДК 669.715

Б. М. НЕМЕНЕНОК, д-р техн. наук,  
А. П. БЕЖОК, канд. техн. наук (БНТУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ СТРОНЦЕВЫХ ЛИГАТУР В АЛЮМИНИЕВОМ РАСПЛАВЕ

Степень усвоения модификатора расплавом является важной характеристикой стронциевых лигатур и зависит от скорости нагрева лигатуры в расплаве, температуры плавления лигатуры и кинетики ее растворения, так как бедные стронцием лигатуры, не содержащие свободного стронция, растворяются обычным способом с переходом в расплав из лигатуры интерметаллических соединений и последующим их распадом в расплаве. Следовательно, чем мельче алюминиды стронция, тем меньше времени требуется для полного растворения и усвоения расплавом лигатуры, что и сокращает характерный для стронциевых лигатур «инкубационный» период при сохранении достаточного времени их «живучести».

На скорость нагрева введенной в расплав лигатуры оказывают влияние ее форма и размеры кусков. Для оценки влияния этих факторов используем дифференциальное уравнение нагрева тонкого тела по методике, изложенной в работе [1].

Для составления дифференциального уравнения нагрева тонкого тела запишем элементарный тепловой баланс:

$$qF d\tau = McdT_{cp}, \quad (1)$$

где  $F$  – тепловоспринимающая поверхность тела,  $m^2$ ;  $\tau$  – время, с;  $M$  – масса тела, кг;  $c$  – теплоемкость тела, Дж/(кг·К);  $T_{cp}$  – средняя температура тела, К.

Изменение температуры тела в единицу времени, или скорость нагрева, можно определить как

$$C_n = dT_{cp}/d\tau \quad (2)$$

или с учетом формулы (2)

$$C_n = qF/(Mc), \quad (3)$$

т. е. скорость нагрева пропорциональна удельному тепловому потоку и тепловоспринимающей поверхности и обратно пропорциональна массе тела и теплоемкости.

Введем понятие линейных размеров тела, связанных с его поверхностью  $F$  и объемом  $V$ . Пусть  $l_V$  – линейный размер, связанный с объемом тела соотношением  $l_V^3 = V$  или  $l_V = V^{1/3}$ ,  $l_f$  – линейный размер, связанный с поверхностью тела соотношением  $l_f^2 = F$  или  $l_f = F^{1/2}$ . Используем эти соотношения для характеристики формы тел различных размеров.

Отношение линейных размеров  $l_f$  и  $l_V$  является безразмерным и представляет собой параметр, характеризующий форму тела ( $E_S$ ):

$$E_S = \frac{l_f}{l_V} = \frac{F^{1/2}}{V^{1/3}}. \quad (4)$$

Используя формулу (4), выразим поверхность тела  $F$  через его объем  $V$  и коэффициент формы  $E_S$ :

$$F = E_S^2 V^{2/3}. \quad (5)$$

Подставив это выражение в отношение объема к поверхности, получим

$$\frac{V}{F} = \frac{V}{E_S^2 \cdot V^{2/3}} = \frac{V^{1/3}}{E_S^2} = \frac{l_V}{E_S^2}. \quad (6)$$

Отношение массы тела к поверхности

$$\frac{M}{F} = \frac{\gamma V}{F} = \frac{\gamma l_V}{E_S^2}. \quad (7)$$

Используя формулу (4), определим коэффициент формы для тел с конфигурацией, которую могут иметь куски лигатур:

для шара

$$E_S = \frac{(4\pi r^2)^{1/2}}{(4/3\pi r)^{1/3}} = \frac{\sqrt{4\pi}}{\sqrt[3]{4\pi/3}} = \frac{3,54}{1,61} \cong 2,20;$$

для призмы с размерами  $a \times a \times 3a$ :

$$E_S = \frac{(2a^2 + 4a \cdot 3a)^{1/2}}{(3a^3)^{1/3}} = \frac{\sqrt{14a^2}}{\sqrt[3]{3a^3}} = \frac{\sqrt{14}}{\sqrt[3]{3}} = \frac{3,73}{1,45} \cong 2,59;$$

для параллелепипеда с размерами  $a \times a \times 3a$ :

$$E_s = \frac{\sqrt{2a^2 \cdot 2 + (2a + 4a)3a}}{\sqrt[3]{a \cdot 2a \cdot 3a}} = \frac{\sqrt{22}}{\sqrt[3]{6}} = \frac{4,7}{1,81} \approx 2,60.$$

Таким образом, минимальный коэффициент формы имеет шар. С учетом выражения (7) скорость нагрева

$$C_{II} = \frac{qE_s^2}{l_V \gamma c}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что при одном и том же линейном размере  $l_V$ , т. е. при одном и том же объеме тела, скорость нагрева шара будет наименьшей, а все другие тела в этих условиях будут иметь большую скорость нагрева. Наибольший коэффициент формы имеют тела с максимально развитой поверхностью нагрева, т. е. пластины или тонкие листы. Применительно к используемым лигатурам навески кусковых лигатур для модифицирования можно приближенно сравнить с шаром, а добавку лигатур в форме кокильных пластин или быстроохлажденных лент – с параллелепипедом.

Допустим, что для модифицирования необходимо ввести в расплав I кг лигатуры Al – 10% Sr с плотностью 2,69 г/см<sup>3</sup>. В этом случае лигатура в виде пластины толщиной 5 мм и шириной 60 мм должна иметь длину 1239,2 мм. Для лигатуры, полученной прокаткой из жидкого состояния, при толщине пластины 3 мм и возможной ширине 40 мм длина должна составить 3098 мм,  $E_s$  соответственно будет равен 5,59 и 7,18. Для кусковой лигатуры этот показатель примем условно равным 2,2. Сравнивая скорости нагрева вводимых лигатур в расплаве при прочих равных условиях, видим, что лигатура, полученная прокаткой, прогреется по сравнению с кусковой быстрее в 10,65 раза, а лигатура в виде пластины по отношению к кусковой – в 6,46 раза.

Этот приближенный расчет учитывает только геометрические факторы лигатур при их нагреве; размеры алюминидов стронция, которые должны полностью раствориться, во внимание не принимаются. Процесс растворения и усвоения вводимых лигатур лимитируется физико-химическими процессами на границе раздела лигатура – металлический расплав [2, 3]. По мнению авторов работы [3], растворение твердых частиц в жидкости можно представить состоящим из двух процессов: перехода атомов из твердой фазы в жидкость через поверхность раздела фаз и перераспределения частиц в жидкости. В зависимости от того, какое из этих двух явлений определяет скорость процесса в целом, различают кинетический и

диффузионный режимы растворения. Зная размеры и удельный объем частиц в лигатуре, можно вычислить время растворения частиц как сумму времен в обоих режимах. Авторы работы [3] рассчитали зависимость времени растворения интерметаллидов  $TiAl_3$  в алюминиевом расплаве от начальных размеров кристаллов в диффузионном и кинетическом режимах. Значения кинетических коэффициентов растворения, коэффициентов диффузии и предельной растворимости титана в жидком алюминии для разных температур были вычислены из аналитических формул, полученных после обработки экспериментальных результатов работы [2]. Исследованиями установлено, что в диффузионном режиме алюминиды титана растворяются почти мгновенно (время растворения значительно меньше 2 мин). Если же учесть, что при растворении существенную роль играют эффекты на границе раздела фаз, то длительность процесса варьируется в широком интервале в зависимости от начальных размеров кристаллов. Используя полученные данные, рассчитали время растворения алюминидов титана в зависимости от их размеров и температуры расплава. Если, к примеру, лигатуру вводить в расплав при температуре 990 К, то для растворения интерметаллидов, имеющих размер  $x_0 = 150$  мкм, потребуется время  $t_1 = 220$  мин, а при растворении кристаллов размером  $x_0 = 3$  мкм –  $t_2 = 1,2$  мин.

К настоящему времени в литературе нет данных по кинетическим коэффициентам растворения и коэффициентам диффузии стронция, что исключает возможность проведения подобных расчетов. Тем не менее, для сравнения воспользуемся полученными зависимостями для титана применительно к стронцию, так как можно допустить близость их механизмов растворения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. – Мн.: Выш. шк., 1992. – 217 с.
2. Еременко В. Н., Натанзон Я. В., Дыбков В. И. Физико-химические процессы на границе раздела твердый металл – металлический расплав // Физико-химическая механика материалов. – 1984. – № 6. – С. 3 – 9.
3. Роль кинетики растворения интерметаллидов при легировании алюминиевых расплавов титаном / И. В. Поленц, И. Г. Бродова, Д. В. Башлыков и др. // Расплавы. – 1995. – № 6. – С. 23 – 31.