

Структура сплава МА14 после электроимпульсной обработки

Валеев И.Ш.[†]

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 Уфа,

[†] valeevs@mail.ru

Structure of ZK60 alloy after powerful electric pulse treatment

I.Sh Valeev

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

Исследовано влияние импульсов тока высокой плотности ($\sim 10^4$ А/мм²) и малой длительности (~ 100 мкс) на структуру предварительно деформированного магниевого сплава МА14. Показано, что электроимпульсная обработка (ЭИО) может обеспечить формирование однородной мелкозернистой структуры, со средним размером зерна 2 мкм.

Ключевые слова: магниевый сплав, электроимпульсная обработка (ЭИО), микроструктура.

The effects of short electric pulses ($\sim 100\mu\text{s}$) with the current density of $\sim 10^4$ A/mm² on the structure of a pre-deformed magnesium alloy ZK60 were investigated. It is shown that powerful electric pulse treatment (PEPT) provides processing uniform fine-grained structure with $\sim 2 \mu\text{m}$ grains.

Keywords: magnesium alloy, powerful electric pulse treatment (PEPT), microstructure.

1. Введение

Повышение механических свойств деформируемых магниевых сплавов может быть достигнуто измельчением зеренной структуры. Для получения мелкозернистой структуры литые или гомогенизированные заготовки подвергают равноканальному угловому прессованию [1-3], изотермической деформации в условиях сверхпластического течения металла [4], гидростатической экструзии [5] и др. Такие известные процессы термомеханической обработки, направленные на формирование мелкозернистых структур, требуют достижения больших деформаций ($\epsilon > 1$) и отличаются высокой стоимостью и низкой технологичностью. Одним из перспективных направлений измельчения структуры металлов и сплавов является воздействие импульсами тока высокой плотности (электроимпульсной обработкой (ЭИО)), на предварительно деформированный материал [6,7].

В работе изучено влияние ЭИО на структуру предварительно деформированного магниевого сплава МА14.

2. Материалы и методики

Исследования проводили на магниевом сплаве МА14 (Mg-6,9%Zn-0,72%Zr). Образцы гомогенизировали при температуре 400°C в течение 8 часов. Затем сплав деформировали холодной прокаткой за несколько проходов с промежуточным отжигом в течение 10 минут при температуре 200°C до суммарных степеней деформации 25% и 44%.

Импульс тока формировался с помощью установки МИУ-30 и регистрировался с использованием пояса Роговского и запоминающего осциллографа С8-17. Для характеристики внесенной в образец энергии использовали интеграл тока, который определяли как:

$$K_j = \frac{k^2}{S^2} \cdot \frac{A_1^2}{A_2} \cdot \frac{T}{4 \ln \left(\frac{A_1}{A_3} \right)} \quad (1)$$

где A_1 , A_2 , A_3 - первая, вторая и третья амплитуды затухающего колебания, соответственно; k - коэффициент пояса Роговского; S - площадь сечения рабочей части образца; T - период колебания.

Электроимпульсная обработка проводилась в диапазоне плотностей тока 1 - 10 кА/мм² при длительности импульсов $\sim 10^{-4}$ с по методике [6]. Изменение средней температуры в образце вследствие Джоулева тепловыделения определяли в соответствии с соотношением [8]:

$$\int_0^{t_k} j^2 dt = \int_{T_0}^{T_k} \rho c \sigma dT \quad (2)$$

где ρ , c , σ - соответственно, плотность, теплоемкость и электропроводность сплава МА14; j - плотность тока, t_k - время ЭИО, T_k - достигнутая в образце средняя температура, T_0 - комнатная температура.

Образцы обрабатывали импульсами с минимальным значением интеграла тока $K_j = 0,077 \times 10^5$ А²с/мм⁴ (K_{\min}),

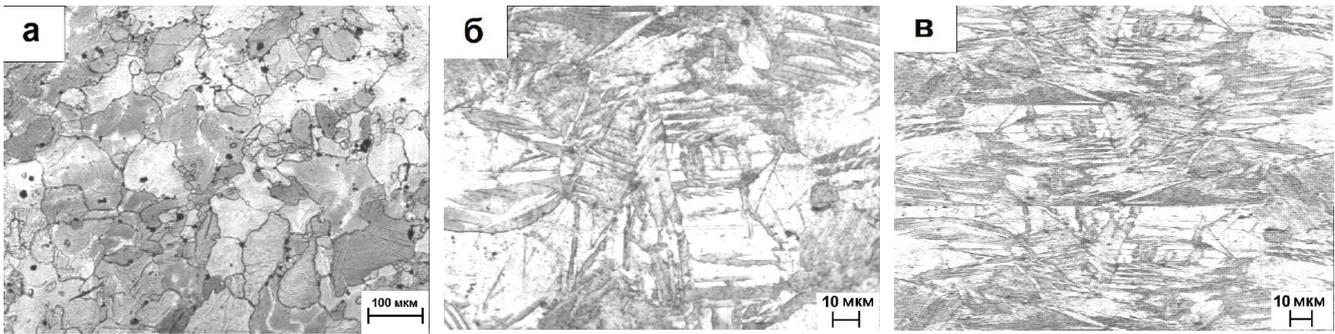


Рис. 1. Микроструктура МА14: а) в исходном состоянии; б) после прокатки со степенью 25%; в) после прокатки со степенью 44%.

соответствующим условной температуре $\sim 290^\circ\text{C}$, и с максимальным значением $K_j=0,114 \times 10^5 \text{ A}^2\text{c}/\text{мм}^4$ (K_{max}), соответствующим условной температуре $\sim 460^\circ\text{C}$. Использование меньшей энергии не приводит к заметным структурным изменениям на микро- и мезо-уровне, увеличение внесенной энергии приводит к разрушению образцов.

Микроструктурные исследования проводили на оптическом микроскопе «Axiovert100A» с программой обработки изображения KSLite 300.

2. Результаты и обсуждение

После гомогенизационного отжига в сплаве наблюдается крупнозернистая микроструктура, со средним размером зерен 55 мкм (рис.1а). Прокатка при комнатной температуре вызывает вытягивание исходных зерен в

направлении течения материала и интенсивное формирование двойников деформации (рис.1б,в). Увеличение степени деформации приводит к тому, что внутри крупных исходных двойников формируются вторичные двойники, разделяющие двойниковые пластины на области, окруженные двойниковыми границами (рис. 1в).

При ЭИО в сплаве протекает рекристаллизация. Новые зерна образуются по границам исходных зерен и вблизи границ двойников, которые выступают в качестве зародышей рекристаллизации и трансформируются в цепочки новых зерен [9]. В образцах, предварительно деформированных со степенью деформации 25%, обработка с низким значением условной температуры (290°C) приводит к образованию структуры, где области исходных крупных зерен окружены мелкими зернами со средним размером 2 мкм (рис. 2а). Повышение условной

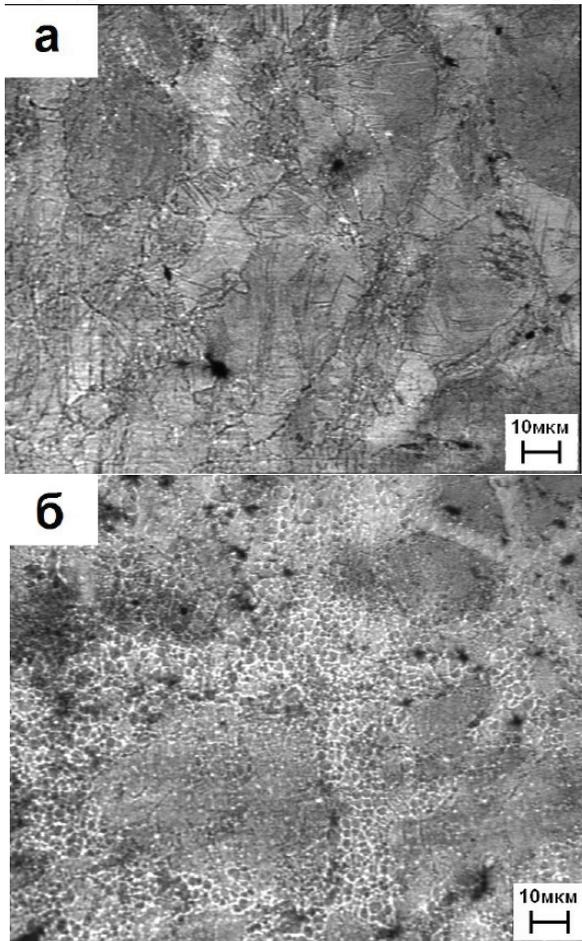


Рис. 2. Микроструктура МА14 ($\epsilon=25\%$), обработанного ЭИО: а) $K_j=0,077 \times 10^5 \text{ A}^2\text{c}/\text{мм}^4$ ($T \sim 290^\circ\text{C}$); б) $K_j=0,114 \times 10^5 \text{ A}^2\text{c}/\text{мм}^4$ ($T \sim 460^\circ\text{C}$).

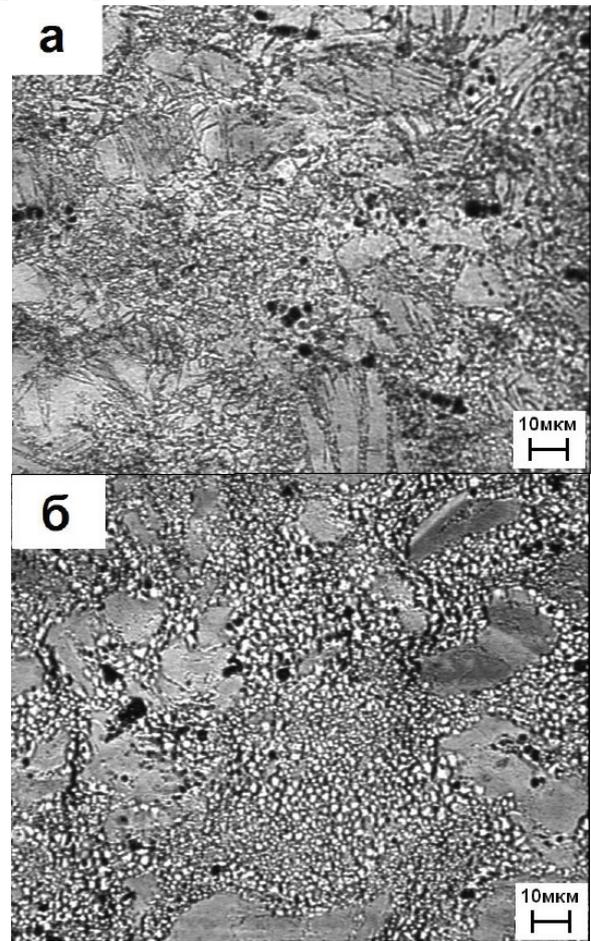


Рис. 3. Микроструктура МА14 ($\epsilon=44\%$), обработанного ЭИО: а) $K_j=0,077 \times 10^5 \text{ A}^2\text{c}/\text{мм}^4$ ($T \sim 290^\circ\text{C}$); б) $K_j=0,114 \times 10^5 \text{ A}^2\text{c}/\text{мм}^4$ ($T \sim 460^\circ\text{C}$).

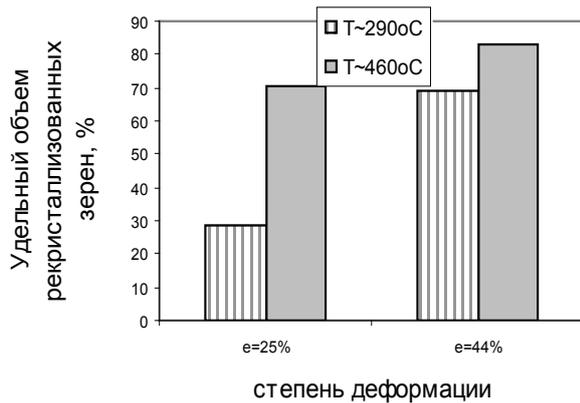


Рис.4. Зависимость удельного объема рекристаллизованных зерен от степени предварительной деформации и величины условной температуры.

температуры (до 460°C) приводит к увеличению доли рекристаллизованных зерен без значительного изменения размера зерна (рис.2б).

Структурные изменения в образцах, прокатанных со степенью 44%, проходят более интенсивно, за счет большего числа центров рекристаллизации, сформировавшихся во время деформации (рис.3а, б). После обработки с энергией, соответствующей условной температуре и ~290°C, и ~460°C, средний размер мелких зерен по-прежнему составляет 2 мкм. Увеличение энергии ЭИО приводит к формированию в сплаве близкой к однородной, мелкозернистой структуры.

Зависимость удельного объема рекристаллизованных зерен от степени предварительной деформации и величины условной температуры представлена на рисунке 4. Для образцов, предварительно деформированных со степенью деформации 25%, увеличение условной температуры с ~290°C до ~460°C приводит к росту удельного объема рекристаллизованных зерен с 28 до 70%. Увеличение степени предварительной деформации до 44% также приводит к росту удельного объема рекристаллизованных зерен (с 69 до 83%) с повышением энергии ЭИО, при сохранении их размера.

3. Заключение

Можно заключить, что ЭИО образцов сплава МА14 (для рассмотренных степеней предварительной деформации и величин условной температуры), вызывает формирование смешанной структуры с двумя группами зерен, в которой оставшиеся фрагменты крупных исходных зерен окружены областями мелких рекристаллизованных зерен.

Увеличение степени деформации и повышение энергии ЭИО приводит к росту удельного объема рекристаллизованных зерен при сохранении их среднего размера (~ 2 мкм), и позволяет получить в материале мелкозернистую, близкую к однородной, структуру.

Литература

1. V.N. Chuvil'deev, T.G.Nieh, M.Yu.Gryaznov, A.N.Sysoev, V.I.Kopylov. *Scripta Materialia*. 50, 861 (2004).
2. R.Lapovok, P.F.Thomson, R.Cottam, Y.Estrin. *Journal of Materials Science*. 40, 1699 (2005).
3. Yu.Estrin, R.Hellmig. *Metal Science and heat treatment*. 48(11-12), 504 (2006).
4. A.Galiyev, R.Kaibyshev. *Scripta Materialia*. 51(2), 89 (2004).
5. J. Swiostek, D.Letzing, K. U. Kainer. *Metal Science and heat treatment*. 617 (11), 31(2006). (in Russian) [Я. Свѣстек, В. Летциг, К.У. Кайнер. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 617 (11), 31(2006)]
6. I.Sh.Valeev, N.P.Barykin, V.G.Trifonov, A.Kh.Valeeva. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 14 (2), 236 (2005).
7. V.V. Stolyarov. *Letters on materials (in Russian)*. 1 (2), 75 (2011). [В.В. Столяров. *Письма о материалах*. 1 (2), 75 (2011)].
8. H.Knoepfel. *Pulsed high magnetic fields*, Amsterdam-London, North-Holland Publishing Company (1970) 392.
9. O.Sitdikov, R.Kaibyshev. *Materials Transactions*. 42, 1928 (2001).