

И.Г.Узлов, О.Г.Сидоренко, И.П.Федорова, А.П.Сухой

**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ ЦЕНТРОВ ФАЗОВЫХ
ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ**

Проанализированы особенности роста центров фазовых превращений, развивающихся на основе зародышей низкотемпературной фазы, образующихся в области стабильного существования высокотемпературной фазы и температурах ее переохлаждения. Показано, что в отличие от зародышей, образовавшихся при температурах переохлаждения, у «высокотемпературных» зародышей на начальном этапе развития должен иметь место период ускоренного роста.

В соответствии с принятой в настоящее время точкой зрения, развитие фазовых превращений при охлаждении происходит преимущественно за счет роста зародышей низкотемпературной фазы, которые образуются в объеме переохлажденной высокотемпературной фазы [1]. Вместе с тем современная теория фазовых превращений не исключает возможности образования зародышей низкотемпературной фазы в объеме высокотемпературной и при температурах области ее стабильного существования [2, 3]. При этом уточняется, что в силу того, что в этой области низкотемпературная фаза нестабильна, ее зародыши сразу же после образования должны начать растворяться. Но допускается, что если благодаря высокой скорости охлаждения растворяющимся зародышам низкотемпературной фазы удается сохранить сверхкритические размеры вплоть до достижения критической температуры T_0 низкотемпературного фазового превращения, то при дальнейшем понижении температуры эти зародыши могут принимать участие в превращении наравне с зародышами, образовавшимися при температурах переохлаждения. Однако результаты анализа условий развития «высокотемпературных» зародышей низкотемпературной фазы свидетельствуют о том, что такие зародыши должны обладать решающим преимуществом в росте перед зародышами, образующимися при температурах переохлаждения.

В свое время Тамманом [4] было показано, а впоследствии многократно подтверждено и другими исследователями, что по мере повышения степени переохлаждения среды, в которую помещают исследуемый образец, относительно критической температуры наблюдаемого фазового превращения линейная скорость роста центров фазового превращения сначала повышается, достигает максимума, а затем начинает понижаться.

Возможность одновременного со степенью переохлаждения повышения линейной скорости центров превращения обеспечивается, как было показано в [5], благодаря тому, что на протяжении этого этапа температура фронта фазового превращения сохраняется постоянной и близкой к T_0 .

Понижение линейной скорости роста начинается после того, как это условие нарушается.

Закономерность влияния степени переохлаждения на линейную скорость роста центров фазовых превращений установлена при помещении исследуемых образцов в среду с постоянной температурой. Вместе с тем очевидно, что эта закономерность должна оставаться справедливой и при непрерывном понижении температуры окружающей образец среды. Именно последние условия должны сопровождать зародыш низкотемпературной фазы при переходе его из области устойчивости высокотемпературной фазы в температурную область устойчивого состояния самого зародыша. В самом деле, при охлаждении в первой области имеет место одновременное понижение температуры и зародыша, и окружающей его исходной высокотемпературной фазы. При достижении второй области температура матрицы продолжает понижаться. Температура же зародыша после приобретения при охлаждении температуры T_0 , дальнейшее понижение прекращает. Это достигается за счет поступления теплоты фазового превращения, начавшегося после попадания составляющей зародыш фазы в область ее стабильного состояния. Продолжение понижения температуры матрицы, то есть, повышения степени ее переохлаждения относительно критической температуры превращения T_0 , которую удерживает развивающийся зародыш, становится при этом фактором, способствующим, в соответствии с установленной Тамманом закономерностью, стимулированию ускоренного роста нового центра фазового превращения.

Таким образом, вплоть до момента начала понижения линейной скорости роста, наступающего на определенном этапе повышения степени переохлаждения, у центров фазового превращения, основу которых составили «высокотемпературные» зародыши, на начальном этапе развития будет наблюдаться период ускоренного роста.

Если теперь вернуться к зародышам, образующимся при температурах переохлаждения исходной фазы, то можно отметить, что и у них на начальных этапах можно было бы ожидать периода ускоренного роста. Однако для этого прежде всего необходимо, чтобы после образования они приобретали температуру T_0 . Последнее можно было бы наблюдать в том случае, если бы при образовании зародышей выделялась теплота фазового превращения.

Если предположить, что теплота фазового превращения при образовании зародышей действительно выделяется, и что вся она расходуется на повышение температуры только испытанного превращение объема исходной фазы, то теоретически максимальная температура отогрева $\Delta T_{\text{м.о.}}$ этого объема в соответствии с уравнением теплового эффекта фазового превращения [4] должна составлять:

$$\Delta T_{\text{м.о.}} = \frac{q}{c} \quad (1)$$

где q – удельная теплота фазового превращения; c – теплоемкость.

В соответствии с (1) минимальная температура зародыша, при отогреве от которой он мог бы приобрести температуру T_0 , составляет:

$$T_{\min} = T_0 - \Delta T_{\text{м.о.}} \quad (2)$$

Величина $\Delta T_{\text{м.о.}}$ может иметь достаточно большие значения. Так, при превращении аустенита в перлит $\Delta T_{\text{м.о.}}$ составляет ≈ 100 °С.

Однако вариант с отогревом, описываемым уравнениями (1) и (2) при прочих допущениях мог бы быть возможным лишь в том случае, если бы в новую фазу преобразовался одновременно весь объем исходной фазы. В действительности же объем сформировавшегося зародыша составляет лишь малую долю от приходящегося на него объема исходной фазы (матрицы). Поэтому большая часть выделяющейся теплоты превращения должна будет расходоваться и на отогрев окружающей зародыш матрицы. При этом необходимо, чтобы при условии перераспределения количества теплоты, остающегося после отогрева зародыша от температуры его образования и до T_0 , и достижения при этом равномерного на единицу объема матрицы убывания температуры, температура поверхности этого объема оставалась не ниже температуры образования зародыша. Только при соблюдении этого условия продолжающееся понижение температуры исследуемого образца будет способствовать ускорению роста зародыша. Если устанавливающаяся температура матрицы окажется ниже температуры образования зародыша, при последующем понижении температуры образца развитие зародыша будет происходить не с повышением, а с замедлением скорости роста.

При известной величине отношения объема образовавшегося зародыша V_3 к приходящемуся на него объему матрицы $V_{\text{м.}}$, а также известной величине максимально возможного отогрева объема образовавшегося зародыша $\Delta T_{\text{м.о.}}$, можно определить и то значение отогрева зародыша $\Delta T_{\text{о.з.}}$, которое может быть получено при соблюдении условия необходимости отогрева не только самого зародыша, но и окружающей его матрицы:

$$\frac{V_3}{V_{\text{м.}}} = \frac{\Delta T_{\text{о.з.}}}{\Delta T_{\text{м.о.}}} \quad \text{откуда}$$

$$\Delta T_{\text{о.з.}} = \Delta T_{\text{м.о.}} \cdot \frac{V_3}{V_{\text{м.}}} \quad (3)$$

Так как отношение $\frac{V_3}{V_{\text{м.}}}$ в реальных условиях крайне невелико (менее $10^{-15} - 10^{-20}$) то, в соответствии с (3), бесконечно мала и величина интервала переохлаждения, в пределах которого можно было бы ожидать период ускоряющегося роста зародышей. Это свидетельствует о том, что при

непрерывном охлаждении рост практически всех зародышей низкотемпературной фазы, образовавшихся при температурах ниже T_0 , должен проходить с замедлением вплоть до полного прерывания развития центров превращения на их основе.

Последний вывод свидетельствует о необходимости поиска дополнительных экспериментальных и теоретических доказательств того, что фазовые превращения при непрерывном охлаждении развиваются на основе зародышей, источником которых является область стабильного состояния высокотемпературной фазы.

1. *Фольмер М.* Кинетика образования новой фазы. – М.: Наука, 1986. – 208с.
2. *Я.И. Френкель.* Введение в теорию металлов. – Ленинград: Наука, 1972. – 424с.
3. *Кристиан Дж.* Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. 1. – М.: Мир, 1978. – 806 с.
4. *Тамман Г.* Металлография. – Ленинград: Ленхимсектор, 1931. – 446 с.
5. *Сидоренко О.Г., Федорова И.П., Сухой А.П.* Методика исследования фазовых превращений, обеспечивающая возможность оценки соответствия результатов исследования закону сохранения энергии. // Новейшие материалы и технологии в металлургии. – 2005. – №2.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Г.В.Левченко