Влияние экструзии на модуль Юнга и внутреннее трение в магниевых сплавах с различным содержанием длиннопериодной слоистой структуры

Каминский Владимир Владимирович^{*1,2,5}, кандидат физико-математических наук,

лаборатории дифракционных методов исследования реальной структуры кристаллов Дорогов Максим Владимирович^{1,7}, кандидат физико-математических наук,

доцент института перспективных систем передачи данных

Филиппов Сергей Анатольевич^{2,3,8}, научный сотрудник лаборатории дифракционных методов исследования

реальной структуры кристаллов, доцент высшей школы механики и процессов управления

Романов Алексей Евгеньевич^{1,4,9}, доктор физико-математических наук, профессор,

главный научный сотрудник института перспективных систем передачи данных

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург (Россия)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург (Россия)

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург (Россия)

⁴Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*E-mail: vvkaminskii@itmo.ru

⁵ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4388-2459 ⁶ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0003-1986-3693</u> ⁷ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0001-5987-3357</u> ⁸ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-7784-5</u>55X ⁹ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3738-408X

Поступила в редакцию 31.03.2025

Пересмотрена 14.04.2025

Принята к публикации 13.05.2025

Аннотация: Проведение исследования обусловлено растущим прикладным интересом к получению и исследованию механических свойств новых магниевых сплавов, содержащих длиннопериодную слоистую структуру (ДПС). Исследование влияния обработки теплой экструзией на модуль Юнга и внутреннее трение позволит в большей мере понять поведение данных материалов под действием различных механических напряжений, что важно для улучшения их функциональных характеристик. Представлены результаты влияния теплой экструзии на структуру, эффективный модуль Юнга и внутреннее трение в сплавах с различным содержанием фазы ДПС. Сплавы в системе Mg-Zn-Y с содержанием ДПС 0, 50 и 100 % об. были изучены с использованием пьезоэлектрического составного вибратора на частотах, близких к 100 кГц. Полученные результаты показали увеличение модуля Юнга с ростом содержания ДПС, обусловленное большей жесткостью и сильной межатомной связью в этой структуре. Экструзия вызвала уменьшение модуля Юнга на 3 % вдоль направления обработки. Этот эффект объясняется формированием удлиненной микротекстуры, преимущественной ориентацией в фазах альфа-магния и ДПС, а также возрастанием плотности подвижных дислокаций. Нелинейная часть внутреннего трения возрастала в результате экструзии благодаря увеличению плотности вовлеченных дислокаций. В то же время критическая амплитуда деформации уменьшалась с увеличением доли ДПС. Кроме того, выявлено снижение дефекта модуля Юнга после экструзии, что объясняется преимущественно дислокационным упрочнением. Полученные данные позволяют с большим пониманием взглянуть на деформационное поведение сплавов Mg–Zn–Y с ДПС, а также на влияние на него обработки теплой экструзией.

Ключевые слова: сплавы магния; длиннопериодная слоистая структура; ДПС; внутреннее трение; модуль Юнга; микропластичность.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Виноградову Алексею Юрьевичу (профессору Исследовательского центра магния, Университет Кумамото) за полезное обсуждение и помощь в интерпретации результатов работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-00073, https://rscf.ru/project/24-72-00073/.

Для цитирования: Каминский В.В., Калганов Д.А., Дорогов М.В., Филиппов С.А., Романов А.Е. Влияние экструзии на модуль Юнга и внутреннее трение в магниевых сплавах с различным содержанием длиннопериодной слоистой структуры // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 2. С. 19–27. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-2.

введение

Магниевые сплавы с длиннопериодной слоистой (ДПС) структурой представляют собой уникальный класс материалов, которые привлекли внимание исследователей и инженеров благодаря своим выдающимся механиче-

© Каминский В.В., Калганов Д.А., Дорогов М.В., Филиппов С.А., Романов А.Е., 2025

ским свойствам. Ё. Кавамура первым предложил компонентный состав и методы производства тройных магниевых ДПС сплавов [1]. Группа авторов из Исследовательского центра магния на сегодняшний день наиболее активно разрабатывает наноструктурированные материалы

заведующий лабораторией института перспективных систем передачи данных

Калганов Дмитрий Александрович^{2,6}, младший научный сотрудник

и публикует результаты своих исследований по данной тематике. Эти сплавы сочетают в себе легкость магния с повышенной прочностью, сопротивлением ползучести и улучшенными характеристиками демпфирования [1-3]. Наиболее изученными материалами в этой категории являются сплавы на основе Mg-Zn-Y, ДПС структура в них характеризуется периодическим чередованием слоев с различной последовательностью упаковки атомов. Тройные соединения Mg-Zn-Y кристаллизуются в разных фазах в зависимости от соотношения Zn-Y и методов затвердевания [4]. Распространенными типами фаз ДПС в этих сплавах являются 18R (ромбоэдрическая структура с периодом 18 слоев) и 14Н (гексагональная структура с периодом 14 слоев). Эти фазы в системе Mg–Zn–Y образуются путем добавления нескольких атомных процентов цинка и иттрия (соотношение Zn/Y ~1) к магниевому сплаву путем быстрой кристаллизации [1]. Фазы ДПС значительно повышают прочность сплавов Mg-Zn-Y за счет упорядоченной структуры, которая препятствует движению дислокаций, создает барьеры на границах раздела, способствует дисперсионному твердению и уменьшению размера зерна, а также подавляет деформационное двойникование. Особый интерес представляет механизм разрушения этих сплавов, который существенно отличается от механизма классических сплавов из-за образования так называемых полос деформации – "kink band" [5].

Магниевые сплавы с ДПС структурой упрочняются после экструзии [6]. Так, в [7] литой сплав с содержанием ДПС 88 % (Mg₈₈Zn₄Y₇) имел низкую прочность на растяжение (предел текучести) около 140 МПа при комнатной температуре. После экструзии прочность значительно возросла. При соотношении экструзии 10:1 прочность достигла 460 МПа при комнатной температуре, что более чем в 3 раза выше, чем у литого сплава. Упрочнение происходит потому, что экструзия выравнивает фазу ДПС вдоль направления экструзии, предотвращая базисное скольжение и увеличивая прочность. Кроме того, полосы сброса, образованные во время экструзии, создают дополнительные границы, которые эффективно предотвращают движение дислокаций, что еще больше способствует повышению прочности. Хотя известно, что фаза ДПС увеличивает прочность сплава, а экструзия еще больше усиливает это упрочнение, точные механизмы (например, взаимодействие дислокаций с фазой ДПС) требуют дальнейшего изучения.

Обычно механические свойства магниевых сплавов с ДПС структурами изучаются с использованием стандартных (испытания на растяжение, усталость и твердость) [8], а также более специализированных методов (акустическая эмиссия, наблюдения in situ) [9]. Эти методы предоставляют исчерпывающую информацию о прочности, пластичности, усталостных характеристиках и микроструктуре сплавов. Относительно новым направлением исследований сплавов, содержащих ДПС, стало исследование высокочастотного затухания и эффективного модуля упругости [10].

Цель работы – исследование влияния экструзии на механические свойства магниевых сплавов с ДПС структурами с использованием метода пьезоэлектрического составного вибратора при частоте 100 кГц.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод пьезоэлектрического составного вибратора

Основным методом исследования в данной работе является метод пьезоэлектрического составного вибратора (ПСВ) [11]. Метод ПСВ основан на измерении частот резонанса образца материала, возбуждаемого пьезоэлектрическим преобразователем. Составной вибратор состоит из двух частей: пьезоэлемента (кварца) и исследуемого образца, которые механически соединены с помощью цианоакрилатного клея. При подаче переменного напряжения на пьезоэлектрический элемент генерируются механические колебания, которые передаются образцу. Анализ резонансных частот и декремента затухания колебаний ПСВ позволяет определить модуль упругости при малоамплитудной колебательной деформации (модуль Юнга) и внутреннее трение образца на основе следующих уравнений:

$$m_{osc}\delta_{osc} = m_q\delta_q + m_s\delta_s;$$

$$m_{osc}f_{osc} = m_qf_q + m_sf_s,$$
(1)

где *m*_{osc} – масса всего вибратора;

$$m_q$$
 – масса кварца

*m*_s – масса образца;

 δ_{osc} – затухание колебаний всего вибратора;

- δ_q затухание колебаний кварца;
- δ_s затухание колебаний образца;

*f*_{osc} – частота колебаний всего вибратора;

 f_q – частота колебаний кварца;

*f*_s – частота колебаний образца.

Уравнение для определения модуля Юнга:

$$m_{osc}f_{osc} = m_a f_a + m_s f_s , \qquad (2)$$

где ρ – плотность исследуемого материала; *l* – длина образца.

Измеряя отклонение резонансной частоты ПСВ с образцом, можно определить модуль Юнга и внутреннее трение материала при различных температурах и нагрузках (амплитудах деформации). Амплитуда деформации в экспериментах варьировалась от 2×10^{-7} до 2×10^{-4} , а температура – от 80 до 320 К со скоростью нагрева/охлаждения 2 К/мин. Следует отметить, что внутреннее трение характеризует способность материала рассеивать энергию механической вибрации. Она проявляется в затухании амплитуды колебаний и выражается через декремент затухания, или логарифмический декремент. Мерой внутреннего трения служил логарифмический декремент б (определяемый как $\delta = \Delta W/2W$, где ΔW – энергия, рассеиваемая за цикл; *W* – максимальная накопленная энергия колебаний). Модуль Юнга характеризует отношение напряжения к деформации в приближении одноосного растяжения или сжатия. Изучение обеих этих характеристик одновременно при различных амплитудах деформации в широком диапазоне температур дает полную информацию о механических процессах, происходящих в образцах.

Дефект модуля Юнга измерялся на основе амплитудно-независимой величины E_i модуля и его изменений на высокоамплитудной стадии $E(\varepsilon)$ в соответствии с уравнением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_i - E(\varepsilon)}{E_i},\tag{3}$$

Анализ и интерпретация зависимостей внутреннего трения и дислокационного дефекта модуля в металлах методом ПСВ подробно рассмотрены в работах [12–14].

Материалы исследования и вспомогательные методы

Объектами изучения в данной работе являлись наборы поликристаллических образцов сплавов на основе Mg-Zn-Y до и после экструзии с различным содержанием ДПС: 0, 50 и 100 % (объемная доля). Эти сплавы были получены в Университете Кумамото, Япония. Они имели следующие номинальные химические составы (в ат. %), подтвержденные индуктивно связанной плазменной спектроскопией: Мд99,2Zn0,2Y0,6 (ДПС-0%), Мд93Zn2,5Y4,5 (ДПС-50 %) и Mg85Zn6Y9 (ДПС-100 %). С помощью алмазной пилы образцам придали форму параллелепипедов с размерами 2×3×24,5 мм³. Для всех экструдированных образцов самое длинное направление совпадало с направлением экструзии. Такая форма была выбрана на основе формулы (2) для обеспечения резонанса в системе «кварц – образец».

В качестве дополнительных методов для исследования микроструктуры использовались растровая электронная микроскопия (РЭМ) в режиме контраста отраженных электронов (MIRA III Tescan), оптическая микроскопия (МЕТ-5т Альтами) и рентгеновская дифракция (МД-10 Радикон). Изображения РЭМ и данные рентгеновской дифракции были получены с ортогонального (наименьшего) поперечного сечения образца-параллелепипеда. Поверхности образцов полировались в изопропиловом спирте с использованием наждачной бумаги с зернистостью до 1 мкм. Данные рентгенодифракционного анализа (РДА) были получены путем вращения образцов вокруг со со скоростью 10 мин⁻¹ с использованием излучения CrKa_a, монохроматизированного LiF(200).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные рентгеновские дифрактограммы (рис. 1 а, 1 b) удовлетворительно описываются в рамках трех структур с различными параметрами: искаженная гексагональная решетка альфа-магния (Р63/mmc a=3,19 c=5,18), кубическая W-фаза и гексагональная фаза. Все образцы характеризуются сложной дифракционной картиной указанных структур в области 30-40 град. В сравнении с модельным профилем дифракции поликристаллического образца, полученные данные для литого сплава ДПС-0 % показывают повышенную интенсивность максимума 0002 (20=34,59°), а для литого сплава ДПС-50 % - повышенную интенсивность 1 1-2 0 (20=58,36°). Главной особенностью экструдированных образцов по сравнению с литыми является выраженная текстура в базальных плоскостях гексагональной решетки магния, что соответствует высокой интенсивности максимума 10-10 на рис. 1b. Можно также наблюдать, что образцы ДПС-0 % и ДПС-50 % переориентированы с затуханием пиков 0 0 0 2 и 1 1 – 2 0 соответственно (рис. 1 b).

Микроизображения РЭМ литых и экструдированных образцов показывают наличие блоков разного контраста в режиме обратно рассеянных электронов для ДПС-50 % и ДПС-100 % (рис. 2). Образец ДПС-50 % включает в себя не менее трех различных по контрасту типов зерен.

В результате исследования были определены температурные зависимости модуля Юнга сплавов Mg–Zn–Y с различным содержанием ДПС структуры до и после экструзии (рис. 3). Можно заметить, что модуль Юнга образцов после экструзии уменьшается в среднем на 3 % для 0, 50 и 100 % содержания ДПС. Несмотря на то, что погрешность измерения модуля Юнга составляет 0,001 % (это справедливо для уже зафиксированного образца), она может уменьшаться до 1 % при повторном приклеивании образца. В данном исследовании случайное отклонение измеряемых величин уменьшалось путем повтора эксперимента на серии образцов и анализа средних значений. Значения модуля Юнга при комнатной температуре были следующими: для 0 % ДПС до экструзии – 44,2 ГПа,



Рис. 1. Рентгеновские дифракционные картины на литых (**a**) и экструдированных (**b**) ДПС образцах **Fig. 1.** X-ray diffraction patterns on as-cast (**a**) and extruded (**b**) LPSO samples



Рис. 2. РЭМ-микроизображения для литых (a, c, e) и экструдированных (b, d, f) ДПС образцов, полученные в режиме сопоставления отраженных электронов
 Fig. 2. SEM microimages for as-cast (a, c, e) and extruded (b, d, f) LPSO samples obtained in backscattered electron contrast mode



Рис. 3. Температурная зависимость модуля Юнга магниевых сплавов с различным содержанием ДПС структур до и после экструзии
 Fig. 3. Temperature dependence of Young's modulus of magnesium alloys with different content of LPSO structures before and after extrusion

после – 42,6 ГПа; для 50 % ДПС до экструзии – 49,8 ГПа, после – 48,5 ГПа; для 100 % ДПС до экструзии – 57,2 ГПа, после – 55,6 ГПа. С понижением температуры модуль Юнга увеличивается.

На рис. 4 показаны амплитудные зависимости внутреннего трения для образцов до и после экструзии. Видно увеличение внутреннего трения в образцах после экструзии, также оно наблюдается с ростом содержания фаз ДПС в сплаве. В этих зависимостях отчетливо видны амплитудно-зависимая (АЗВТ) и амплитудно-независимая (АНВТ) части внутреннего трения (для понимания на рис. 4 представлена вставка). АНВТ увеличивается с ростом содержания ДПС, но большее увеличение происходит после экструзии. АЗВТ ведет себя по-разному без выраженной закономерности. В образцах с содержанием ДПС 50 и 100 % можно наблюдать значительное уменьшение критической амплитуды деформации ε_c .

На рис. 5 показаны амплитудные зависимости дефекта модуля Юнга до и после экструзии. После экструзии дефект модуля значительно уменьшился. До экструзии можно наблюдать увеличение дефекта модуля Юнга с ростом содержания фаз ДПС.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Максимумы рентгеновской дифракции для образцов (рис. 1) в исследованном диапазоне соответствуют известным кристаллическим структурам [4]. Текстура образцов, соответствующая фазово-контрастным изображениям (рис. 2 a, c, e), сохраняется после обработки в плоскости, нормальной к направлению экструзии (рис. 2b, d, f). Однако для всех фаз наблюдается ориентация кристаллической структуры при сдвиговой деформации (рис. 1 b, пик 1 0 –1 0).

Результаты показывают, что модуль Юнга магниевых сплавов с ДПС структурами увеличивается с увеличением содержания ДПС (рис. 3). Значения модуля Юнга при фиксированной амплитуде деформации растут с увеличением объемной доли фазы ДПС. Это происходит из-за того, что фазы ДПС имеют сильные межатомные связи и увеличивают жесткость сплава. Причины снижения модуля Юнга после экструзии различны. Например, при экструзии в материале формируется текстура, в которой большинство кристаллитов ориентированы определенным образом (например, базисные плоскости (0001) выстраиваются параллельно направлению экструзии), что подтверждается результатами рентгеновского анализа (рис. 1). В направлении, параллельном оси экструзии, модуль Юнга может уменьшаться из-за преимущественной ориентации базисных плоскостей, которые имеют меньший модуль Е вдоль оси с [15]. В перпендикулярном направлении модуль Юнга может, наоборот, увеличиваться. В нашем случае текстура способна играть ключевую роль, поскольку измерения проводятся параллельно оси экструзии.

В сплавах с ДПС структурами экструзия также может приводить к частичному разрушению или изменению формы фаз ДПС [16]. Эти фазы играют решающую роль в упрочнении материала, а их деградация может снижать общий модуль Юнга. В наших экспериментах результаты РЭМ (рис. 2) показывают изменение формы блоков, содержащих ДПС структуры. Экструзия также вызывает значительную пластическую деформацию, что приводит к накоплению дислокаций и образованию полосы деформации [17]. Эти дефекты снижают упругие свойства материала, поскольку создают области с пониженной жесткостью. Увеличение АНВТ на рис. 4 лишь косвенно указывает на увеличение плотности дислокаций. Экструзия обычно приводит к измельчению зерна посредством динамической рекристаллизации [18]. Хотя уменьшение размера зерна увеличивает прочность и пластичность, оно может снизить модуль Юнга



Рис. 4. Амплитудная зависимость внутреннего трения в сплаве Mg–Y–Zn с различным содержанием ДПС структур (ДПС – 0 %, ДПС – 50 %, ДПС – 100 %) до и после экструзии. Последовательные циклы нагружения с ростом ε_m обозначены красным, зеленым и черным цветом соответственно. Кривая для содержания ДПС 0 % после экструзии выделена синим цветом. Вставка – схематическое изображение амплитудно-независимого внутреннего трения (AHBT) и амплитудно-зависимого трения (A3BT). ε_c – критическая амплитуда деформации, разграничивающая эти два режима. Стрелки указывают направление прямого и обратного хода в глобальном цикле нагружения **Fig. 4.** Amplitude dependence of internal friction in the Mg–Y–Zn alloy with different content of LPSO structures (LPSO – 0 %, LPSO – 50 %, LPSO – 100 %) before and after extrusion. Consequent loading cycles with increasing ε_m are marked in red, green and black, respectively. The curve for 0 % LPSO after extrusion is highlighted in blue. Inset – schematic illustration of the amplitude –

independent internal friction (AHBT) and amplitude – dependent friction (A3BT).

 ε_c is the critical strain amplitude delineating these two regimes.

The arrows indicate the direction of the forward and backward run in the global loading cycle

из-за увеличения объема границ зерен, которые имеют меньшую эластичность, чем объемные кристаллиты [19].

Амплитудные зависимости внутреннего трения были получены при комнатной температуре (рис. 4). Согласно классическим работам [20], амплитудная зависимость внутреннего трения связана с движением дислокаций в материале, где АНВТ отражает плотность дислокаций, АЗВТ – движение сегментов дислокаций, а є связан с отрывом дислокаций (их сегментов) от точек закрепления. Следует отметить, что АНВТ увеличивается с ростом содержания ДПС, но в большей степени увеличение происходит после экструзии, что связано с ростом плотности дислокаций. АЗВТ ведет себя по-другому, и точная интерпретация наблюдаемого явления требует более детального изучения. В настоящей работе мы только подчеркнем наблюдаемое явление уменьшения критической амплитуды деформации в образцах с высоким содержанием фаз ДПС, это явление следует обсудить более подробно.

На рис. 5 видно, что дефект модуля Юнга в широком диапазоне амплитуд меньше для образцов после экструзии. Это можно объяснить несколькими причинами, но основная из них – упрочнение за счет дислокаций. В процессе экструзии материал претерпевает значительную пластическую деформацию, что приводит к росту плотности дислокаций, о чем свидетельствует рост АНВТ в образцах после экструзии. Высокая плотность дислокаций может затруднять перемещение дислокаций при последующем нагружении, что снижает вклад дислокационных механизмов в дефект модуля Юнга. Влияние изменений фазы ДПС на уменьшение дефекта модуля Юнга после экструзии несущественно, что подтверждается изменениями дефекта модуля Юнга в образцах с содержанием фазы ДПС 0 %. Подводя итог, можно сказать, что основной причиной уменьшения дефекта модуля Юнга после экструзии является увеличение плотности дислокаций.

выводы

Исследование показывает, что модуль Юнга сплавов Mg–Zn–Y увеличивается с более высоким содержанием ДПС из-за сильных межатомных связей фаз ДПС. Однако экструзия снижает модуль Юнга примерно на 3 %, что объясняется образованием текстуры, частичной деградацией фаз ДПС и повышенной плотностью дислокаций. Измерения внутреннего трения показывают рост АНВТ после экструзии, что указывает на более высокую плотность дислокаций, в то время как критическая амплитуда деформации уменьшается в сплавах



Рис. 5. Амплитудная зависимость дефекта модуля Юнга для сплавов с различным содержанием ДПС до и после экструзии.
 Зеленая линия – образцы с 0 % ДПС, черная линия – с 50 % ДПС, красная пунктирная линия – со 100 % ДПС Fig. 5. Amplitude dependence of the softening of Young's modulus for alloys with different LPSO content before and after extrusion.
 Green line samples with 0 % LPSO, black line with 50 % LPSO, red-dashed line with 100 % LPSO

с более высоким содержанием ДПС. Экструзия также уменьшает дефект модуля Юнга, в первую очередь из-за упрочнения, вызванного дислокациями. Микроструктурные изменения, такие как измельчение зерна и образование полос деформации, дополнительно влияют на механические свойства. Эти результаты подчеркивают важность содержания ДПС и процессов экструзии для оптимизации механического поведения магниевых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kawamura Y., Hayashi K., Inoue A., Masumoto T. Rapidly solidified powder metallurgy Mg₉₇Zn₁Y₂ alloys with excellent tensile yield strength above 600 MPa // Materials Transactions. 2001. Vol. 42. № 7. P. 1172– 1176. DOI: <u>10.2320/matertrans.42.1172</u>.
- Cao Furong, Liang Jinrui, Xu Panning, Xu Guangming. Microstructural Evolution, Mechanical Property, and Strengthening in a Lightweight Mg-Y-Zn-Mn Alloy Fabricated by Multidirectional Forging and Hot Rolling // Journal of Materials Engineering and Performance. 2024. DOI: <u>10.1007/s11665-024-10221-2</u>.
- Jiang We, Zou Chunming, Chen Yang, Wei Zunjie. The effect of pressure-induced Mg₆₄Zn₁₅Y₂₁ phase on the mechanical properties of Mg–Zn–Y alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 840. Article number 155682. DOI: <u>10.1016/j.jallcom.2020.155682</u>.
- Deng D.W., Kuo K.H., Luo Z.P., Miller D.J., Kramer M.J., Dennis K.W. Crystal structure of the hexagonal Zn₃MgY phase // Journal of Alloys and Compounds. 2004. Vol. 373. № 1-2. P. 156–160. DOI: <u>10.1016/j.jallcom.2003.10.039</u>.
- Kaminskii V.V., Abe E., Kawamura Y., Dorogin L.M., Romanov A.E. Kinking in LPSO Mg-Zn-Y alloys and other layered materials // Reviews on Advanced Materials and Technologies. 2022. Vol. 4. № 2. P. 15–31. DOI: 10.17586/2687-0568-2022-4-2-15-31.
- Liu Wei, Zhao Yuhang, Zhang Yuntao, Shuai Chuan, Chen Liwen, Huang Zhiquan, Hou Hua. Deformationinduced dynamic precipitation of 14H-LPSO structure

Frontier Materials & Technologies. 2025. № 2

and its effect on dynamic recrystallization in hotextruded Mg-Y-Zn alloys // International Journal of Plasticity. 2023. Vol. 164. Article number 103573. DOI: <u>10.1016/j.ijplas.2023.103573</u>.

- Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y., Yamasaki M., Kawamura Y., Yasuda H.Y., Umakoshi Y. Effect of longperiod stacking ordered phase on mechanical properties of Mg–Zn–Y extruded alloy // Acta Materialia. 2010. Vol. 58. № 19. P. 6282–6293. DOI: <u>10.1016/j.actamat.2010.07.050</u>.
- Xu D.K., Liu L., Xu Y.B., Han E.H. The fatigue crack propagation behavior of the forged Mg–Zn–Y–Zr alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2007. Vol. 431. № 1-2. P. 107–111. DOI: <u>10.1016/j.jallcom.2006.05.043</u>.
- Janeček M., Král R., Dobroň P., Chmelik F., Supik V., Hollander F. Mechanisms of plastic deformation in AZ31 magnesium alloy investigated by acoustic emission and transmission electron microscopy // Materials Science and Engineering: A. 2007. Vol. 462. № 1-2. P. 311–315. DOI: <u>10.1016/j.msea.2006.01.172</u>.
- Kalganov D.A., Philippov S.A., Kaminskii V.V., Ivanov A.Yu., Zasypkin S.V., Merson D.L., Dorogov M.V. Low Amplitude Nonlinear Damping and Effective Modulus in Magnesium Alloys Containing Long-Period Stacking Ordered Structures // Reviews on Advanced Materials and Technologies. 2025. Vol. 7. № 1. P. 63–70. DOI: 10.17586/2687-0568-2025-7-1-63-70.
- Robinson W.H., Edgar A. The Piezoelectric Method of Determining Mechanical Damping at Frequencies of 30 to 200 KHz // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1974. Vol. 21. № 2. P. 98–105. DOI: <u>10.1109/T-SU.1974.29798</u>.
- Лебедев А.Б., Кустов С.Б., Кардашев Б.К. Акустопластический эффект при активном деформировании и ползучести алюминия // Физика твердого тела. 1987. Т. 29. № 12. С. 3563–3569.
- Kaufmann H.J., Pal-Val P.P. Interaction of dislocations with localized pinning points in high-purity molybdenum single crystals // Physica Status Solidi (A). 1980. Vol. 62. № 2. P. 569–575. DOI: <u>10.1002/pssa.2210620226</u>.

- 14. Pal-Val P., Vatazhuk O., Ostapovets A., Král L., Pinc J. Thermoactivated Dislocation Motion in Rolled and Extruded Magnesium: Data of the Low-Temperature Acoustic Experiment // Metals. 2021. Vol. 11. № 10. Article number 1647. DOI: <u>10.3390/met11101647</u>.
- 15. Wang Zixuan, Zheng Jie, Jia Leichen, Liu Waner, Huang Youwang, Yan Zhaoming, Zhang Zhimin, Xue Yong. Abnormal texture formation and mechanical anisotropy of pre-aging extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy with large-scale // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 20. P. 2771–2783. DOI: <u>10.1016/j.jmrt.2022.08.069</u>.
- 16. Chen Tao, Chen Zhiyang, Shao Jianbo, Wang Renke, Mao Longhui, Liu Chuming. Evolution of LPSO phases in a Mg-Zn-Y-Gd-Zr alloy during semicontinuous casting, homogenization and hot extrusion // Materials & Design. 2018. Vol. 152. P. 1–9. DOI: <u>10.1016/j.matdes.2018.04.070</u>.
- 17. Wang Jie, Zhu Gaoming, Wang Leyun, Zhang Xianbing, Knezevic M., Zeng Xiaoqin. Strengthening mechanisms, hardening/softening behavior, and microstructure evolution in an LPSO magnesium alloy at elevated temperatures // Materials Characterization. 2023. Vol. 203. Article number 113066. DOI: <u>10.1016/j.matchar.2023.113066</u>.
- Yoshimoto S., Yamasaki M., Kawamura Y. Microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Zn-Y alloys with 14H long period ordered structure // Materials Transactions. 2006. Vol. 47. № 4. P. 959–965. DOI: <u>10.2320/matertrans.47.959</u>.
- 19. Liu Wei, Su Yu, Zhang Yuntao, Chen Liwen, Hou Hua, Zhao Yuhong. Dissolution and reprecipitation of 14H-LPSO structure accompanied by dynamic recrystallization in hot-extruded Mg₈₉Y₄Zn₂Li₅ alloy // Journal of Magnesium and Alloys. 2023. Vol. 11. № 4. P. 1408– 1421. DOI: <u>10.1016/j.jma.2022.03.018</u>.
- 20. Yin Wujun, Briffod F., Shiraiwa T., Enoki M. Mechanical properties and failure mechanisms of Mg-Zn-Y alloys with different extrusion ratio and LPSO volume fraction // Journal of Magnesium and Alloys. 2022. Vol. 10. № 8. P. 2158–2172. DOI: <u>10.1016/j.jma.2022.02.004</u>.

REFERENCES

- Kawamura Y., Hayashi K., Inoue A., Masumoto T. Rapidly solidified powder metallurgy Mg₉₇Zn₁Y₂ alloys with excellent tensile yield strength above 600 MPa. *Materials Transactions*, 2001, vol. 42, no. 7, pp. 1172– 1176. DOI: 10.2320/matertrans.42.1172.
- Cao Furong, Liang Jinrui, Xu Panning, Xu Guangming. Microstructural Evolution, Mechanical Property, and Strengthening in a Lightweight Mg-Y-Zn-Mn Alloy Fabricated by Multidirectional Forging and Hot Rolling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024. DOI: <u>10.1007/s11665-024-10221-2</u>.
- 3. Jiang We, Zou Chunming, Chen Yang, Wei Zunjie. The effect of pressure-induced Mg₆₄Zn₁₅Y₂₁ phase on the mechanical properties of Mg–Zn–Y alloy. *Journal* of Alloys and Compounds, 2020, vol. 840, article number 155682. DOI: <u>10.1016/j.jallcom.2020.155682</u>.
- Deng D.W., Kuo K.H., Luo Z.P., Miller D.J., Kramer M.J., Dennis K.W. Crystal structure of the hexagonal Zn₃MgY phase. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, vol. 373, no. 1-2, pp. 156–160. DOI: <u>10.1016/j.jallcom.2003.10.039</u>.

- Kaminskii V.V., Abe E., Kawamura Y., Dorogin L.M., Romanov A.E. Kinking in LPSO Mg-Zn-Y alloys and other layered materials. *Reviews on Advanced Materials* and *Technologies*, 2022, vol. 4, no. 2, pp. 15–31. DOI: <u>10.17586/2687-0568-2022-4-2-15-31</u>.
- Liu Wei, Zhao Yuhang, Zhang Yuntao, Shuai Chuan, Chen Liwen, Huang Zhiquan, Hou Hua. Deformationinduced dynamic precipitation of 14H-LPSO structure and its effect on dynamic recrystallization in hotextruded Mg-Y-Zn alloys. *International Journal of Plasticity*, 2023, vol. 164, article number 103573. DOI: <u>10.1016/j.ijplas.2023.103573</u>.
- Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y., Yamasaki M., Kawamura Y., Yasuda H.Y., Umakoshi Y. Effect of long-period stacking ordered phase on mechanical properties of Mg–Zn–Y extruded alloy. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 19, pp. 6282–6293. DOI: <u>10.1016/j.actamat.2010.07.050</u>.
- Xu D.K., Liu L., Xu Y.B., Han E.H. The fatigue crack propagation behavior of the forged Mg–Zn–Y–Zr alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, vol. 431, no. 1-2, pp. 107–111. DOI: <u>10.1016/j.jallcom.2006.05.043</u>.
- Janeček M., Král R., Dobroň P., Chmelik F., Supik V., Hollander F. Mechanisms of plastic deformation in AZ31 magnesium alloy investigated by acoustic emission and transmission electron microscopy. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 462, no. 1-2, pp. 311–315. DOI: <u>10.1016/j.msea.2006.01.172</u>.
- Kalganov D.A., Philippov S.A., Kaminskii V.V., Ivanov A.Yu., Zasypkin S.V., Merson D.L., Dorogov M.V. Low Amplitude Nonlinear Damping and Effective Modulus in Magnesium Alloys Containing Long-Period Stacking Ordered Structures. *Reviews on Advanced Materials and Technologies*, 2025, vol. 7, no. 1, pp. 63–70. DOI: <u>10.17586/2687-0568-2025-7-1-63-70</u>.
- Robinson W.H., Edgar A. The Piezoelectric Method of Determining Mechanical Damping at Frequencies of 30 to 200 KHz. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1974, vol. 21, no. 2, pp. 98–105. DOI: <u>10.1109/T-SU.1974.29798</u>.
- 12. Lebedev A.B., Kustov S.B., Kardashev B.K. Acoustoplastic effect in the active deformation and creep of aluminum. *Fizika tverdogo tela*, 1987, vol. 29, no. 12, pp. 3563–3569.
- Kaufmann H.J., Pal-Val P.P. Interaction of dislocations with localized pinning points in high-purity molybdenum single crystals. *Physica Status Solidi (A)*, 1980, vol. 62, no. 2, pp. 569–575. DOI: <u>10.1002/pssa.2210620226</u>.
- 14. Pal-Val P., Vatazhuk O., Ostapovets A., Král L., Pinc J. Thermoactivated Dislocation Motion in Rolled and Extruded Magnesium: Data of the Low-Temperature Acoustic Experiment. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 10, article number 1647. DOI: <u>10.3390/met11101647</u>.
- 15. Wang Zixuan, Zheng Jie, Jia Leichen, Liu Waner, Huang Youwang, Yan Zhaoming, Zhang Zhimin, Xue Yong. Abnormal texture formation and mechanical anisotropy of pre-aging extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy with large-scale. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 20, pp. 2771–2783. DOI: <u>10.1016/j.jmrt.2022.08.069</u>.
- 16. Chen Tao, Chen Zhiyang, Shao Jianbo, Wang Renke, Mao Longhui, Liu Chuming. Evolution of LPSO phases in a Mg-Zn-Y-Gd-Zr alloy during semi-

continuous casting, homogenization and hot extrusion. *Materials & Design*, 2018, vol. 152, pp. 1–9. DOI: <u>10.1016/j.matdes.2018.04.070</u>.

- 17. Wang Jie, Zhu Gaoming, Wang Leyun, Zhang Xianbing, Knezevic M., Zeng Xiaoqin. Strengthening mechanisms, hardening/softening behavior, and microstructure evolution in an LPSO magnesium alloy at elevated temperatures. *Materials Characterization*, 2023, vol. 203, article number 113066. DOI: <u>10.1016/j.matchar.2023.113066</u>.
- Yoshimoto S., Yamasaki M., Kawamura Y. Microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Zn-Y alloys with 14H long period ordered structure. *Materials*

Transactions, 2006, vol. 47, no. 4, pp. 959–965. DOI: <u>10.2320/matertrans.47.959</u>.

- Liu Wei, Su Yu, Zhang Yuntao, Chen Liwen, Hou Hua, Zhao Yuhong. Dissolution and reprecipitation of 14H-LPSO structure accompanied by dynamic recrystallization in hot-extruded Mg₈₉Y₄Zn₂Li₅ alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, vol. 11, no. 4, pp. 1408– 1421. DOI: <u>10.1016/j.jma.2022.03.018</u>.
- 20. Yin Wujun, Briffod F., Shiraiwa T., Enoki M. Mechanical properties and failure mechanisms of Mg-Zn-Y alloys with different extrusion ratio and LPSO volume fraction. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 10, no. 8, pp. 2158–2172. DOI: <u>10.1016/j.jma.2022.02.004</u>.

Effects of extrusion on Young's modulus and internal friction of magnesium alloys with various long period ordered structure content

 Vladimir V. Kaminskii*^{1,2,5}, PhD (Physics and Mathematics), Head of laboratory of Institute of Advanced Data Transfer Systems
 Dmitrii A. Kalganov^{2,6}, junior researcher of Laboratory of Diffraction Methods for Investigation of Real Crystal-Structures
 Maksim V. Dorogov^{1,7}, PhD (Physics and Mathematics), assistant professor of Institute of Advanced Data Transfer Systems
 Sergei A. Philippov^{2,3,8}, researcher of Laboratory of Diffraction Methods for Investigation of Real Crystal-Structures, assistant professor of Higher School of Mechanics and Control Processes
 Alexey E. Romanov^{1,4,9}, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, chief researcher of Institute of Advanced Data Transfer Systems
 ¹ITMO University, St. Petersburg (Russia)
 ²Ioffe Institute of the RAS, St. Petersburg (Russia)

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg (Russia) ⁴Togliatti State University, Togliatti (Russia)

*E-mail: vvkaminskii@itmo.ru

⁵ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-4388-2459</u> ⁶ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0003-1986-3693</u> ⁷ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0001-5987-3357</u> ⁸ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-7784-555X</u> ⁹ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0003-3738-408X</u>

Received 31.03.2025

Revised 14.04.2025

Accepted 13.05.2025

Abstract: The relevance of this work stems from the growing interest in magnesium alloys with long period ordered structure (LPSO) due to their unique mechanical properties. Investigating the effect of extrusion on Young's modulus and internal friction of such alloys provides a deeper understanding of their mechanical behaviour, which is important for the development of new materials with improved performance properties. This research explores the effect of warm extrusion on the structure, dynamic Young's modulus and internal friction of magnesium alloys containing varying amounts of LPSO phases. Alloys in the Mg–Zn–Y system with estimated LPSO phase contents of 0, 50 and 100 % vol. were analysed using the composite piezoelectric oscillator technique at 100 kHz. The results demonstrate that the Young's modulus increases with higher LPSO content, driven by the enhanced stiffness and strong interatomic bonding of the LPSO phases. Extrusion leads to a 3 % decrease in Young's modulus along the direction parallel to its axis for all samples. This effect is explained by the formation of an elongated texture and an increase in the dislocation density. Internal friction measurements revealed a rise in amplitude-independent internal friction post-extrusion, suggesting higher dislocation density, while the critical strain amplitude decreased in alloys with higher LPSO content. Additionally, Young's modulus softening was reduced after extrusion, primarily due to dislocation-induced hardening. These findings shed light on the mechanical properties of Mg–Zn–Y alloys with LPSO structures, emphasising the effects of extrusion and phase content on their dynamic behaviour.

Keywords: magnesium alloys; long-period stacking-ordered structure; LPSO; internal friction; Young's modulus; microplasticity.

Acknowledgements: The authors are grateful to Professor Alexey Vinogradov (Magnesium Research Center, Kumamoto University) for meaningful discussions and assistance in interpreting the results of the study. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-72-00073, <u>https://rscf.ru/en/project/24-72-00073/</u>.

For citation: Kaminskii V.V., Kalganov D.A., Dorogov M.V., Philippov S.A., Romanov A.E. Effects of extrusion on Young's modulus and internal friction of magnesium alloys with various long period ordered structure content. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 2, pp. 19–27. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-2.