

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»  
(наименование кафедры)  
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов  
(код и наименование направления подготовки)  
Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем  
(наименование профиля)

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Количественная оценка эффекта Баушингера в магниевых сплавах с эффектом асимметрии»

---

Студент	<u>А. И. Брилевский</u> (И.О. Фамилия)	<hr/>	(личная подпись)
Руководитель	<u>Д. Л. Мерсон</u> (И.О. Фамилия)	<hr/>	(личная подпись)
Консультанты	<u>Л. Н. Горина</u> (И.О. Фамилия)	<hr/>	(личная подпись)
	<u>Н. В. Яценко</u> (И.О. Фамилия)	<hr/>	(личная подпись)
	<u>В. Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	<hr/>	(личная подпись)

**Допустить к защите**

И. о. заведующего кафедрой к.т.н., А.С. Селиванов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

---

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»  
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ  
И. о. завкафедрой «НМиМ»  
\_\_\_\_\_ А.С. Селиванов  
(подпись) (И.О. Фамилия)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение бакалаврской работы**

Студент Брилевский Александр Игоревич

1. Тема Количественная оценка эффекта Баушингера в магниевых сплавах с эффектом асимметрии
2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы 15.06.2017
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: материалы по преддипломной практике, стандарты предприятия
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов):

*АННОТАЦИЯ*

*ABSTRACT*

*ВВЕДЕНИЕ*

1. *Раздел «Аналитический обзор»*
2. *Раздел «Методика проведения экспериментов»*
3. *Раздел «Безопасность и экологичность технического объекта»*
4. *Раздел «Проведение испытаний с целью исследования эффекта Баушингера при растяжении - сжатии магниевых сплавов Mg-Zn-RE и Mg-Zn-Zr-RE»*

*Заключение*

*Список использованной литературы*

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала презентация к бакалаврской работе

6. Консультанты по разделам:

«Безопасность и экологичность»

Л. Н. Горина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Аннотация на английском языке

Н. В. Яценко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Нормоконтроль

В. Г. Виткалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

7. Дата выдачи задания «1» марта 2017 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы

Д. Л. Мерсон

(подпись)

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

А. И. Брилевский

(подпись)

(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»  
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ  
И. о. завкафедрой «НМиМ»  
\_\_\_\_\_  
(подпись) А.С. Селиванов  
(И.О. Фамилия)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН  
выполнения бакалаврской работы**

Студента: Брилевского Александра Игоревича  
по теме: Количественная оценка эффекта Баушингера в магниевых сплавах с эффектом асимметрии

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
АННОТАЦИЯ, ABSTRACT	13.03.2017	20.03.2017	Выполнено	
Введение	27.03.2017	27.03.2017	Выполнено	
Аналитический обзор	10.04.2017	10.04.2017	Выполнено	
Методика проведения экспериментов	17.04.2017	17.04.2017	Выполнено	
Безопасность и экологичность технического объекта	24.04.2017	01.05.2017	Выполнено	
Проведение испытаний с целью исследования эффекта Баушингера при растяжении - сжатии магниевых сплавов Mg-Zn-RE и Mg-Zn-Zr-RE	08.05.2017	15.05.2017	Выполнено	
Заключение	29.05.2017	29.05.2017	Выполнено	
Список использованных источников	05.06.2017	05.06.2017	Выполнено	

Руководитель выпускной  
квалификационной работы

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Д. Л. Мерсон  
(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_  
(подпись)

А. И. Брилевский  
(И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Пояснительная записка содержит: 59 страниц, 13 рисунков, 12 таблиц, 23 источника.

Эта работа посвящена определению количественной оценки эффекта Баушингера в магниевых сплавах с эффектом асимметрии.

Во введении представлены цель и задачи работы, её актуальность и обоснование.

Первый раздел посвящён аналитическому обзору, в котором описана общая информация о магнии, его деформируемых сплавах, и классическом определении эффекта Баушингера.

Во втором разделе представлены объекты исследования – магниевые сплавы с эффектом асимметрии. Определена методика, по которой будут проводиться испытания: требования к оборудованию и образцам, как и каким образом, будет фиксироваться и обрабатываться полученная информация.

Третий раздел посвящен влиянию проводимых испытаний на экологию и безопасность.

В четвертом разделе, представлены результаты проведенных испытаний. На основе проведенных исследований, а также полученных за время обучения знаний были разработаны и представлены новые коэффициенты по количественной оценке эффекта Баушингера и эффекта асимметрии.

## ABSTRACT

This graduation work is devoted to determining the quantitative evaluation of the Bauschinger effect in magnesium alloys with the asymmetry effect.

The introduction presents the aim and objectives of the graduation work, its relevance and rationale.

The first section is devoted to the analytical review which describes general information on magnesium, its deformable alloys, and the classical definition of the Bauschinger effect.

The second section presents the objects of the research – magnesium alloys with the effect of asymmetry. The methodology for the tests was determined: the requirements for equipment and samples, as well as the ways of recording and processing the data received.

The third section is devoted to the impact of ongoing tests on ecology and safety.

In the fourth section the results of the tests are presented. Based on the studies carried out, as well as the knowledge gained during the training, new coefficients for the quantitative evaluation of the Bauschinger effect and the asymmetry effect were developed and presented.

The explanatory note contains: 59 pages, 13 figures, 12 tables, 23 sources.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	11
1.1 Основные сведения .....	11
1.2 Магниевого сплавы .....	11
1.3 Деформационное поведение магниевых сплавов .....	12
1.4 Эффект Баушингера.....	19
1.5 Эффект асимметрии.....	20
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....	21
2.1 Выбор объектов исследования .....	21
2.2 Методика испытания образцов с целью исследования эффекта Баушингера при растяжении, сжатии магниевых сплавов Mg-Zn-Re и Mg-Zn-Zr-RE.....	24
2.2.1 Требования к испытательному оборудованию .....	24
2.2.2 Требования к образцам и их подготовке к испытаниям .....	24
2.2.3 Режимы испытания и способы фиксации информации .....	25
2.2.4 Измеряемые параметры.....	26
2.2.5 Обработка результатов .....	26
3 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ..	28
3.1 Конструктивно-технологическая и организационно-техническая характеристика рассматриваемого технического объекта .....	28
3.2 Идентификация профессиональных рисков.....	30
3.3 Методы и средства снижения профессиональных рисков .....	34
3.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта.....	36
3.4.1 Идентификация опасных факторов пожара включает:.....	36

3.4.2	Разработка технических средств и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности заданного технического объекта (выпускной квалификационной работы).....	37
3.4.3	Организационные (организационно-технические) мероприятия по предотвращению пожара.....	38
3.5	Обеспечение экологической безопасности технического объекта.....	40
3.5.1	Анализ негативных экологических факторов реализуемого производственно-технологического процесса (изготовления, транспортировки, хранения) и/или осуществляемой функциональной эксплуатации технического объекта с точки зрения обеспечения его экологической безопасности.....	40
3.5.2	Разработка мероприятий по снижению негативного антропогенного воздействия на окружающую среду рассматриваемым техническим объектом (заданным выпускной квалификационной работой), обеспечивающих соблюдение действующих (перспективных) требований нормативных документов. ....	41
3.6	Заключение по разделу «Безопасность и экологичность технического объекта» выпускной квалификационной работы бакалавра .....	42
4	ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ С ЦЕЛЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ - СЖАТИИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ MG-ZN-RE И MG-ZN-ZR-RE .....	43
4.1	Введение.....	43
4.2	Описание экспериментов .....	46
4.3	Результаты .....	50
4.4	Обсуждение результатов и выводы.....	54
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	56
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	57

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в научном мире проводится большое количество работ по изучению магния и его сплавов.

С момента открытия почти двести лет назад магний привлекает к себе повышенный интерес конструкторов в связи с высочайшей структурной эффективностью, которая может быть выражена соотношением прочности к плотности. Несмотря на это, применение магния и его сплавов до сих пор было ограничено литейными сплавами в довольно узких областях машиностроения по причине низкой пластичности и проблем с его термомеханической обработкой. Однако в последнее время в мире наблюдается стремительный рост в развитии магниевых сплавов, вызванный потребностью авиа- и автомобилестроителей в новых сверхлегких материалах, с одной стороны, и развитием технологий обработки магния с другой. Широкое внедрение магниевых сплавов позволит резко сократить энергозатраты, повысить экологичность транспорта (как наземного, так и аэрокосмического), улучшить общую экономическую эффективность перевозок и повысить их безопасность. Спектр применения магниевых сплавов быстро расширяется с улучшением их технологичности и повышением свойств.

Новый виток интереса к магниевым сплавам поддержан как специализированными национальными научными программами, так и отраслевыми проектами сотрудничества между промышленностью и академическими и научно-исследовательскими организациями (страны Евросоюза, Япония, Австралия, Китай). Известны специальные инвестиционные программы Air Force США и другие, евро-американо-азиатские программы, направленные на развитие данного направления. Уже сейчас это привело к разработке весьма перспективных деформируемых сплавов, резко превосходящих устаревающие литейные марки, практически по всем характеристикам (например, японский сплав Kumadaï с LPSO

структурой); развиваются технологии термомеханической обработки этих сплавов для экономически обоснованного высокотехнологичного производства коммерческих продуктов. Бурно растет как количество публикаций, так и обмен научной информацией на международных форумах.

Последние достижения в области технологий обработки стимулировали быстрый рост разработок в сфере проектирования и использования деформируемых сплавов на основе Mg. Однако, несмотря на эту тенденцию, физико-механические характеристики Mg сплавов по-прежнему оставляют желать лучшего - главным образом, из-за пробелов в понимании механизмов деформации. За последние годы появились методы интенсивной пластической деформации (ИПД), как эффективное средство для упрочнения металлических материалов и повышения их прочности, как с низкой, так и высокой степенью измельчения зерна.

Магний более чем на 30% легче алюминия, благодаря чему сплавы на его основе обладают максимальной на сегодняшний день удельной прочностью из всех существующих металлических материалов. Этим объясняется повышенный интерес к ним во всем мире.

Наиболее перспективно применение магниевых сплавов в авиакосмической и автомобильной промышленности. При этом особые надежды возлагают на сплавы системы Mg-Zn-RE.

Одним из основных недостатков магния является наличие у него эффекта асимметрии (ЭА): отличие в сопротивлении пластическому деформированию при растяжении и сжатии. Из-за этого сплавы на его основе имеют недостаточно высокие усталостные свойства.

Кроме того, усталостные свойства материалов зависят от его способности воспринимать неупругие деформации, которая оценивается величиной эффекта Баушингера (ЭБ).

Классически эффект Баушингера заключается в уменьшении сопротивления пластическим деформации при смене знака нагружения на

противоположный, поэтому его величину, как правило, определяют как относительную разницу в пределах текучести в прямом и обратном направлениях

Однако при наличие эффекта асимметрии величины предела текучести изначально сильно отличаются, в связи с чем нужен другой способ оценки ЭБ.

Поэтому была поставлена следующая цель и задачи.

Цель – расширить представления о деформационном поведении магниевых сплавов при циклическом нагружении.

Задачи:

1. Провести аналитический обзор.
2. Разработать методику испытания образцов.
3. Провести испытания.
4. Провести количественную оценку ЭБ в магниевых сплавах с эффектом асимметрии.
5. Сравнить различные способы оценки ЭБ и сделать вывод об их применимости.

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Основные сведения

Магний - щелочноземельный металл серебристо-белого цвета. Это один из наиболее распространенных металлов в природе. Вторым после алюминия металлом, используемым для производства конструкционных сплавов, применяемых в машино- и авиастроении [1].

Магний имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую структуру, параметры кристаллической решетки  $c = 5,199 \text{ \AA}$  и  $a = 3,202 \text{ \AA}$ , отношение  $c/a = 1,623$ . Магний обладает замечательными физическими свойствами: малой плотностью ( $1,74 \text{ г/см}^3$  при  $20^\circ\text{C}$  и  $1,58 \text{ г/см}^3$  при температуре плавления  $651^\circ\text{C}$ ) и низкой температурой кипения  $1104^\circ\text{C}$ .

Из химических свойств магния весьма важны следующие: высокое сродство к кислороду (одно из самых высоких среди металлов), хлору и фтору, высокий нормальный электрохимический потенциал, равный  $2,37 \text{ В}$  [1].

Фундаментальное понимание сложных механизмов деформации магния является ключом для конструирования сплавов на его основе с заданными свойствами. Таким образом, основной задачей настоящего проекта является понимание этих механизмов в связи с состоянием микроструктуры и условиями нагружения, прежде всего при усталости. Однако эта задача требует так же безусловного понимания работающих механизмов при одноосном нагружении как в направлении растяжения, так и в направлении сжатия.

## 1.2 Магниевого сплавы

Несмотря на то, что исторически большинство конечных изделий из Mg изготавливались литьем, последние достижения в технологиях термомеханической обработки стимулируют быстрое развитие деформируемых магниевых сплавов. Однако, несмотря на эти достижения,

конструкционные свойства последних по-прежнему оставляют желать лучшего, в основном из-за пробелов в понимании механизмов деформации в сплавах Mg.

Промышленные магниевые сплавы принято делить на литейные для получения деталей методом фасонного литья (МЛ) и деформируемые для получения полуфабрикатов и изделий путем пластической деформации (МА). По применению их классифицируют на конструкционные и со специальными свойствами.

По плотности магниевые сплавы разбиваются на легкие и сверхлегкие. К сверхлегким относятся сплавы, легированные литием (МА21, МА18), а к легким - все остальные. Сплавы магния с литием (МА21, МА18) - самые легкие конструкционные металлические материалы.

Также по температурам эксплуатации они разделяются на:

- а) Предназначены для работы при обычных температурах (сплавы общего назначения);
- б) Жаропрочные (для длительной эксплуатации при температурах до 200°C);
- в) Высокожаропрочные (для длительной эксплуатации при температурах до 250 - 300°C);
- г) Предназначены для эксплуатации при криогенных температурах [2];

### 1.3 Деформационное поведение магниевых сплавов

В настоящее время перед исследовательским сообществом всего мира стоит задача разобраться в деформационном поведении магниевых сплавов. В последние десятилетия предпринимались многочисленные усилия, однако всестороннее понимание деформационных свойств магниевых сплавов еще, по-прежнему, далеко от совершенства. Нет научно обоснованного понимания в этом вопросе, что мешает развитию новых технологически жизнеспособных схем обработки магниевых сплавов, которые позволят экономически эффективно деформировать магниевые сплавы. У магния

гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ) и соотношение кристаллографических осей  $c/a$ , которое близко к идеальному, это обуславливает уникальное деформационное поведение, которое радикально отличается от других металлов с кубической решеткой (например, ГЦК или ОЦК). При комнатной температуре скольжение вдоль направления  $[0001]$   $\langle 1120 \rangle$  является наиболее легко активируемой системой, а затем при более высоких напряжениях активируются системы пирамидального скольжения и призматическая  $[1010]$   $\langle 1120 \rangle$ . Можно отметить, что эти системы обеспечивают деформацию исключительно в пределах базисной плоскости и предлагают не более четырех независимых систем скольжения. Поэтому не выполняется критерий Мизеса, которому для реализации однородной деформации требуется не менее пяти независимых систем скольжения, а деформация вдоль оси в этом случае происходить не будет. Отсюда, деформация двойникованием является важным аккомодационным механизмом, который выводит элементарную деформацию за пределы базисной плоскости. Двойникование, в магнии, по направлению  $[1012]$  связано с растяжением вдоль оси и переориентацией решетки на  $86.3^\circ$ , а вот двойникование при сжатии по направлению  $[1011]$  связано со сжатием вдоль оси и наклоном решетки на  $56^\circ$ . По этим механизмам двойникования есть исследования, а также существует консенсус о том, что механическое двойникование является доминирующим фактором механического поведения магниевых сплавов. Конкретнее, при циклическом нагружении магниевых сплавов именно двойникование ответственно за широко наблюдаемое явление асимметрии процесса «сжатие-растяжение». Этот процесс, который объясняется полярной природой двойников, вызывает серьезные технологические проблемы при формовании или штамповке листов магниевых сплавов (например, формование и штамповка кузова автомобиля, формование дверей), так как при этом может происходить неравномерная деформация. Также можно отметить, что указанное явление в значительной

степени влияет на циклическое поведение магниевых сплавов и их усталостные свойства, которые до сих пор требуют более подробного изучения. В деформационном поведении магниевых сплавов отдельно отмечается хорошо известное явление асимметрии деформационного отклика при циклическом нагружении и/или смене знака приложения нагрузки. Это явление можно заметить в сплавах со слабой текстурой, что непременно оказывает большое влияние на усталостные свойства, которые часто являются ключевыми для практических применений.

Можно проследить связь между асимметрией циклической деформации и полярной природой двойникования в гцк металлах, которая проявляется в активации различных двойниковых систем на фазах сжатия и растяжения, а также в существовании механизма детвиннинга, ассоциированного с псевдоупругостью двойника растяжения. Ряд исследователей процессов циклической деформации сталкиваются с серьезной проблемой интерпретации результатов. Это связано со сложной формы петли циклического гистерезиса, вызванной асимметрией процессов двойникования и вообще говоря, дислокационного скольжения. В ходе выполнения данной бакалаврской работы было сделано предположение, что природу усталости магниевых сплавов и методы улучшения свойств следует искать в понимании фундаментальных механизмов пластической деформации – дислокационного скольжения по базисной и альтернативным плоскостям и множественного двойникования.

Активация каждого из вышеперечисленных механизмов деформации в значительной степени зависит от различных микроструктурных характеристик магниевых сплавов, к ним можно отнести исходную текстуру, размер зерна, состав легирующих компонентов, также активация зависит от экспериментальных условий, таких как скорость деформации и температура испытания. Анализируя деформационное упрочнение магниевых сплавов, нужно принять во внимание, как механизмы дислокационного скольжения,

так и взаимодействие между двойниками и дислокациями. Это является очень сложной задачей из-за большого количества представленных в литературе противоречивых результатов, что является результатом ограниченного понимания рассматриваемой проблемы. Прежде всего, двойниковые границы могут выступать в качестве барьеров для скольжения дислокаций. Кроме того, дислокации в основной матрице материала могут преобразоваться при прохождении фронта двойниковой границы и вызывать таким образом скрытое упрочнение в области двойника (данный механизм был предложен недавно Niewczas).

Отсюда, видно, что магниевые сплавы являются сложными многокомпонентными и многофазными системами, которые имеют иерархическую микроструктуру, включающую в себя большое многообразие масштабных уровней от атомистического до макроскопического. Также очевидно, что физические, механические и химические свойства магниевых сплавов и их структурных составляющих тесно взаимосвязаны и должны исследоваться одновременно, в идеале с использованием нескольких взаимодополняющих технологий и самых современных экспериментальных методов, включающих нейтронную и синхротронную дифракцию, атом-проб томографию, акустическую эмиссию, просвечивающую микроскопию, в том числе высокого разрешения.

Поэтому, детальное исследование материалов при различных структурных (текстура, микроструктура) и экспериментальных (температура, скорость деформации) условиях открывают возможности для активации процесса двойникового параллельно с различными режимами скольжения дислокаций и это является ключевой задачей для получения такого материала на основе магния, в котором эффект асимметрии процесса «сжатие-растяжение» будет пренебрежимо мал.

Исследования сосредоточены на конкретной проблеме, касающейся влияния легирующих элементов на поведение дислокаций скольжения,

кинетики двойникования и взаимодействия между этими двумя основными режимами деформационного поведения, которые оказывают решающее влияние на процессы растяжения/сжатия, их асимметрию и низкую усталостную прочность при циклических деформациях сплавов системы Mg-Zn-X.

Одним из используемых инструментов для улучшения свойств и характеристик магниевых сплавов является легирование. Действительно, судя по многим факторам, влияющим на механизмы упрочнения магниевых сплавов, можно отметить, что магниевые сплавы – это класс материалов, прочность которых в значительной степени обязана наличию в твердом растворе легирующих элементов и первичных фаз, образующих дендритные структуры (нетермоупрочняемые сплавы), а также точечно-распределенным включениям (дисперсионно-упрочняемые сплавы). Решающим фактором, для перечисленных случаев, для механических свойств материалов является пересыщение твердого раствора в литом состоянии.

Однако, получить объёмные материалы путем быстрой кристаллизации из расплава не получится. Даже после компактирования не удастся полностью устранить такие негативные факторы как наличие пор или внутреннее загрязнение поверхности. Однако есть альтернативный метод литья, который оказался способен обеспечить относительно высокую скорость затвердевания литья непрерывной полосы и особенно его модификация со сдвоенными валками. В процессе литья методом валковой разливки-прокатки в двухвалковом кристаллизаторе (Twin-Roll Casting - TRC) расплав заливают между двумя вращающимися стальными или медными валками с водяным охлаждением. Жидкий металл подается через сопло в прокатное устройство, где сдвоенные валки играют роль и теплообменника, и прокатного механизма. Металл, покидающий сопло, затвердевает на валках и раскатывается в полосу, что придает материалу дополнительное упрочнение. Несмотря на то, что пересыщение твердого раствора достигаемое с помощью

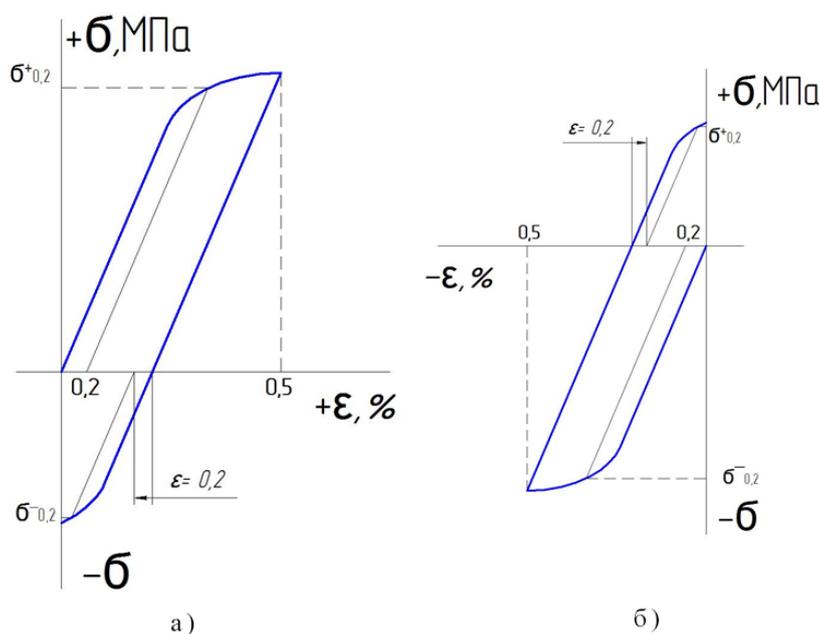
этого метода не столь высоко, как в других методах быстрой кристаллизации из расплава (спиннингование из расплава, например), оно все равно оказывается гораздо выше, чем для литья, полученного обычной кристаллизацией из расплава.

В отличие от стандартных способов быстрой кристаллизации из расплава, метод валковой разливки-прокатки позволяет производить большие объемы пересыщенных сплавов со свойствами, близкими к свойствам сплавов, полученными методом быстрой кристаллизации из расплава (rapid solidification). Кроме того, метод валковой разливки-прокатки является экономически эффективным процессом, поскольку он сочетает в себе как быстрое затвердевание, так и горячую прокатку в один этап. Типичный образец материала, полученный по способу валковой разливки-прокатки похож на образец «горячего измельчения и компактирования». Таким образом, по сравнению с обычным литьем и горячей прокаткой, процедура литья через сдвоенные валки является более гибкой и экономичной, исключая дорогие и трудоемкие шаги по термообработке и многопроходной прокатке. Ключевая разница между обычным литьем и валковой разливкой-прокаткой состоит в скорости затвердевания металла: в то время, как в случае обычного литья под давлением оно находится в пределах от 1 до 50 °C/сек, то в случае литья через сдвоенные валки она может достигать от 500 до 1000 °C/сек. Такая технология литья приводит к очень измельченной микроструктуре с тонким диспергированием и однородным распределением первичных частиц. Кроме того, в материалах, полученных по способу валковой разливки-прокатки, может быть достигнут еще более мелкий размер зерен (микроструктурный и даже субмикроструктурный), если они впоследствии подвергаются дополнительной прокатке и термообработке. Несмотря на то, что деформируемые магниевые сплавы, как правило, весьма дороги и относительно трудно формуемы и штампуемы при комнатной температуре по

сравнению с обычными литыми сплавами, существует еще ряд недостатков и препятствий для получения конкурентоспособной продукции на основе деформируемых магниевых сплавов, и особенно листовых материалов, которые необходимы для различного промышленного применения. Также стоит отметить, что несмотря на то, что деформируемые магниевые сплавы проявляют лучшие механические свойства, чем литые магниевые сплавы, снижение производственных затрат и улучшение деформируемости являются теми задачами, которые должны быть преодолены, прежде чем деформируемые магниевые сплавы захватят широкий рынок применения в транспортной отрасли. Именно поэтому, метод валковой разливки-прокатки в двухвалковом кристаллизаторе (TRC), является перспективным для изготовления листов деформируемого магниевого сплава при относительно низкой себестоимости. Кроме того, данная технология позволяет за счет высокой скорости кристаллизации обеспечить получение высококачественной микроструктуры с пониженным уровнем сегрегации, улучшить распределение включений по размерам и добиться высокой микроструктурной однородности. Можно ожидать, что высокая скорость затвердевания будет способствовать дисперсионному упрочнению и упрочнению в твердом растворе за счет легирующих элементов, которые обладают ограниченной растворимостью в магниевой матрице. Это, как правило, невозможно при обычном литье, потому что эти элементы при низких скоростях кристаллизации образуют крупные интерметаллидные частицы, характерные для этой процедуры. Это оправдывает выбор метода литья в сдвоенных валках в качестве базовой технологии получения перспективных сложных сплавов магния, подлежащих тщательному изучению в рамках настоящего проекта.

## 1.4 Эффект Баушингера

Эффект был обнаружен Иоганном Баушингером, когда тот проводил исследования с каменной солью. В последствии открытый эффект был назван в его честь. «Заключается в том, что предварительная пластическая деформация металла растяжением уменьшает предел текучести при последующем его сжатии и, наоборот, предварительная пластическая деформация металлов сжатием уменьшает предел текучести при последующем его растяжении.»[23]



а) «Растяжение – Сжатие»; б) «Сжатие – Растяжение»

Рисунок 1 – Проявление эффекта Баушингера на схемах:

Эффект Баушингера является проявлением неупругости материала в зоне перехода к упругопластическим деформациям.

С точки зрения дислокационного механизма пластической деформации эффект Баушингера указывает на то, что при повторном деформировании заблокированным перед препятствиями дислокациям легче двигаться в направлении, противоположном к их движению при предварительной пластической деформации.

Эффект Баушингера имеет важное практическое значение при

циклической деформации металлов, влияя на процессы усталостного разрушения, при деформации дисперсионноусиленных сплавов.

### 1.5 Эффект асимметрии

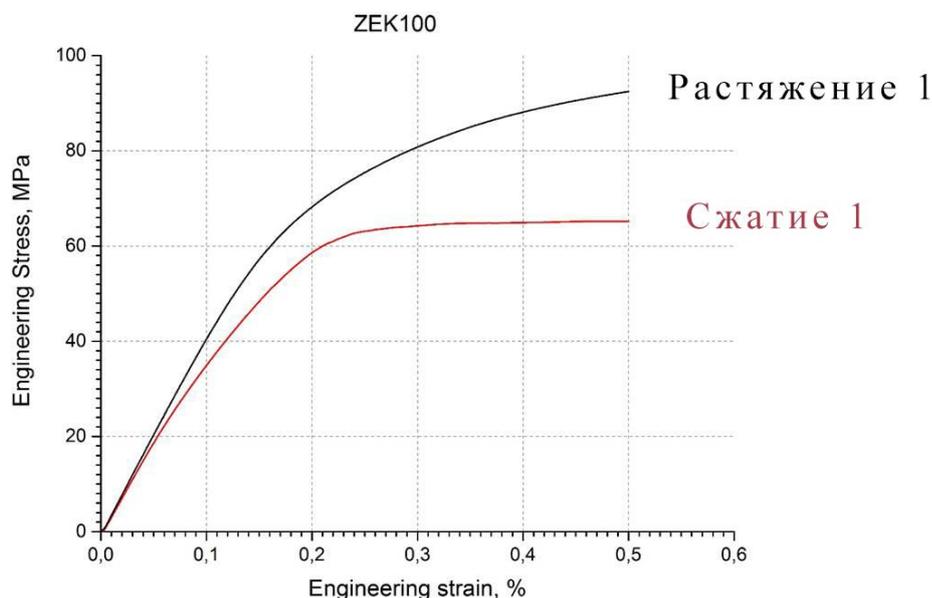


Рисунок 2 – Проявление эффекта асимметрии у сплава ZEK100

Эффект асимметрии деформационного поведения можно наблюдать в магнии и его сплавах при сжатии и растяжении, а именно он проявляется как разница в значения предела текучести, предела прочности, и деформационного упрочнения, неупругость деформации при разгрузке, а также перегиб кривой, связанный со сменой преимущественного дислокационного скольжения на двойникование. Такое поведение связано с активацией различных механизмов деформации – базисного скольжения  $\{0001\}$ , двойникования сжатия  $\{1011\}$  и двойникования растяжения  $\{1012\}$  [15,16], однако для дальнейшего понимания эволюции данных механизмов необходимо более детальное изучение процесса деформации.

Эффект асимметрии не позволяет подсчитать эффект Баушингера в его классическом виде, что приводит к необходимости поиска новых способов и методов его расчета.

## 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1 Выбор объектов исследования

В настоящей работе для исследования выбраны серии перспективных деформируемых сплавов системы Mg-Zn-X: Mg-Zn-RE (серия ZE) и Mg-Zn-RE-Zr (серия ZEK), которые могут быть рассмотрены, с одной стороны, как практически важные сплавы с высокой прочностью, и, с другой стороны, как сплавы, идеально подходящие для фундаментальных исследований. В качестве таких сплавов выбраны высокопрочные сплавы ZE10 (Mg-1.3%Zn-0.2Nd) и ZEK100 (Mg-1.3%Zn-0.2 Nd+0.5Zr). Кроме того, для сравнения взяты классические, хорошо изученные сплавы AZ31 (Mg-3%Al-1%Zn) и ZK60 (Mg-6%Zn-0.2%Zr).

Основной причиной выбора для исследования магниевых сплавов серий ZE и ZEK является то, что эти классы сплавов обладают не ярко выраженной текстурой прокатки, что приводит к подавлению явления асимметрии при растяжении-сжатии (далее APC) (т.е. разница между пределами текучести, измеренными при испытаниях на растяжение и сжатие, может быть сведена к минимуму в отличие от сплавов, выбранных для сравнения).

Сплавы ZE10 и ZEK100, AZ31, ZK60 были получены методом литья в валки (twin roll casting –TRC). Внешний вид образцов приведен на рисунке 3. Химический состав сплавов представлен в таблице 1.

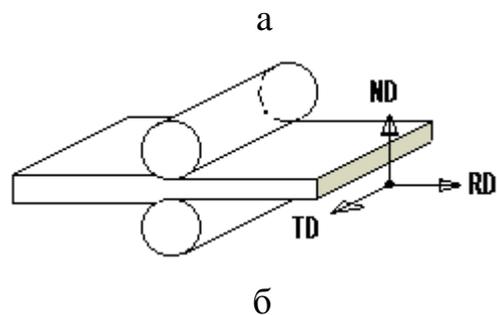
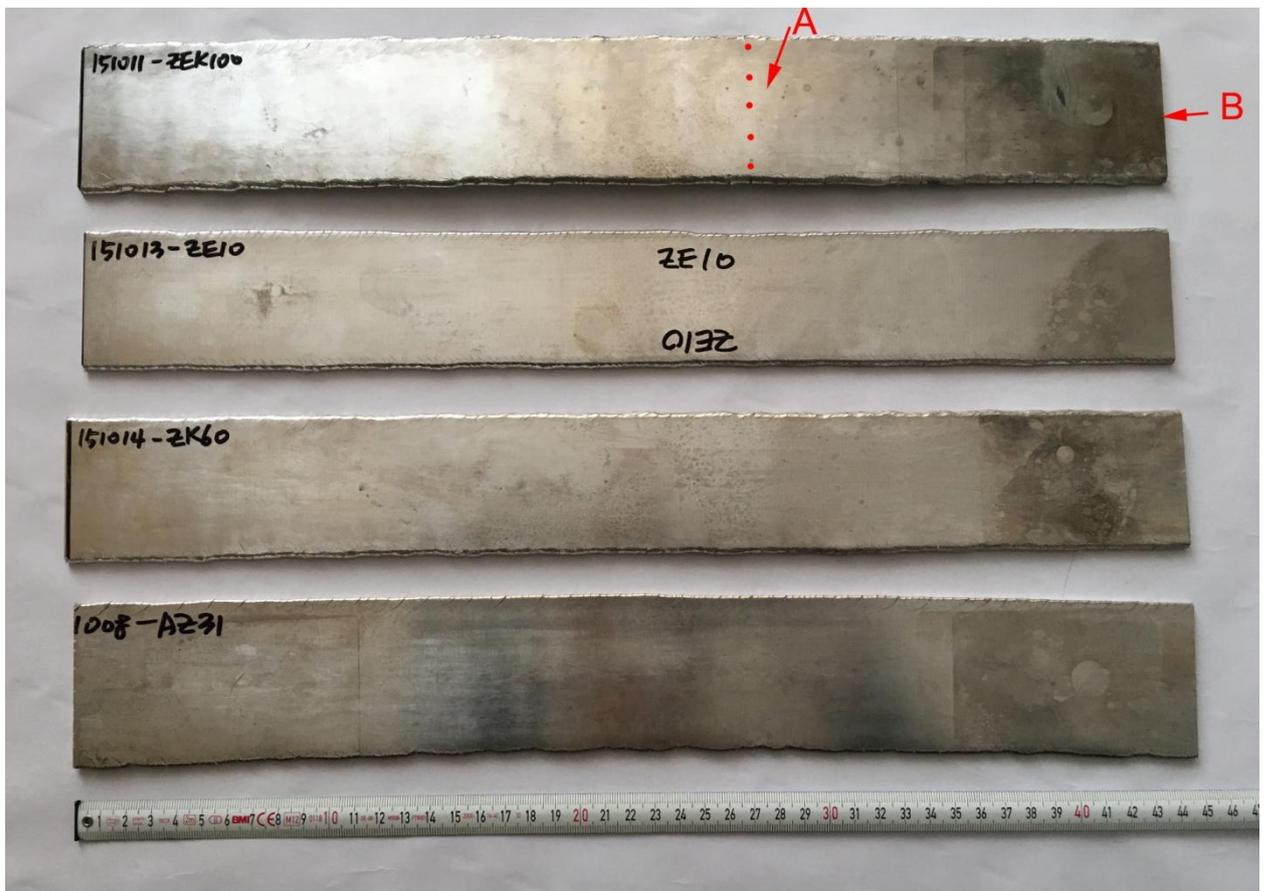


Рисунок 3 – Внешний вид образцов сплавов AZ31, ZK60, ZE10 и ZE100, полученных методом литья в сдвоенные валки (Twin Roll Casting) (а), и обозначения основных осей (б) – RD – rolling direction, TD – transverse direction, ND – normal direction

Таблица 1 – Содержание химических элементов в исследуемых образцах после TRC

Содержание химических элементов, масс. %	Сплав			
	AZ31	ZK30	ZE10	ZEK100
Al	2.814	0.0071	0.0083	0.0100
Mn	0.3038	0.0139	0.0230	0.0229
Zn	0.785	2.606	1.279	1.293
Cu	0.0017	0.0050	0.0069	0.0040
Si	0.0030	0.0047	0.0128	0.0166
Fe	0.0014	0.0015	0.0323	<0.0600
Ni	0.0006	0.0020	0.0091	0.0305
Zr	<0.0010	0.0101	<0.0010	0.0137
Ti	<0.0010	0.0013	0.0027	0.0039
Sn	<0.0005	0.0019	0.0021	0.0016
Be	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Pb	<0.0010	0.0019	0.0031	0.0032
Cd	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Ca	0.0010	0.0038	0.0090	0.0140
Na	<0.0005	<0.0005	0.0011	0.0011
Nd	<0.0010	<0.0010	0.2390	0.2615
Mg	96.1	97.3	98.4	98.3

## 2.2 Методика испытания образцов с целью исследования эффекта Баушингера при растяжении, сжатии магниевых сплавов Mg-Zn-Re и Mg-Zn-Zr-RE

Методика испытания образцов с целью исследования эффекта Баушингера при растяжении, сжатии магниевых сплавов Mg-Zn-Re и Mg-Zn-Zr-RE регламентирует действия, необходимые для определения характеристик эффекта Баушингера, заключающегося в эффекте снижения величины условного предела текучести при смене знака нагружения.

### 2.2.1 Требования к испытательному оборудованию

Для определения механических свойств, характеризующих наличие асимметрии сопротивления материала действию напряжения противоположного знака требуется следующее оборудование.

- Испытательная машина Kammrath&Weiss с максимальный усилием 10 кН, способная выполнять испытания на растяжение-сжатие в соответствии с рекомендациями стандартов ГОСТ1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение», ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Методы испытаний на сжатие» и др.
- Испытательная машина по п.1 должна быть укомплектована экстензометром с точностью определения деформации не хуже  $5 \cdot 10^{-6}$ .

### 2.2.2 Требования к образцам и их подготовке к испытаниям

Представленная методика определяет требования к образцам, испытываемым на растяжение и сжатие, для корректного определения характеристик эффекта Баушингера магниевых сплавов.

- Для испытаний необходимо использовать образцы с геометрией, приведенной на рисунке 2. Возможно уменьшение толщины образца до 2 мм. Особое внимание должно быть обращено на точность выполнения сопряжения между рабочей частью и головкой образца.

Образцы рекомендуется изготавливать с применением техники электроискровой вырезки.

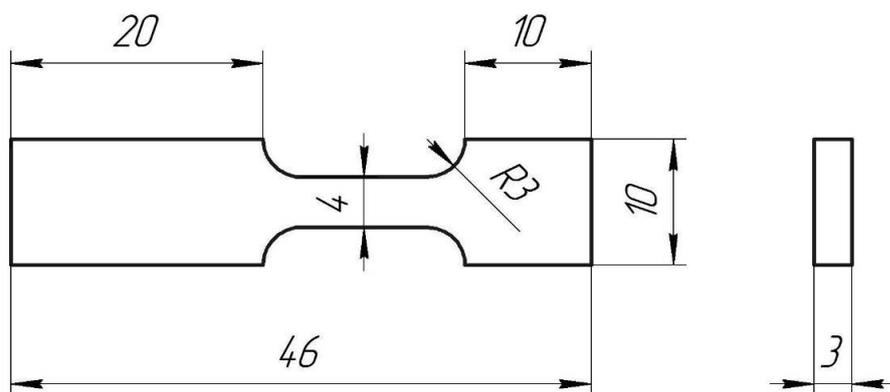


Рисунок 4 – Геометрия образца.

- С целью недопущения наличия концентрации напряжений на кромках образцов, к которым наиболее чувствительны характеристики микропластичности, образцы магниевых сплавов перед испытанием должны шлифоваться вручную на полировальной бумаге с зернистостью 400÷2500 под проточной водой.
- Каждый однотипный вид испытания магниевых сплавов должен быть проведен не менее, чем на трех одинаковых образцах.

### 2.2.3 Режимы испытания и способы фиксации информации

- Фиксация данных испытания производится путем сохранения информации, полученной в ходе эксперимента, на жесткий диск компьютера.
- Для испытательной машины Kammrath&Weiss в порядке предпочтения рекомендуются следующие скорости перемещения траверсы: 2 мкм/сек, 4 мкм/сек, 5 мкм/сек.
- Образец нагружается по схеме «Растяжение – Сжатие» и/или «Сжатие – Растяжение». На каждую схему используется три образца. Скорость

перемещения траверсы при испытании одного образца в обе стороны должна быть одинаковой.

- Нагружение образца в первую сторону осуществляют до полной деформации 0,5%.

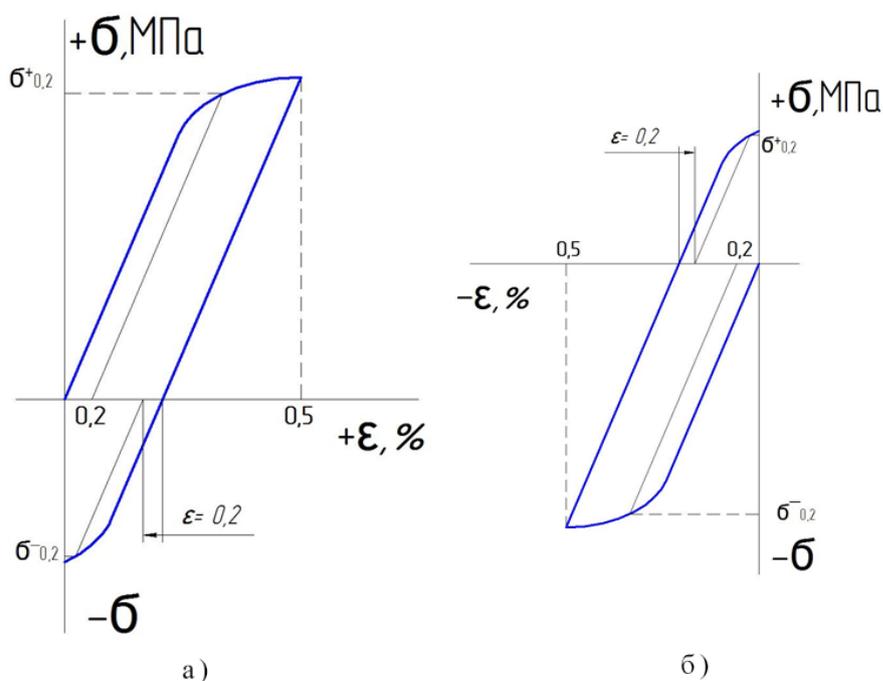
#### 2.2.4 Измеряемые параметры

Основными измеряемыми параметрами в процессе испытания являются:

- Текущая нагрузка (напряжение), регистрируемая тензорезисторным динамометром;
- Изменение рабочей длины (деформация) образца, регистрируемое экстензометром;

#### 2.2.5 Обработка результатов

По зарегистрированным параметрам в координатах напряжение – деформация строятся диаграммы нагружения по схеме «Растяжение – Сжатие» (рис. 5а), либо по схеме «Сжатие – Растяжение» (рис. 5б).



а) «Растяжение – Сжатие»; б) «Сжатие – Растяжение»

Рисунок 5 – Схема испытания:

По стандартным процедурам, описанным в ГОСТ1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» и ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Методы испытаний на сжатие», определяют условные пределы текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) при растяжении «+» и сжатии «-» (см. рис. 3).

Величина эффекта Баушингера определяется коэффициентами представленными в разделе «Проведение испытаний с целью исследования эффекта Баушингера при растяжении - сжатии магниевых сплавов Mg-Zn-RE и Mg-Zn-Zr-RE».

## 3 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

### 3.1 Конструктивно-технологическая и организационно-техническая характеристика рассматриваемого технического объекта

Таблица 2 - Технологический паспорт технического объекта

№ п/п	Технологический процесс	Технологическая операция, вид выполняемых работ	Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию	Оборудование, техническое устройство, приспособление	Материалы, вещества
1	2	3	4	5	6
1	Пробоподготовка	Шлифование	Техник	Шлифовально-полировальный станок Struers LaboPol-25; Шлифовальные круги с диаметром зерна 240, 60, 2500.	Магниевые сплавы: ZE10, ZEK100, AZ31, ZK60.
		Полирование	Техник	Шлифовально-полировальный станок Struers LaboPol-25; Полировальный круг из сукна и бархата; Суспензии 3мкм, 0,05 мкм.	Магниевые сплавы: ZE10, ZEK100, AZ31, ZK60.

Продолжение таблицы 2

2	Механические испытания	Цикловые испытания на растяжение-сжатие	Младший научный сотрудник	Испытательная машина Kammrath & Weiss	Магниевые сплавы: ZE10, ZEK100, AZ31, ZK60.
3	Обработка данных	Создание графиков; Определение параметров на графиках; Вычисление коэффициентов, количественно отражающих эффект Баушингера и эффект асимметрии;	Младший научный сотрудник	Персональный компьютер	Исходные данные

### 3.2 Идентификация профессиональных рисков

Таблица 3 – Идентификация профессиональных рисков

№ п/п	Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ	Опасный и /или вредный производственный фактор	Источник опасного и /или вредного производственного фактора
1	2	3	4
1	Шлифование; Полирование;	<p><b>Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами физического воздействия на организм работающего человека:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• опасные и вредные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения, в том числе в поле тяжести: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ движущиеся (в том числе разлетающиеся) твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего (в том числе движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования; передвигающиеся изделия, заготовки, материалы; разрушающиеся конструкции; обрушивающиеся горные породы; падающие деревья и их части; струи и волны, включая цунами; ветер и вихри, включая смерчи и торнадо);</li> </ul> </li> </ul>	Вращающийся шлифовальный станок;

Продолжение таблицы 3

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• опасные и вредные производственные факторы, связанные с механическими колебаниями твердых тел и их поверхностей и характеризующиеся:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ повышенным уровнем общей вибрации;</li> </ul> </li> </ul>	
		<p><b>Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека.</b></p> <p>Химические вещества находятся в пастообразном, жидком, состояниях.</p> <p>Степень опасности химических веществ связана с путями их попадания в организм человека, которые подразделяют на следующие группы проникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• через кожные покровы и слизистые оболочки (кожный путь);</li> <li>• через открытые раны;</li> </ul> <p>По характеру результирующего химического воздействия на организм человека химические вещества подразделяют:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• раздражающие;</li> </ul> <p>По составу химические вещества подразделяют на:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• на индивидуальные вещества;</li> <li>• смеси;</li> </ul> <p>По критерию опасной трансформации химические вещества подразделяют:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• на используемые в производственной деятельности без последующей трансформации химических свойств;</li> </ul>	<p>Различные суспензии, спирт, ацетон;</p>

Продолжение таблицы 3

		<p>По критерию опасного и (или) вредного воздействия на организм работающего химические вещества подразделяют:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• косвенно действующие на организм работающего как опасные и вредные производственные факторы физической природы действия, обусловленные свойствами этих химических веществ воспламеняться, гореть, тлеть, взрываться и т. п.</li> </ul> <p>Для целей разработки средств защиты выделяют отдельные группы химических веществ, связанных с химической продукцией и специфично воздействующих на человека:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вещества, вызывающие поражение (некроз/омертвление или раздражение) кожи;</li> </ul>	
2	Механическое испытание	<p><b>Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами физического воздействия на организм работающего человека:</b></p> <p>а) опасные и вредные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения, в том числе в поле тяжести:</p> <p>9) движущиеся (в том числе разлетающиеся) твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего (в том числе движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования; передвигающиеся изделия, заготовки, материалы; разрушающиеся конструкции; обрушивающиеся горные породы; падающие деревья и их части; струи и волны, включая цунами; ветер и вихри, включая смерчи и торнадо);</p>	Рабочие области испытательной машины Kammrath & Weiss

Продолжение таблицы 3

3	Обработка данных	<p><b>Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека, подразделяют:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса.</li> </ul> <p>Нервно-психические перегрузки подразделяют:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• перенапряжение анализаторов, в том числе вызванное информационной нагрузкой;</li> <li>• монотонность труда, вызывающая монотонию;</li> </ul> <p>Нервно-психические перегрузки организма работающего, связанные с напряженностью трудового процесса, в целях оценки условий труда, разработки и принятия мероприятий по их улучшению характеризуются такими показателями, как:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• длительность сосредоточенного наблюдения;</li> </ul>	Персональный компьютер
---	------------------	---	------------------------

### 3.3 Методы и средства снижения профессиональных рисков

Таблица 4 – Организационно-технические методы и технические средства (технические устройства) устранения (снижения) негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов (как уже реализованных в базовом исходном состоянии, так и дополнительно или альтернативно предлагаемых бакалавром для реализации в рамках выпускной квалификационной работы)

№ п/п	Опасный и / или вредный производственный фактор	Организационно-технические методы и технические средства защиты, частичного снижения, полного устранения опасного и / или вредного производственного фактора	Средства индивидуальной защиты работника
1	2	3	4
1	Опасные и вредные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения, в том числе в поле тяжести	Средства защиты от воздействия механических факторов: <ul style="list-style-type: none"> <li>• оградительные;</li> <li>• знаки безопасности;</li> <li>• автоматического контроля и сигнализации;</li> <li>• дистанционного управления.</li> </ul>	Оградительные бортики.
2	Опасные и вредные производственные факторы, связанные с механическими колебаниями твердых тел и их поверхностей и характеризующиеся: повышенным уровнем общей вибрации;	К средствам защиты от повышенного уровня вибрации относятся устройства: <ul style="list-style-type: none"> <li>• виброизолирующие,</li> <li>• виброгасящие и</li> <li>• вибропоглощающие;</li> </ul>	Делать перерыв.

Продолжение таблицы 4

3	<p>По характеру результирующего химического воздействия на организм человека химические вещества подразделяют:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• раздражающие;</li> </ul>	<p>Средства защиты от воздействия химических факторов;</p>	<p>Средства защиты рук: перчатки. Одежда специальная защитная:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• халаты;</li> <li>• костюмы;</li> <li>• жилеты;</li> </ul>
4	<p>Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека, подразделяют:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса.</li> </ul>	<p>Устройство новых и (или) реконструкция имеющихся мест организованного отдыха, помещений и комнат релаксации, психологической разгрузки, мест обогрева работников, а также укрытий от солнечных лучей и атмосферных осадков при работах на открытом воздухе; расширение, реконструкция и оснащение санитарно-бытовых помещений.</p>	<p>Делать перерыв каждые 40 минут по 10 минут.</p>

### 3.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта

#### 3.4.1 Идентификация опасных факторов пожара

Таблица 5 – Идентификация классов и опасных факторов пожара

№ п / п	Участок, подразделение	Оборудование	Класс пожара	Опасные факторы пожара	Сопутствующие проявления факторов пожара
1	2	3	4	5	6
1	Лаборатория пробоподготовки	Шлифовально-полировальный станок Struers LaboPol-25;	Е	Повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения;	Вынос (замыкание) высокого электрического напряжения токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества
2	Лаборатория рентгеноструктурного анализа и лазерной микроскопии	Шлифовально-полировальный станок Struers LaboPol-25;	Е	Пламя и искры;	Вынос (замыкание) высокого электрического напряжения токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества
3	Рабочее место оператора	Персональный компьютер	Е	Пламя и искры;	Вынос (замыкание) высокого электрического напряжения токопроводящие части технологических установок

3.4.2 Разработка технических средств и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности заданного технического объекта (выпускной квалификационной работы)

Таблица 6 - Технические средства обеспечения пожарной безопасности

Первичные средства пожаротушения	Мобильные средства пожаротушения	Стационарные установки и системы пожаротушения	Средства пожарной автоматики	Пожарное оборудование	Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре	Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)	Пожарные сигнализация, связь и оповещение.
1	2	3	4	5	6	7	8
Порошковые огнетушители	Комбинированные	Аэрозольная система пожаротушения	Технические средства оповещения и управления эвакуацией пожарные; системы передачи извещений о пожаре;	Пожарный шкаф	Повязки	Механизированы	Дистанционное

### 3.4.3 Организационные (организационно-технические) мероприятия по предотвращению пожара

Таблица 7 – Организационные (организационно-технические) мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Наименование технологического процесса, используемого оборудования в составе технического объекта	Наименование видов реализуемых организационных (организационно-технических) мероприятий	Предъявляемые нормативные требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты
1	2	3
<p>Пробоподготовка; Механические испытания;</p>	<p>Обучение персонала ПБ; Соблюдение техники безопасности; соблюдение последовательности алгоритма технологического процесса; наличие средств пожаротушения; своевременная уборка промасленной ветоши с рабочего места; ограничение взрывоопасных материалов и компонентов на рабочем месте; хранение взрывоопасных материалов и компонентов в соответствии с требованиями ПБ.</p>	<p>Квалифицированный персонал; обеспечение защиты помещений системами обнаружения пожара; оповещения и эвакуации; наличие систем пожаротушения</p>

Продолжение таблицы 7

Обработка данных	Наличие средств пожаротушения; своевременная уборка промасленной ветоши с рабочего места; ограничение взрывоопасных материалов и компонентов на рабочем месте; хранение взрывоопасных материалов и компонентов в соответствии с требованиями ПБ.	Квалифицированный персонал; обеспечение защиты помещений системами обнаружения пожара; оповещения и эвакуации; наличие систем пожаротушения.
------------------	--	--

### 3.5 Обеспечение экологической безопасности технического объекта

3.5.1 Анализ негативных экологических факторов реализуемого производственно-технологического процесса (изготовления, транспортировки, хранения) и/или осуществляемой функциональной эксплуатации технического объекта с точки зрения обеспечения его экологической безопасности

Таблица 8 – Идентификация негативных экологических факторов технического объекта

Наименование технического объекта, производственно-технологического процесса	Структурные составляющие технического объекта, производственно-технологического процесса	Негативное экологическое воздействие на атмосферу	Негативное экологическое воздействие на гидросферу ( )	Негативное экологическое воздействие на литосферу
1	2	3	4	5
Пробоподготовка	Шлифовально-полировальный станок Struers LaboPol-25;	Выброс отходов в виде стружки и частиц микропыли от абразивного диска	Выброс микропыли в гидравлическую систему	Загрязнения растительного покрова из за микропыли

Продолжение таблицы 8

Механические испытания	Испытательная машина Kammrath&Weiss	Выброс отходов в виде микропыли при разрыве образца	-	Использованные образцы
------------------------	--	---	---	------------------------

3.5.2 Разработка мероприятий по снижению негативного антропогенного воздействия на окружающую среду рассматриваемым техническим объектом (заданным выпускной квалификационной работой), обеспечивающих соблюдение действующих (перспективных) требований нормативных документов

Таблица 9 – Разработанные (дополнительные и/или альтернативные) организационно-технические мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия заданного технического объекта на окружающую среду

Наименование технического объекта	Пробоподготовка; Механические испытания
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на атмосферу	Установка фильтров циклон М-3
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на гидросферу	Установка фильтрующих элементов на канализационную систему
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на литосферу	Заключение договора с лицензированной организацией на вывоз и захоронение отходов

### 3.6 Заключение по разделу «Безопасность и экологичность технического объекта» выпускной квалификационной работы бакалавра

1. В разделе «Безопасность и экологичность технического объекта» приведена характеристика технологического процесса изготовления, должности работников, производственно-техническое и инженерно-техническое оборудование, применяемые сырьевые технологические и расходные материалы, комплектующие изделия и производимые изделия.

2. Проведена идентификация профессиональных рисков по осуществляемому технологическому процессу, выполняемым технологическим операциям, видам производимых работ. В качестве опасных и вредных производственных факторов идентифицированы следующие: вращающийся диск шлифовально-полировального станка; различные суспензии, спирт, ацетон.

3. Разработаны организационно-технические мероприятия, включающие технические устройства снижения профессиональных рисков, а именно Опасные и вредные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения, в том числе в поле тяжести; факторы, связанные с механическими колебаниями твердых тел и их поверхностей и характеризующиеся - повышенным уровнем общей вибрации; химические раздражающие вещества; нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса. Подобраны средства индивидуальной защиты для работников.

4. Разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности технического объекта. Разработаны средства, методы и меры обеспечения пожарной безопасности. Разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности на техническом объекте.

5. Идентифицированы экологические факторы и разработаны мероприятия по обеспечению экологической безопасности на техническом объекте.

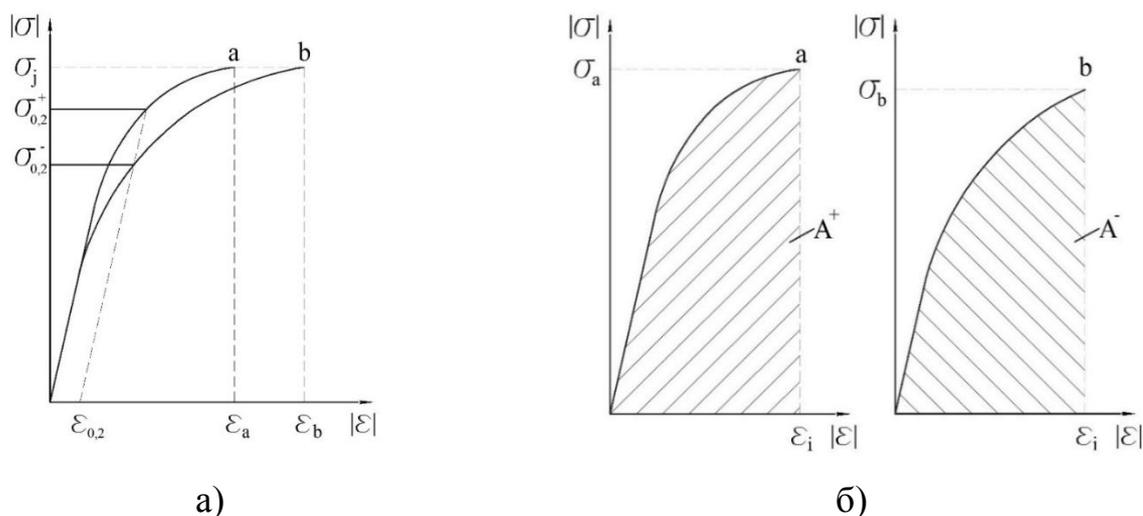
## 4 ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ С ЦЕЛЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ - СЖАТИИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ MG-ZN-RE И MG-ZN-ZR-RE

### 4.1 Введение

Одним из наиболее серьезных недостатков магния и сплавов на его основе, как конструкционных материалов, является плохая деформируемость и их резко асимметричное поведение при растяжении и сжатии, проявляющееся в существенном отличии пределов текучести на растяжение и сжатие и, как следствие, недостаточно высокая усталостная прочность [5-7]. Асимметрия циклической деформации в металлах с ГПУ решеткой, к которым относятся магниевые сплавы, является следствием полярной природы двойникования и проявляется в активации различных двойниковых систем на фазах сжатия и растяжения, а также в существовании механизма раздвойникования (detwinning), связанного с псевдо-упругостью двойника растяжения [8-12]. В магнии двойникование при растяжении реализуется по направлению [1012] и связано с переориентацией решетки на  $86.3^\circ$ , а двойникование при сжатии реализуется по направлению [1011] и сопровождается наклоном решетки на  $56^\circ$ . Эти механизмы двойникования уже достаточно подробно изучены [13] и являются определяющим фактором механического поведения магниевых сплавов [15-16].

При работе конструкции в условиях переменных нагрузок, особенно в режиме малоциклового усталости, важнейшее значение приобретает способность материала рассеивать накапливающуюся энергию, которая отражается в различных явлениях неупругости и, прежде всего, в эффекте Баушингера (ЭБ). Суть этого эффекта, открытого более 100 лет назад [17], заключается в облегчении микропластической деформации материала после его предварительного нагружения в противоположном направлении. Т.е. для наиболее распространенной одноосной схемы испытания материалов кривая

повторного нагружения образца в обратном направлении будет располагаться ниже кривой первичного испытания (Рисунок 6, а). Степень несовпадения этих кривых и является мерой ЭБ.



а – в прямом и обратном направлении; б – по работе деформации

Рисунок 6 – Схемы к определению параметров эффекта Баушингера по несовпадению кривых нагружения

К настоящему времени для оценки величины ЭБ предложен целый ряд параметров [18-20], основные из которых следующие:

абсолютное снижение напряжения ( $\sigma$ ) при нагружении материала в обратном направлении при остаточной деформации  $i$  (а – в прямом и обратном направлении; б – по работе деформации

Рисунок 6а), которая, как правило, выбирается равной 0,2%, т.е. соответствующей условному пределу текучести

$$k_1 = \sigma_i^1 - \sigma_i^2 \quad ; \quad (1)$$

относительное снижение напряжения при нагружении материала в обратном направлении при остаточной деформации  $i$  (Рисунок 6а)

$$k_2 = \frac{\sigma_i^1 - \sigma_i^2}{\sigma_i^1} \cdot 100\% \quad ; \quad (2)$$

абсолютное увеличение деформации ( $\epsilon$ ) при нагружении материала в обратном направлении при уровне напряжений  $j$  (а – в прямом и обратном направлении; б – по работе деформации

Рисунок ба, разница  $\varepsilon_b - \varepsilon_a$ )

$$k_3 = \varepsilon_j^2 - \varepsilon_j^1 ; \quad (3)$$

относительное увеличение деформации при нагружении материала в обратном направлении при уровне напряжений  $j$  (Рисунок ба)

$$k_4 = \frac{\varepsilon_j^2 - \varepsilon_j^1}{\varepsilon_j^1} \cdot 100\% ; \quad (4)$$

относительное уменьшение работы ( $A$  – площадь под кривой нагружения) на деформирование материала в обратном направлении до деформации  $i$  (а – в прямом и обратном направлении; б – по работе деформации

Рисунок бб)

$$k_5 = \frac{A_i^1 - A_i^2}{A_i^1} \cdot 100\% , \quad (5)$$

где индексы «1» и «2» относятся, соответственно, к прямому и обратному нагружениям (при этом прямым нагружением может быть как растяжение, так и сжатие).

При сравнении ЭБ в разных материалах (сплавах), безусловно, предпочтительнее коэффициенты, измеряемые в относительных единицах, т.е. выражения (2), (4) и (5).

Отметим, что все вышеприведенные показатели совершенно не пригодны для оценки ЭБ в материалах, обладающих эффектом асимметрии (ЭА) поведения при нагружении на растяжение и сжатие, т.к. для них эти показатели оказываются ненулевыми даже без какого-либо предварительного нагружения в противоположном направлении. Очевидно, что для этого случая при оценке ЭБ правильнее сравнивать не прямое и обратное нагружения, а лишь прямое, но в двух состояниях: собственно, в прямом и в прямом, но после предварительного нагружения в обратном направлении. То есть, если для вычисления показателей ЭБ по выражениям (1) – (5) достаточно только одного образца, испытанного в разных направлениях, то для исследования ЭБ в материалах с ЭА, требуется не менее двух образцов: одного, испытанного в прямом направлении, и второго, также испытанного в

прямом направлении, но только после предварительного нагружения в обратном.

Следовательно, для материалов с ЭА для оценки ЭБ можно применять любое из выражений (1) – (5), если под индексом «2» понимать нагружение второго образца в прямом направлении после предварительного нагружения в противоположном, например, как это было сделано В. Столяровым в работе [21].

По аналогии с выражениями (1) – (5) для оценки эффекта асимметрии можно использовать параметры:

отношение пределов текучести на растяжение и сжатие (Рисунок 4, а)

$$a_1 = \frac{\sigma_{0,2}^-}{\sigma_{0,2}^+} \cdot 100\% ; \quad (6)$$

отношение работ, выполненных при деформировании материала на растяжение и сжатие до деформации  $i$  (Рисунок 6б)

$$a_2 = \frac{A_i^-}{A_i^+} \cdot 100\% , \quad (7)$$

где индекс «+» означает растяжение, а индекс «-» – сжатие.

## 4.2 Описание экспериментов

Механические испытания образцов проводили на испытательной машине Kammrath&Weiss (Рисунок 7) при скорости нагружения 5 мкм/сек ( $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) по двум схемам одноциклового нагружения: первая – «растяжение – сжатие», в которой испытание начиналось в сторону растяжения, и вторая – «сжатие – растяжение», в которой первой фазой было сжатие. В обеих схемах нагружение осуществляли с амплитудой полной деформации 0,52%. Ниже в качестве примера для сплава ZE10 приведены диаграммы испытания по обеим схемам с обозначением всех необходимых для дальнейших вычислений данных (Рисунки 8-11).

Рассмотрим особенности кривой циклического нагружения, и каким образом по ней определяли необходимые данные на примере цикла

«Растяжение – сжатие» (Рисунок 6, а). Сама диаграмма представляет собой разомкнутую петлю достаточно сложной формы, последовательно проходящей через точки:  $o$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  и  $e$ . Если на стадии растяжения диаграмма имеет типичный для всех материалов вид: линейный участок (закон Гука) переходит в параболическую, связанную с активацией пластической деформации, то на стадии разгрузки от точки  $b$  к точке  $c$  только в начале снижения нагрузки ход диаграммы подчиняется линейному закону Гука, а далее начинает существенно от него отклоняться и вместо точки  $m$  попадает в точку  $c$ . Таким образом, в точке начала разгрузки  $b$  полная деформация (отрезок  $on$ ) состоит из упругой деформации  $\varepsilon_e$  (отрезок  $mn$ ) и пластической  $\varepsilon_p$  (отрезок  $om$ ), которая, в свою очередь, также состоит из двух частей: остаточной деформации (отрезок  $oc$ ) и квазиупругой  $\varepsilon_d$  (отрезок  $cm$ ). Нет сомнений, что деформация  $\varepsilon_d$  является результатом раздвоения, т.е. связана с исчезновением на стадии разгрузки двойников, образовавшихся на стадии нагружения [22].

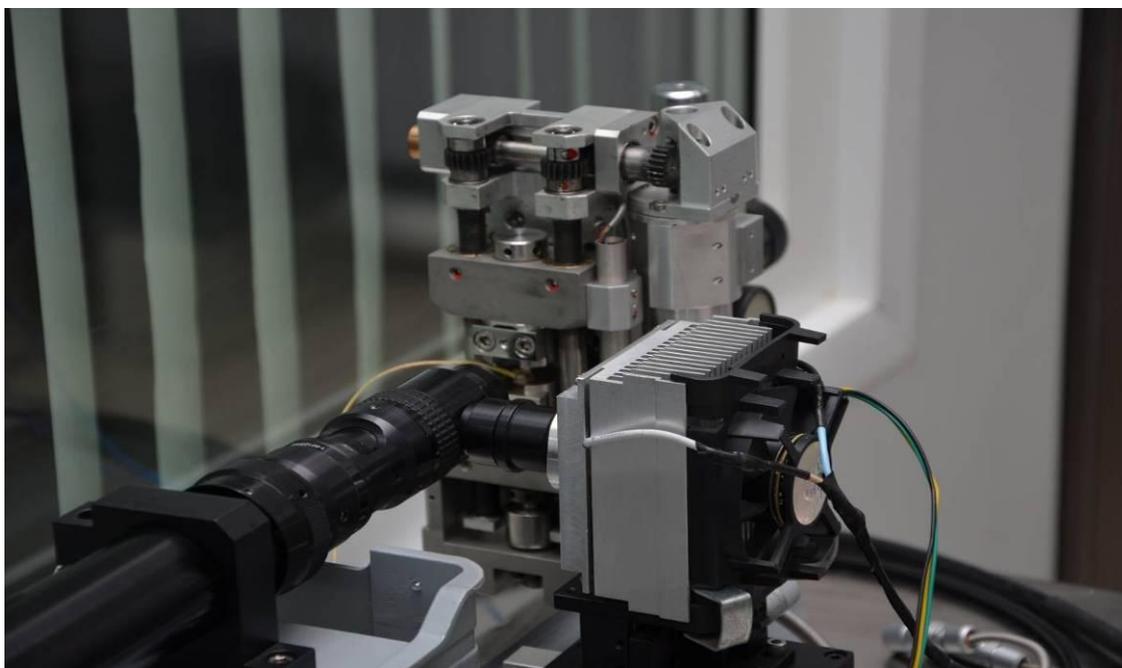
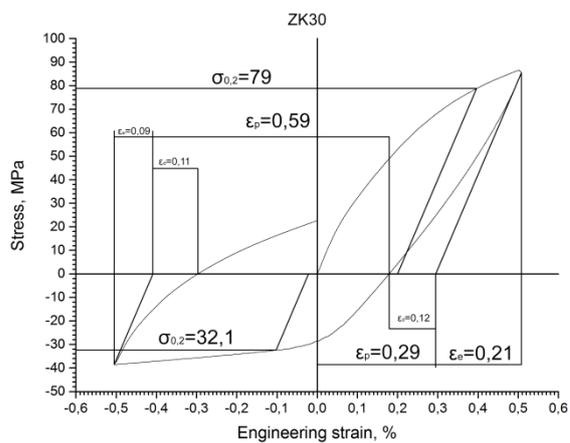
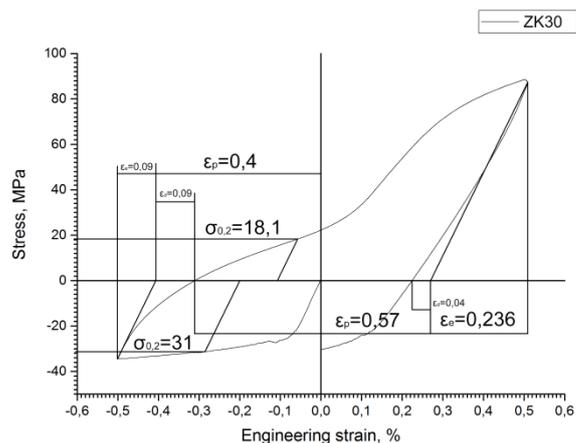


Рисунок 7 – Испытательная машина Kammrath&Weiss с установленным образцом



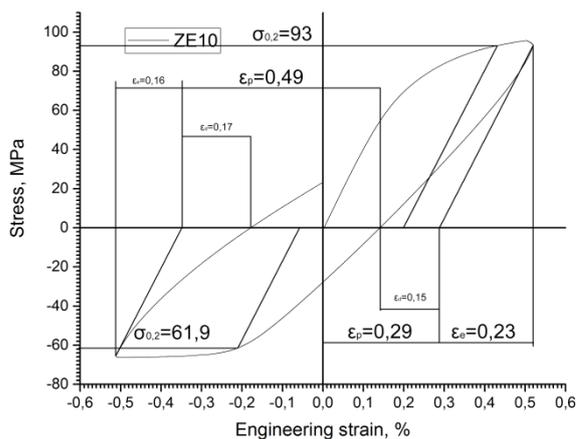
а)



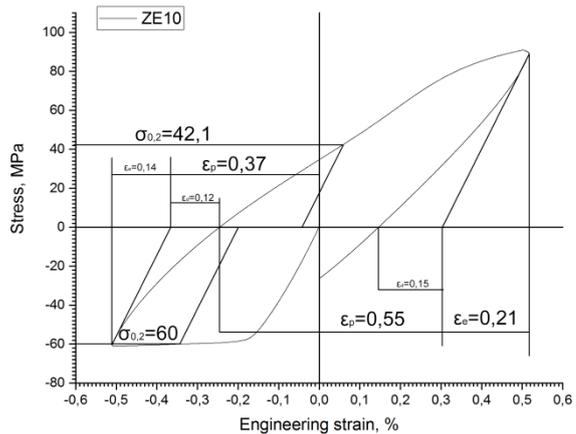
б)

а – «растяжение – сжатие»; б – «сжатие – растяжение»

Рисунок 8 – Диаграммы испытаний образцов сплава ZK30 с циклами



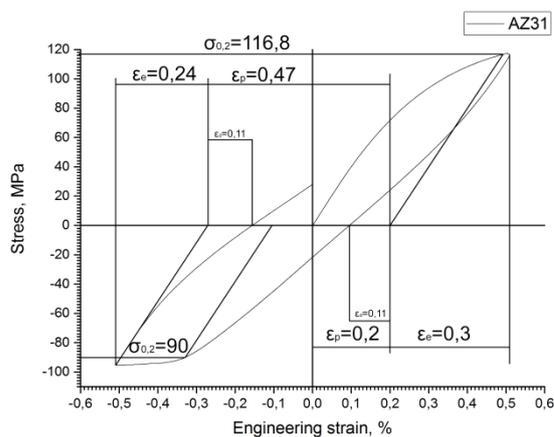
а)



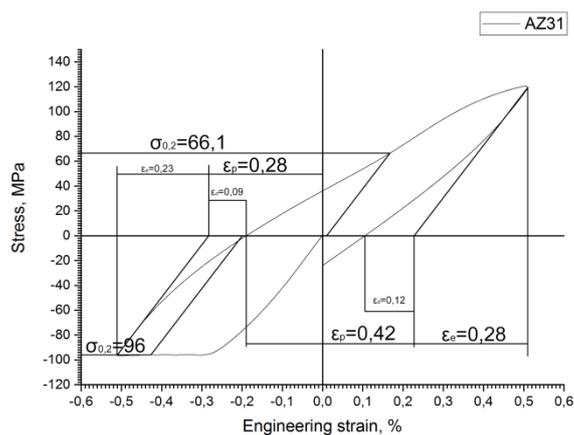
б)

а – «растяжение – сжатие»; б – «сжатие – растяжение»

Рисунок 9 – Диаграммы испытаний образцов сплава ZE10 с циклами



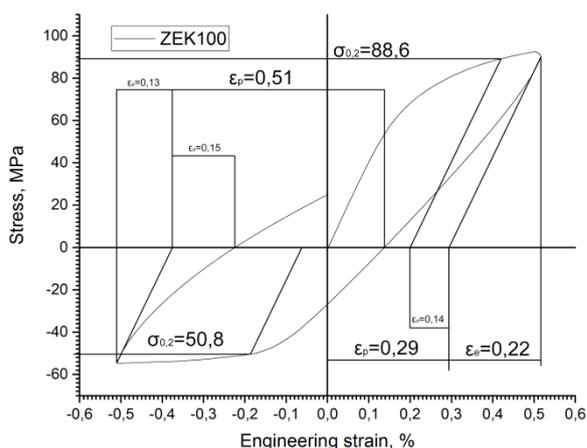
а)



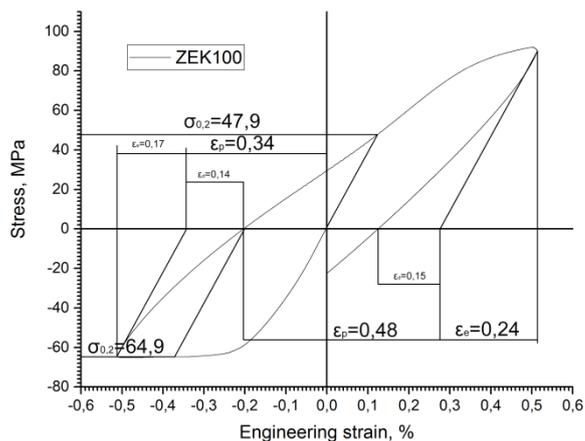
б)

а – «растяжение – сжатие»; б – «сжатие – растяжение»

Рисунок 10 – Диаграммы испытаний образцов сплава AZ31 с циклами



а)



б)

а – «растяжение – сжатие»; б – «сжатие – растяжение»

Рисунок 11 – Диаграммы испытаний образцов сплава ZEK100 с циклами

Были приняты следующие обозначения характеристик, которые в далее будут использоваться (Рисунок б):  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести, соответствующий остаточной деформации 0,2% (строго говоря, эта остаточная деформация - величина условная, т.к. не учитывает деформацию, связанную с раздвойникованием);  $\epsilon_p$  – величина пластической деформации в

точке разгрузки;  $\varepsilon_d$  – величина квазиупругой деформации, вызванная раздвойникованием, в точке разгрузки;  $A_{0,5}$  – площадь под кривой при полной деформации 0,5%. Кроме того, верхний индекс +/- обозначает соответственно стадию растяжения или сжатия, верхний индекс 1/2 относится соответственно к прямому или обратному нагружению.

#### 4.3 Результаты

Результаты измерения указанных характеристик (Таблица 10) были использованы для определения параметров ЭБ согласно выражениям (2) и (5), значения которых представлены ниже (Таблица 11). Как видно, вычисление параметров ЭБ по критериям напряжения (выражение (2)) и работы деформации (выражение (5)) дает очень близкие результаты. Кроме того, очевидно, точного совпадения и не должно было быть, т.к. точка, соответствующая полной деформации 0,5%, для которой рассчитывали критерий  $k_5$ , лежит на диаграмме несколько ближе к точке  $b$  (или  $d$ ), чем точка, соответствующая условному пределу текучести, для которой вычисляли критерий  $k_2$ , т.е. критерии  $k_2$  и  $k_5$  вычисляли не при точно совпадающих условиях.

Таблица 10 - Характеристики диаграмм нагружения сплавов

Параметр		Сплав	Цикл растяжения		Цикл сжатия	
			1	2	1	2
$\sigma_{0,2}$	МПа	ZK30	79,0	18,1	32,1	31,0
		ZE10	93,0	42,1	61,9	60,0
		AZ31	116,8	66,1	96,0	90,0
		ZEK100	88,6	47,9	64,9	50,8
$\varepsilon_p$	%	ZK30	0,29	0,57	0,40	0,59
		ZE10	0,29	0,55	0,37	0,49
		AZ31	0,20	0,42	0,28	0,47
		ZEK100	0,29	0,48	0,34	0,51
$\varepsilon_d$	%	ZK30	0,12	0,04	0,09	0,11
		ZE10	0,15	0,16	0,12	0,17
		AZ31	0,10	0,12	0,09	0,11
		ZEK100	0,15	0,15	0,14	0,15
$A_{0,5}$	$10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{М}$	ZK30	27,91	10,18	14,09	13,60
		ZE10	33,61	17,68	25,19	21,42
		AZ31	37,51	23,71	36,37	27,01
		ZEK100	33,30	18,55	25,83	18,72

Таблица 11 - Значения параметров оценки эффекта Баушингера

Сплав	Номер критерия (выражения)	Параметры оценки эффекта Баушингера, %		
		$k_2$ (2)	$k_5$ (5)	$k_6$ (9)
	Тип прямого нагружения	$\frac{\sigma_{0,2}^{(1)} - \sigma_{0,2}^{(2)}}{\sigma_{0,2}^{(1)}} \cdot 100\%$	$\frac{A_{0,5}^{(1)} - A_{0,5}^{(2)}}{A_{0,5}^{(1)}} \cdot 100\%$	$\frac{\varepsilon_d/\varepsilon_p^1 - \varepsilon_d/\varepsilon_p^2}{\varepsilon_d/\varepsilon_p^1} \cdot 100\%$
ZK30	Растяжение	77,09	63,54	80,98
	Сжатие	3,07	3,45	18,96
ZE10	Растяжение	54,73	47,40	42,69
	Сжатие	6,25	14,97	6,20
AZ31	Растяжение	43,41	36,80	43,86
	Сжатие	6,25	25,73	34,77
ZEK100	Растяжение	45,94	44,30	39,5
	Сжатие	21,73	27,52	27,55

Таблица 12 - Значения параметров оценки эффекта асимметрии

Номер критерия (выражения)	Параметры оценки эффекта асимметрии		
	$a_1$ (6)	$a_2$ (7)	$a_3$ (10)
Сплав	$\frac{\sigma_{0,2}^-}{\sigma_{0,2}^+}$	$\frac{A_{0,5}^-}{A_{0,5}^+}$	$\frac{\varepsilon_d/\varepsilon_p^-}{\varepsilon_d/\varepsilon_p^+}$
ZK30	0,41	0,50	0,60
ZE10	0,67	0,75	0,64
AZ31	0,82	0,97	0,63
ZEK100	0,73	0,78	0,79

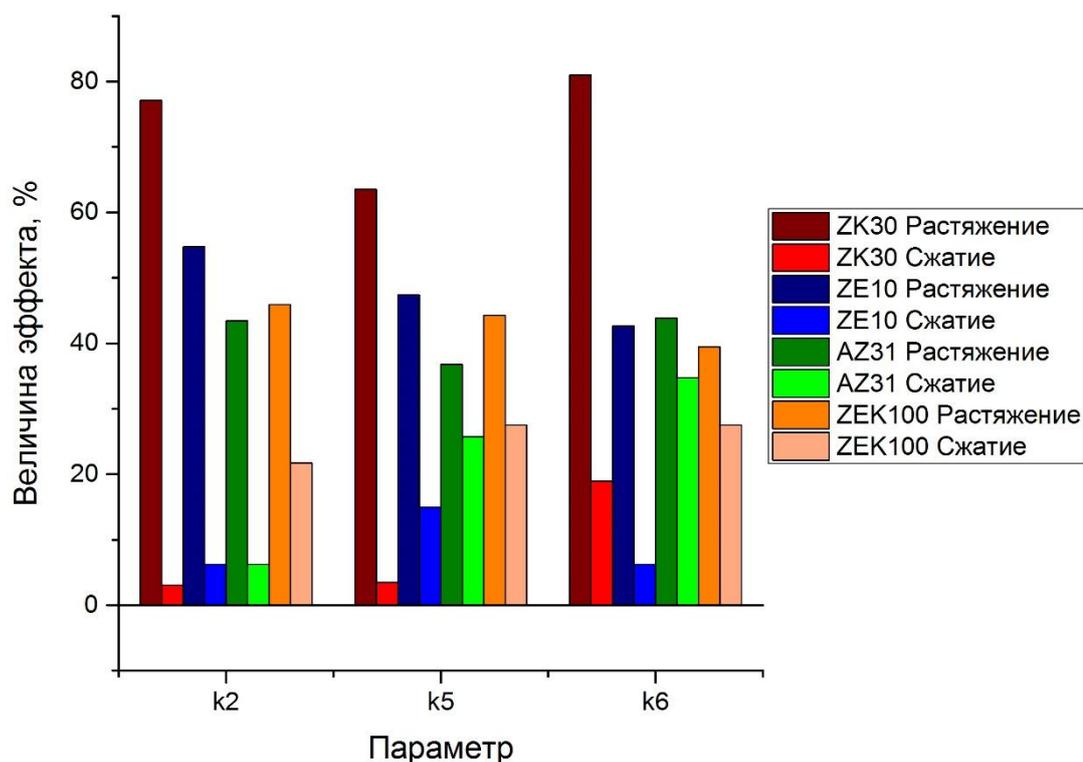


Рисунок 12 - Значения параметров эффекта Баушингера  $k_2$ ,  $k_5$ ,  $k_6$

Аналогично рассмотренному выше, по выражениям (6) и (7) были вычислены параметры оценки эффекта асимметрии  $a_1$  и  $a_2$ . Как и при оценке ЭБ значения различных критериев оказались близки друг другу (Таблица 12).

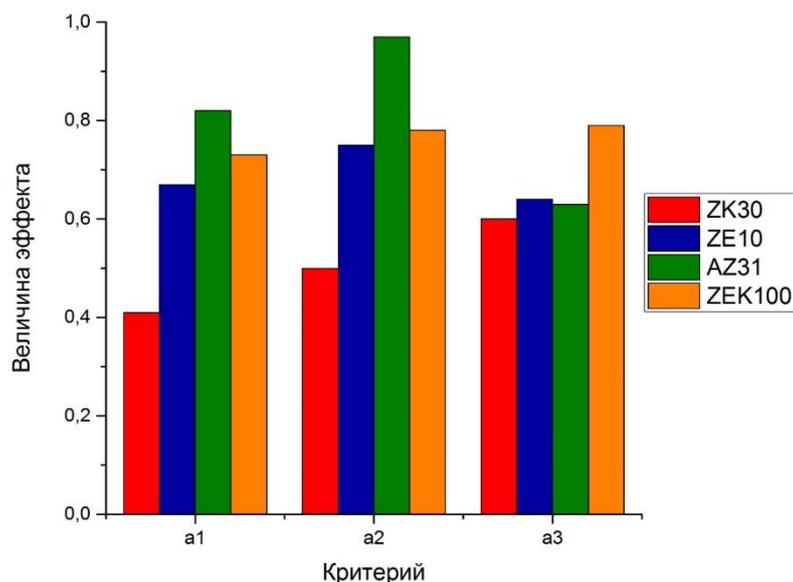


Рисунок 13- Значения параметров эффекта асимметрии  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$

#### 4.4 Обсуждение результатов и выводы

Как уже обсуждалось выше, асимметричное поведение сплавов на основе магния при растяжении и сжатии объясняется разницей в кристаллографии двойникования при этих двух схемах нагружения, а отклонение разгрузочной ветви диаграммы от линейной зависимости (закона Гука) объясняется протеканием процесса раздвойникования. В связи с этим, логично предположить, что эффект Баушингера связан с различным вкладом раздвойникования в общую деформацию при прямом нагружении и прямом после обратного. Обозначим долю раздвойникования в общей пластической деформации как

$$\varepsilon_d/\varepsilon_p \quad (8)$$

и введем на ее основе еще один параметр оценки ЭБ по тому же принципу, что и все предыдущие:

$$k_6 = \frac{\varepsilon_d/\varepsilon_p^1 - \varepsilon_d/\varepsilon_p^2}{\varepsilon_d/\varepsilon_p^1} \cdot 100\% \quad (9)$$

Результаты вычисления параметра  $k_6$  приведены выше (Таблица 11), и их значения оказались практически точно такими же, как все остальные. То есть в исследуемых магниевых сплавах за эффект Баушингера отвечает неупругость, связанная с процессом раздвойникования.

Попробуем и для оценки ЭА применить критерий, основанный на величине  $\varepsilon_d/\varepsilon_p$ :

$$a_3 = \frac{\varepsilon_d/\varepsilon_p^-}{\varepsilon_d/\varepsilon_p^+} \quad (10)$$

Результаты вычисления  $a_3$  приведены выше (Таблица 12) и опять они оказались очень близки к остальным. Это свидетельствует о том, что асимметрия поведения магниевых сплавов при растяжении и сжатии одинаковым образом проявляется как на напряжении начала пластической деформации (условном пределе текучести), так и на вкладе деформации раздвойникования в общей пластической деформации.

Согласно полученным данным (Таблица 11), все параметры оценки эффекта Баушингера при сжатии существенно ниже, чем при растяжении, т.е. ЭБ в этом случае практически намного слабее. Следовательно, в магниевых сплавах неупругость, ответственная за ЭБ, связана с особенностями двойникования именно при растяжении.

Сравнение данных испытаний для разных сплавов во всех случаях говорит в пользу сплава AZ31: для него выше показатели условного предела текучести, как при растяжении, так и при сжатии; меньше проявляется асимметрия поведения и меньше величина эффекта Баушингера.

При прочих равных условиях, сплав ZEK100 с дополнительными интерметаллидными частицами цирконий-содержащих фаз по сравнению со сплавом ZE10 демонстрирует несколько большую склонность к деформационной асимметрии и более сильному эффекту Баушингера при пластической деформации в направлении сжатия, что, наиболее вероятно, логично связано с дополнительными обратными напряжениями, формируемыми дислокационными петлями Орована вокруг частиц. Сравнивая все исследованные сплавы, наименьшую асимметрию деформационного отклика демонстрирует сплав AZ31, что также имеет вполне логичное объяснение, так как именно он содержит наименьшую объемную долю интерметаллидных частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В магниевых сплавах разгрузка образца происходит не по линейному закону, т.е. наряду с линейной упругой деформацией присутствует нелинейная упругая деформация, именно которая и определяет в этих сплавах величину Эффекта Баушингера.
2. Природа нелинейной упругой деформации, по крайней мере, на стадии растяжения, пока не определена.
3. При разгрузки на стадии растяжения обнаружен аномальный эффект подрастания двойников.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Производство цветных металлов [Текст]: учеб. пособие для ПТУ / Б.Б. Кистяковский, Н.В. Гудима, Н.Н. Ракова и др. – 2-е изд. М. : Металлургия, 1984. – 280 с. : ил.
2. Рейнор Г. В. Металловедение магния и его сплавы [Текст] / пер. с англ. Е. А. Гальперина и Н. М. Тиховой. М. : Металлургия, 1964. – 486 с. : ил.
3. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» – Москва: Изд-во стандартов, 1984. –26 с.
4. ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие» – Москва: Изд-во стандартов, 1997. –27 с.
5. Luo A. A. Magnesium: current and potential automotive applications //jom. – 2002. – Т. 54. – №. 2. – С. 42-48.
6. Liu W.C., Dong, J., Zhang P., Yao Z.Y., Zhai C.Q., Ding W.J. High cycle fatigue behavior of as-extruded ZK60 magnesium alloy //Journal of Materials Science. – 2009. – Т. 44. – №. 11. – С. 2916-2924.
7. Shiozawa K., Kitajima J., Kaminashi T., Murai T., Takahashi T. Low-cycle fatigue deformation behavior and evaluation of fatigue life on extruded magnesium alloys //Procedia Engineering. – 2011. – Т. 10. – С. 1244-1249.
8. Lin X. Z., Chen D. L. Strain controlled cyclic deformation behavior of an extruded magnesium alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Т. 496. – №. 1. – С. 106-113.
9. Yin S.M., Yang F., Yang X.M., Wu S.D., Li S.X., Li G.Y. The role of twinning–detwinning on fatigue fracture morphology of Mg–3% Al–1% Zn alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Т. 494. – №. 1. – С. 397-400.

10. Proust G., Tomé C.N., Jain A., Agnew, S.R. Modeling the effect of twinning and detwinning during strain-path changes of magnesium alloy AZ31 //International Journal of Plasticity. – 2009. – Т. 25. – №. 5. – С. 861-880.
11. Wu L., Jain A., Brown D.W., Stoica G.M., Agnew S.R., Clausen B., Liaw P.K. Twinning–detwinning behavior during the strain-controlled low-cycle fatigue testing of a wrought magnesium alloy, ZK60A //Acta Materialia. – 2008. – Т. 56. – №. 4. – С. 688-695.
12. Lee S. Y., Wang H., Gharghoury M. A. Twinning-detwinning behavior during cyclic deformation of magnesium alloy //Metals. – 2015. – Т. 5. – №. 2. – С. 881-890.
13. Теория образования текстур в металлах и сплавах – М.: Наука. 1979, 344 с.
14. Christian J. W., Mahajan S. Deformation twinning //Progress in materials science. – 1995. – Т. 39. – №. 1. – С. 1-157.
15. Barnett M. R. Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part I. “Tension” twins //Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Т. 464. – №. 1. – С. 1-7.
16. Barnett M. R. Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part II. “Contraction” twins //Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Т. 464. – №. 1. – С. 8-16.
17. Bauschinger J. Ueber die veränderung der elasticitätsgrenze und elasticitätsmodul verschiedener, Metal civiling N.F., 27, (1881), 289-348.
18. Механические свойства металлов / Д. Мак-Лин. – М : Металлургия, 1965 . – 431 с.
19. Lemoine X., Aouafi A. Bauschinger effect correspondence of experimental tests //International Journal of Material Forming. – 2008. – Т. 1. – №. 1. – С. 241-244.

20. Abel A. Historical perspectives and some of the main features of the Bauschinger effect //Materials Forum. – Institute of Metals and Materials Australasia, 1987. – Т. 10. – №. 1. – С. 11-26.
21. Столяров В.В. Эффект Баушингера в ультрамелкозернистых металлах //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72. – № 9. – С. 45-49.
22. Vinogradov A., Vasilev E., Linderov M., Merson D. In situ observations of the kinetics of twinning–detwinning and dislocation slip in magnesium //Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 676. – С. 351-360.
23. Фролов, В. В. Теория сварочных процессов / В. В. Фролов. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.