УДК 669.2/.8.018.58

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПАРАМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.В. Шляров, Д.В. Загуляев

E-mail: shlyarov@mail.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

- Аннотация. Работа посвящена анализу влияния слабых постоянных магнитных полей с индукцией до 0,6 Тл на прочностные и пластические характеристики парамагнитных материалов (поликристаллические технически чистые титан и алюминий). В ходе работы установлено, что слабые магнитные поля могут на качественном уровне повлиять на пластические характеристики исследуемых материалов. Эффект влияния магнитного поля линейно зависит от индукции магнитного поля и количественно характеризуется изменением микротвердости поликристаллических технически чистых титана и алюминия. Приведен сравнительный анализ изменения скорости стационарной ползучести в магнитном поле 0,4 Тл для титана и алюминия.
- *Ключевые слова:* магнитное поле, технически чистый титан, технически чистый алюминий, микротвердость, ползучесть, парамагнитные материалы, поликристаллические металлы, индукция магнитного поля.

CHANGE OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE PARAMAGNETIC MATERIALS IN A MAGNETIC FIELD

V.V. Shlyarov, D.V. Zagulyaev

E-mail: shlyarov@mail.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

- *Abstract.* The work is devoted to the analysis of the influence of weak constant magnetic fields with induction up to 0.6 T on the strength and plastic characteristics of paramagnetic materials, in this case polycrystalline technical pure titanium and aluminum. In the course of the work, it was found that weak magnetic fields can qualitatively affect the plastic characteristics of the materials under study. The effect of the magnetic field linearly depended on the induction of the magnetic field and was quantitatively characterized by a change in the microhardness of polycrystalline technically pure titanium and polycrystalline technically pure aluminum. A comparative analysis of the change in the stationary creep rate in a magnetic field of 0.4 T for titanium and aluminum is presented.
- *Keywords:* magnetic field, technically pure titanium, technically pure aluminum, microhardness, creep, paramagnetic metals, polycrystalline metals, magnetic field induction.

Введение

В настоящее время в научном сообществе активно изучаются вопросы влияния внешних энергетических воздействий на структуру и физико-механические свойства металлов и сплавов. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение внешних энергетических полей (электрических [1], электромагнитных [2], ультразвуковых [3] и микроволновых [4]) может на качественном уровне влиять на структуру и механические свойства материалов. Прогрессивным методом модификации материалов является воздействие постоянными и импульсными магнитными полями. Достаточно хорошо изучены вопросы влияния магнитных полей на ферромагнитные материалы [5 – 7]. Установлено, что при определенных режимах обработки импульсные магнитные поля можно использовать подобно интенсивной пластической деформации для создания необходимой микроструктуры, но при этом сохранять первоначальные размеры и форму заготовки [8]. Хорошо известно, что магнитные поля могут в значительной степени изменять кинетику процесса кристаллизации, инициировать фазовые переходы, оказывать влияние на конечную структуру и

другие свойства при обработке материалов [9, 10]. Однако текущие исследования концентрируются в основном на эффектах магнитной обработки во время затвердевания и нагрева, поскольку в этих условиях магнитные поля могут способствовать измельчению зерна [11 - 13]. Научным коллективом, изучающим влияние импульсного магнитного поля на микроструктуру и свойства композитов Al – Zn – Mg – Cu, было установлено, что плотности дислокаций в обработанных образцах возрастают с увеличением индукции магнитного поля, а магнитопластический эффект определяется как основная причина подобных явлений. Существует теория о том, что магнитное поле способствует изменению спинового состояния системы атомов из синглетного в триплетное состояние, что способствует откреплению дислокаций от точечных дефектов [14, 15]. Ведутся работы по исследованию влияния магнитных полей на твердые металлы и сплавы при комнатной температуре. В качестве примера в работе [16] рассмотрено влияние внешнего магнитного поля на сплав титана ТС4 и установлено, что магнитное поле может способствовать фазовому превращению из β- в α-фазу, сопровождающемуся увеличением плотности дислокаций. В настоящей работе рассматривается влияние магнитного поля с индукцией до 0,6 Тл на механические свойства парамагнитных металлов. К парамагнетикам относятся материалы, которые имеют малую магнитную проницаемость, но большую, чем в вакууме, слабо намагничиваются и втягиваются магнитным полем. К парамагнетикам относятся металлы, атомы которых имеют нечетное число валентных электронов (калий, натрий, алюминий и др.), переходные металлы (молибден, вольфрам, титан, платина и др.) с недостроенными электронными оболочками атомов. В качестве исследуемых металлов выступают поликристаллический технически чистый титан марки BT1-0 и поликристаллический технически чистый алюминий марки А85. Были исследованы такие характеристики, как микротвердость и скорость ползучести, определяемая на линейной стадии процесса, в условиях воздействия магнитными полями.

Методики проведения исследований

В качестве источника магнитного поля используют электромагнит. Регулировку индукции осуществляют путем изменения силы тока, протекающего по катушкам. Измерения значений индукции магнитного поля проводят миллитесламетром ТПУ с точностью до 0,01 мТл. Значение индукции варьируют в интервале 0 – 0,6 Тл (при этом сила тока варьируется в интервале 0,18 – 6,20 А). Об изменении пластических характеристик материала свидетельствует изменение микротвердости и скорости ползучести образцов при различных параметрах обработки магнитным полем.

Измерения микротвердости проводят по методу Виккерса, в соответствии с требованиями ГОСТ 9450 - 76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» по методу восстановленного отпечатка (основной) с помощью четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (микротвердомер HVS-1000). Для измерения микротвердости в работе использовали образцы в виде параллелепипедов размером 0,4×1,0×1,0 см. Образцы располагали в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца площадью 1 см² и пронизывали ее. Геометрию магнитного поля не меняли во всех испытаниях. Для обработки данных использовали стандартные методы математической статистики. Значения микротвердости усредняли не менее чем по 50 измерениям. Количественно эффект влияния магнитного поля характеризуется относительным изменением микротвердости (Q):

$$Q = \frac{HV - HV_0}{HV_0} 100 \%, \qquad (1)$$

где HV – микротвердость образца, выдержанного в магнитном поле; HV_0 – исходное значение микротвердости.

Также проведена оценка скорости ползучести в условиях наложения магнитных полей на образцах, представляющих собой цилиндр, длина которого 250 мм, а диам. – 2,5 мм. Исследован процесс ползучести без воздействия и с воздействием магнитного поля, при этом индукция магнитного поля не изменялась во всей серии испытаний и составляло 0,4 Тл.

Образец закрепляли в зажимах, между которыми находился источник магнитного поля. К полвижному зажиму приклалывали растягивающую силу, которая приводит к пластической деформации. Под действием приложенной силы одновременно с удлинением образца происходит перемещение подвижного зажима, что и фиксировал оптико-механический датчик перемещения с точностью 50 мкм. Сигнал от датчика обрабатывался программой «Мультидлиннометр» и сохранялся в виде отдельного текстового файла. Для дальнейшей обработки и анализа полученных данных использован научный пакет Origin Pro 8, математический пакет Microsoft Excel, а также специально разработанная программа для анализа кривой ползучести «Апроксиматор». Основное внимание уделено стадии установившейся ползучести, скорость на которой постоянна, а зависимость $\varepsilon(t)$ и меет характер



Рис. 1. Зависимость относительного изменения микротвердости от индукции магнитного поля сразу после обработки: $a - BT1-0; 0, 1 T_{T} \le B \le 0, 6 T_{T}; t = 1, 25 ч; \delta - A85; 0, 1 T_{T} \le B \le 0, 3 T_{T}; t = 1, 25 ч$

прямой и определяется уравнением (2):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon' t \,, \tag{2}$$

где ε_0 – обратимая (упругая) деформация; ε' – тангенс угла наклона прямой, характеризующий скорость ползучести; *t* – время.

<u>Результаты</u>

Рассмотрим начальный эффект влияния магнитного поля (наблюдающийся сразу после обработки) для различных значений индукции при времени выдержки 1,25 ч на микротвердость алюминия A85 и титана BT1-0. Полученные результаты представлены на рис. 1.

Экспериментальные результаты показывают, что при одних и тех же параметрах обработки влияние магнитного поля на алюминий в три раза сильнее, чем на технически чистый титан. В различных парамагнитных материалах наблюдаемые эффекты являются качественно подобными. Поскольку микротвердость является параметром, характеризующим свойства отдельных микроскопических слоев материала, то для более глубокого понимания процессов влияния слабых магнитных полей необходимы исследования, характеризующие изменение объема материала в целом.

В данной связи в работе проведен анализ процесса ползучести поликристаллических алюминия и титана при одновременном наложении магнитного поля. Кривые ползучести, полученные при деформации исследуемых образцов в магнитном поле и без него, содержат стадии логарифмической, установившейся и ускоренной ползучести, что совпадает с общепринятыми представлениями о кинетике данного процесса [17, 18].

Стадии ползучести (в том числе и установившуюся стадию) определяют при помощи программного обеспечения с погрешностью 5 %. Изменение скорости ползучести под действием магнитного поля характеризуется изменением тангенса угла наклона прямой на стадии установившейся ползучести в сравнении с экспериментальными данными по ползучести без наложения магнитного поля. В общем виде на стадии установившейся ползучести скорость рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_l}{t_l} = tg\alpha; \qquad (3)$$

здесь ε' – скорость ползучести; ε_l – деформация на стадии установившейся ползучести; t_l – время установившейся ползучести.

Наиболее характерные кривые ползучести, полученные при разрушении алюминия и титана при действии постоянного магнитного поля, приведены на рис. 2. Они содержат стадии логарифмической, установившейся и ускоренной ползучести [18]. Проведены расчеты скорости стационарной ползучести для образцов титана ВТ1-0 и алюминия A85, разрушенных в условиях действия магнитного поля и без него.

Установлено, что для титана ВТ1-0 скорость стационарной ползучести без наложения магнитного поля составляет примерно 2 %/ч. Использование постоянного магнитного поля 0,4 Тл во время пластической деформации приводит к увеличению скорости ползучести до 7,58 %/ч.

Разрушение алюминия A85 без применения магнитного поля происходит со скоростью 13,05 %/ч. Расчеты скорости ползучести поликристаллического алюминия марки A85, разрушенного в условиях постоянного магнитного поля с индукцией 0,4 Тл, показывают, что происходит снижение скорости пластической деформации. Усредненное значение скорости ползучести алюминия составляет примерно 3,47 %/ч.

При дифференцировании кривых ползучести по времени получена зависимость скорости ползучести от времени эксперимента (рис. 3). Для исследуемых материалов воздействие магнитного поля существенно изменяет скорость ползу-



Рис. 2. Характерные кривые ползучести титана ВТ1-0 (*a*) и алюминия А85 (б), разрушенных в условиях действия магнитного поля 0,4 Тл

чести на установившейся и ускоренной стадиях. На начальной (логарифмической) стадии ползучести действие магнитного поля не выражено.

Причину изменения пластических характеристик можно связать с влиянием магнитного поля на поведение точечных дефектов. Слабое магнитное поле способствует необратимому изменению метастабильных состояний точечных дефектов, инициируя многостадийный релаксационный процесс, который сопровождается изменением микротвердости кристалла. Это качественно совпадает с зависимостями, полученными на кристаллах NaCl. Для построения собственной теории о влиянии слабых магнитных полей на пластические характеристики парамагнитных металлических материалов на качественном уровне необходимы дальнейшие исследования дислокационной субструктуры и поверхности разрушения исследуемых материалов, формирующихся при ползучести в магнитном поле. Однозначно можно утверждать о возможности модифицирования поликристаллических парамагнитных материалов магнитными полями.

Выводы

Исследованы пластические характеристики поликристаллического технически чистого титана марки BT1-0 и поликристаллического технически чистого алюминия марки A85. Установлено, что под воздействием магнитного поля различной индукции происходит снижение микротвердости алюминия на 4 – 12 %, титана на 2 – 8 %. Эффект влияния магнитного поля линейно возрастает с увеличением индукции. Полученные в ходе экспериментальных исследований на различных металлических материалах (алюминий и титан) данные являются качественно подобными, но количественно разительно отличаются. Эффект влияния на алюминий почти в три раза больше, чем на титан. Установлено, что магнитное поле может в значительной степени повлиять на скорость ползучести титана марки BT1-0 и алюминия A85.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ebadi Z., Pourali N., Mohammadzadeh H. Plasma coating of nanoparticles in the presence of an external electric field // Physics Letters A. 2018. Vol. 382. P. 1024 – 1030.
- Agrawal S., Ghose A. K., Chakrabarty I. Effect of rotary electromagnetic stirring during solidification of In-situ Al-TiB₂ composites // Materials and Design. 2017. Vol. 113. P. 195 – 206.
- Tsunekawa Y., Suzuki H., Genma Y. Application of ultrasonic vibration to in situ MMC process by electromagnetic melt stirring // Materials and Design. 2001. Vol. 22. No. 6. P. 467 – 472.



Рис. 3. Зависимости скорости ползучести титана ВТ1-0 (*a*) и алюминия А85 (*б*) от времени испытания: *1* – образцы, разрушенные без магнитного поля; *2* – образцы, разрушенные при воздействии магнитного поля 0,4 Тл

- Joffe R., Shavit R., Kamenetskii E.O. Microwave magnetoelectric fields: an analytical study of topological characteristics // Journal of Magnetism and Magnetic. 2015. Vol. 392. P. 6 – 21.
- Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K. Static deformation of a ferromagnet in alternating magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016. Vol. 406. P. 217 – 220.
- Yetim A.F., Kovacı H., Aslan M., Çelik A. The effect of magnetic field on the wear properties of a ferromagnetic steel // Wear. 2013. Vol. 301. P. 636 640.
- Wu G. H., Hou T.P., Wu K.M., Chen L. Influence of high magnetic field on carbides and the dislocation density during tempering of high chromium-containing steel // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. Vol. 479. P. 43 49.
- Guirong L., Hongming W., Xueting Y., Yutao Z. Microstructure of nanometer Al₂O₃ particles reinforced aluminum matrix composites processed by high pulsed electromagnetic field // Materials Letters. 2013. Vol. 99. P. 50 53.
- 9. Yin L., Qiang W., Tie L., Pengfei G., Yi Y., Jicheng H. Effects of high magnetic fields on the crystal orientation and magnetostriction of a TbFe₂ based alloy during treatment in the semi-solid state // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 590. P. 110 – 115.
- Yang L., Zhen L., Fuyu Y., Rui D., Qi Y. Effect of external magnetic field on resistance spot welds of aluminum alloy // Material and Design. 2014. Vol. 56. P. 1025 1033.
- **11.** Li C., Hu S., Ren Z., Fautrelle Y., Li X. Effect of the simultaneous application of a high static

magnetic field and a low alternating current on grain structure and grain boundary of pure aluminum // Journal of Materials Science & Technology. 2018. Vol. 34. No. 12. P. 2431 – 2438.

- Li Y.J., Tao W.Z., Yang Y.S. Grain refinement of Al–Cu alloy in low voltage pulsed magnetic field // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212. P. 903 – 909.
- **13.** Fu J.W., Yang Y.S. Microstructure and mechanical properties of Mg–Al–Zn alloy under a low-voltage pulsed magnetic field // Materials Letters. 2012. Vol. 67. P. 252 – 255.
- Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. Magnetoplastic effect in nonmagnetic crystals // Dislocations in Solids. 2008. Vol. 14. P. 333 – 437.
- 15. Cheng J., Gui-rong Li., Hong-ming W., Pei-si Li., Chao-qun Li. Influence of high pulsed magnetic field on the dislocations and mechanical properties of Al₂O₃ / Al composites // Journal of Materials Engineering and Performance. 2018. Vol. 27. P. 1083 1092.
- 16. Guirong L., Yueming L., Fangfang W., Hongming W. Microstructure and performance of solid TC4 titanium alloy subjected to the high pulsed magnetic field treatment // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 644. P. 750 – 756.
- 17. Кеннеди А.Дж. Ползучесть и усталость в металлах. М.: Металлургия, 1965. 312 с.
- **18.** Kassner M.E. Fundamentals of creep in metals and alloys. Elsevir Ltd., 2015. 356 p.

© 2020 г. В.В. Шляров, Д.В. Загуляев Поступила 24 января 2020 г.