

УДК 539.376

© 1992 г.

ТРАНСФОРМАЦИОННО-ТРАНСПОРТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ПОЛЗУЧЕСТЬ МАТЕРИАЛОВ

В. В. Гусаров, С. А. Суворов

Рассмотрены трансформационно-транспортные процессы в поликристаллических системах, приводящие к пластической деформации материала. Выведены соотношения, связывающие структурные, механические и трансформационные параметры со скоростью ползучести. Определено соотношение скоростей ползучести при растяжении и сжатии материала.

Ранее [1, 2] было показано, что при определенных условиях уплотнение поликристаллических систем происходит преимущественно вследствие взаимных трансформаций телесных областей автономных и неавтономных фаз и массопереноса по телесным областям жидких неавтономных фаз. Аналогичные процессы являются причиной пластических деформаций и ползучести материалов. Рассмотрим ползучесть поликристаллического материала при температурах, превышающих температуру плавления локально-равновесной неавтономной 2-мерной фазы. В качестве модельной структуры используем представление поликристаллического материала в виде плотно упакованных прямоугольных параллелепипедов (телесных областей 3-мерных автономных фаз), связанных друг с другом телесными областями 2-мерных неавтономных фаз (фаз конечной толщины), как изображено на рис. 1. Подобный каркас имитирует структуру поликристаллического материала, обладающего в максимальной степени однородным распределением напряжений и деформации при его одноосном растяжении или сжатии, и может достаточно адекватно описывать реальную ситуацию в условиях ползучести материалов.

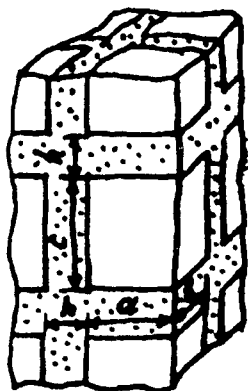


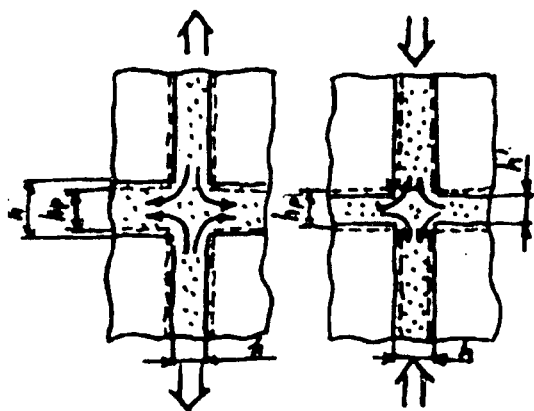
Рис. 1. Модельная структура беспористого поликристаллического тела. Точками выделены области 2-мерных неавтономных фаз.

a, b, c – размеры областей 3-мерных автономных фаз (прямоугольных параллелепипедов с ребром c , ориентированным по направлению действия внешней силы); h – толщина 2-мерной неавтономной фазы (фазы конечной толщины).

Базируясь на представлениях операциональной иерархической термодинамики систем сопряженных и пространственно разделенных n -мерных фаз [3–5], сформулируем основные положения, на которые будем опираться при анализе ползучести поликристаллических материалов.

Нетрансляционные размеры операционально-равновесных и метастабильных неавтономных 2- и 1-мерных фаз имеют определенные значения, являющиеся функцией термодинамических параметров состояния — $h_p(T; \{C_i\}; \dots)$ и $h_M(T; \{C_i\}; \dots)$ [1]. Температура плавления операционально-равновесной неавтономной фазы отлична от температуры плавления автономной фазы того же состава — $T_G \approx (1 - \alpha_H) / (1 - \alpha_S) T_M$, где $T_M(T_G)$ — температуры плавления автономной (неавтономной) фазы, α_H и α_S — некоторые термодинамические параметры [6]. Массоперенос в телесных областях неавтономной фазы осуществляется под действием перепада давлений путем течения жидкой среды. Характер течения — вязкое или ползущее (ламинарное, турбулентное или циклическое вихревое при контакте с сингулярными границами) — зависит от таких свойств жидкой неавтономной фазы, как состав, структура, нетрансляционные размеры (h_p , особенности связи со структурированными твердыми областями неавтономных фаз и т. п.), а также от перепада давлений, скорости плавления (кристаллизации) телесных областей автономных фаз и других внешних условий. Сближение областей автономных фаз под действием внешних сил на расстоянии, меньшие h_p , приводит к трансформации соответствующих областей в неавтономные фазы. Удаление телесных областей автономных фаз на расстояния, большие h_p , приводит к трансформации соответствующей телесной области неавтономной фазы в автономную путем роста пространственно сопряженных с ней областей автономных фаз и образования и роста новых областей автономных фаз. Последний процесс активизируется при удалении на расстояния, большие h_M . Скорости перечисленных трансформационных процессов зависят от кристаллохимических характеристик контактирующих с неавтономными фазами поверхностей автономных фаз и в общем случае различны.

Рис. 2. Трансформационные процессы в поликристаллическом теле под действием растягивающих и сжимающих усилий.



Направление действия внешних сил указано двойной стрелкой, направление массопереноса в 2-мерной неавтономной фазе указано простыми стрелками.

Пунктиром выделены равновесные границы 2-мерных неавтономных фаз (толщина h_p).

Сплошной линией выделены динамические границы 2-мерных неавтономных фаз (толщина h, h').

Занимаемая 2-мерными фазами область отмечена точками.

Ползучесть материала под действием растягивающих (сжимающих) усилий исходя из приведенных выше положений можно представить как трансформационно-транспортный процесс, проиллюстрированный на рис. 2. Не выводя динамического уравнения для скорости деформации, как это было сделано [1, 2] при анализе уплотнения материала на основе трансформационно-транспортного механизма спекания, приведем соотношения, связывающие скорость ползучести с характером механического нагружения и структурой материала для некоторых частных случаев.

Рассмотрим связь между скоростями ползучести при растяжении ($\dot{\epsilon}_{\text{раст}}$) и сжатии ($\dot{\epsilon}_{\text{сж}}$) в случае, когда лимитирующим является трансформационный процесс — переход телесных областей автономных фаз в жидкие неавтономные фазы. Условие реализации подобной ситуации имеет вид, аналогичный приведенному в литературе [1, 2]:

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{m}\right)^{1/n} \frac{h_p}{v_{0n_1 \rightarrow n_2}} \left(\frac{h_p^2}{ab}\right)^{(1+n)/2n} \gg 1, \quad (1)$$

где σ_{33} — нормальная составляющая тензора напряжений по оси x_3 (рис. 2); m , n — параметры модели Оствальда-де-Вилля вязкости расплава — $\eta = m |\dot{\gamma}|^{n-1}$ (η — вязкость, $\dot{\gamma}$ — скорость касательных деформаций); $v_{0n_1 \rightarrow n_2}$ — параметр математической модели скорости трансформации (v_{tr}), предложенной ранее [1, 2]:

$$v_{tr n_1 \rightarrow n_2} = v_{0n_1 \rightarrow n_2} \left| \frac{h_p - h}{h_p} \right|^{a_{n_1 \rightarrow n_2}},$$

$a_{n_1 \rightarrow n_2}$ — некоторая константа, $n_1 \rightarrow n_2$ указывает направление трансформации (n_1 -мерной фазы в n_2 -мерную).

Обратная трансформация (2→3) скажется только на уменьшении доли жидких 2-мерных фаз в системе, т. е. приведет к усложнению проскальзывания зерен относительно друг друга и уменьшению вероятности гомогенного зародышеобразования и в первом приближении этот процесс можно не учитывать. Тогда в случае одинаковых значений v_0 , α для различных кристаллитов и кристаллографических ориентаций граней отношение скоростей ползучести при растяжении и сжатии может быть выражено соотношением

$$\dot{\epsilon}_{\text{раст}} / \dot{\epsilon}_{\text{сж}} = c(a + b)/(ab). \quad (2)$$

Если размеры кристаллов в направлениях x_2 и x_3 одинаковы ($a=b$), то выражение (2) принимает вид

$$\dot{\epsilon}_{\text{раст}} / \dot{\epsilon}_{\text{сж}} = 2c/a, \quad (3)$$

а для изометрических зерен

$$\dot{\epsilon}_{\text{раст}} / \dot{\epsilon}_{\text{сж}} = 2, \quad (4)$$

что подтверждается имеющимися экспериментальными данными, обобщенными Стреловым [7]; а именно для большинства огнеупорных изделий справедливо неравенство

$$\dot{\epsilon}_{\text{раст}} / \dot{\epsilon}_{\text{сж}} > 2.$$

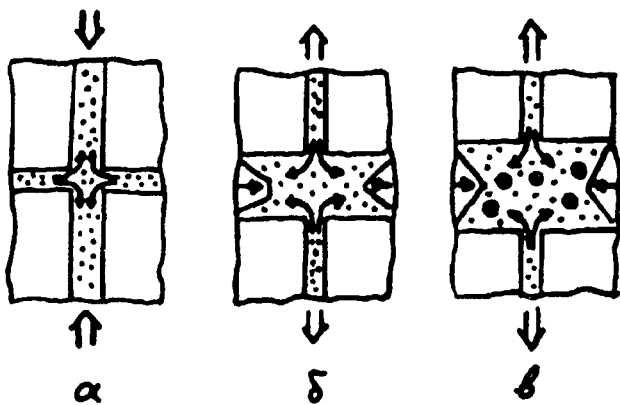


Рис. 3. Процессы массопереноса и образования кавитационных пузырьков в фазах конечной толщины, приводящие к ползучести поликристаллических тел под действием сжимающих (а) и растягивающих (б, в) усилий.

Области 2-мерных фаз отмечены точками, кавитационные пузырьки обозначены черными кружками.

Направления действия внешних сил указаны двойными стрелками, направления переноса телесных областей 2-мерных и 3-мерных фаз под действием перепада давлений в 2-мерных фазах указаны простыми стрелками.

Увеличение отношения $\dot{\epsilon}_{\text{раст}} / \dot{\epsilon}_{\text{сж}}$ может определяться как структурой материала, что следует из выражений (2), (3), так и проявлением других (не трансформационно-транспортных) механизмов ползучести, но связанных с трансформациями в телесных областях неавтономных фаз. Например, в случаях, когда

$v_{\text{tr}3 \rightarrow 2} > v_{\text{tr}2 \rightarrow 3}$, в материале в процессе ползучести будет увеличиваться доля жидких неавтономных фаз, причем под действием растягивающих усилий указанная доля будет возрастать в пределе в $k=c(a+b)/(ab)$ (при $c=a=b$ $k=2$) раз быстрее, чем под действием сжимающих усилий, что приведет к облегчению процессов проскальзывания зерен (рис. 3, а, б). Кроме того, под действием растягивающих напряжений в жидкой неавтономной фазе облегчается образование кавитационных пузырьков, увеличивающих скорость ползучести (рис. 3, в). Сжимающие напряжения, повышая гидростатическое давление в жидкой неавтономной фазе, могут активировать кавитационное схлопывание, если материал, подвергаемый пластическим деформациям, в исходном состоянии был пористым. В беспористых материалах проявление ползучести за счет указанного эффекта невозможно.

Выводы

Предложен трансформационно-транспортный механизм ползучести поликристаллических материалов. Определена связь отношения скорости ползучести при растяжении к скорости ползучести при сжатии со структурными параметрами материалов. Показаны обоснованность, пределы применимости и прогностическая ценность рассматриваемого механизма пластических деформаций материалов.

Список литературы

- [1] Гусаров В.В., Суворов С.А. // ЖПХ. 1992. Т. 65. № 7.
- [2] Gusarov V.V., Suvorov S.A. // The 6th Int. Conf. on Ferrites. Tokyo, Japan, 1992.
- [3] Гусаров В.В. Термодинамика твердых оксидных фаз переменного состава. Л., 1986. 44 с. Деп. ОНИИТЭХИМ, Черкассы, № 1423-хп-86.
- [4] Гусаров В.В. // Тез. докл. VI Всесоюз. симпоз. по изоморфизму. М., 1988. С. 64.
- [5] Гусаров В.В. // Изв. вузов. Физика. 1990. Т. 33. № 11. С. 125.
- [6] Гусаров В.В., Суворов С.А. // ЖПХ. 1990. Т. 63. № 8. С. 1689-1694.
- [7] Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1985. С. 301.

Санкт-Петербургский технологический институт
Поступило в Редакцию 5 октября 1992 г.