

**А. С. Иванов, О. И. Челябинна** (Подольск, РОНЦ МГОУ). **Влияние внутренних напряжений на стабильность твердого раствора.**

Легирующие элементы сплава оказывают существенное влияние на его прочностные характеристики. Внутренние напряжения различной физической природы вызывают диффузионное перераспределение атомов примеси. Так, например, примеси замещения большого атомного радиуса (по отношению к основному металлу) диффузионно мигрируют в область напряжения растяжения и вытесняются из области напряжений сжатия. Так происходит расслоение твердого раствора в поле внутренних напряжений и соответствующее изменение комплекса свойств. Разные типы внутренних напряжений характеризуются одинаковой координатной зависимостью. В рамках линейной теории упругости справедлив принцип суперпозиции. Если внутренние напряжения отличаются по знаку, то их комбинация не оказывает влияние на характер протекания диффузионных процессов. Легирующие элементы сплава в виде твердого раствора сохраняют свою стабильность, и свойства материала остаются неизменными. Целью данного сообщения является анализ влияния суперпозиции внутренних напряжений разного знака на стабильность твердого раствора из легирующих примесей. В качестве иллюстративного примера рассмотрены температурные и остаточные напряжения в цилиндрической оболочке.

Энергия связи атома примеси с полем температурных напряжений определяется известным соотношением [1]

$$V = -\frac{\sigma_{II}}{3}\delta v, \quad (1)$$

где  $\sigma_{II}$  — первый инвариант тензора температурных напряжений для стационарной температуры цилиндрической оболочки,  $\delta v$  — изменение объема материала при размещении атома примеси большого атомного радиуса. С точностью до несущественных постоянных величина  $\sigma_{II}$  имеет вид [2]

$$\sigma_{II} = \frac{2\alpha\mu(T_1 - T_2)(1 + \nu)}{(1 - \nu)\ln(R/r_0)} \left(1 + 2\ln\frac{r}{R}\right), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент термического расширения,  $\mu$  — модуль сдвига,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $T_1$  и  $T_2$  — температуры внутренней и внешней поверхностей оболочки ( $T_1 > T_2$ ),  $r_0$  и  $R$  — внутренний и внешний радиусы оболочки. При этом внутренняя поверхность оболочки находится в состоянии сжатия, а внешняя — в состоянии растяжения. Поэтому рассматриваемые примеси замещения мигрируют в область внешней поверхности оболочки. Ситуация меняется, если в оболочке имеются остаточные напряжения противоположного знака. Их образование происходит следующим образом. Разрез двусвязной области раздвигают на угол  $\omega$  и помещают туда недостающий материал. При такой операции двусвязная область приобретает остаточные напряжения, первый инвариант тензора которых имеет одинаковую координатную зависимость с

температурными напряжениями [3]

$$\sigma_{ii} = \frac{\mu\omega(1+\nu)}{2\pi(1-\nu)} \left( 1 + 2 \ln \frac{r}{R} \right), \quad (3)$$

где  $\omega$  – угол разнесения берегов разреза оболочки (измеряется в радианах). Остальные обозначения соответствуют принятым ранее. Для  $\omega < 0$  соотношения (2) и (3) отличаются по знаку. Поэтому для некоторых значений  $\omega$  принцип суперпозиции приводит к полному отсутствию поля напряжений. Величина  $\omega$  определяется из выражения

$$\omega = \frac{4\pi\alpha(T_1 - T_2)}{\ln(R/r_0)}. \quad (4)$$

Приведенная комбинация первого инварианта тензора температурных и остаточных напряжений привлекательна тем, что оба типа внутренних напряжений имеют одинаковую координатную зависимость. Именно это условие позволяет получить весьма простое соотношение для параметра управления величиной  $\sigma_u$  температурных напряжений. Если соответствующие компоненты тензора напряжений имеют разную координатную зависимость, то получение выражения для параметра управления связано с определенными математическими трудностями. Таким образом, показана принципиальная возможность сохранения однородного распределения легирующих элементов сплава при комбинации разных типов внутренних напряжений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Теодосиу К.* Упругие модели дефектов в кристаллах. М.: Мир, 1985, 351 с.
2. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979, 560 с.
3. *Лихачев В. А., Хайров Р. Ю.* Введение в теорию дисклиний. Л.: ЛГУ, 1975, 183 с.