

05;12

Явление распухания цинка при его отжиге после больших пластических деформаций

© Г.А. Маринин, Г.Я. Акимов, В.Н. Варюхин

Донецкий физико-технический институт НАН Украины

Поступило в Редакцию 1 февраля 1999 г.

В окончательной редакции 6 августа 1999 г.

Методом гидростатического взвешивания исследовано влияние температуры отжига от 20 до 250°С на плотность проволоки цинка (Zn 99.95%), полученной методом гидроэкструзии с последующим волочением. Суммарная деформация по поперечному обжатию составила $\lambda = 99.5\%$. Обнаружено, что после отжига при температурах до 150°С происходит распухание–увеличение объема сильно деформированного цинка, при этом уменьшается его плотность. Установлено, что максимум распухания (минимум плотности) расположен в районе температур 80–100°С.

Известно явление распухания и образования пор в конструкционных металлах и сплавах, работающих в элементах активных зон, а также влияние внутренних напряжений на процесс радиационного распухания [1]. Известно также, что большую плотность точечных дефектов в металлах и сплавах можно получить путем их деформирования, а также то, что уже на начальной стадии деформирования кристаллических твердых тел в них образуются микротрещины и поры [2,3], поэтому есть основание предположить, что после больших пластических деформаций распухание вследствие образования пор может происходить в необлученных металлах и сплавах в процессе последующего отжига, приводящего к снятию внутренних напряжений.

Для исследований выбран цинк, физико-механические свойства которого представляют большой практический и теоретический интерес при изучении природы хрупкости, пластичности и сверхпластичности твердых тел. Цель настоящего исследования — выяснить влияние большой пластической деформации и последующего отжига на плотность цинка.

Литой цинк (Zn 99.95%) деформировался методом гидроэкструзии при давлении 1.0–1.2 ГПа от диаметра 36 до 6 мм. Увеличение пластичности цинка достигалось последующим волочением от диаметра

6 до 2.5 mm при комнатной температуре через ряд фильер с поперечным обжатием за один проход $\lambda = 5-6\%$. Суммарная деформация гидроэкструзией и волочением составляла $\lambda = 99.5\%$. После выдержки в течение двух лет проволока цинка исследовалась методом взвешивания в исходном состоянии и после отжигов при температуре 65, 105, 150, 200 и 250°C. Взвешивание производилось на аналитических весах типа ВЛР-200, для гидростатического взвешивания использовалась дистиллированная вода при температуре $20 \pm 0.25^\circ\text{C}$. Отжигались образцы в воздушной атмосфере при медленном нагреве ($1^\circ\text{C}/\text{min}$) с изотермической выдержкой в течение 10 min и последующим охлаждением вместе с печью. Через сутки образец взвешивался, а затем отжигался при более высокой температуре. Точность взвешивания на воздухе составляла $\pm 0.001 \text{ mN}$, а в жидкости $\pm 0.005 \text{ mN}$. Макроскопическая плотность цинка определялась с точностью $\pm 0.002 \text{ g}/\text{cm}^3$. Полученные результаты приведены на рис. 1 и 2.

Взвешивание на воздухе при комнатной температуре (рис. 1, кривая 1) показывает, что вес цинка P_1 после отжигов в температурном интервале 80–250°C уменьшается тем больше, чем выше температура отжига. Уменьшение веса цинка может быть обусловлено процессом сублимации, так при 180°C упругость пара цинка $P \approx 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$, а при 250°C — $P = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ [4].

Вес образца при гидростатическом взвешивании P_2 изменяется сложным образом (рис. 1, кривая 2). До 100°C вес уменьшается, а после отжига в температурном интервале 100–200°C — увеличивается. Максимальное уменьшение веса цинка больше чем на порядок превышает погрешность взвешивания. Расчеты показали, что изменение веса образца в жидкости связано с распуханием и уменьшением макроскопической плотности (рис. 2).

Полученные данные показывают, что распухание цинка достигает максимального значения после отжига при температурах $T = 80-100^\circ\text{C}$. После отжига при более высоких температурах распухание уменьшается и практически исчезает при нагреве до 250°C. Отжиг исходного материала в интервале температур 25–250°C не привел к регистрируемому изменению его плотности.

Измерения пластичности проволоки цинка на разрывной машине РМУ-0.05-1 при скорости растяжения 10 mm/min и исходной длине образца между захватами 100 mm, а также металлографические исследования микроструктуры и измерение размера зерен методом секущих

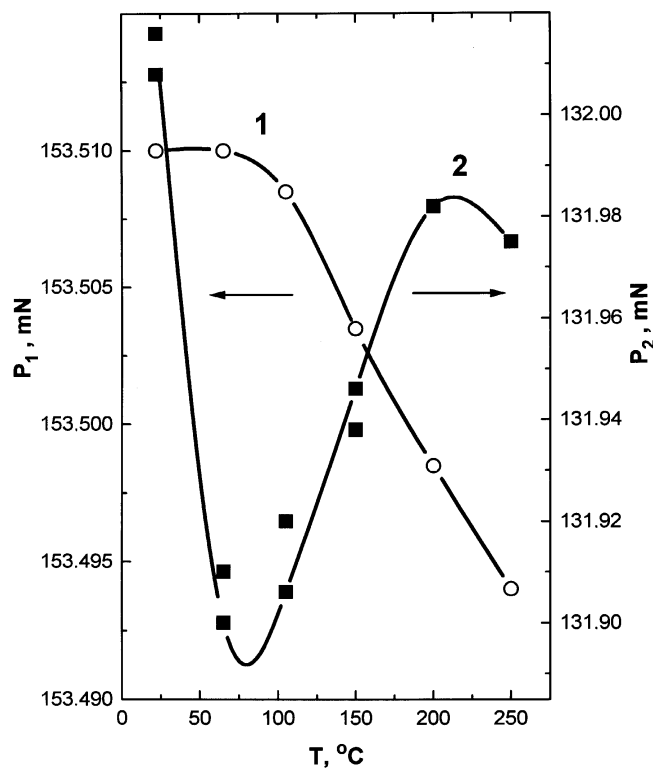


Рис. 1. Влияние температуры T на вес проволоки цинка P_1 при взвешивании на воздухе (кривая 1), при гидростатическом взвешивании P_2 (кривая 2).

с усреднением результатов измерения не менее 100 зерен показали, что исходный образец проволоки цинка имеет мелкозернистую структуру. Размер зерна равен 10–50 μm , зерна слегка вытянуты вдоль оси проволоки. При отжиге до 200°C заметных изменений в размере зерен не происходит, сохраняется и высокая пластичность цинка при комнатной температуре, относительное удлинение проволоки до разрыва составляло 30–37%. Быстрое увеличение зерен и образование монокристалльной "бамбуковой" структуры наблюдались после отжига при 250°C, при этом проволока из цинка становилась хрупкой.

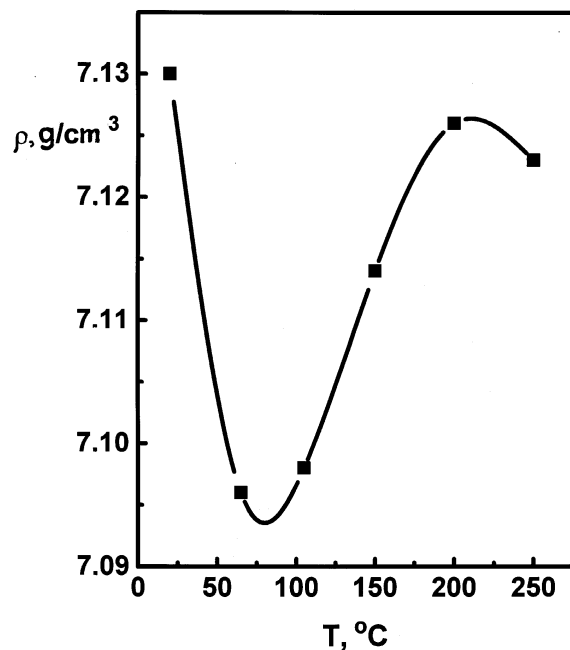


Рис. 2. Макроскопическая плотность сильнодеформированного цинка ρ после различных температур отжига.

Таким образом, распухание цинка и последующее уменьшение распухания наблюдаются в материале, частично рекристаллизованном в процессе его отжига. При этом Zn сохраняет высокую пластичность в интервале температур, при которых не наблюдается существенного роста зерен. Уменьшение распухания совпадает с ростом сублимации цинка при нагреве, интенсивная рекристаллизация при 250°C проходит после уменьшения распухания и приводит к росту крупного зерна.

Известно, что при небольших скоростях деформации $\dot{\epsilon} < 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ упрочнение в том числе обуславливается диффузионным перераспределением точечных дефектов и микросдвиговой релаксацией локальных напряжений [5]. В процессе обычной и сверхпластической деформации в связи с неполной аккомодацией скольжения по границам зерен в

них образуются поры, влияющие на последующее деформирование [6,7]. Образование микротрещин на начальной стадии деформации происходит прежде всего на границах зерен и тройных стыках [2]. Имеется ряд работ по исследованию механизмов образования зернограницных пор в сверхпластичных сплавах [8–10]. Отмечается, например, что в сверхпластичном сплаве Zn–22% Al нагрев выше 100°C приводит к увеличению пор — разрыхлению по границам зерен вследствие растворно-осадочного механизма [8,9].

При деформации под высоким давлением процесс порообразования затрудняется вследствие уменьшения коэффициента диффузии, что приводит к уменьшению пластичности сверхпластичного сплава Zn–0.4% Al "баропластический эффект" [10]. Исследования барических зависимостей относительного изменения объема хрупкого и пластичного цинка [11] показали нелинейный характер изменения объема хрупкого цинка в окрестности давления хрупкопластичного перехода.

Явление распухания цинка при его отжиге после больших пластических деформаций нельзя объяснить механизмом возникновения зернограницных несплошностей по растворно-осадочному механизму, который имеет место при отжиге сверхпластичных сплавов [8,9]. Сильно деформированный чистый цинк не является сверхпластичным материалом. Распухание наблюдается при его нагреве до 80–100°C, поэтому наиболее вероятным механизмом роста пор является возникновение вакансий и их миграция из объема зерен в поры. Одной из причин появления и роста пор в поликристаллическом цинке, по-видимому, может быть высокая анизотропия его свойств. Так, например, в интервале температур 0–100°C коэффициент линейного расширения в направлении, параллельном главной оси монокристалла, в 4 раза выше, чем в перпендикулярном [12]. Это, по-видимому, может привести к пластическому деформированию зерен поликристаллического цинка с образованием пор и их ростом при повышении температуры отжига.

Уменьшение распухания цинка при температуре выше 80–100°C, по-видимому, обусловлено тем, что наряду с процессами, вызвавшими рост пор, начинается процесс их залечивания вследствие роста упругости пара цинка при сублимации [4]; это приводит также к уменьшению веса и объема образца при отжиге. Расчеты показывают, что изменение объема вследствие сублимации на порядок меньше изменения объема, определенного по данным гидростатического взвешивания; следователь-

но, основной вклад в увеличение плотности образца при отжиге в интервале температур 100–200°C, очевидно, вносит залечивание внутренних пор, т. е. уменьшение распухания. С уменьшением распухания заметное уменьшение протяженности границ зерен наблюдалось только при температуре выше 200°C. Можно предположить, что наряду с текстурой, наличием примеси на границах зерен, ячеистой дислокационной структурой, как например в сильно деформированном гидроэкструзией алюминии [13], распухание, т. е. наличие пор и в том числе на границах зерен, не только повышает пластичность, но и препятствует процессу рекристаллизации, так как только после возвращения объема и плотности к исходным значениям наблюдается резкий рост зерен с образованием монокристалльной "бамбуковой" структуры.

Не вызывает сомнения, что обнаруженное явление распухания цинка при его отжиге после больших пластических деформаций требует дальнейших исследований и представляет практический и теоретический интерес.

Авторы благодарят В.И. Барбашова за обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- [1] Неустров В.С., Островский З.Е., Шамардин В.К. // ФММ. 1998. Т. 86. С. 115–125.
- [2] Васильев А.Д., Горная И.Д., Моисеев В.Ф. и др. // Металлофизика. 1982. Т. 4. № 2. С. 91–100.
- [3] Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах / Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 291 с.
- [4] Справочник химика. Т. 1. М.–Л.: Химическая литература, 1951. 895 с.
- [5] Гиндин И.А., Неклюдов И.М. Физика программного упрочнения. Киев: Наук. думка, 1979. 184 с.
- [6] Зинер К. Упругость и неупругость металлов / Пер. с англ. М.: ИЛ, 1954. 367 с.
- [7] Ahmed M.M.J., Mohamed F.A., Zangdina T.G. // J. Mat. Sci. 1979. V. 14. P. 2913–2917.
- [8] Кузнецова Р.И., Кайбышев О.А. // Докл. АН СССР. 1981. 257. № 4. С. 863–866.
- [9] Кузнецова Р.И., Коршак В.Ф. // ФММ. Т. 58. № 5. С. 914–920.

- [10] *Папиров И.И., Зайцев В.И., Акимов Г.Я.* и др. // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 2. С. 370–372.
- [11] *Варюхин В.Н., Дацко О.И., Резников А.В.* // Физика твердого тела. Вып. 14. Киев–Донецк: Вища школа, 1984. С. 75–78.
- [12] *Справочник металлиста.* Т. 2. М.: Машиностроение, 1965. 435 с.
- [13] *Галкин А.А., Дацко О.И., Зайцев В.И., Маринин Г.А.* // ФММ. 1969. Т. 28. № 1. С. 187–189.