

Влияние структурных факторов на механические характеристики магниевого сплава Ма2-1 при квазистатическом и высокоскоростном деформировании

© Г.В. Гаркушин^{1,2}, С.В. Разоренов^{1,2}, В.А. Красновейкин², А.А. Козулин², В.А. Скрипняк²

¹ Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

² Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: garkushin@icp.ac.ru

(Поступила в Редакцию 7 июля 2014 г.)

Проведены измерения пределов упругости и прочности деформируемого магниевого сплава Ма2-1 с различной структурой и текстурой с целью поиска корреляции между спектром дефектов в материале и сопротивлением деформированию и разрушению при квазистатическом и динамическом нагружении. Исследовались образцы в состоянии поставки, после высокотемпературного отжига, а также образцы, подвергнутые равноканальному угловому прессованию при температуре 250°C. Изучена анизотропия прочностных характеристик при ударном сжатии относительно направления прокатки исходного сплава. Показано, что в отличие от квазистатических условий при ударном нагружении пределы упругости и прочности магниевого сплава Ма2-1 после равноканального углового прессования уменьшаются по сравнению с образцами в состоянии поставки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-31682), гранта Президента РФ МК-3066.2012.8, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН 2П „Вещество при высоких плотностях энергий“ и Программы повышения международной конкурентоспособности и потенциала Томского государственного университета.

1. Введение

Деформируемые сплавы системы Mg–Al–Zn–Mn, к которым относится сплав Ма2-1 (зарубежный аналог AZ31), широко применяются в качестве конструкционных в приборостроении, авиакосмической, автомобильной и других отраслях промышленности, так как обладают низкой плотностью при высоких удельных прочностных характеристиках и пластичности [1]. Исследованиям механических свойств магниевого сплава Ма2-1 с различной зеренной структурой и текстурой, сформированной при интенсивной пластической деформации (ИПД), посвящены работы [2–6]. Закономерности механического поведения исследованы в основном в статических и квазистатических условиях нагружения при скоростях деформирования до 10^3 s^{-1} . Экспериментальные данные о прочностных свойствах сплава Ма2-1 при более высоких скоростях деформирования практически отсутствуют. Известно, что в результате обработки металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации происходит не только изменение размеров зерен и формирование текстуры, но и генерируется большое количество микродефектов различных масштабных уровней (дислокаций, дисклинаций, двойников, микропор, микротрещин) [7]. Повышение плотности дислокаций и двойников приводит к росту сопротивления пластическому течению в квазистатических условиях деформации. Вместе с тем в услови-

ях интенсивных динамических воздействий повышенная плотность микродефектов может ослабить зависимость предела текучести от скорости деформирования. Различие скоростных зависимостей может быть настолько большим, что, как в случае титана и алюминия [8], может измениться знак влияния структурных факторов с переходом от квазистатического к динамическому нагружению. Относительные вклады внутренней структуры в сопротивление деформированию могут быть выявлены экспериментально путем варьирования структуры материала и скорости деформирования [6,9]. В настоящей работе проведены сравнительные исследования упругопластических и прочностных характеристик магниевого сплава Ма2-1 при квазистатической скорости деформирования 10^{-3} s^{-1} и скоростях деформирования свыше 10^4 s^{-1} при ударно-волновом нагружении испытываемых образцов [10].

2. Материалы и постановка эксперимента

Исследуемый магниевый сплав Ма2-1 имел элементный состав: 93.7% Mg, 4.36% Al, 1.34% Zn и 0.39% Mn и плотность 1.79 g/cm^3 . Эксперименты выполнялись с образцами Ма2-1 в крупнозернистом (в состоянии поставки) и мелкозернистом состоянии. Образцы для всех исследований вырезались электроэрозионным способом из промышленного прутка диаметром 60 mm. С це-

лю изменения текстуры и размера зерна в образцах магниевого сплава был использован метод многопроходного равноканального углового прессования (РКУП) с ортогональным сопряжением каналов [7]. Поскольку исследуемый деформируемый магниевый сплав Ма2-1 при достаточно высокой прочности обладает низкой пластичностью при температурах $< 200^\circ\text{C}$, РКУП проводили при температуре $250 \pm 2^\circ\text{C}$. Традиционные методы деформации сплавов (прокат, экструзия, прямое прессование и др.) позволяют измельчить средний размер зерна до микронного уровня, но не могут изменить тип базисной текстуры, тормозящей активность базисного и других типов скольжения [3].

РКУП образцов проводили с использованием противодавления. Каждый цикл по траектории B_c при заданной температуре включал в себя продавливание блока через канал постоянного сечения с поворотом заготовки на 90° вокруг продольной оси до четырех раз. Проведенный микроструктурный анализ исходных образцов показал, что исследуемый магниевый сплав в состоянии поставки обладает распределением размеров зерен в диапазоне от 2 до $55 \mu\text{m}$. После РКУП при температуре 250°C в сплаве Ма2-1 происходит измельчение зерна за счет интенсивных пластических деформаций и динамической рекристаллизации. При выбранных режимах прессования в блоке формируется более однородная зеренно-субзеренная структура со средним размером зерна $7 \mu\text{m}$. Отметим, что после РКУП в сплаве Ма2-1 отмечены отдельные крупные зерна с размерами $\sim 15\text{--}30 \mu\text{m}$, которые не претерпели измельчения. На рис. 1 (*a, b*) показаны гистограммы распределения зерен по размерам, где d — размер зерна.

Для исследуемых образцов были определены значения твердости по Роквеллу на установке ТН-300 с использованием стального индентора диаметром 1.6 mm, силой 60 kgF и выдержкой 3 s. Твердость составила для образцов сплава в состоянии поставки $61 \pm 2 \text{ HRF}$, а после РКУП $78 \pm 3 \text{ HRF}$ соответственно. Количество проходов РКУП от одного до четырех слабо повлияло на твердость образцов.

Исследования прочностных свойств сплава Ма2-1 при квазистатическом осевом растяжении проведены на электромеханической испытательной машине INSTRON 5948 при скорости деформации образцов 10^{-3} s^{-1} . Образцы для испытания на растяжение в форме плоских двусторонних лопаток были вырезаны электроэрозионным методом из материала в исходном состоянии и из образцов, подвергнутых многопроходному РКУП, вдоль их оси. Размеры рабочей части образцов были приняты $5 \times 1.2 \times 10 \text{ mm}$.

Высокие скорости деформирования в экспериментах были реализованы путем нагружения образцов плоскими ударными волнами, которые генерировались в них при соударении с алюминиевыми пластинами-ударниками, разогнанными до скоростей $630 \pm 30 \text{ m/s}$ с помощью взрывных устройств [10]. В экспериментах

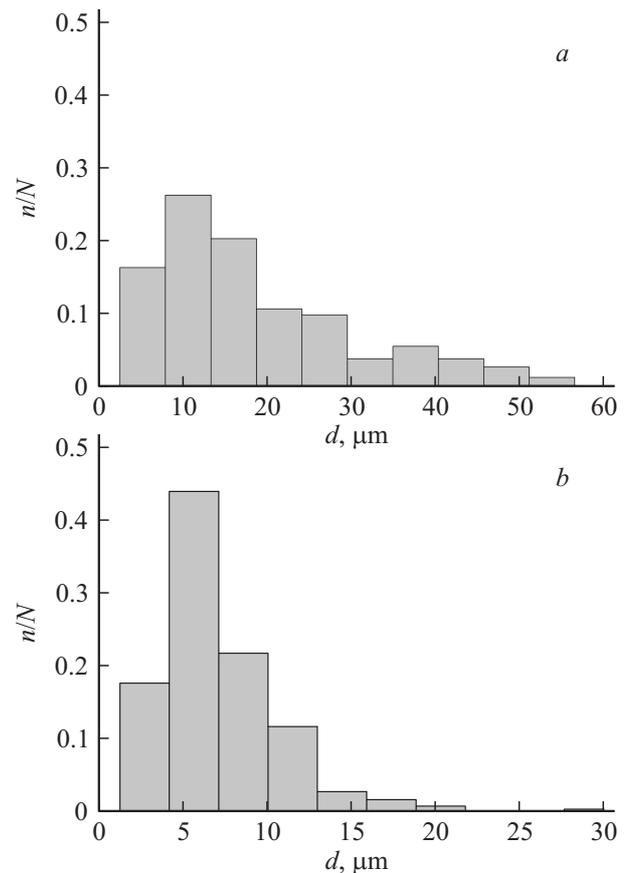


Рис. 1. Гистограммы распределения зерен по размерам в магниевом сплаве Ма2-1: *a* — состояние поставки, *b* — после РКУП.

осуществлялась непрерывная регистрация скорости движения свободной тыльной поверхности образца с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [11,12]. Профили скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$ фиксировались с разрешением $\sim 1 \text{ ns}$ по времени и $\pm 3 \text{ m/s}$ по величине измеряемой скорости. Все испытания проведены при комнатной температуре.

3. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 представлены диаграммы напряжение (σ) — инженерная деформация ($\Delta l/l_0$), полученные при испытаниях на одноосное растяжение образцов сплава Ма2-1 в состоянии поставки и после 2 и 4 проходов РКУП по траектории B_c . Результаты этих экспериментов показали, что при уменьшении размера зерна и формировании дефектной структуры исследуемый сплав демонстрирует увеличение значений предела текучести от 150 до 200 МПа и предела кратковременной прочности от 250 до 295 МПа, а также предельной деформации до разрушения образцов после РКУП с 17.5 до 24%. В таблице представлены значения прочностных характе-

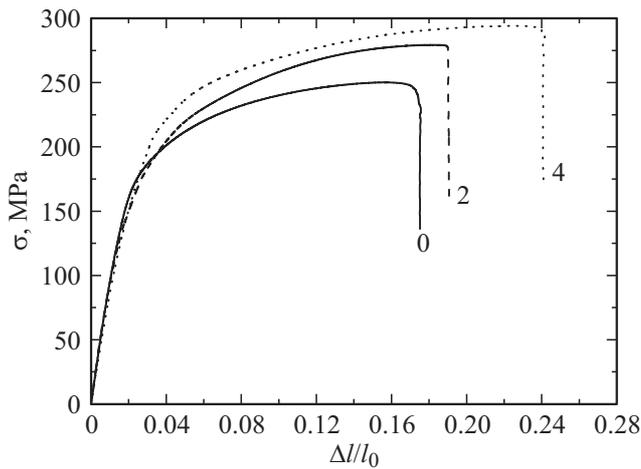


Рис. 2. Результаты испытаний на одноосное растяжение плоских образцов сплава Ма2-1. Цифрами у кривых указано количество проходов РКУП.

ристик, полученные в результате обработки данных при квазистатическом растяжении.

В работе [3] отмечается, что для аналогичного сплава в последовательности состояний: исходное состояние — РКУП при растяжении на машине INSTRON-1163 происходит уменьшение предела текучести с 220 до 132 МПа, предела прочности с 279 до 245 МПа при возрастании равномерного относительного удлинения. Для сплава AZ31 авторы работы [6] указывают, что соотношение и объемное распределение в зеренной структуре мелких и крупных зерен может оказывать на сопротивление пластической деформации магниевых сплавов существенно разное (качественное) влияние. Отмечено, что разные траектории РКУП (A_c , B_c , E и др.) приводят к разным текстурам и разному объемному распределению крупных и мелких зерен в объеме после прессования. В результате предел текучести может не меняться, а предельная деформация до разрушения увеличиться в несколько раз. При другой текстуре и распределении зерен, наоборот, возрастает предел текучести и прочности, а предельная деформация до разрушения уменьшается. Применение режима прессования маршрутом B_c дает возможность формирования зеренных структур с таким распределением размеров, при котором возрастают обе прочностные характеристики: пределы прочности и текучести и предельные степени деформации. Известно, что наличие в структуре мелкозернистых сплавов крупных зерен или образование бимодальных зеренных структур

приводит к существенному повышению пластичности ультрамелкозернистых сплавов [7]. Различие результатов данной работы с работой [3] может быть связано как с разницей в исходной текстуре и структуре используемых в этих работах магниевых сплавов, так и с отличием в технологии изготовления образцов методами РКУП.

Для проверки предположения о возможном различии зависимостей напряжения течения от скорости деформации магниевых сплавов в крупнокристаллическом и мелкозернистом состояниях, как это наблюдалось в случае титана и алюминия [8], с переходом от квазистатического к высокоскоростному нагружению, были проведены эксперименты по их ударному сжатию. Во всех ударно-волновых экспериментах в образцах было реализовано напряженное состояние, близкое к гидростатическому при одномерной деформации путем нагружения последних плоскими ударными волнами [10]. Максимальная амплитуда ударных волн в большинстве опытов не превышала ~ 4 ГПа.

В первой серии ударно-волновых экспериментов была сделана оценка влияния высокотемпературного нагрева на упругопластические характеристики магниевого сплава в состоянии поставки путем сравнения его прочностных характеристик в исходном и отожженном состоянии. Предварительная интенсивная пластическая деформация образцов магниевого сплава Ма2-1 путем РКУП проводилась при температуре 250°C , что могло приводить к его отжигу. В свою очередь отжиг позволяет снять остаточные внутренние напряжения исходной заготовки. Ранее [9] при исследовании алюминиевого сплава Д16Т отмечалось сильное влияние отжига, который привел примерно к двукратному падению твердости и уменьшению динамического предела текучести в четыре–пять раз. Предварительный отжиг образцов магниевого сплава проводился при 450°C в течение 20 min. Измерение твердости образцов до и после отжига показало отсутствие влияния термической обработки, в обоих случаях ее значение составляло 61 ± 2 HRF.

На рис. 3 показаны зарегистрированные профили скорости тыльной поверхности плоских образцов от времени в неотожженных (пунктирная линия) и отожженных образцах магниевого сплава в состоянии поставки. На волновых профилях регистрируется выход на поверхность упругопластической волны сжатия и части следующей за ней волны разрежения. При выбранном соотношении толщин ударника и образца условия нагружения вблизи свободной тыльной поверхности образца соответствуют началу затухания ударной волны под действием нагоняющей ее волны разрежения. После отражения импульса сжатия от свободной поверхности внутри образца генерируются растягивающие напряжения, в результате чего инициируется его разрушение — откол. При этом происходит релаксация растягивающих напряжений и формируется волна сжатия (откольный импульс), выход которой на поверхность образца вызывает второй подъем ее скорости. Дальнейшие затухающие

Механические свойства сплава Ма2-1 до и после РКУП

| Состояние образцов | Предел текучести, МПа | Предел кратковременной прочности, МПа |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Исходные | 150 ± 5 | 250 ± 10 |
| 2 прохода РКУП | 160 ± 5 | 280 ± 10 |
| 4 прохода РКУП | 200 ± 5 | 295 ± 10 |

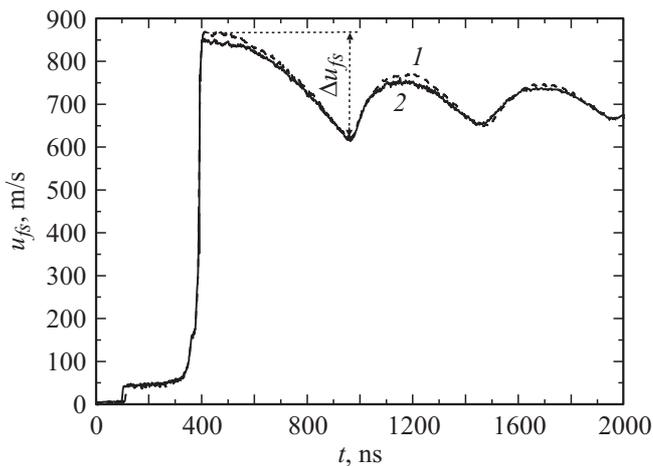


Рис. 3. Результаты измерений профилей скорости свободной поверхности отожженных (1) и неотожженных (2) образцов магниевого сплава. Толщина образцов 9.84 и 10.78 mm, нагружение ударом алюминиевой пластины толщиной 2 mm со скоростью 630 ± 30 m/s.

колебания скорости связаны с реверберацией откольного импульса в оторвавшейся от образца откольной пластине. Присутствие дополнительной ступеньки на фронте пластической ударной волны (на уровне 160 m/s) связано с переотражением упругого предвестника между свободной поверхностью и пластической ударной волной.

Напряжение одноосного сжатия за фронтом упругого предвестника, равное динамическому пределу упругости материала, рассчитывается по формуле [10]

$$\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{fs}^{HEL} / 2, \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность сплава, c_l — продольная скорость звука, u_{fs}^{HEL} — величина скорости свободной поверхности за фронтом упругого предвестника. Декремент скорости поверхности Δu_{fs} (рис. 3) при ее спаде от максимума до значения перед фронтом откольного импульса пропорционален величине разрушающего напряжения — откольной прочности материала в данных условиях нагружения. В линейном (акустическом) приближении ее величина равна

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{2} \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta u), \quad (2)$$

где c_b — объемная скорость звука, δu — поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скоростей фронта откольного импульса и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним [13]. Подобные искажения имеют место, когда релаксация напряжений при разрушении порождает в растянутом материале волну сжатия, фронт которой представляет собой упругую волну, нагоняющую разгрузочную часть падающего импульса сжатия, движущуюся с объемной скоростью звука (c_b). Полученные результаты показали, что предварительный отжиг не повлиял на характер

упругопластического перехода и величину динамического предела упругости, а откольная прочность при этом незначительно уменьшилась с 1.04 до 1.02 GPa.

При максимальном давлении ударного сжатия на профилях скорости свободной поверхности магниевого сплава регистрируются слабые нерегулярные осцилляции. Подобные осцилляции скорости могут быть вызваны деформационным процессом двойникования в волне сжатия при максимальном сжатии [14,15]. В работе [15] подобные осцилляции наблюдались для монокристаллов магния в направлении (0001). Проведенные микроструктурные исследования образцов монокристалла магния (0001) после предварительного ударного сжатия выявили интенсивное пирамидальное двойникование в структуре монокристалла [15].

Известно, что основным упрочняющим механизмом при ударном деформировании является процесс двойникования и концентрация двойников в объеме материала растет с ростом давления [16]. Двойникование приводит к заметному упрочнению кристаллов магния [14]. Для оценки влияния интенсивности ударного сжатия на сопротивление магниевого сплава динамическому разрушению были проведены дополнительные измерения откольной прочности отожженного образца в состоянии поставки толщиной 8.98 mm при нагружении ударом алюминиевой пластины толщиной 2 mm со скоростью 1.8 km/s. Как показали эти опыты, измеренное значение откольной прочности при давлении ударного сжатия ~ 12.5 GPa составило 1.12 GPa, что на 8% больше, чем при скорости соударения 630 ± 30 m/s, когда максимальная амплитуда ударной волны составляла 3.8 GPa.

Как известно, сформированная разными технологическими методами (прокатом, экструзией, термообработкой и т.п.) исходная текстура материала оказывает влияние на сопротивление материалов деформированию и разрушению [6,9]. Для выяснения влияния текстуры образца магниевого сплава в состоянии поставки на характер динамического деформирования и разрушения были проведены эксперименты, в которых варьировались направления ударного сжатия относительно направления прокатки. На рис. 4 приведены результаты измерений профилей скорости свободной поверхности отожженных образцов сплава Ma2-1 в состоянии поставки. Ударное нагружение осуществлялось в направлении прокатки (\parallel) и в поперечном направлении (\perp) с помощью алюминиевых ударников толщиной 2 mm при скорости соударения 630 ± 30 m/s. Непосредственное сопоставление этих волновых профилей показывает, что во втором случае откольная прочность образцов примерно на 17% меньше по сравнению с ее значением, полученным для первого случая, когда ее величина составила 1.04 GPa. В этом отношении поведение магниевого сплава Ma2-1 подобно поведению ранее исследованных в такой же постановке текстурированных сталей и алюминиевого сплава Д16Т [9,17–20]. Наблюдавшееся в

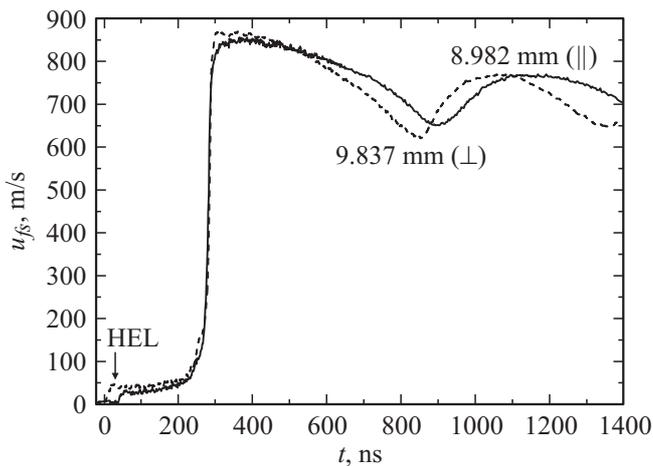


Рис. 4. Профили скорости свободной поверхности образца магниевого сплава Ма2-1 в состоянии поставки, полученные при ударно-волновом нагружении в направлении прокатки и в поперечном направлении. Цифрами указана толщина образцов.

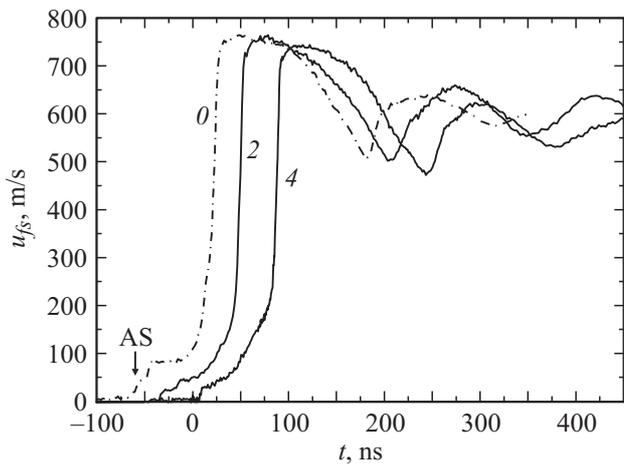


Рис. 5. Профили скорости свободной поверхности образцов отожженного сплава (линия 0) и сплава, подвергнутого РКУП, соответственно после 2 и 4 проходов — линии 2 и 4 соответственно.

настоящей работе различие значений откольной прочности в зависимости от ориентации ударной нагрузки относительно направления проката, вероятно, является следствием того, что потенциальные очаги разрушения имеют вытянутую форму и ориентированы в направлении прокатки. Анализ результатов опытов показывает, что текстура сплава Ма2-1 может оказывать влияние на динамический предел упругости. При нагружении поперек направления проката значение динамического предела упругости для сплава Ма2-1 оказалось равным $\sigma_{HEL} = 215$ МПа, что на $\sim 36\%$ больше значений предела упругости образцов, нагружаемых в направлении прокатки. Как известно, макроскопическая пластическая деформация в гомогенных средах осуществляется путем сдвигов в направлениях, ориентированных под углами, близкими к 45° , к главным осям, в нашем случае — к на-

правлению сжатия. Различие условий одноосного сжатия в направлении прокатки и в поперечном направлении заключается в том, что в первом случае все сдвиги происходят под углом 45° к волокнам текстуры, в то время как во втором случае часть сдвигов должна происходить путем смещения волокон текстуры друг относительно друга. Несколько более высокие значения динамического предела упругости сплава, полученные при сжатии в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, свидетельствуют о том, что смещение волокон текстуры друг относительно друга при высокоскоростной деформации затруднено и требует приложения более высоких напряжений [9].

На рис. 5 показаны профили скорости свободной поверхности образцов отожженного и после 2 и 4 проходов РКУП сплава Ма2-1. Толщина всех образцов была ~ 2 мм, нагружение осуществлялось ударом алюминиевой пластины толщиной 0.4 мм со скоростью 630 ± 30 м/с. На волновых профилях регистрируется слабая волна сжатия перед фронтом упругого предвестника (отмечена как AS на рис. 5), которая возникает в результате воздействия на образцы воздушной ударной волны перед летящим ударником. Изменение размера зерна и текстуры в РКУП привело к уменьшению динамического предела упругости материала с 410 МПа (линия 0 на рис. 5) до 220 МПа и практически не повлияло на величину откольной прочности. Из сравнения волновых профилей видно, что увеличение количества проходов РКУП для исследуемых образцов с 2 до 4 не влияет на характер упругопластического деформирования и разрушения. Ожидалось, что изменение текстуры и размера зерна магниевых образцов путем РКУП приведет к повышению механических характеристик сплава по сравнению с исходными недеформированными образцами, как это было найдено при квазистатическом деформировании. Необходимо отметить, что наибольшим значением твердости обладали как раз мелкозернистые образцы магниевого сплава. В работе [21] отмечается отсутствие влияния измененной структуры на упругопластические характеристики в мелкозернистых образцах тантала по отношению к исходным, при этом значение его твердости увеличилось примерно на 30%.

На рис. 6 представлены результаты измерений динамического предела упругости образцов в состоянии поставки [22] и в мелкозернистом состоянии. Максимальные значения динамического предела упругости найдены для образцов в исходном состоянии. В работе [3] отмечается, что для ГПУ металлов уменьшение динамического предела упругости можно связать с радикальным изменением текстуры материала из-за больших сдвиговых деформаций, преимущественно проходящих в плоскостях, наклоненных под углом $45-50^\circ$ к направлению прессования, и протекания процесса динамической рекристаллизации. После РКУП при 250°C в магниево сплаве Ма2-1 происходит измельчение зерна. При этом зерна имеют ориентировки, характерные для

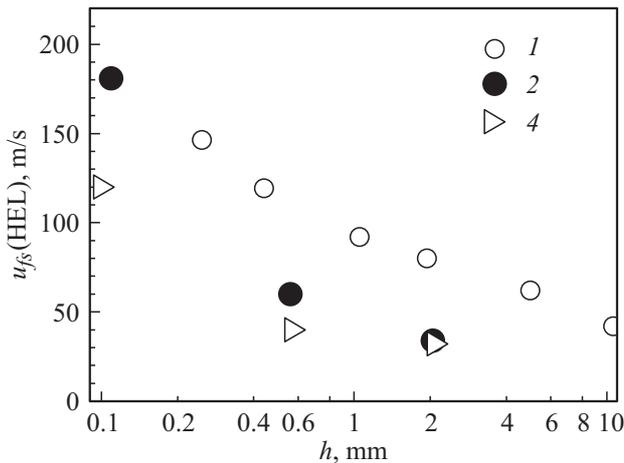


Рис. 6. Зависимость динамического предела упругости от толщины исследуемых образцов магниевого сплава Ма2-1. 1 — данные [22]. 2 и 4 — после 2 и 4 проходов РКУП соответственно.

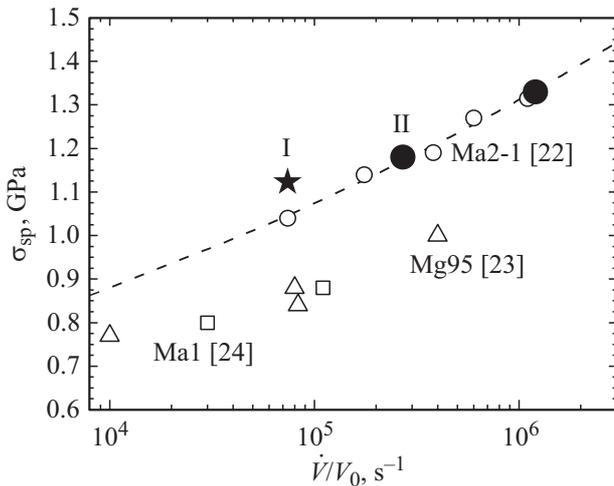


Рис. 7. Результаты измерений откольной прочности магния и магниевых сплавов, полученные в данной работе и в [22–24], в зависимости от скорости деформации \dot{V}/V_0 в волне разрежения.

наклоненных к направлению прессования на $40\text{--}50^\circ$ базисных полюсов. Авторы работы [3] предположили, что пластическая деформация при одноосном растяжении при комнатной температуре исследуемого сплава после различных состояний обеспечивается базисным (0001) и призматическим скольжением дислокаций вдоль направления $\langle 1120 \rangle$, пирамидальным $\langle 1122 \rangle$ скольжением дислокаций вдоль направления $\langle 1123 \rangle$ и двойникованием (1012) $\langle 1011 \rangle$. Полученные в настоящей работе результаты показывают, что ориентационные факторы и соответственно начальные критические напряжения сдвига для базисного скольжения в данном сплаве уменьшаются после РКУП.

На рис. 7 показана зависимость разрушающих напряжений при отколе в сплаве Ма2-1 от скорости деформа-

ции. Под скоростью объемной деформации понимается скорость расширения вещества в волне разрежения, определяемая как

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = -\frac{\dot{u}_{fsr}}{2c_b}, \quad (3)$$

где \dot{u}_{fsr} — измеренная скорость спада скорости свободной поверхности испытуемого образца в разгрузочной части импульса ударного сжатия. I — значение откольной прочности сплава Ма2-1, полученное при скорости ударника 1.8 km/s. II — средние значения откольной прочности для исследуемых мелкозернистых образцов после 2 и 4 проходов РКУП. Для сравнения приведены измеренные ранее значения откольной прочности крупнозернистого литого магния Mg95 [23] и листового магния Ma1 [24]. Из рис. 7 следует, что откольная прочность образцов магниевого сплава после РКУП совпадает с данными по откольной прочности, полученным ранее в работе [22] для магниевого сплава Ма2-1 в состоянии поставки, т.е. интенсивная пластическая деформация не оказывает заметного влияния на его сопротивление откольному разрушению.

4. Заключение

Представлены новые результаты измерений квазистатических и динамических пределов текучести и динамической прочности магниевого сплава Ма2-1 в состоянии поставки, отожженном состоянии, а также после его интенсивной пластической деформации методом равноканального углового V_c прессования при температуре 250°C . Проведены экспериментальные исследования влияния направления ударной нагрузки относительно текстуры материала на величины динамического предела упругости и величину откольной прочности. Установлено, что при ориентации направления ударно-волнового воздействия параллельно направлению прокатки сопротивление субмикросекундному разрушению сплава Ма2-1 меньше, чем при ударе в направлении проката. Предварительный отжиг сплава не влияет на характер высокоскоростного деформирования.

Условный предел текучести и временное сопротивление магниевого сплава Ма2-1 при квазистатическом нагружении возрастают в результате изменения структуры материала при многопроходном РКУП. При ударно-волновом нагружении изменение размера зерна и текстуры материала в результате многопроходного РКУП приводит к уменьшению динамического предела упругости и не оказывает существенного влияния на величину откольной прочности. Количество проходов РКУП при этом практически не влияет на прочностные свойства материала.

Авторы выражают благодарность Ермолову Л.Г. за помощь в проведении взрывных экспериментов.

Список литературы

- [1] Магниевые сплавы. Ч. 1: Справочник. Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов / Под ред. И.И. Гурьева, М.В. Чухрова. Металлургия, М. (1978). 296 с.
- [2] В.Н. Серебряный, Т.М. Иванова, В.И. Копылов, С.В. Добаткин, Н.Н. Позднякова, В.А. Пименов, Т.И. Савелова. *Металлы* **4**, 82 (2010).
- [3] В.Н. Серебряный, Г.С. Дьяконов, В.И. Копылов, Г.А. Салищев, С.В. Добаткин. *ФММ* **114**, 5, 488 (2013).
- [4] В.Н. Серебряный, С.В. Добаткин, В.И. Копылов. *Технология легких сплавов* **3**, 28 (2009).
- [5] F. Zhao, Y. Li, T. Suo, W. Huang, J. Liu. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **20**, 1316 (2010).
- [6] G. Wanc, B.L. Wua, Y.D. Zhanga, G.Y. Shaa, C. Esling. *Mater. Sci. Eng. A* **527**, 2915 (2010).
- [7] Р.З. Валиев, И.В. Александров. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. Академкнига, М. (2007). 398 с.
- [8] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.С. Савиных, Е.Б. Зарецкий, Ю.Р. Колобов. Исследование структурных уровней, определяющих сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению металлов и сплавов. Препринт ОИВТ РАН № 1-478, М. (2004). 32 с.
- [9] Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов, Г.И. Канель. *ЖТФ* **78**, 11, 53 (2008).
- [10] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. Ударноволновые явления в конденсированных средах. Янус-К, М. (1996). 407 с.
- [11] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.* **43**, 11, 4669 (1972).
- [12] T. Antoun, L. Seaman, D.R. Curran, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin. *Spall Fracture*. Springer, NY (2003). 404 p.
- [13] Г.И. Канель. *ПМТФ* **42**, 2, 194 (2001).
- [14] Г.П. Эпштейн, О.А. Кайбышев. Высокоскоростная деформация и структура металлов. Металлургия, М. (1971). 200 с.
- [15] G.V. Garkushin, A.S. Savinykh, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, D. Jones, W.G. Proud, L.R. Botvina. *J. Phys. Conf. series* **500** (2014). P. 112 027.
- [16] М.А. Мейерс, Л.Е. Мурр. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Пер. с англ. Металлургия, М. (1984). 512 с.
- [17] В.А. Огородников, Е.Ю. Боровкова, С.В. Ерунов. *ФГВ* **40**, 5, 109 (2004).
- [18] В.Д. Глузман, Г.И. Канель, В.Ф. Лоскутов, В.Е. Фортов, И.Е. Хорев. *Проблемы прочности* **8**, 52 (1985).
- [19] G.T. Gray III, N.K. Bourne, M.A. Zocher, P.J. Maudlin, J.C.F. Millett. In: *Shock Compression of Condensed Matter-1999* / Ed. M.D. Furnish, L.C. Chhabildas, R.S. Hixson. AIP Press. Woodbury, N. Y. (2000). P. 509.
- [20] G.T. Gray III, M.F. Lopez, N.K. Bourne, J.C.F. Millett, K.C. Vecchio. In: *Shock Compression of Condensed Matter-2001* / Ed. M.D. Furnish, N.N. Thadhani, Y. Horie. AIP Press. Melville, N. Y. (2002). P. 479.
- [21] С.В. Разоренов, Г.И. Канель, Г.В. Гаркушин, О.Н. Игнатова. *ФТТ* **54**, 4, 742 (2012).
- [22] Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. *ФТТ* **54**, 5, 1012 (2012).
- [23] G.I. Kanel, C.V. Razorenov, A.A. Bogatch, A.V. Utkin, V.E. Fortov, D.E. Grady. *J. Appl. Phys.* **79**, 11, 8310 (1996).
- [24] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, В.Е. Фортов. *ДАН СССР*, **275**, 2, 369 (1984).