

УДК 536.423: 669.017: 539.52 (438) (575.2) (04)

КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Н.В. Жданов – канд. физ.-мат. наук, доц.

Н.М. Комарцов – преподаватель

П.В. Трусов – докт. физ.-мат. наук, проф. (ПГТУ, Пермь)

The analysis of a balance of phases in heterogenous systems as the aluminium alloy D18T is given. Critical phenomena at super-plastic deformation of aluminium alloys are considered.

В металлообрабатывающей промышленности наиболее перспективными считаются технологии, основанные на применении сверхпластичности превращения (динамической сверхпластичности). Этот вид сверхпластичности наблюдается в металлах с неподготовленной специально структурой в ходе фазового перехода при любых гомологических температурах. В алюминиевых сплавах сверхпластичность превращения протекает по механизму динамической рекристаллизации [1].

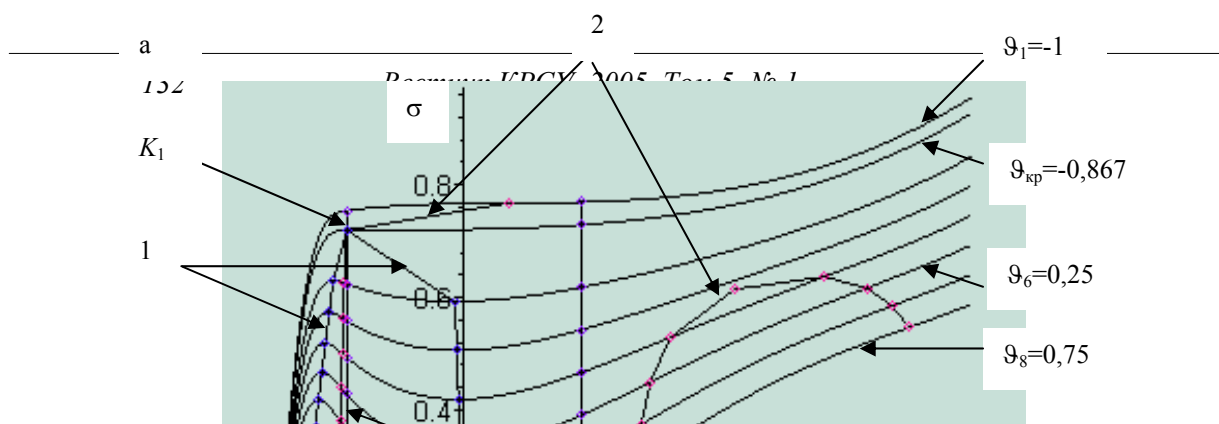
Контролируя термомеханические режимы обработки, можно получить заранее заданные структурные и механические свойства металлов. Для этого должна быть установлена взаимосвязь диаграмм «напряжение – деформация» с изменениями структуры в процессе формоизменения материала. В горячей деформации металлов и сплавов указанная проблема является важнейшей и менее всего изученной [2].

Следует отметить, что при феноменологическом подходе к описанию свойств материалов невозможно указать признаки, количественно определяющие структурное состояние, вследствие того, что экспериментальные физические методы дают лишь качественную характеристику структурных преобразований. Так, непосредственное подтверждение проте-

кания динамической рекристаллизации в опытах получить трудно, потому что существует большая вероятность принять новые зерна, рекристаллизованные статически во время последеформационных выдержек или охлаждения, за рекристаллизованные динамически [2].

В данной работе с феноменологических позиций термодинамики приводится анализ равновесия фаз в структурнонеоднородных сложных системах – образцах из алюминийевого сплава Д18Т при простях видах нагружения, растяжении и сжатии, в термомеханических режимах динамической сверхпластичности, устанавливается тип протекающего фазового перехода, производится построение фазовых диаграмм. В основу исследования положена хорошо развитая теория термодинамической устойчивости [3]. Математически задача сводится к выявлению особенностей функции нескольких переменных – в нашем случае потенциала Гиббса z , зависящего от указанных ниже макропараметров.

Конечной целью анализа равновесия фаз (определение фазы в соответствии с современными представлениями см. [4]) в локальной термодинамической системе является установление зависимостей между термомеханическими параметрами, ответственными за структурное состояние. По идентифицированному,



Диаграммы фазового равновесия алюминиевого сплава Д18Т,
деформируемого в состоянии сверхпластичности. Критическая точка:

а – растяжение K_1 ($\vartheta_{кр} = -0,867$, $d_{кр} = 0,905$, $h_{кр} = -0,062$),

б – сжатие K_2 ($\vartheta_{кр} = 0,490$, $d_{кр} = 0,042$, $h_{кр} = -0,291$).

согласно измерениям в опытах макроэкспери-
мента, термодинамически допустимому меха-

ническому уравнению состояния [5], связы-
вающему тензор напряжений Коши (σ_{ij}) с

температурой ϑ , тензором скорости деформации (d_{ij}) и тензором деформации Генки (h_{ij}) (здесь и далее $-1 \leq \sigma_{ij}, \vartheta, d_{ij}, h_{ij} \leq +1$ – стандартизованные величины), при некоторых дополнительных предпосылках, устанавливается аналитическое выражение термодинамического потенциала [6]. Зная потенциал, можно не только найти нужные определяющие соотношения и состояние равновесия системы, но и предсказать характер фазовых превращений при изменении макропараметров состояния в определенном направлении. Построение диаграммы состояния, сочетая графический и аналитический методы, дает ответ на вопрос о том, сколько и какие фазы образуют систему при конкретных значениях параметров. При динамической сверхпластичности большие пластические деформации порождают структурную неустойчивость, вызванную фазовыми превращениями и связанную с неравновесными состояниями локальной системы

Кривые «напряжение – деформация», графически отображающие механическое уравнение состояния (см. рисунок), имеют все феноменологические признаки протекшей в деформированном алюминиевом сплаве динамической рекристаллизации [2]. Графоаналитический анализ потенциала Гиббса, основанный на представлениях об устойчивости термодинамической системы, показал, что в деформированном в условиях сверхпластичности превращения алюминиевом сплаве произошли критические и закритические явления [3,4].

При исследовании на устойчивость системы встретился случай, когда необходимо разложение потенциальной функции в ряд Маклорена по степеням параметров до четвертого порядка. К сожалению, общих приемов исследования функции на знакоопределенность, сходных с критерием Сильвестра, для разложений выше второго порядка нет. Поэтому был использован следующий прием. Так как отрезок ряда представляет собой многочлен от трех переменных, однозначно представимый в виде суммы нескольких форм, то для каждой формы составляется блочная диагональная матрица коэффициентов. Рассматривая совместно, по индукции с критерием Сильвестра, совпадающие по положению в матрицах глав-

ные миноры, определяются границы областей неустойчивости и пониженной устойчивости. Для критических точек K_1, K_2 (см. рисунок) при растяжении и сжатии выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} z''_{h^2} = 0, \\ z'''_{h^3} = 0, \\ z'''_{hd\vartheta} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} z^{IV}_{h^4} < 0, & z^{IV}_{h^2d^2} < 0, \\ z^{IV}_{h^2d\vartheta} < 0, & z^{IV}_{hd^2\vartheta} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Условие (1)₁ определяет границы устойчивости (неустойчивости) фаз, спинодаль, (1)₂ – границу пониженной устойчивости, квазиспинодаль, (1)₃ – границу значительно пониженной устойчивости, субквазиспинодаль. Указанные границы на рисунке обозначены цифрами 1, 2, 3 соответственно, границы устойчивости фаз по скорости деформации не нанесены. Условия протекания динамической сверхпластичности, для случая растяжения и сжатия, учитывая максимальную неустойчивость термодинамической системы, выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \left| z''_{h^2} \Big|_{d_{кр}, \vartheta} \right| \leq 0, & \left| z''_{hd} \Big|_{d_{кр}, \vartheta} \right| \leq 0, \\ \left| \sigma \right| \geq \left| \sigma_{\min} \Big|_{d_{кр}, \vartheta} \right|. \end{cases} \quad (3)$$

По-видимому, для твердого деформируемого тела условие равновесия сосуществующих фаз (бинодаль) не выполняется по причине невозможности иметь один локальный объем, деформации которого соответствуют два тензора.

В описываемом случае термодинамический потенциал и его производные конечны, не имеют особенностей, что зависит от выбранных аппроксимирующих данных опытов соотношений.

Приведенные диаграммы состояния соответствуют критическим и закритическим явлениям в алюминиевом сплаве Д18Т, деформируемому в режимах сверхпластичности превращения при растяжении и сжатии. Таким образом, феноменологически показано протекание в деформируемом сплаве критических и закритических явлений, связанных со струк-

турными изменениями. Протекающий фазовый переход ближе всего по свойствам к переходу первого рода. Дальнейшее совмещение исследований в механических и металлургических экспериментах даст возможность установить кинетику изменения характеристик структуры в сверхпластически деформируемых сплавах.

Литература

1. *Кайбышев О.А.* Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
2. *Бернштейн М.Л. и др.* Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
3. *Семенченко В.К.* Избранные главы теоретической физики. – М.: Просвещение, 1966. – 396 с.
4. *Глазов В.М., Павлова В.М.* Химическая термодинамика и фазовые равновесия. – М.: Металлургия, 1988. – 560 с.
5. *Жданов Н.В., Комарцов Н.М., Трусов П.В.* Термодинамическое обоснование реологических соотношений в механике сплошных сред // *Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр.* – Вып. 119. Современные проблемы механики деформируемого твердого тела. – Новосибирск: РАН. Ин-т гидродинамики, 2001. – С. 43–47.
6. *Жданов Н.В., Комарцов Н.М., Чикалев И.Ю.* Прямой метод построения термодинамического потенциала // *Тез. докл. XXVII Сибирск. теплофиз. сем. Москва – Новосибирск, 1–5 октября 2004 г.* – Новосибирск: РАН, СО РАН, 2004. – С. 146–147.