

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»

6–10 сентября 2021 г.

Томск, Россия

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ
В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВЕ Mg-Y-Nd**

¹Легостаева Е.В., ¹Ерошенко А.Ю., ^{1,2}Лугинин Н.А., ¹Белявская О.А., ^{2,3}Вавилов В.П.,
³Скрипняк В.А., ²Чулков А.О., ³Козулин А.А., ³Скрипняк В.В., ⁴Schmidt J., ^{1,2}Шаркеев Ю.П.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

⁴Innovent Technology Development, Jena

Использование сплавов на основе магния в качестве клинических имплантатов для сердечно-сосудистой, скелетно-мышечной и общей хирургии известно давно. Одним из преимуществ является близкие значения модуля упругости сплавов на основе магния, которые составляют 40-45 ГПа, к модулю упругости кости. Легирование магния редкоземельными металлами (РЗМ или rare earth, RE), такими как Y, Nd, Gd, Ce, Dy и др. приводит к улучшению прочностных характеристик, повышению пластичности и коррозионной стойкости [1]. Однако в ряде случаев достигаемый уровень прочностных свойств не всегда отвечает необходимым требованиям, что ограничивает их применение в имплантологии. Применение различных деформационных обработок, в том числе, прокатка, штамповка, экструзия, кручение под давлением, РКУ-прессование *abc*-ковка и т.д. позволяет значительно повысить прочностные свойства сплавов на основе магния.

Для успешного практического использования сплавов на основе магния, разработки конструкций и изделий для медицины и техники необходимо понимание процессов пластической деформации и разрушения, происходящих при различных видах нагружения. Особую роль здесь играет явление локализации деформации, поскольку оно определяет процессы деградации и разрушения реальных изделий во время эксплуатации

Целью настоящей работы было изучение и анализ закономерностей накопления и диссипации энергии в процессе пластической деформации при квазистатическом растяжении образцов сплава системы Mg-RE(Y, Nd) в рекристаллизованном и экструдированном состояниях с использованием инфракрасной термографии.

В работе исследовали коммерческий магниевый сплав системы Mg-Y-Nd состава:(wt.%): Mg 95,0; Y 2,9; Nd 1,3; Fe 0,2; Al <0.6. Для получения оптимальных механических свойств сплав подвергали деформационной обработке экструзией со степенью деформации $e=1,3$. Рекристаллизованное состояние в сплаве получали отжигом при температуре 510 °С в течение 6 часов в аргоне с последующим охлаждением на воздухе.

Микроструктура сплава в экструдированном состоянии представлена матричными зёрнами на основе α -твёрдого раствора (ГПУ-решетка) магния, по границам и внутри которых, наблюдаются наноразмерные (100-500 нм) частицы интерметаллидной фазы системы Mg-Y. Характер микроструктуры бимодальный. На оптических изображениях наблюдаются два типа структурных элементов: зёрна со средним размером 15 мкм и более мелкие зёрна со средним размером до 1 мкм, которые образуют текстурированные «полосы». В рекристаллизованном состоянии микроструктура сплава достаточно однородная по объёму образца и представляет собой равноосные зёрна основной α -фазы магния со средним размером 35 мкм.

Механические испытания выполнялись на универсальном сервогидравлическом испытательном стенде Instron VHS 40/50-20 (“INSTRON”, Великобритания). Эксперименты по одноосному растяжению плоских образцов проводили с постоянной скоростью деформации $0,01 \text{ с}^{-1}$. Измерительная тепловизионная система FLIR SC 7700M была использована для измерения температурного поля на поверхности образцов, их размеров и формы (образование шейки) в процессе деформирования, что позволило получить истинные деформационные кривые, а также оценить работу пластической деформации, удельное количество теплоты, рассеявшееся в процессе деформирования, и поглощенную энергию в

процессе пластической деформации. Методика расчета перечисленных параметров подробно описана ранее в [2].

По диаграммам «инженерное напряжение – инженерная деформация» были определены следующие предельные прочностные характеристики сплава Mg–Y–Nd в условиях одноосного растяжения: условный предел текучести σ_{02} , предел прочности σ_6 , максимальная пластическая деформация до разрушения ε_f . Для сплава Mg–Y–Nd в рекристаллизованном состоянии $\sigma_{02} = 150$ МПа, $\sigma_6 = 230$ МПа, $\varepsilon_f = 12\%$, а в экструдированном состоянии $\sigma_{02} = 220$ МПа, $\sigma_6 = 340$ МПа и $\varepsilon_f = 21\%$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что измельчение зерна в процессе экструзии сопровождается повышением условного предела текучести, предела прочности сплава Mg–Y–Nd \approx в 1,5 раза, и изменению закономерностей деформационного упрочнения при квазистатическом растяжении. Кроме того, при растяжении сплава Mg–Y–Nd в экструдированном состоянии \approx в 1,75 раза увеличивается деформация до разрушения ε_f по сравнению сплавом с рекристаллизованном состоянием, что согласуется с результатами исследования других авторов магниевых сплавов MA2-1 и WE43 после ИПД [3, 4].

Анализ полученных данных показал, что удельная работа пластической деформации при растяжении сплава в экструдированном состоянии в 2 раза выше, по сравнению рекристаллизованном состоянием, что обусловлено его более высокой пластичностью. Предельная удельная работа пластической деформации вплоть до разрушения составляет соответственно 20 и 45 МДж/м³ для экструдированного и рекристаллизованного состояний сплава.

Для образцов сплава Mg–Y–Nd как в экструдированном, так и в рекристаллизованном состояниях, количество выделившейся при деформации теплоты неравномерно на разных участках деформирования. На начальном этапе деформирования, до $\varepsilon_{true} \sim 0,03-0,04$, практически 100 % работы пластической деформации идет на изменение внутренней энергии. Это свидетельствует о способности сплава эффективно задействовать структурный канал поглощения энергии на начальном этапе деформирования независимо от его структурного состояния, что может быть связано с дисперсионным упрочнением интерметаллидными частицами. Затем, зависимости выделившейся и поглощенной энергии от деформации сплава в экструдированном состоянии ведут себя практически линейно. При этом количество теплоты, выделившееся в результате термопластического эффекта для образцов сплава в экструдированном состоянии, составляет $\sim 35\%$ от работы пластической деформации (15 МДж/м), а остальные $\sim 65\%$ энергии (30 МДж/м³) поглощаются сплавом.

Для сплава в рекристаллизованном состоянии перед разрушением происходит резкое повышение температуры до 45°C, а коэффициент деформационного упрочнения становится отрицательным и составляет $-3,5$ ГПа, что свидетельствует о локальном разупрочнении сплава. При этом, количество теплоты, выделившееся при деформировании, составляет 60% от работы пластической деформации, и равно 12 МДж/м³, а удельная энергия, поглощенная сплавом, составляет $\sim 40\%$ от работы пластической деформации и равна 8 МДж/м³.

Таким образом, деформационная обработка экструзией приводит к повышению механических характеристик и оказывает значительное влияние на закономерности деформационного поведения и накопления и диссипации энергии в процессе пластической деформации образцов сплава Mg–Y–Nd.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0004.

1. Junxiu Chena, Lili Tana, Xiaoming Yua at. el. Mechanical properties of magnesium alloys for medical application: A review // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. - 2018. – V. 87 – P.68–79.
2. Sharkeev Y.P., Vavilov V.P., Skrypnjak V.A. at. el. Research on the processes of deformation and failure in coarse- and ultrafine-grain states of Zr1–Nb alloys by digital image correlation and infrared thermography // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – V.784. – P.139203.

3. Martynenko N.S., Lukyanova E.A., Serebryany V.N. at el. Increasing strength and ductility of magnesium alloy WE43 by equal-channel angular pressing // Materials Science and Engineering: A. - 2018. - V. 712. - P.625-629.
4. Козулин А.А., Скрипняк В.А., Красновейкин В.А. и др. Исследование физико-механических свойств ультрамелкозернистых магниевых сплавов // Известия Вузов. Физика. – 2014. - №9. – С.98-104.