

adhesion of Re-Ni coatings to substrates was carried out by method of plotting latticed and parallel scratches (scratches method). The value of adhesion of coatings by method of latticed scratches on the surface was assessed according to the 4-point scale. It is established that an adhesion of coatings without annealing was on copper substrates – 1 point, on stainless steel substrates – 4 points. The coatings after annealing have an adhesion on copper substrates – 1 point, on stainless steel substrates – 2 points. The value of adhesion of coatings by method of parallel scratches was assessed according to the 3-point scale. The values of adhesion of coatings on copper and stainless steel substrates without annealing are 2 points. The coatings after annealing have an adhesion on copper substrates – 1 point, on stainless steel substrates – 2 points. The Re-Ni coatings adhesion on copper substrates is higher than on steel. The heat treatment of coatings increases the adhesion regardless of the substrate material. The microhardness of coatings after annealing has increased: on a copper substrate from 6990 up to 9211 MPa, on a steel substrate from 3732 up to 4204 MPa.

Key words: alloys, coatings, rhenium, nickel, membrane electrolysis, annealing, adhesion, microhardness, copper-substrate, steel-substrate.

Поступила 05.08.2015



УДК 629.76/78.0022

**Комплексное использование
минерального сырья. № 3. 2015**

*М. Б. ИСМАИЛОВ, Ж. М. РАМАЗАНОВА, Г. Б. НИГМЕТЧАНОВА,
С. ТОЛЕНДЫУЛЫ, Л. М. МУСТАФА*

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»

Алматы, m.ismailov@spaceres.kz

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Mg-Al-Zn-Mn

Исследовано влияние деформации и термической обработки на структуру и свойства экспериментального магниевого сплава системы Mg-Al-Zn-Mn. Деформируемые сплавы данной системы предназначены для изготовления полуфабрикатов различными методами обработки давлением (прессование, ковка на гидравлических прессах, штамповка и т. п.). Химический состав полученных в лабораторных условиях образцов составил, вес. %: алюминий – 8,3; цинк – 0,61; марганец – 0,25; остальное – магний. Пористость сплава составила 5,9 %. Полученный сплав по составу аналогичен стандартному сплаву МА5 и европейскому аналогу AZ80A. Деформация осуществлялась при температурах образцов 150-350 °С и до степеней сжатия 20 % и 40 (20+20) %. При температуре 150 °С деформация приводит к разрушению образцов. При температурах 200 °С и выше пластическая деформация идет без образования трещин. Показано, что с увеличением температуры прессования прилагаемое давление пресса уменьшается. Исследована микроструктура образцов. Установлено, что после гомогенизационного отжига размеры зерен находятся в пределах 13-15 мкм. Деформация сплава в 20 % приводит к измельчению зерен до 10-11 мкм. Деформация до 40 % приводит к уменьшению размера зерна до 9-10 мкм. Получены значения давления прессования для степени деформации 20 и 40 % и диапазона температур прессования 200-350 °С. Установлено, что при степени деформации 20 и 40 % максимальные значения прочности достигаются при температуре 250 °С. Прочностные характеристики для исследованного экспериментального магниевого сплава приближаются к характеристикам российского сплава МА5 и европейского сплава AZ80A при степени деформации 40 %.

Ключевые слова: магниевый сплав, деформация, термическая обработка, микропористость, микротвердость, прочностные характеристики.

Введение. Магниевого сплавы находят большое применение в производстве авиационной, космической, автомобильной техники. Ос-

новными преимуществами магниевых сплавов являются малая плотность, высокая удельная прочность, жесткость, виброустойчивость. Вви-

ду того, что магниевые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых, в 4 раза легче стали и чугуна, их применение снижает массу изделий на 25-30 % [1]. Особой отличительной чертой магниевых сплавов является то, что они обладают высоким коэффициентом демпфирования, поэтому магниевые сплавы находят применение при изготовлении движущихся элементов конструкций, работающих при знакопеременных нагрузках.

Группа сплавов системы Mg-Al-Zn-Mn широко применяется в качестве деформируемых сплавов [2, 3]. Деформируемые сплавы данной системы предназначены для изготовления полуфабрикатов различными методами обработки давлением (прессование, ковка на гидравлических прессах, штамповка и т. п.). Высокопрочный деформируемый сплав МА5 является недорогим экономно легированным сплавом. Данный сплав в настоящее время успешно применяется для изготовления различных деталей, работающих в условиях отрицательных напряжений при повышенных нагрузках в конструкциях летательных аппаратов. В этой связи представляется целесообразным проведение исследований по влиянию деформации и термической обработки на структуру и свойства магниевого сплава.

Цель настоящей работы – исследование влияния различной степени деформации и термической обработки на структуру и механические свойства магниевого сплава системы Mg-Al-Zn-Mn.

Методика проведения исследований. В лабораторных условиях получены образцы магниевого сплава под слоем флюса в шахтной печи сопротивления СШОЛ 5.6 1750 OL, оборудованной системой автоматического регулирования температуры. Образцы получали в виде цилиндра диаметром 25 мм, высотой 100 мм. Химический состав образцов, вес. %: алюминий – 8,3; цинк – 0,61; марганец – 0,25; остальное – магний. Пористость сплава составила 5,9 %. Полученный сплав по составу аналогичен стандартному сплаву МА5 и европейскому аналогу AZ80A.

Деформацию литых образцов после гомогенизационного отжига осуществляли методом горячего прессования на прессе «Dezimalpresse DP36», оборудованном обогреваемыми плитами. Поддержание температуры плит обеспечивалось программируемыми измерителями-регистраторами температур «ОВЕН Т470» и «ОВЕН ТРМ10». Скорость деформации магниевого

сплава составила 0,13-0,20 мм/с. Прессование осуществляли в два этапа: 1 – 20 %; 2 – (20+20) %, в сумме 40 %. Температурные режимы прессования и соответствующие степени обжатия представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Температурные режимы процесса прессования и степени обжатия

№ образца	Температура, °C	Степень обжатия, %
1	150	20
2	200	20
3	250	20
4	300	20
5	350	20
6	200	40 (20 +20)
7	250	40 (20+20)
8	300	40 (20+20)
9	350	40 (20 +20)

После деформации образцы подвергались закалке при температуре 420 °C в течение 6 часов и искусственному старению при температуре 190 °C в течение 14 часов.

Исследование микроструктуры сплава проводили на микроскопе Axiovert 200 MAT методами количественной металлографии и путем сопоставления структуры с заранее составленными шкалами. Для подготовки шлифов использовали комплекс пробоподготовки BRILLANT 221.

При излучении микротвердости применяли прибор ПМТ-3. Прочностные свойства материала определялись на универсальной разрывной машине AG-100kNx компании «Shimadzu» с компьютерной обработкой. Образцы для испытаний были изготовлены согласно ГОСТ 1497-84 размером: ширина – 20 мм, толщина – 3 мм, длина – 80 мм. Растяжение образцов производили при комнатной температуре со скоростью 0,5 мм/мин, нагрузке до 100 кН.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Проведение процесса деформации литого образца магниевого сплава системы Mg-Al-Zn-Mn при температуре 150 °C привело к разрушению образца с образованием трещин. Известно, что гексагональное строение кристаллической решетки магния и его сплавов обуславливает некоторые особенности процесса деформации и свойств получаемых полуфабрикатов. При комнатной температуре скольжение в кристаллической решетке маг-

ния происходит только по одной плоскости базиса гексагональной призмы, чем объясняется низкая пластичность сплавов при этой температуре. При данной температуре сплав, имеющий неравновесные границы зерен, при деформации показывает низкие показатели пластичности. При температурах 200 °С и выше пластическая деформация идет без образования трещин. Установлено, что с увеличением температуры прессования прилагаемое давление пресса уменьшается.

Данные зависимости давления пресса от температуры образца представлены в таблице 2.

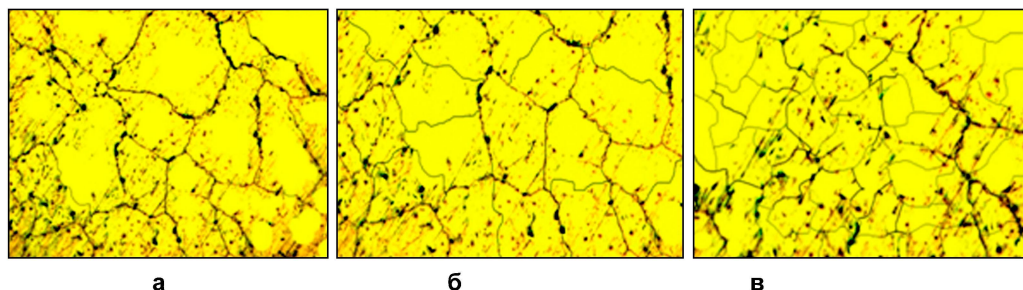
Таблица 2 – Зависимость давления пресса от температуры образца

Температура образца и пресса, °С	Деформация образца на 20 %		Деформация образца на 40 %	
	усилие пресса, кгс	давление пресса, МПа	усилие пресса, кгс	давление пресса, МПа
200	605,8	5,1	688,8	3,5
250	563,4	4,7	650,0	3,3
300	476,8	4,0	605,8	3,1
350	388,6	3,2	476,8	2,4

15 мкм. Деформация сплава на 20 % приводит к измельчению зерен до 10-11 мкм. Дальнейшая деформация до 40 % способствует большему возникновению зародышевых центров и, как следствие, к уменьшению размера зерна до 9-10 мкм.

Как известно, микротвердость образца сплава зависит от размера зерна [4, 5]. Исследования микротвердости образцов, полученных после деформации на 20 и 40 %, показали, что с увеличением степени деформации микротвердость образцов растет. Увеличение микротвердости деформируемого сплава происходит главным образом за счет измельчения структуры, которое в данных условиях эксперимента может быть обусловлено как дроблением исходных зерен и кристаллитов, так и за счет образованием зародышей рекристаллизации. Результаты измерений микротвердости образца после технологических операций приведены на рисунке 2.

Как видно, все технологические операции получения деформированного магниевого сплава дают повышение микротвердости материала.



а – образец после гомогенизационного отжига (x200); б – образец после прессования на 20% (x200); в- образец после прессования на 40 % (x200);

Рисунок 1 – Микроструктура образцов при различных степенях прессования

Как и ожидалось, давление прессования снижается по мере увеличения температуры материала. Полученные данные необходимы для решения практических задач штамповки,ковки, прокатки магневых сплавов и подбора технологического оборудования.

Качественные изменение микроструктуры материала после деформаций приведены на рисунке 1.

Исследования микроструктуры образцов после гомогенизационного отжига показали, что размеры зерен находятся в пределах 13-

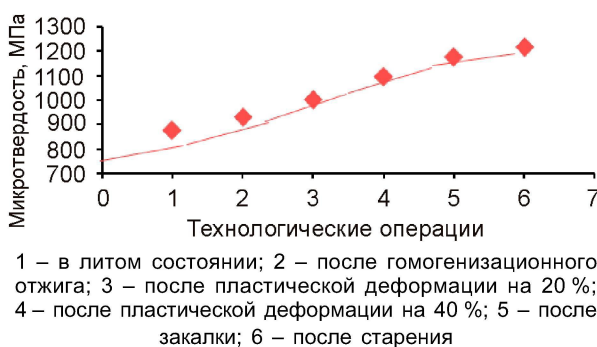


Рисунок 2 – Микротвёрдость сплава системы Mg-Al-Zn-Mn

Результаты исследования прочностных характеристик материала на разрыв приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Влияние температуры и степени деформации на прочность материала

№ образца	Температура деформации, °С	Степень деформации, %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	200	20	200	141	6,4
2	250	20	238	158	7,3
3	300	20	226	153	8,8
4	350	20	238	159	8,6
5	200	40 (20+20)	280	220	5,3
6	250	40 (20+20)	328	267	7,6
7	300	40 (20+20)	300	231	5,3
8	350	40(20+20)	315	259	6,8

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о следующих закономерностях:

- увеличение степени деформации приводит к упрочнению материала;
- при 20 %-ной деформации максимальный уровень прочности материала достигается при температуре прессования 250 °С, и далее с повышением температуры меняется незначительно;
- при 40 %-ной деформации максимальный уровень прочности материала достигается при температуре прессования 250 °С и при дальнейшем повышении температуры прочность начинает падать.

Данные закономерности указывают на сложную зависимость микроструктуры образцов от температуры прессования. Температура 250 °С является оптимальной для данного состава сплава с точки зрения максимальной прочности материала и минимальных затрат на его получение.

Прочностные характеристики для исследованного экспериментального магниевого сплава приближаются к характеристикам российского сплава МА5 [5] ($\sigma_b = 265-295$ МПа, $\sigma_{0,2} = 175-185$ МПа, $\delta = 4-6$ %) и европейского сплава AZ80A [6] ($\sigma_b = 290-340$ МПа, $\sigma_{0,2} = 200-250$ МПа, $\delta = 5-6$ %) при степени деформации 40 %.

Выводы. Получены экспериментальные значения давления прессования для магниевого сплава системы Mg-Al-Zn-Mn при температурах 200-350 °С и степенях деформации 20 и 40 %.

Показано, что пластическая деформация приводит к увеличению микротвердости сплава.

Процессы закалки и искусственного старения приводят к дальнейшему увеличению микротвердости сплава. После процесса искусственного старения микротвердость сплава составляет 1220 МПа.

Деформация вызывает уменьшение размера зерен микроструктуры материала. Деформация сплава на 20 % приводит к измельчению зерен до 10-11 мкм. Дальнейшая деформация до 40 % приводит к большему возникновению зародышевых центров, что приводит к уменьшению размера зерна до 9-10 мкм. Оптимальная температура деформации – 250 °С.

Значение прочностных характеристик на разрыв у полученных образцов сплава приближаются к прочностным характеристикам промышленных деформируемых магневых сплавов МА5 и AZ80А при степени деформации 40 %.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Уридия З.П., Мухина И.Ю. Новые пропитывающие материалы для герметизации отливок из магневых и алюминиевых сплавов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2011. – № 8. – С. 37-41.
- 2 Волкова Е.Ф., Антипов В.В. Магнелиевые деформируемые сплавы // Все металлы. Энциклопедический справочник. – 2012. – № 5. – С. 135-141.
- 3 Волкова Е.Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2006. – № 11. – С. 14-19.
- 4 Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
- 5 Пат. 2384639 РФ. Деформируемый магниевый сплав, имеющий хорошую формуемость, и способ его изготовления / Ким Канг-Хыунг.; опубл. 20.03.2010, Бюл. № 15.
- 6 Марочник стали и сплавов [Электрон. ресурс]. – URL: <http://splav.kharkov.com>. (дата обращения: 27.10.2014).

REFERENCES

- 1 Uridiya Z.P., Mukhina I.Yu. *Novye propityvayushchie materialy dlya germetizatsii otlivok iz magnievykh i aluminievykh splavov* (New impregnating materials for sealing casting of magnesium and aluminum alloys) *Vse materialy. Ehntseklpedicheskij spravochnik* = *All materials. Book of reference*. **2011.** 8, 37-40 (in Russ.).
- 2 Volkova E.F., Antipov V.V. *Magnievyje deformiruyemye splavy* (Magnesium wrought alloys) *Vse metally. Ehnciklopedicheskij spravochnik* = *All metals. Book of reference*. **2012.** 5, 135-141 (in Russ.).
- 3 Volkova E.F. *Sovremennye deformiruyemye splavy i kompozitsionnye materialy na osnove mag-*

niya (Modern wrought alloys and composite materials based on magnesium) *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*. 2006. 11, 14-19 (in Russ.).

4 Polukhin P.I., Gorelik S.S., Vorontsov V.K. *Fizicheskie osnovy plasticheskoy deformatsii* (Physical basis of plastic deformation). Moscow: Metallurgy. 1982. 584 (in Russ.).

5 Pat. 2384639 RF. *Deformiruemyy magnievyj splav, imeyushchij khoroshuyu formuemost', i sposob ego izgotovleniya* (Wrought magnesium alloy having good formability and method of its making) Kim Kang-Hyung. Opubl. 20.03.2010, 15 (in Russ.).

6 *Marochnik stali i splavov* (Database of Steel and Alloys) *Elektron. ressource* – <http://splav.kharkov.com>. (date of access: 27.10.2014) (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Тәжірибелік магний қорытпа Mg-Al-Zn-Mn жүйесінің деформация мен термиялық өңдеу әсері арқылы құрылымы мен қасиеттері зерттелді. Зертханалық жағдайда алынған үлгілердің химиялық құрамы, салмағы %: алюминий – 8,3 %; мырыш – 0,61 %; марганец – 0,25 %; қалғаны магний. Қорытпаның микрокеуектілігі 5,9 % құрады. Алынған қорытпа құрамы стандарттық қорытпа МА5 және еуропалық үйлестікке AZ80A ұқсас. Беріктігі жоғары деформациялық қорытпа МА5 арзан және үнемді қосындыланған қорытпа болып табылады. Ұзақ созу кернеуі кезінде жұмыс істейтін түрлі тетіктерді штамповка жолымен дайындауда, сондай-ақ, үлкен салмақтарды көтеретін азаматтық ұшақтар мен ұшу аппараттарының конструкциясында аталған қорытпа қазіргі кезде табысты қолданылып келеді. Үлгілерде 20 % және 40 % (20+20) % қысу дәрежесі бойынша деформация 150-350 °С температурада орындалды. 150 °С температурада деформациялағанда үлгінің бұзылуына әкеледі. 200 °С – дан жоғары температурада пластикалық деформация кезінде ақаулар байқалмайды. Көрсетілгендей престеу кезінде температура жоғарлаған сайын, престін қысымы төмендейді. Үлгілердің микроқұрлымы зерттелген. Біртектендіруші өңдеуден кейін түйіршік өлшемі 13-15 мкм аралықта болатыны анықталған. 20 %-дық деформация кезінде қорытпа түйіршіктері 10-11 мкм ұсақталады. 40 %-ға дейін деформациялағанда түйіршіктің өлшемі 9-10 мкм төмендеуіне алып келеді. Қысу температурасы 200-350 °С аралығындағы және деформация деңгейі 20 % және 40 % кезіндегі қысудың мәні алынған. 250 °С температурада кезінде 20 % және 40 % деформация деңгейінде ең жоғарғы беріктік мәні алынғаны анықталған. 40 % деформация деңгейі кезіндегі зерттелген тәжірибелік магний қорытпасының беріктік сипаттамалары ресейлік қорытпа МА5 және еуропалық қорытпа AZ80A беріктік сипаттамаларына сәйкес келеді.

Түйінді сөздер: магний құймалары, деформация, термиялық өңдеу, кеуектілік, микроқаттылық, беріктік сипаттамалары.

SUMMARY

During the research influence of strain and thermal treatment on properties of the experimental magnesium alloy Mg-Al-Zn-Mn was studied. Chemical composition of samples obtained in laboratory is, mass %: Al – 8,3; Zn – 0,61; Mn – 0,25; remainder – Mg. Porosity of alloy equals to 5,9 %. Obtained alloys composition is identical to conventional alloy MA5 and to European analogue AZ80A. High-strength nonrigid alloy MA5 is economical sparingly doped alloy. This alloy is currently used to fabricate press moulded products which endure long lasting tensile loads and high carry stress in civil airplanes and other flight vehicles. Straining process was carried out under samples temperature 150-350 °C and compressive ratio of 20 % and 40 (20+20) %. At 150 °C strain leads to samples failure. At temperatures of 200 °C and higher plastic deformation proceeds without structural defects (cracks). It is shown that with growth of pressing temperature required pressure is reduced. Microstructure of samples was analyzed during the study. It was established that after diffusion annealing grains dimensions were in range of 13-15 µm. Alloy deformation of 20 % decreases grains size to 10-11 µm. Deformation up to 40 % decreases grains size to 9-10 µm. Pressure values for degree of deformation 20 % and 40 % and temperature range of 200-300 °C were determined. At deformation degree 20 and 40 % maximum strength properties are obtained at 250 °C. Properties of fabricated material come close to Russian alloy MA5 and European AZ80A at 40 % deformation.

Key words: magnesium alloy, deformation, thermal processing, microporosity, microstructure, strength properties.

Поступила 21.04.2015

