

Компьютерное прогнозирование разрушения цилиндрической заготовки из магниевого сплава в процессе равноканального углового прессования

Волкова Елена Павловна¹, младший научный сотрудник
Научно-исследовательского института физики перспективных материалов
Худододова Ганджина Дастамбуевна², младший научный сотрудник
Научно-исследовательского института физики перспективных материалов
Боткин Александр Васильевич³, доктор технических наук,
профессор кафедры материаловедения и физики металлов
Валиев Руслан Зуфарович^{*4}, доктор физико-математических наук, профессор,
директор Научно-исследовательского института физики перспективных материалов
Уфимский университет науки и технологий, Уфа (Россия)

*E-mail: ruslan.valiev@ugatu.su

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7183-4077>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1273-8518>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9522-280X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4340-4067>

Поступила в редакцию 03.05.2024

Пересмотрена 18.09.2024

Принята к публикации 21.10.2024

Аннотация: Основной сложностью в использовании магниевых сплавов, применяемых в медицине в качестве биоразлагаемых материалов, является труднодеформируемость, что, в свою очередь, приводит к частым разрушениям образцов во время интенсивной пластической деформации. В работе показано, что температурный режим равноканального углового прессования (РКУП) магниевого сплава системы Mg–Zn–Ca, обеспечивающий деформирование образцов без разрушения, возможно определять по результатам конечно-элементного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки, расчета поврежденности сплава с использованием модели Кокрофта – Лэтэма и прогнозирования области разрушения образца. Моделирование показало, что поверхностная область заготовки, примыкающая при РКУП к внутреннему углу матрицы, является областью возможного разрушения магниевого сплава. Значение поврежденности сплава при РКУП в этой области при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше 1, что соответствует неразрушению металла. Для верификации результатов компьютерного моделирования выполнено физическое моделирование РКУП, получены заготовки без признаков разрушения. Проведено исследование механических свойств магниевого сплава Mg–1%Zn–0,06%Ca до и после обработки РКУП по выбранному режиму: предел прочности повысился на 45 %, твердость увеличилась на 16 %, при этом пластичность повысилась на 5 %.

Ключевые слова: магниевые сплавы; напряженно-деформированное состояние; конечно-элементное компьютерное моделирование; поврежденность сплава; равноканальное угловое прессование; микротвердость; предел прочности.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 24-43-20015 (<https://rscf.ru/project/24-43-20015/>). Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНиТ».

Для цитирования: Волкова Е.П., Худододова Г.Д., Боткин А.В., Валиев Р.З. Компьютерное прогнозирование разрушения цилиндрической заготовки из магниевого сплава в процессе равноканального углового прессования // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 4. С. 19–28. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-2.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие магниевые сплавы привлекают повышенное внимание исследователей, занимающихся биоматериалами для медицинского применения. Эти сплавы содержат химические элементы, которые благотворно взаимодействуют с человеческим организмом. Однако эти сплавы в литом состоянии обладают низкими показателями прочности и коррозионной стойкости для их успешного применения при изготовлении биоразстворимых имплантатов, используемых в челюстно-лицевой хирургии и ортопедии [1; 2]. В настоящей работе для повышения прочности сплава Mg–1%Zn–0,06%Ca использовали один из эффектив-

ных подходов – формирование в них ультрамелкозернистой структуры методами интенсивной пластической деформации [3–5], а именно обработкой заготовок равноканальным угловым прессованием (РКУП).

Литые магниевые сплавы являются труднодеформируемыми материалами, малопластичными при деформации при комнатной температуре и склонными к разрушению [6–8]. В экспериментальных исследованиях температуру деформационной обработки зачастую определяют опытным путем с большими затратами времени и материальных ресурсов. Альтернативой опытному определению температурного режима является использование моделей разрушения металлов при обработке давлением.

В механике обработки металлов давлением количественную оценку поврежденности [9] – микроскопических нарушений сплошности (субмикро- и микропор, микротрещин) металла выполняют с использованием косвенных относительных показателей. Например, в соответствии с методикой В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова¹ поврежденность металла в материальной точке деформируемого тела – это отношение степени деформации, накопленной материальной точкой в процессе деформирования, к максимально возможной степени деформации металла, накопленной к моменту исчерпания способности деформироваться без разрушения, т. е. к моменту накопления металлом предельной поврежденности, равной 1, когда лавинообразно возникают макротрещины – этот момент называют разрушением. Если накопление предельной поврежденности, равной 1, происходит в материальной точке поверхности деформируемого образца, то разрушение металла в этом месте поверхности визуально обнаруживается появлением трещины. Если накопление предельной поврежденности, равной 1, происходит в какой-либо материальной точке внутри деформируемого образца, то разрушение металла в этом месте в виде поры обнаруживается не визуально, а с использованием специальной техники, например прибора с использованием ультразвуковых излучений.

В работе [10] впервые показано, что поврежденность металла в рамках модели Кокрофта – Лэтэма возможно количественно и косвенно рассчитать, с учетом изменяющегося напряженного состояния, как отношение удельной работы положительных внутренних сил (главных нормальных положительных напряжений), действующих на материальную точку в процессе деформации, к максимально возможной удельной работе положительных внутренних сил, соответствующей моменту исчерпания металлом способности деформироваться без разрушения. В работах [11; 12] показано, что нормализованная модель разрушения Кокрофта – Лэтэма обладает более высокой точностью прогнозирования трещин в различных технологических процессах, дальнейшее развитие этот подход получил в работах [13; 14].

Как отмечено в работе [15], трудность выбора и оптимизации схемы РКУП в том, что пристеночные поля течения, «переупрочнение» и скрытое повреждение трудно наблюдаемы и плохо прогнозируемы. Поэтому разработка новых и проверка имеющихся методик прогнозирования разрушения металла при РКУП, особенно применительно к магниевым сплавам, является актуальной и важной задачей. Перспективным решением этой задачи является использование компьютерного моделирования для анализа процессов повреждаемости заготовки при РКУП, которое базируется на прогнозировании области разрушения образца [16].

Цель исследования – определение с использованием компьютерного моделирования такого температурного режима обработки равноканальным угловым прессованием (РКУП) сплава Mg–Zn–Ca, которое обеспечивает деформирование образцов без разру-

шения, и достижение в сплаве повышенных механических свойств.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные исследования включали физический эксперимент и конечно-элементное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния заготовки в программном комплексе DEFORM-3D, а также расчет поврежденности сплава.

Исходные цилиндрические образцы (заготовки) магниевого сплава Mg–1%Zn–0,06%Ca диаметром 20 мм и длиной 100 мм для физического моделирования изготавливали на токарном станке из круглой отливки, полученной гравитационным литьем. Сплав Mg–1%Zn–0,06%Ca был отлит на Соликамском опытно-металлургическом заводе (Россия). Химический состав был определен оптическим эмиссионным спектрометром Thermo Fisher Scientific ARL 4460 OES (США) и представлен в таблице 1. С целью выравнивания химического состава по объему образца и устранения последствий дендритной ликвации литые образцы были термически обработаны (подвергнуты гомогенизационному отжигу) в муфельной печи Nabertherm при температуре 450 °С в течение 24 ч с охлаждением в воду [17]. Это состояние образца было принято исходным.

Физическое моделирование выполняли в оснастке для РКУП, изготовленной с углом пересечения цилиндрических каналов 120°. Оснастку нагревали до нужной температуры с помощью двух электрических нагревательных элементов в форме хомутов, установленных на матрицу. Исходная заготовка перед РКУП нагревалась в камерной печи электросопротивления до нужной температуры. Каждый последующий проход РКУП выполняли с поворотом на 90° вокруг продольной оси заготовки. Обработку РКУП проводили по режиму, описанному в работе [18] для сплава системы Mg–Zn–Ca: первый и второй проходы выполняли при 400 °С; третий и четвертый при 350 °С; пятый и шестой при 300 °С; седьмой и восьмой при 250 °С.

На первом этапе теоретических исследований решали термопластическую задачу с использованием программного продукта DEFORM-3D – пошагово определяли неоднородное в объеме заготовки напряженно-деформированное состояние. Конечно-элементное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния заготовки при РКУП (рис. 1) проводилось при следующих допущениях (обычно используемых в практике моделирования):

- 1) задачу решали в условиях объемного напряженно-деформированного состояния;
- 2) в неизотермических условиях, с учетом теплового эффекта пластической деформации при начальной температуре заготовки (20...350) °С;
- 3) модель материала заготовки – пластическая среда, зависимости напряжения текучести от степени деформации сплава Mg–1%Zn–0,06%Ca, полученные по результатам предварительно проведенных нами механических испытаний на растяжение в интервалах температур и скоростей деформаций, соответствующих реализующимся при РКУП, в табличном виде вводили при подготовке базы данных;

¹ Пластичность и разрушение / под ред. В.Л. Колмогорова. М.: Металлургия, 1977. 336 с.

Таблица 1. Химический состав сплава Mg-1%Zn-0,06%Ca
Table 1. Chemical composition of the Mg-1%Zn-0.06%Ca alloy

Массовая доля элементов										
Zn	Zr	Al	Fe	Mn	Ni	Cu	Si	Ca	Pb	Sn
0,953	≤0,001	0,011	0,027	0,0026	0,0008	0,0008	0,0025	0,0641	0,018	≤0,001

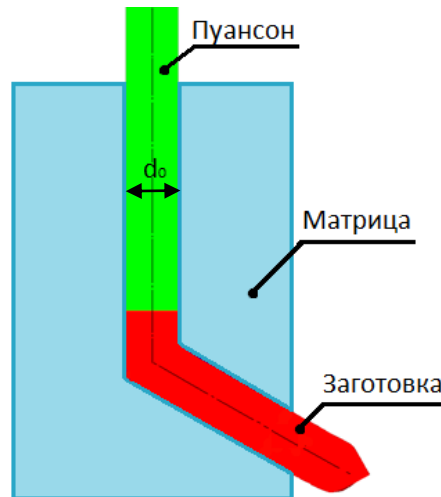


Рис. 1. Схема оснастки для РКУП
Fig. 1. ECAP equipment diagram

4) материал матрицы и пуансона для РКУП – недеформируемая жесткая среда с температурой (20...350) °С.

Скорость движения пуансона задавали постоянной 0,56 мм/с (равной скорости движения подвижной траверсы гидропресса при РКУП с номинальной силой 160 тс). Показатель трения (по Зибелю) ψ между инструментом и заготовкой принимали равным 0,3 и определяли по результатам предварительного виртуального и физического моделирования продольной осадки образцов с применением графито-молибденовой смазки. Моделирование выполняли с использованием равномерной сетки элементов. Минимальный размер конечного элемента (длина ребра тетраэдра) составлял 1,2 мм. Верификация результатов компьютерного моделирования при указанных допущениях, количестве конечных элементов и результатов физического моделирования РКУП показала относительное превышение расчетной силы деформирования над экспериментально измеренным значением на квазистационарной стадии РКУП в 5 %.

На втором этапе рассчитывали поврежденность сплава с использованием результатов моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки при РКУП и известной модели разрушения Кокрофта – Лэтэма [19].

В программном комплексе DEFORM-3D для прогнозирования разрушения металлов и сплавов при большой пластической деформации как основная методика традиционно используется модель разрушения Кокрофта –

Лэтэма, хотя и не учитывающая влияние напряженного состояния металла на максимально возможную величину удельной работы положительных внутренних сил, соответствующую моменту истощения металлом способности деформироваться без разрушения.

Согласно модели разрушения Кокрофта – Лэтэма условие неразрушения материальной точки проверяют по неравенству:

$$c < c_{пр}, \quad (1)$$

где левая часть неравенства $c = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i$ – показатель

поврежденности, энергетический показатель Кокрофта – Лэтэма относительной удельной работы элементарных растягивающих сил,

σ_1 – главное положительное нормальное напряжение,

σ_i – интенсивность напряжений,

ε_i – интенсивность деформаций;

$c_{пр}$ – предельное (максимально возможное) значение показателя Кокрофта – Лэтэма, соответствующее моменту разрушения металла.

Разрушение металла в соответствии с моделью разрушения Кокрофта – Лэтэма происходит при выполнении условия $c \geq c_{пр}$.

Поврежденность рассчитывали по формуле, учитывающей влияние напряженного состояния на предельное

(максимально возможное) значение показателя Кокрофта – Лэтэма, полученной в работе [10]:

$$\omega = \sum_{k=1}^r \frac{\Delta C_k}{\left(\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} \varepsilon_{i,p} \right)_k}, \quad (2)$$

где r – количество этапов деформирования материальной точки;

$$\Delta C_k = \int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i - \text{приращение показателя Кокрофта –}$$

Лэтэма (приращение удельной работы положительных внутренних сил, действующих на материальную точку на k -м этапе деформирования материальной точки заготовки);

$\varepsilon_{i,k}$ – степень деформации, накопленной материальной точкой заготовки к началу k -го этапа деформирования;

$\varepsilon_{i,k+1}$ – степень деформации, накопленной материальной точкой заготовки к окончанию k -го этапа деформирования;

σ_1 – главное положительное нормальное напряжение;

σ_i – интенсивность напряжений;

$(\sigma_1/\sigma_i)_{cp}$ – среднее значение отношения главного нормального напряжения к интенсивности напряжений на k -м этапе деформирования материальной точки заготовки;

$\varepsilon_{i,p}$ – степень деформации, накопленной материальной точкой образца к моменту разрушения (количественная мера пластичности сплава) при постоянном значении показателя σ_1/σ_i напряженного состояния.

Функции

$$\varepsilon_{i,p} = -0,19 \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right) + 0,16; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{i,p} = -0,21 \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right) + 0,18,$$

определяющие пластичность магниевого сплава Mg–1%Zn–0,06%Ca при температурах 20 и 350 °С в зависимости от показателя напряженного состояния, устанавливали экспериментально по методике, приведенной в работе [20].

Для учета изменения показателя напряженного состояния материальной точки поврежденность в ней рассчитывали за $r=150$ этапов, при этом длительность всех этапов деформирования была одинаковой и равной $t_3=1$ с, с удовлетворением условия [10]:

$$0,99 \leq \frac{\sum_{k=1}^r \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} t_3 \right]_k}{S} \leq 1, \quad (4)$$

где S – площадь, определенная с использованием графика показателя напряженного состояния σ_1/σ_i материальной точки заготовки от времени деформирования. Поврежденность сплава при РКУП рассчитывали для материальной точки с максимальным значением пока-

зателя поврежденности c в области заготовки, определенной по результатам моделирования.

Расчет поврежденности сплава с использованием формул (2), (3) и результатов моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки выполняли в Excel, так как в программном продукте DEFORM-3D разработчиками не предусмотрена возможность ввода пользователем в решатель каких-либо определяющих соотношений, моделей разрушения металла и др.

Микротвердость (HV) измеряли по методу Виккерса на микро-макротвердомере Emco-Test Durascan 50 с нагрузкой на индентор 0,49 Н и временем выдержки 10 с. Для измерения микротвердости использовали образцы в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 1,5 мм, вырезанные в поперечном направлении из деформированной заготовки. Для каждого образца было проведено 20 измерений. Испытания на растяжение проводили на испытательной машине Instron 5982 при комнатной температуре и скорости деформации 10^{-3} с^{-1} с использованием образцов с размером рабочей части $0,6 \times 1 \times 4,5 \text{ мм}^3$. Плоские образцы вырезали из дисковых образцов. Для каждого состояния испытывалось не менее 5 образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты компьютерного моделирования

Распределение показателя поврежденности, полученное компьютерным моделированием, показало, что поверхностная область заготовки, примыкающая при РКУП к внутреннему углу матрицы, является областью возможного разрушения магниевого сплава (рис. 2). Указанная на рис. 2 точка из этой области входит в очаг пластической деформации при полностью заполненном сплавом выходном канале матрицы, т. е. на установившейся стадии РКУП.

Значительное увеличение показателя поврежденности c (рис. 3) в точке заготовки происходит в интервале времени 68–85 с из-за действия положительного нормального напряжения σ_1 (рис. 4).

Степень деформации (рис. 5) в материальной точке в интервале времени 68–85 с, как и показатель поврежденности, увеличивается.

Значение поврежденности металла при $T=20$ °С, рассчитанное по формуле (2), получили равным $\omega=1,19$. Следовательно, условие $\omega < 1$ не выполняется, и заготовка при деформировании РКУП в первом проходе разрушится в области поверхности, примыкающей при РКУП к внутреннему углу матрицы. Расчетное значение поврежденности сплава при $T=350$ °С получили равным $\omega=0,9$, что меньше 1, условие неразрушения металла $\omega < 1$ выполняется, и заготовка при РКУП в первом проходе не разрушится.

Результаты физического эксперимента

На рис. 6 а приведено фото образца 1, деформированного за один проход при комнатной температуре – образец разрушился на две отдельные части. На одной из частей видна макротрещина в области заготовки, примыкающей при деформировании к внутреннему углу матрицы. На рис. 6 б приведено фото образца 2,

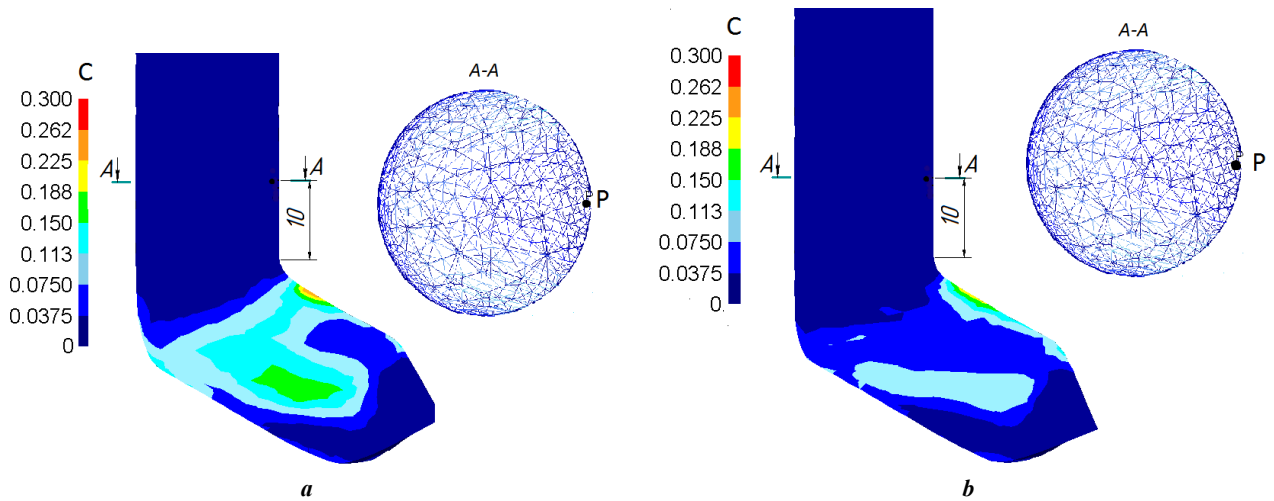


Рис. 2. Схема положения материальной точки, выбранной для расчета поврежденности, и распределение показателя c в продольном сечении виртуально деформированной заготовки при начальной температуре:
a – $T=20$ °C; **b** – $T=350$ °C

Fig. 2. Scheme of the position of the material point selected for damage calculation and the distribution of the c index in the longitudinal section of the virtually deformed billet at the initial temperature:
a – $T=20$ °C; **b** – $T=350$ °C

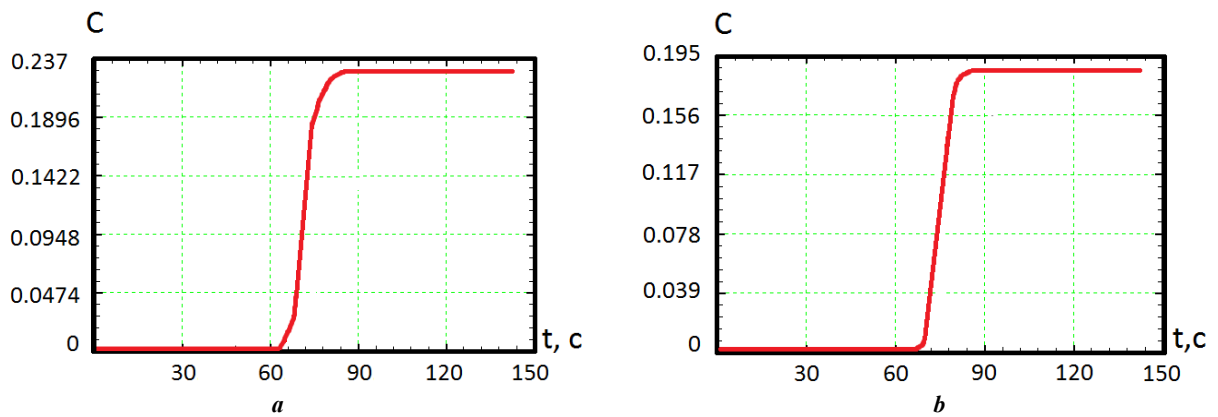


Рис. 3. Изменение во времени показателя поврежденности в точке: **a** – $T=20$ °C; **b** – $T=350$ °C
Fig. 3. Change in damage index over time at a point: **a** – $T=20$ °C; **b** – $T=350$ °C

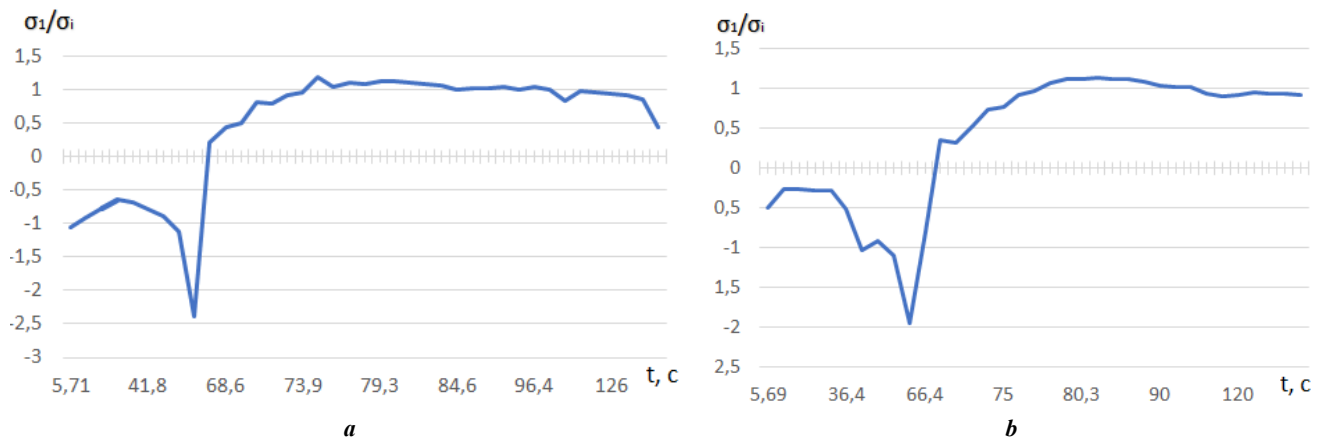


Рис. 4. Изменение во времени показателя σ_1/σ_i напряженного состояния в материальной точке заготовки:
a – $T=20$ °C; **b** – $T=350$ °C
Fig. 4. Change of the σ_1/σ_i index of the stress state at a material point of the billet over time:
a – $T=20$ °C; **b** – $T=350$ °C

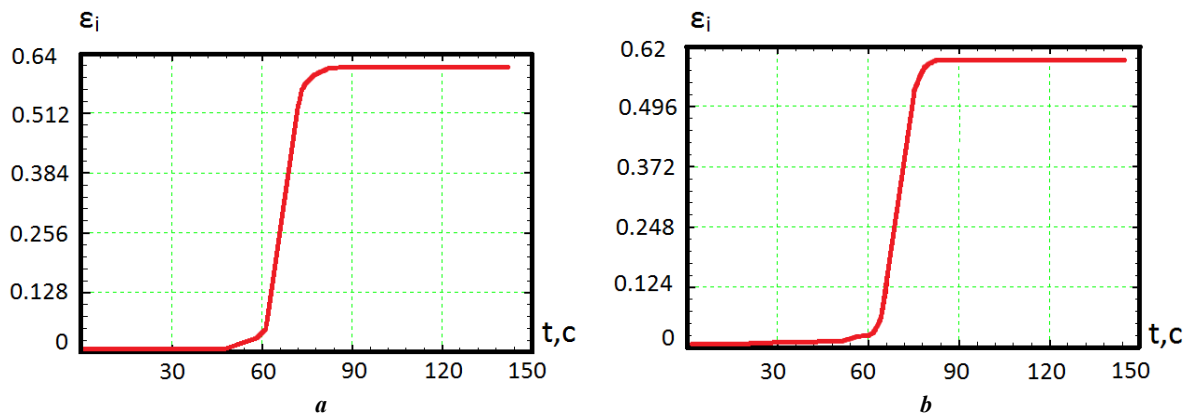


Рис. 5. Изменение во времени степени деформации в материальной точке заготовки: *a* – $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* – $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Fig. 5. Change in the degree of deformation in a material point of the billet over time: *a* – $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* – $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$

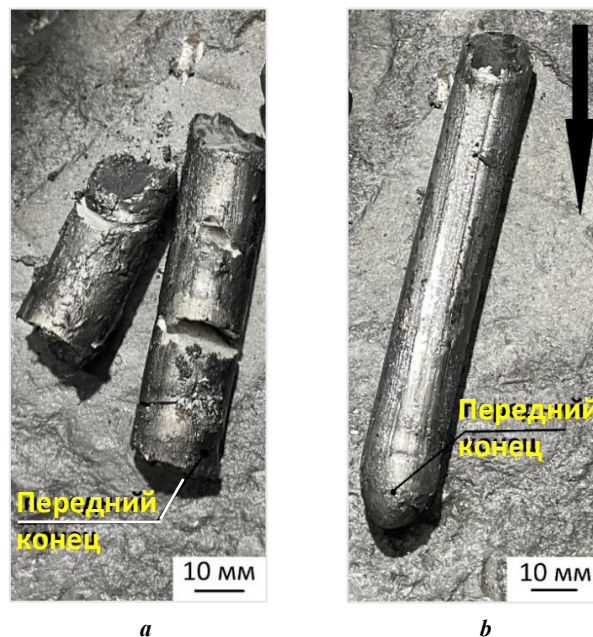


Рис. 6. Образцы после одного прохода равноканального углового прессования (РКУП):
a – $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* – $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (стрелкой указано направление прохода при РКУП)
 Fig. 6. Samples after one equal channel angular pressing (ECA) pass:
a – $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* – $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (arrow indicates the ECA pass direction)

деформированного за один проход при $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на образце отсутствуют видимые признаки разрушения. Результаты исследований механических свойств образцов представлены на рис. 7 и приведены в таблице 2.

На рис. 7 а приведена диаграмма растяжения исследуемого сплава до и после РКУП. Сплав Mg-1\%Zn-0,06\%Ca в гомогенизированном состоянии обладает прочностью 144 МПа. В деформированном состоянии его прочность повышалась с увеличением степени деформации методом РКУП. Так, после 8 проходов РКУП прочность выросла до 210 МПа, что на 45 % выше по сравнению со сплавом в гомогенизированном состоянии (рис. 7 а, таблица 2). Существенно повысился предел текучести – с 42 МПа в гомогенизированном состоянии до 68 МПа после деформации методом РКУП. Этот результат свидетельствует о значимости проведения РКУП для увеличения

прочностных свойств данного сплава. Микротвердость гомогенизированного состояния сплава Mg-1\%Zn-0,06\%Ca составила $44\pm 2,8\text{ HV}$. Значение микротвердости в результате пластической деформации методом РКУП со степенью деформации $\epsilon=5,04$, накопленной за 8 проходов, повысилось с $44\pm 2,8$ до $51,2\pm 3,4\text{ HV}$ (рис. 7 б, таблица 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Функции (3), определяющие пластичность магниевого сплава Mg-1\%Zn-0,06\%Ca при температурах 20 и $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от показателя напряженного состояния, установленные в рамках проведенных исследований экспериментально, соответствуют известной закономерности – пластичность магниевых сплавов значительно возрастает при повышении температуры.

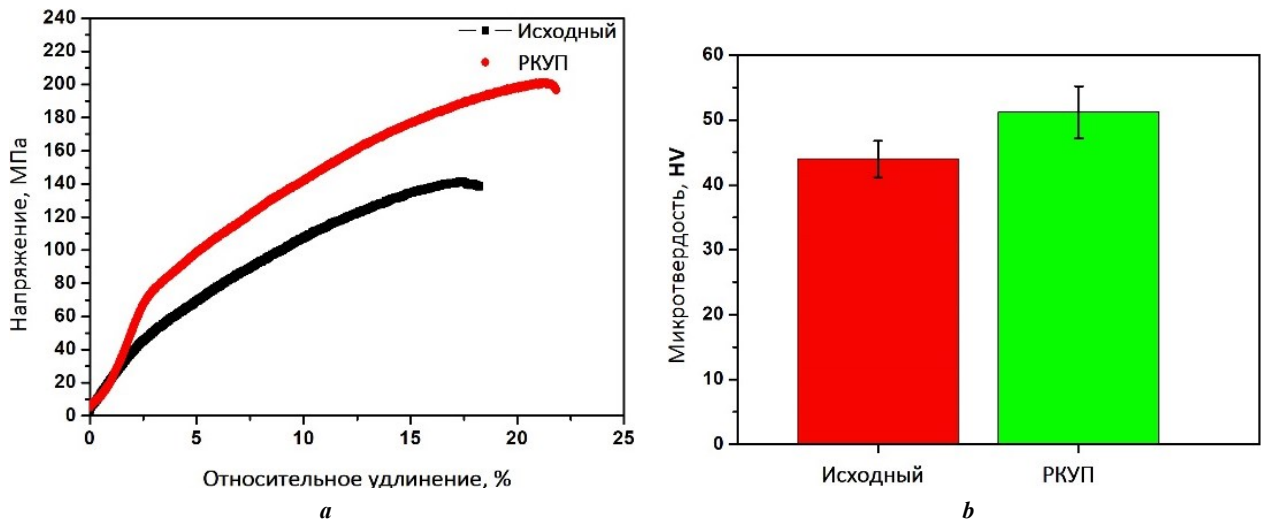


Рис. 7. Результаты механических испытаний:

a – диаграмма растяжения сплава Mg–1%Zn–0,06%Ca до и после равноканального углового прессования (РКУП);
b – сравнение исходной и полученной после РКУП микротвердости

Fig. 7. Results of mechanical tests:

a – stress-strain curve of the Mg–1%Zn–0.06%Ca alloy before and after equal channel angular pressing (ECA);
b – comparison of the initial microhardness and microhardness obtained after ECA

Таблица 2. Результаты испытаний на растяжение образцов и измерения микротвердости
Table 2. Results of tensile tests of samples and microhardness measurements

Состояние	<i>T</i> , °С	HV (среднее значение)	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Исходное состояние	20	44,0±2,8	144	42	18
После РКУП	20	51,2±3,4	210	68	23

Проведенные исследования впервые показали возможность успешного применения модели разрушения Кокрофта – Лэтэма с учетом изменяющегося напряженного состояния [10] к сплаву Mg–1%Zn–0,06%Ca для определения температуры обработки. До последнего времени указанная модель успешно применялась к сталям [14] и титановым сплавам [21]. По результатам компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки и расчета поврежденности металла в области с наиболее неблагоприятным напряженным состоянием ($\sigma_1 > 0$) приняли решение: физическое моделирование РКУП для первого прохода выполнять при начальной температуре заготовки и оснастки, равной 400 °С. Данная температура выбрана с некоторым запасом, чтобы обеспечить гарантированное неразрушение заготовки в физическом эксперименте. Теоретически и экспериментально показано, что при начальной температуре образца менее 250 °С происходит его растрескивание как раз в той области заготовки, где показатель поврежденности *s* имеет максимальное значение по результатам компьютерного моделирования. Ранее в работе [22] при указанном температурном интервале обработки было отмечено сходное поведение близкого по составу сплава.

Физическое моделирование заготовок за 8 проходов показало успешное использование применительно к сплаву Mg–1%Zn–0,06%Ca известного подхода – РКУП с постепенным понижением температуры обработки [18]. Образцы, не разрушенные за первый проход при $T=400$ °С, подвергались последующему успешному деформированию РКУП еще в 7 проходов с понижением температуры с 400 до 250 °С.

Результаты моделирования распределения степени деформации в заготовке хорошо согласуются с аналитической оценкой степени деформации за 8 проходов $\varepsilon=5,04$, выполненной по известной формуле [23]:

$$\varepsilon_i = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \cos \operatorname{ec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right], \quad (5)$$

где *N* – количество проходов;
 Ψ – внешний угол;
 Φ – внутренний угол.

В расчете брали внешний угол равным 20°, внутренний (угол пересечения каналов, соответствующий оснастке на рис. 1) – 120°. Значение деформации 0,63 за один проход РКУП, рассчитанное по формуле (5),

хорошо согласуется со значением, полученным моделированием (рис. 5).

Как и в работе [18], было обнаружено повышение механических свойств магниевых сплавов, но не такое значительное, что связано с меньшим содержанием в составе кальция: предел прочности повысился на 45 %, твердость на 16 % по сравнению с гомогенизированным состоянием. Это, вероятно, происходит благодаря формированию структуры с более мелким средним размером зерна за счет увеличения степени деформации до 5.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Использование комплексного моделирования процесса интенсивной пластической деформации магниевых сплавов, в том числе компьютерного и физического моделирования на экспериментальной установке, позволяет разрабатывать режимы деформирования заготовки благодаря расчету поврежденности сплава с использованием модели Кокрофта – Лэтэма. Физическое моделирование деформирования образцов подтвердило возможность определять компьютерным моделированием термомеханический режим РКУП магниевых сплавов системы Mg–Zn–Ca, обеспечивающий деформирование образцов без разрушения. Результаты физического моделирования хорошо согласуются с расчетными значениями поврежденности при компьютерном моделировании: комнатная температура $\omega=1,19$ ($\omega \geq 1$, условие разрушения) соответствовала разрушению образца при интенсивной пластической деформации; $T=350$ °C и $\omega=0,9$ ($\omega < 1$, условие неразрушения) соответствовали неразрушению образца. Это показывает надежность режима обработки, полученного путем комплексного моделирования, и обоснованность его применения к объемным заготовкам.

2. Интенсивная пластическая деформация является эффективным методом повышения механических свойств: после 8 проходов РКУП значения прочности сплава выросли с 144 до 210 МПа, что на 45 % выше по сравнению с гомогенизированным состоянием необработанного образца, значение микротвердости также повысилось с $44 \pm 2,8$ до $51,2 \pm 3,4$ HV.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sun Yu, Zhang Baoping, Wang Yin, Geng Lin, Jiao Xiaohu. Preparation and characterization of a new biomedical Mg–Zn–Ca alloy // *Materials and Design*. 2012. Vol. 34. P. 58–64. DOI: [10.1016/j.matdes.2011.07.058](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.058).
- Vinogradov A., Merson E., Myagkikh P., Linderov M., Brilevsky A., Merson D. Attaining High Functional Performance in Biodegradable Mg-Alloys: An Overview of Challenges and Prospects for the Mg–Zn–Ca System // *Materials*. 2023. Vol. 16. № 3. Article number 1324. DOI: [10.3390/ma16031324](https://doi.org/10.3390/ma16031324).
- Валиев Р.З., Жилиев А.П., Лэнгдон Т.Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. СПб.: Эко-Вектор, 2017. 479 с.
- Martynenko N.S., Anisimova N.Y., Rybalchenko O.V. et al. Rationale for Processing of a Mg–Zn–Ca Alloy by Equal-Channel Angular Pressing for Use in Biodegradable Implants for Osteoreconstruction // *Crystals*. 2021. Vol. 11. Article number 1381. DOI: [10.3390/cryst11111381](https://doi.org/10.3390/cryst11111381).
- Medeiros M.P., Lopes D.R., Kawasaki M., Langdon T.G., Figueiredo R.B. An Overview on the Effect of Severe Plastic Deformation on the Performance of Magnesium for Biomedical Applications // *Materials*. 2023. Vol. 16. № 6. Article number 2401. DOI: [10.3390/ma16062401](https://doi.org/10.3390/ma16062401).
- Rezaei-Baravati A., Kasiri-Asgarani M., Bakhsheshi-Rad H.R., Omid M., Karamian E. Microstructure, Biodegradation, and Mechanical Properties of Biodegradable Mg-Based Alloy Containing Calcium for Biomedical Applications // *Physical Mesomechanics*. 2023. Vol. 26. № 2. P. 176–195. DOI: [10.1134/S1029959923020078](https://doi.org/10.1134/S1029959923020078).
- Alper Incesu, Ali Gungor. Mechanical properties and biodegradability of Mg–Zn–Ca alloys: homogenization heat treatment and hot rolling // *Journal of materials science. Materials in medicine*. 2020. Vol. 31. № 12. Article number 123. DOI: [10.1007/s10856-020-06468-5](https://doi.org/10.1007/s10856-020-06468-5).
- Roche V., Koga G.Y., Matias T.B., Kiminami C.S., Bolfarini C., Botta W.J., Nogueira R.P., Jorge Junior A.M. Degradation of Biodegradable Implants: The Influence of Microstructure and Composition of Mg–Zn–Ca Alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 774. P. 168–181. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.09.346](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.346).
- Колмогоров В.Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2003. № 2. С. 4–16.
- Боткин А.В., Валиев Р.З., Степин П.С., Баймухаметов А.Х. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофт – Латам // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 7. С. 17–22. EDN: [NXAHSN](https://www.edn.ru/NXAHSN).
- Kwak Eun Jeong, Bok Cheon Hee, Seo Min Hong, Kim Taek-Soo, Kim Hyoung Seop. Processing and mechanical properties of fine-grained magnesium by equal channel angular pressing // *Materials Transactions*. 2008. Vol. 49. № 5. P. 1006–1010. DOI: [10.2320/matertrans.MC200725](https://doi.org/10.2320/matertrans.MC200725).
- Christiansen P., Nielsen C.V., Martins P.A.F., Bay N. Predicting the onset of cracks in bulk metal forming by ductile damage criteria // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 207. P. 2048–2053. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.10.1106](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1106).
- Власов А.В. О применении критерия Кокрофта – Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 11-1. С. 46–58. EDN: [ZVLXNV](https://www.edn.ru/ZVLXNV).
- Матвеев М.А. Оценка вероятности разрушения металла при горячей пластической деформации с помощью критерия Кокрофта – Латама // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 2. С. 109–126. DOI: [10.18721/JEST.230211](https://doi.org/10.18721/JEST.230211).
- Штремель М.А. Разрушение. В 2-х кн. Кн. 1: Разрушение материалов. М.: МИСИС, 2014. 670 с.
- Chen Xuewen, Yang Zhen, Zhang Bo, Sun Jiawei, Su Zhiyi, Mao Yiran. An Inverse Optimization Method for the Parameter Determination of the High-Temperature Damage Model and High-Temperature Damage Graph of Ti6Al4V Alloy // *Materials*. 2023. Vol. 16. Article number 4770. DOI: [10.3390/ma16134770](https://doi.org/10.3390/ma16134770).

17. Худододова Г.Д., Кулясова О.Б., Нафиков Р.К., Исламгалиев Р.К. Структура и механические свойства биомедицинского магниевого сплава Mg–1%Zn–0,2%Ca // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 2. С. 105–112. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-2-105-112](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-105-112).
 18. Кулясова О.Б., Исламгалиев Р.К. Влияние структурных изменений на механические свойства сплава Mg–1%Zn–0,2%Ca, полученного методом равноканального углового прессования // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2018. Т. 22. № 3. С. 24–29. EDN: [YAAWLZ](https://www.elibrary.ru/yaaawlz).
 19. Cockcroft M.G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals // *Journal of the Institute of Metals*. 1968. Vol. 96. P. 33–39.
 20. Боткин А.В., Валиев Р.З., Кубликова А.А., Дубинина С.В. Исследование пластичности металла при сдвиге на основе результатов испытаний образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием) // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2013. № 6. С. 60–65. DOI: [10.17073/0368-0797-2013-6-60-65](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-6-60-65).
 21. Gao Lin, Zhao Jiang, Quan Guo-zheng, Xiong Wei, An Chao. Study on the Evolution of Damage Degradation at Different Temperatures and Strain Rates for Ti-6Al-4V Alloy // *High Temperature Materials and Processes*. 2018. Vol. 38. P. 332–341. DOI: [10.1515/htmp-2018-0091](https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0091).
 22. Козулин А.А., Скрипняк В.А., Красновейкин В.А., Скрипняк В.В., Каравацкий А.К. Исследование физико-механических свойств ультрамелкозернистых магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014. Т. 57. № 9. С. 98–104. EDN: [SXZFZX](https://www.elibrary.ru/sxzfzx).
 23. Iwahashi Y., Wang J., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine-grained materials // *Scripta Materialia*. 1996. Vol. 35. № 2. P. 143–146. DOI: [10.1016/1359-6462\(96\)00107-8](https://doi.org/10.1016/1359-6462(96)00107-8).
- REFERENCES**
1. Sun Yu, Zhang Baoping, Wang Yin, Geng Lin, Jiao Xiaohu. Preparation and characterization of a new biomedical Mg-Zn-Ca alloy. *Materials and Design*, 2012, vol. 34, pp 58–64. DOI: [10.1016/j.matdes.2011.07.058](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.058).
 2. Vinogradov A., Merson E., Myagkikh P., Linderov M., Brilevsky A., Merson D. Attaining High Functional Performance in Biodegradable Mg-Alloys: An Overview of Challenges and Prospects for the Mg-Zn-Ca System. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 3, article number 1324. DOI: [10.3390/ma16031324](https://doi.org/10.3390/ma16031324).
 3. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Lengdon T.Dzh. *Obemnye nanostrukturnye materialy: fundamentalnye osnovy i primeneniya* [Bulk nanostructural materials: fundamental principle and application]. Sankt Petersburg, Eko-Vektor Publ., 2017. 479 p.
 4. Martynenko N.S., Anisimova N.Y., Rybalchenko O.V. et al. Rationale for Processing of a Mg-Zn-Ca Alloy by Equal-Channel Angular Pressing for Use in Biodegradable Implants for Osteoreconstruction. *Crystals*, 2021, vol. 11, article number 1381. DOI: [10.3390/cryst11111381](https://doi.org/10.3390/cryst11111381).
 5. Medeiros M.P., Lopes D.R., Kawasaki M., Langdon T.G., Figueiredo R.B. An Overview on the Effect of Severe Plastic Deformation on the Performance of Magnesium for Biomedical Applications. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 6, article number 2401. DOI: [10.3390/ma16062401](https://doi.org/10.3390/ma16062401).
 6. Rezaei-Baravati A., Kasiri-Asgarani M., Bakhsheshi-Rad H.R., Omidi M., Karamian E. Microstructure, Biodegradation, and Mechanical Properties of Biodegradable Mg-Based Alloy Containing Calcium for Biomedical Applications. *Physical Mesomechanics*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 176–195. DOI: [10.1134/S1029959923020078](https://doi.org/10.1134/S1029959923020078).
 7. Alper Incesu, Ali Gungor. Mechanical properties and biodegradability of Mg–Zn–Ca alloys: homogenization heat treatment and hot rolling. *Journal of materials science. Materials in medicine*, 2020, vol. 31, no. 12, article number 123. DOI: [10.1007/s10856-020-06468-5](https://doi.org/10.1007/s10856-020-06468-5).
 8. Roche V., Koga G.Y., Matias T.B., Kiminami C.S., Bolfarini C., Botta W.J., Nogueira R.P., Jorge Junior A.M. Degradation of Biodegradable Implants: The Influence of Microstructure and Composition of Mg-Zn-Ca Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 774, pp. 168–181. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.09.346](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.346).
 9. Kolmogorov V.L. Numerical simulation of large plastic deformations and failure of metals. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 2, pp. 4–16.
 10. Botkin A.V., Valiev R.Z., Stepin P.S., Baymukhamev A.Kh. Estimation of metal damage during cold plastic deformation using the Cockcroft–Latham failure model. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2011, no. 7, pp. 17–22. EDN: [NXAHSN](https://www.elibrary.ru/nxahsn).
 11. Kwak Eun Jeong, Bok Cheon Hee, Seo Min Hong, Kim Taek-Soo, Kim Hyoung Seop. Processing and mechanical properties of fine-grained magnesium by equal channel angular pressing. *Materials Transactions*, 2008, vol. 49, no. 5, pp. 1006–1010. DOI: [10.2320/matertrans.MC200725](https://doi.org/10.2320/matertrans.MC200725).
 12. Christiansen P., Nielsen C.V., Martins P.A.F., Bay N. Predicting the onset of cracks in bulk metal forming by ductile damage criteria. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 207, pp. 2048–2053. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.10.1106](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1106).
 13. Vlasov A.V. On the application of the Cockcroft–Latham criterion to predict fracture in cold forging. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 11-1, pp. 46–58. EDN: [ZVLXNV](https://www.elibrary.ru/zvlnxnv).
 14. Matveev M.A. Numerical estimation of the probability of metal failure under hot plastic deformation by means of the Cockcroft – Latham criterion. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 109–126. DOI: [10.18721/JEST.230211](https://doi.org/10.18721/JEST.230211).
 15. Shtremel M.A. *Razrushenie. Razrushenie materialov* [Destruction. Destruction of materials]. Moscow, MISIS Publ., 2014. Kn. 1, 670 p.
 16. Chen Xuewen, Yang Zhen, Zhang Bo, Sun Jiawei, Su Zhiyi, Mao Yiran. An Inverse Optimization Method for the Parameter Determination of the High-Temperature Damage Model and High-Temperature Damage Graph of Ti6Al4V Alloy. *Materials*, 2023, vol. 16, article number 4770. DOI: [10.3390/ma16134770](https://doi.org/10.3390/ma16134770).
 17. Khudododova G.D., Kulyasova O.B., Nafikov R.K., Islamgaliev R.K. The structure and mechanical properties of biomedical magnesium alloy Mg–1%Zn–0.2%Ca. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 105–112. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-2-105-112](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-105-112).

18. Kulyasova O.B., Islamgaliev R.K. The influence of the structural changes in the Mg-1%Zn-0,2%Ca alloy, produced by ECAP on its mechanical properties. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 24–29. EDN: [YAAWLZ](#).
19. Cockcroft M.G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals. *Journal of the Institute of Metals*, 1968, vol. 96, pp. 33–39.
20. Botkin A.V., Valiev R.Z., Kublikova A.A., Dubinina S.V. Determining the shear plasticity of metals on the basis of torsion-tension tests. *Steel in Translation*, 2013, vol. 43, no. 6, pp. 360–364. DOI: [10.3103/S096709121306003X](#).
21. Gao Lin, Zhao Jiang, Quan Guo-zheng, Xiong Wei, An Chao. Study on the Evolution of Damage Degradation at Different Temperatures and Strain Rates for Ti-6Al-4V Alloy. *High Temperature Materials and Processes*, 2018, vol. 38, pp. 332–341. DOI: [10.1515/htmp-2018-0091](#).
22. Kozulyn A.A., Skripnyak V.A., Krasnoveikin V.A., Skripnyak V.V., Karavatskii A.K. An investigation of physico-mechanical properties of ultrafine-grained magnesium alloys subjected to severe plastic deformation. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, no. 9, pp. 1261–1267. DOI: [10.1007/s11182-015-0372-5](#).
23. Iwahashi Y., Wang J., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine-grained materials. *Scripta Materialia*, 1996, vol. 35, no. 2, pp. 143–146. DOI: [10.1016/1359-6462\(96\)00107-8](#).

Computer prediction of fracture of magnesium alloy cylindrical billet during equal channel angular pressing

*Elena P. Volkova*¹, junior researcher
of the Research Institute of Physics of Advanced Materials
*Gandzhina D. Khudododova*², junior researcher
of the Research Institute of Physics of Advanced Materials
*Aleksandr V. Botkin*³, Doctor of Sciences (Engineering),
professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals
Ruslan Z. Valiev^{*4}, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,
Director of the Research Institute of Physics of Advanced Materials

Ufa University of Science and Technology, Ufa (Russia)

*E-mail: ruslan.valiev@ugatu.su

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7183-4077>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1273-8518>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9522-280X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4340-4067>

Received 03.05.2024

Revised 18.09.2024

Accepted 21.10.2024

Abstract: The main challenge in using magnesium alloys, applied in medicine as biodegradable materials, is their difficult deformability, which in turn leads to frequent failure of samples during severe plastic deformation. This paper shows that the temperature mode of equal channel angular pressing (ECAP) of a Mg–Zn–Ca system magnesium alloy, which ensures deformation of samples without failure, can be determined based on the results of finite-element computer simulation of the stress-strain state of the billet, calculation of alloy damage using the Cockcroft–Latham model, and prediction of the sample failure area. Modelling showed that the surface area of the billet adjacent to the matrix inner corner during ECAP, is the area of possible failure of the magnesium alloy. The value of alloy damage during ECAP in this area at $T=350$ °C is less than 1, which corresponds to non-failure of the metal. To verify the computer simulation results, ECAP physical simulation was performed; billets without signs of failure were produced. A study of the mechanical properties of the Mg–1%Zn–0.06%Ca magnesium alloy was conducted before and after ECAP processing according to the selected mode: the ultimate strength limit increased by 45 %, the hardness increased by 16 %, while the plasticity increased by 5 %.

Keywords: magnesium alloys; stress-strain state; finite-element computer simulation; alloy damage; equal channel angular pressing; microhardness; ultimate strength limit.

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-43-20015 (<https://rscf.ru/project/24-43-20015/>). The experimental part was carried out using the equipment of the “Nanotech” Shared Research Facility of Ufa University of Science and Technology.

For citation: Volkova E.P., Khudododova G.D., Botkin A.V., Valiev R.Z. Computer prediction of fracture of magnesium alloy cylindrical billet during equal channel angular pressing. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 4, pp. 19–28. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-2.