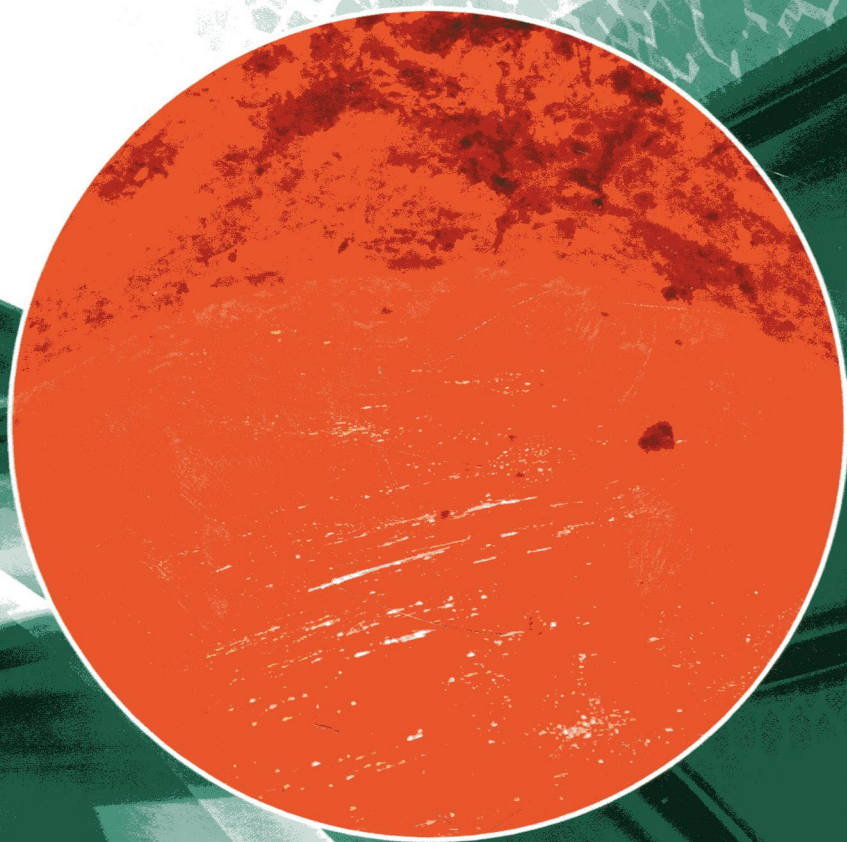


Е.Ф. ВОЛКОВА, Л.Л. РОХЛИН, Б.В. ОВСЯННИКОВ



# СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ  
В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Е.Ф. Волкова, Л.Л. Рохлин, Б.В. Овсянников**

**СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ  
МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ:  
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ  
В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Под общей редакцией  
академика РАН, профессора Е.Н. Каблова

Допущено Федеральным Учебно-методическим объединением  
по укрупненной группе специальностей и направлений  
22.00.00 «Технологии материалов» в качестве учебного пособия  
при подготовке магистров, обучающихся по направлению  
22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»,  
и аспирантов, обучающихся по направлению  
22.06.01 «Технологии материалов»

МОСКВА  
ВИАМ  
2021

УДК 669.721.5(075.8)

ББК 34.2

В67

Рецензенты: преподаватель ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», доктор технических наук, профессор *С.Я. Бецофен*; преподаватель ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», доктор технических наук, профессор *В.Ю. Конкевич*; заместитель начальника лаборатории ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, доктор технических наук *Н.А. Ночовная*; главный научный сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, доктор технических наук *Н.В. Петрушин*

**Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Овсянников Б.В.**

В67 Современные деформируемые магниевые сплавы: состояние и перспективы применения в высокотехнологичных отраслях промышленности: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – Москва: ВИАМ, 2021. – 392 с. : ил.

ISBN 978-5-905217-70-8

В учебном пособии рассмотрены достижения в области разработки и производства деформируемых магниевых сплавов, предназначенных для использования в качестве легких конструкционных материалов в изделиях современной техники. Приведены сведения по свойствам сплавов, их составам, особенностям структуры и специфике формирования фазового состава, изменениям их служебных характеристик в зависимости от системы легирования и технологий изготовления. Представлены характеристики свариваемости, дана оценка коррозионной стойкости в различных средах, рассмотрены методы защиты. Обсуждены перспективы создания новых магниевых сплавов на основе последних сведений о связи их свойств со структурой, фазовым составом, возможностью использования перспективных технологий и новых легирующих элементов. Рассмотрены области применения деформируемых магниевых сплавов в России и за рубежом.

Издание предназначено для студентов и аспирантов высших учебных заведений, специализирующихся в области материаловедения легких сплавов, будет полезно конструкторам, технологам и специалистам в области материаловедения, работающим в научно-исследовательских институтах, на предприятиях авиационной и космической промышленности, а также в других областях, где востребованы легкие конструкционные материалы.

УДК 669.721.5(075.8)

ББК 34.2

ISBN 978-5-905217-70-8

© ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

От издателя .....	7
Введение .....	9
<b>Глава 1. Введение в курс металловедения магния и его сплавов .....</b>	<b>13</b>
1.1. Элемент магний. Основные физические, химические и механические свойства магния, нахождение в природе .....	13
1.2. Природное минеральное сырье. Наиболее известные промышленные способы получения магния .....	16
1.3. Области применения .....	22
<b>Литература .....</b>	<b>23</b>
<b>Вопросы к главе .....</b>	<b>24</b>
<b>Глава 2. Особенности взаимодействия магния с другими химическими элементами .....</b>	<b>26</b>
2.1. Основные принципы легирования магниевых сплавов .....	26
2.1.1. Основные легирующие элементы .....	27
2.1.2. Элементы, используемые как технологические добавки и примеси .....	29
2.2. Особенности диаграмм состояния магния с химическими элементами I–IV групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева .....	30
2.2.1. Диаграммы состояния двойных систем .....	31
2.2.2. Основные диаграммы состояния тройных систем .....	45
2.2.3. Диаграммы состояния четверных систем .....	67
2.3. Роль редкоземельных металлов как перспективных легирующих компонентов в магниевых сплавах .....	69
2.4. Металловедческие основы разработки составов магниевых сплавов для промышленного использования, технологии их термической обработки и обработки давлением .....	71
2.4.1. Особенности кинетики и структурных превращений при распаде пересыщенных твердых растворов на основе магния, сопровождающемся упрочнением при старении .....	71

2.4.2. Особенности поведения магния и сплавов на его основе при пластической деформации и последующих отжигах . . . . .	123
<b>Литература</b> . . . . .	148
<b>Вопросы к главе</b> . . . . .	157
<b>Глава 3. Современные деформируемые магниевые сплавы</b> . . . . .	159
3.1. Классификация и краткая характеристика деформируемых магниевых сплавов (их свойства), используемых в промышленности. Перспективные сплавы . . . . .	159
3.1.1. Сплавы средней прочности . . . . .	160
3.1.2. Сплавы повышенной прочности . . . . .	165
3.1.3. Жаропрочные сплавы . . . . .	171
3.1.4. Сплавы пониженной плотности . . . . .	173
3.1.5. Гранулированные сплавы . . . . .	175
3.2. Особенности используемых технологий деформации и термической обработки магниевых сплавов. Базовые системы легирования. Основные достоинства и недостатки деформируемых магниевых сплавов различных систем. . . . .	178
3.3. Особенности фазового состава магниевых сплавов, содержащих РЗМ . . . . .	180
<b>Литература</b> . . . . .	193
<b>Вопросы к главе</b> . . . . .	196
<b>Глава 4. Перспективы повышения эксплуатационных характеристик магниевых сплавов.</b> . . . . .	198
4.1. Сбалансированное комплексное легирование и применение прогрессивных технологий литья . . . . .	198
4.1.1. Сбалансированное комплексное легирование при сверхбыстрой кристаллизации . . . . .	201
4.1.2. Ультразвуковая обработка . . . . .	206
4.1.3. Бесслитковая прокатка . . . . .	210
4.2. Применение нестандартной технологии обработки давлением . . . . .	212
4.2.1. Сверхпластическая деформация . . . . .	212
4.2.2. Деформация методом гидроэкструзии . . . . .	226

4.3. Изготовление полуфабрикатов из быстрозакристаллизованных гранул магниевых деформируемых сплавов .....	237
4.3.1. Изготовление гранул .....	238
4.3.2. Изготовление прессованных изделий .....	239
4.3.3. Свойства полуфабрикатов, изготовленных из быстрозакристаллизованных магниевых сплавов .....	244
<b>Литература</b> .....	248
<b>Вопросы к главе</b> .....	254
<b>Глава 5. Промышленное производство деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов .....</b>	<b>255</b>
5.1. Плавка и литье крупногабаритных слитков в заводских условиях .....	255
5.1.1. Защита магниевых сплавов при плавлении и литье .....	255
5.1.2. Плавление и приготовление сплава .....	263
5.1.3. Гомогенизация магниевых сплавов .....	284
5.2. Изготовление деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов в заводских условиях .....	289
5.2.1. Основы деформации магниевых сплавов .....	289
5.2.2. Прессование магниевых сплавов .....	294
5.2.3. Штамповка магниевых сплавов .....	298
5.2.4. Изготовление поковок .....	305
5.3. Требования к оборудованию кузнечно-прессовых и термических цехов. Методы борьбы с дефектами. Контроль качества слитков и полуфабрикатов .....	307
5.3.1. Требования к оборудованию кузнечно-прессовых и термических цехов .....	307
5.3.2. Методы борьбы с дефектами .....	312
5.3.3. Контроль качества слитков и полуфабрикатов .....	324
<b>Литература</b> .....	326
<b>Вопросы к главе</b> .....	328
<b>Глава 6. Свариваемость и коррозионная стойкость деформируемых магниевых сплавов .....</b>	<b>330</b>
6.1. Свариваемость деформируемых магниевых сплавов. Основные свойства сварных соединений перспективных магниевых сплавов .....	330

6.2. Природная химическая активность магниевых сплавов. Коррозионная стойкость и способы защиты . . . . .	342
<b>Литература</b> . . . . .	352
<b>Вопросы к главе</b> . . . . .	355
<b>Глава 7. Перспективные области применения магниевых сплавов</b> . . . . .	356
7.1. Особенности производства деталей и узлов из магниевых сплавов . . . . .	356
7.2. Деформируемые магниевые сплавы нового поколения для изделий авиационной, ракетно-космической техники, автомобильной, электронной промышленности. Перспективы применения . . . . .	362
<b>Литература</b> . . . . .	373
<b>Вопросы к главе</b> . . . . .	373
<b>Глава 8. Техника безопасности при работе с магниевыми сплавами</b> . . . . .	375
8.1. Проблема склонности магниевых сплавов к воспламенению при достижении высоких температур. Пути повышения пожаробезопасности магниевых сплавов . . . . .	375
8.2. Основные требования техники безопасности . . . . .	383
<b>Литература</b> . . . . .	386
<b>Вопросы к главе</b> . . . . .	388
<b>Заключение</b> . . . . .	389