

УДК 621.831

Кравцов В. В., д-р техн. наук Качан А. Я.

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## ВЛИЯНИЕ ДВОЙНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТОЛЕТНОЙ ТРАНСМИССИИ

**Цель работы.** Оценка влияния последовательных этапов химико-термической обработки (цементация + азотирование) на качество изготовления зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш главных вертолетных редукторов.

**Методы исследования.** Микроструктура образцов зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш главных вертолетных редукторов исследовалась на оптическом металлографическом микроскопе модели «Axio Observer. Dlm» (фирма «Karl Zeiss», производитель Германия), оснащенного камерой ARTCAM-300MI (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); съемка образцов выполнена в отраженном свете по методам светлого поля.

Механические свойства образцов зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш после ХТО определялись по стандартной методике при испытании на растяжение по ГОСТ 1497-84 на машине INSTRON-8801.

**Полученные результаты.** На основе результатов экспериментальных исследований, показано влияние двойной химико-термической обработки на микротвердость, микроструктуру и механические свойства зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш главных вертолетных редукторов.

**Научная новизна.** В данной работе экспериментально установлено влияние последовательных этапов (цементация + азотирование) химико-термической обработки на параметры качества контактных поверхностей зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш главных вертолетных редукторов.

**Практическая ценность.** На основании полученных результатов эксперимента возможно разработать рациональный технологический процесс изготовления зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш главных вертолетных редукторов, обеспечивающий высокие эксплуатационные характеристики.

**Ключевые слова:** главный вертолетный редуктор, зубчатые колеса, двойная химико-термическая обработка, микроструктура цементированного слоя, микроструктура азотированного слоя, механические свойства зубчатых колес, экспериментальные данные.

### Введение

Изготовление зубчатых колес – многооперационный технологический процесс, где операции горячей пластической деформации и механической обработки сочетаются с операциями термической обработки заготовок и химико-термической обработки (ХТО) деталей. Зубчатые колеса вертолетных редукторов относятся к числу наиболее сложных в технологическом отношении деталей. При их изготовлении число операций и переходов достигает нескольких десятков. Сложная и ажурная конфигурация зубчатых колес, минимальные припуски существенно усложняют процессы термической и механической обработки, требуют тщательного их выполнения [1].

Работоспособность зубчатых колес в решающей степени зависит от точности изготовления и качества поверхностного слоя зубьев, которое должно быть высоким, чтобы в условиях действия больших контактных напряжений, сил трения и контактных температур рабочие поверхности могли противостоять повреждению и разрушению усталости [2, 3].

Среди современных упрочняющих технологий, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики зубчатых колес, центральное место принадлежит химико-термической обработке.

### 1 Анализ исследований и публикаций

Химико-термическая обработка (ХТО) представляет собой совокупность процессов теплового и химического воздействия, направленных на изменение химического состава и структуры поверхностного слоя зубьев колес для повышения их эксплуатационных свойств. При ХТО зубчатые колеса помещают в нагретую до высоких температур химически активную среду, в которой происходит диффузионное насыщение их поверхности одними или несколькими химическими элементами. В результате поверхностного легирования в сочетании с предварительной или последующей термической обработкой формируют диффузионные слои, обладающие комплексом высоких механических свойств.

ХТО включает несколько способов. Для эффективного упрочнения поверхности зубьев колес используют цементацию, высокотемпературную нитроцементацию и азотирование. Каждый из этих способов имеет несколько технологических вариантов, отличающихся насыщающей средой, оборудованием, технологическими возможностями, экономичностью и экологической чистотой. Влияние этих факторов обуславливает различный механизм формирования диффузионного слоя при цементации (нитроцементации) и азотировании, его химический состав, структуру и свойства [2], [4–6].

## 2 Цель работы

Цель работы – оценка влияния последовательных этапов химико-термической обработки (цементация + азотирование) на качество изготовления зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш главных вертолетных редукторов.

## 3 Объект исследования

В качестве объекта исследования, для последовательной химико-термической обработки, приняты образцы зубчатых колес главных вертолетных редукторов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш.

## 4 Методы исследования

Для оценки качества материала проведена химико-термическая обработка трёх образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш по следующим режимам:

*образец № 1:*

- цементация (930 °С) – 16 ч;
- отжиг (660 °С) – 7 ч;
- нормализация (935 °С) – 3 ч 30 мин;
- отпуск (650 °С) – 4 ч;
- закалка (915 °С) – 2 ч 15 мин;
- холод (-60 °С) – 1 ч 10 мин;
- отпуск (300 °С) – 3 ч 15 мин.

*образец № 2:* после цикла обработки, как для образца № 1 + азотирование при 540 °С – 2 ч 30 мин.

*образец № 3:* после цикла обработки, как для образца № 2 + повторное азотирование при 550 °С – 2 ч.

Микроструктура образцов исследовалась на оптическом металлографическом микроскопе «Axio Observer. Dlm» (фирма «Karl Zeiss», Германия), оснащенного камерой ARTCAM-300MI (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); съемка выполнена в отраженном свете по методам светлого поля.

Механические свойства образцов после ХТО определялись по стандартной методике при испытании на растяжение по ГОСТ 1497-84 на машине INSTRON-8801.

## 5 Результаты исследований и их обсуждение

Результаты определения микротвердости по сечению диффузионного слоя со стороны поверхностей, подвергавшихся цементации и цементации с азотированием, представлены в табл. 1.

*Примечание.* Значения твердости, представленные в таблице 1, в единицах измерения (HRN15) и (HRC), получены на основании таблиц перевода значений прямого измерения методом Виккерса HV1.

Из приведенных результатов микротвердости (HV1) следует, что эффективная глубина диффузионного слоя, соответствующая 500HV, составляет:

- образец № 1 – 2,2 мм;
- образец № 2 – 1,9 мм;
- образец № 3 – 1,55 мм.

На образце № 1 глубина цементированного слоя составляет ~ 2,17 мм (рис. 1а).

Микроструктура цементированного слоя представляет собой мартенсит и карбиды, выделившиеся в виде сетки (рис. 1б, в), микроструктура сердцевины – мартенсит отпуска.

На образцах № 2 и № 3 глубина упроченного слоя составляет 2,220 мм (рис. 2а, 3а).

Микроструктура упроченного слоя представляет собой мартенсит + карбиды в виде грубой сетки и карбонитриды. С поверхности имеется ξ- фаза толщиной ~ 0,004 мм на образце № 2 и ~ 0,010 мм на образце № 3 (рис. 2б, в; 3б, в), микроструктура сердцевины – мартенсит отпуска.

**Таблица 1** – Микротвердость по сечению диффузионного слоя

№ образца	Расстояние от поверхности, мм										
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Микротвердость, HV1 (HRC, HRN15)											
Образец № 1	HV1	754	757	749	727	716	692	656	623	561	527
	HRN15	91,0	91,0	91,0	90,5	90,5	90,0	89,0	88,5	86,5	85,5
	HRC	62,0	62,0	62,0	61,0	60,5	59,5	58,0	56,5	53,0	51,0
Образец № 2	HV1	610	599	593	592	579	575	558	537	524	498
	HRN15	88,0	88,0	87,5	87,5	87,5	87,5	87,0	86,0	85,5	85,0
	HRC	55,5	55,0	54,5	54,5	54,0	53,5	52,5	51,5	50,5	49,0
Образец № 3	HV1	578	572	567	564	552	537	518	496	–	–
	HRN15	87,0	87,0	87,0	87,0	86,5	86,0	85,5	84,5	–	–
	HRC	54,0	53,5	53,0	53,0	52,5	51,5	50,0	48,5	–	–

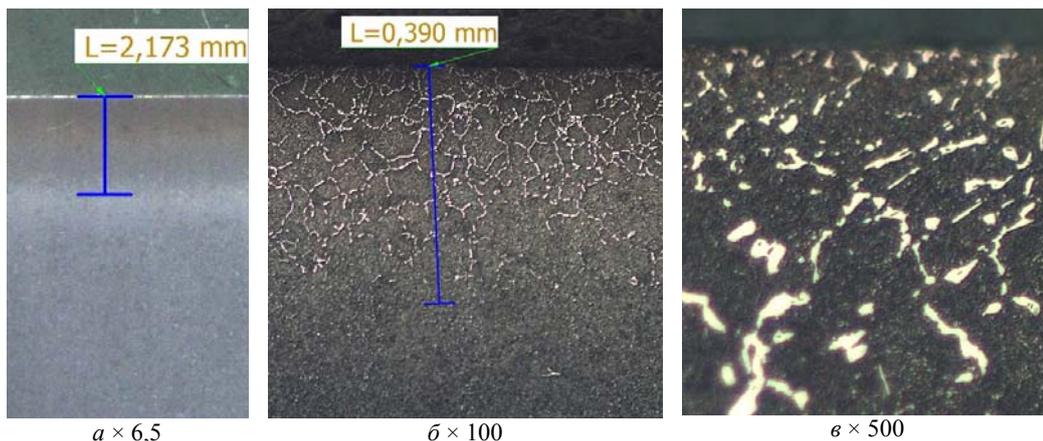


Рис. 1. Микроструктура цементованного слоя образца № 1

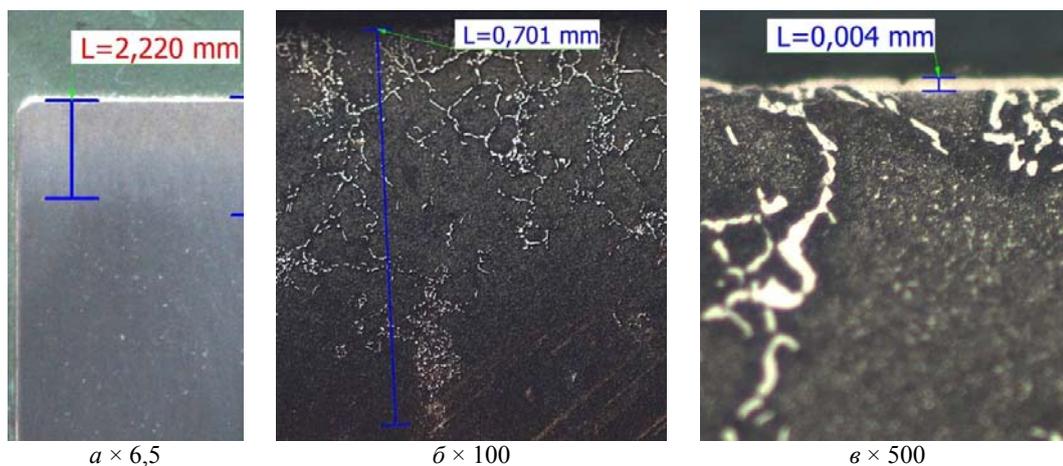


Рис. 2. Микроструктура цементованного слоя образца № 2

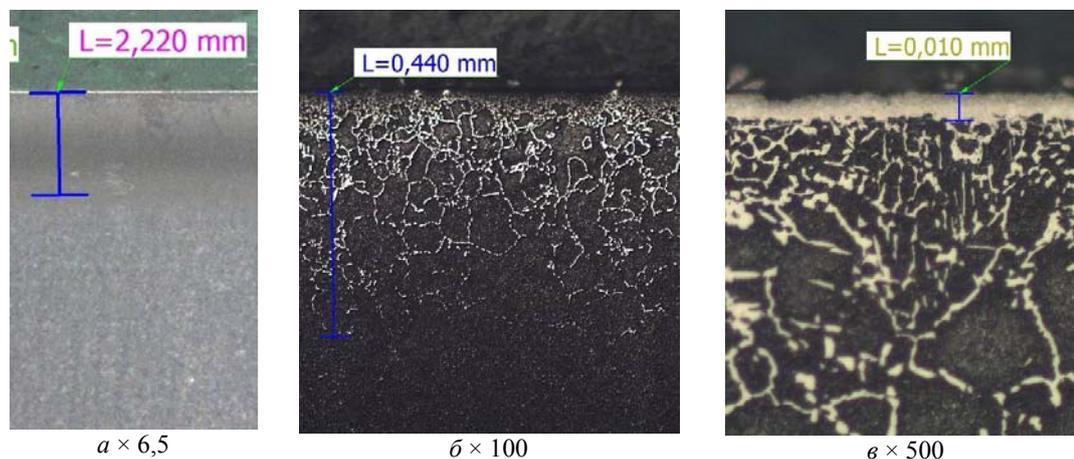


Рис. 3. Микроструктура цементованного слоя образца № 3

**Примечание.** Качество азотирования, проведенного после цементации на образцах № 2 и № 3, оценивали со стороны поверхности, не подвергавшейся цементации. В результате установлено, что качество азотирования удовлетворительное: - глубина азотированного слоя на образце № 2 составляет  $\sim 0,10$  мм, на образце № 3  $\sim 0,13$  мм; - твердость азотированного слоя на образце № 2 – 89 HRN15, на образце № 3 – 90-91 HRN15. - микроструктура азотированного слоя представляет собой азотистый мартенсит отпуска и единичные тонкие избыточные нитриды; толщина  $\xi$ - фазы на образцах № 2 и № 3 составляет  $\sim 0,002$  и  $\sim 0,005$  мм, соответственно (рис. 4, 5).

Дополнительно определены механические свойства стали 16ХЗНВФМБ-Ш после двойной термообработки (цементация + азотирование). Испытания проводились

на хордовых образцах, вырезанных из зубчатого колеса. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

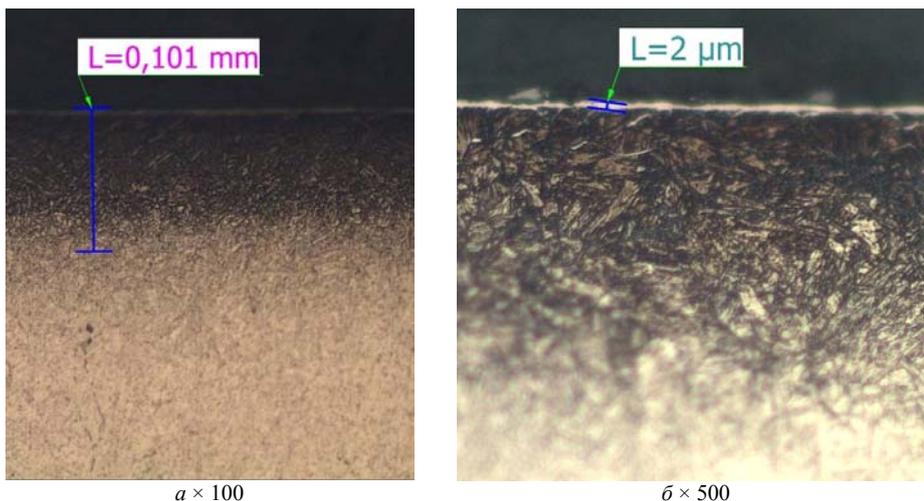


Рис. 4. Микроструктура азотированного слоя образца № 2

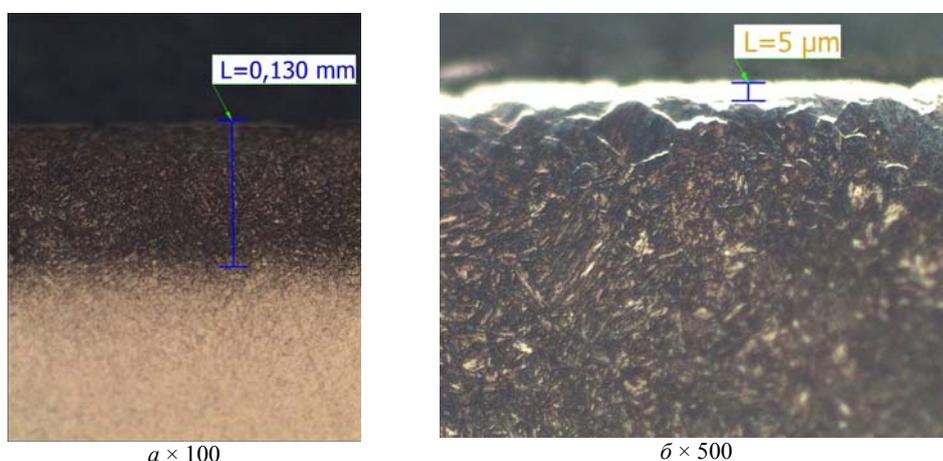


Рис. 5. Микроструктура азотированного слоя образца № 3

Таблица 2 – Механические свойства образцов из стали 16Х3НВФМБ-Ш после двойной термообработки (цементация + азотирование)

№ образца	Режим термообработки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, МПа
Хордовый образец из стали 16Х3НВФМБ-Ш	- цементация (930 °С) – 3 ч - отжиг (660 °С) – 7 ч	1291,6	1127	12,4	51,1	45,4
Нормы по 27ТУ-135	- закалка (915 °С) – 2 ч 30 мин - холод (-60 °С) – 1 ч 10 мин - отпуск (300 °С) – 3 ч 15 мин - азотирование (540 °С) – 2 ч 30 мин	не менее				
		1274	1127	6,5	35	41,2

### Выводы

Качество материала образцов № 1, 2, 3 детали колеса зубчатое, после цементации (образец № 1) и после цементации и азотирования (образцы № 2 и № 3) по твердости поверхности, твердости сердцевины и глубине упрочненного слоя соответствуют нормам.

Следует отметить, что после выполнения двойной химико-термической обработки (цементация + азотирование) имеет место снижение твердости упрочненного слоя при прямом измерении поверхности под нагрузкой 1500Н (HRC), а также микротвердости (HV1) по

сечению упрочненного слоя, на расстоянии ~ 0,2 мм от поверхности, в сравнении с твердостью и микротвердостью цементированного слоя, вследствие того, что азотирование выполняется при температуре 540 °С, превышающей температуру отпуска после цементации (300 °С).

Микроструктура цементированного слоя на образцах № 1, 2, 3 неудовлетворительная.

Механические свойства основного материала колеса зубчатого после двойной химико-термической обработки (цементация + азотирование) соответствуют нормам 27ТУ-135.

## Список літератури

1. Елисеєв Ю. С. Научные основы совершенствования технологии изготовления зубчатых колес ГТД / Елисеєв Ю. С. // Двигатель. – 2001. – № 4 (16). – С. 10–13.
2. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей : Произв.-практ. издание / Ю. С. Елисеєв, В. В. Крымов, И. П. Нежурин и др. ; под ред. Ю. С. Елисеєва. – М. : Высш. шк., 2001. – 493 с.
3. Фомина Л. П. Повышение триботехнических свойств зубчатых колес газотурбинного двигателя путем совершенствования технологии их изготовления / Л. П. Фомина // Технология металлов – 2004. – № 8. – С. 43–47.
4. Райцес В. Б. Химико-термическая обработка деталей / В. Б. Райцес, В. М. Литвин. – К. : Техника, 1980. – 152 с.
5. Цырлин Э. С. Химико-термическая обработка деталей машин / Э. С. Цырлин. – М. : НИИмаш, 1980. – 80 с.
6. Современные технологии повышения долговечности цилиндрических зубчатых колес / А. А. Пермяков, А. Н. Шелковой, А. А. Ключко, А. А. Охрименко // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали ХVІІІ міжнародної науково-технічної конференції 29 червня – 1 липня 2017 р. – Київ, 2017. – С. 348–350.

Одержано 28.01.2019

### Кравцов В.В., Качан О.Я. Вплив подвійної хіміко-термічної обробки на якість виготовлення зубчатих коліс вертолітної трансмісії

**Мета роботи.** Оцінка впливу послідовних етапів хіміко-термічної обробки (цементация + азотування) на якість виготовлення зубчатих коліс зі сталі 16ХЗНВФМБ-Ш головних вертолітних редукторів.

**Методи дослідження.** Мікроструктура зразків зубчатих коліс із сталі 16ХЗНВФМБ-Ш головних вертолітних редукторів досліджувалась на оптичному металографічному мікроскопі моделі «Axio Observer Dlm» (фірма «Karl Zeiss», виробник Німеччина), оснащеного камерою ARTCAM-300MI (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); зйомка зразків виконана у відбитому світлі за методами світлого поля.

Механічні властивості зразків зубчатих коліс зі сталі 16ХЗНВФМБ-Ш після ХТО визначалися за стандартною методикою при випробуванні на розтягування за ГОСТ 1497-84 на машині INSTRON-8801.

**Отримані результати.** На основі результатів експериментальних досліджень, показано вплив подвійної хіміко-термічної обробки на мікротвердість, мікроструктуру та механічні властивості зубчатих коліс зі сталі 16ХЗНВФМБ-Ш головних вертолітних редукторів.

**Наукова новизна.** Експериментально встановлено вплив послідовних етапів (цементация + азотування) хіміко-термічної обробки на параметри якості контактних поверхонь зубчатих коліс зі сталі 16ХЗНВФМБ-Ш головних вертолітних редукторів.

**Практична цінність.** На основі отриманих результатів експерименту можливо розробити раціональний технологічний процес виготовлення зубчатих коліс зі сталі 16ХЗНВФМБ-Ш головних вертолітних редукторів, який забезпечує високі експлуатаційні характеристики.

**Ключові слова:** головний вертолітний редуктор, зубчаті колеса, подвійна хіміко-термічна обробка, мікроструктура цементованого шару, мікроструктура азотованого шару, механічні властивості зубчатих коліс, експериментальні дані.

### Kravtsov V., Kachan A. Influence of double chemical-thermal treatment on the production quality of gear wheels of helicopter transmission

**Purpose.** Influence estimation of consecutive stages of chemical-thermal treatment (cementation + nitriding) on the manufacture quality of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш of helicopter main gearboxes.

**Research methods .** Models microstructure of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш of helicopter main gearboxes had been researched on the optical metallographic microscope «Axio Observer Dlm» («Karl Zeiss», made in Germany), equipped with ARTCAM-300MI camera (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); shooting of models is executed in the reflected light by methods of the light field.

Mechanical properties of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш were determined after chemical-thermal treatment according to standard procedure by tensile test according to GOST 1497-84 on the INSTRON-8801 machine.

**Results.** Based on the results of experimental studies, it is shown the influence of double chemical-thermal treatment on microhardness, microstructure and mechanical properties of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш of helicopter main gearboxes.

**Scientific novelty.** It was experimentally established the influence of consecutive stages (cementation + nitriding) of chemical-thermal treatment on parameters of contact surfaces quality of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш of helicopter main gearboxes.

**Practical value.** On the basis of the received results of experiment it is possible to develop the rational processing of manufacturing of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш of helicopter main gearboxes providing high operational characteristics.

**Key words:** helicopter main gearbox, gear wheels, double chemical-thermal treatment, microstructure of the cemented layer, microstructure of the nitrated layer, mechanical properties of gear wheels, experimental data.

## СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ УЛУЧШЕНИЯ ЛИТЬЯ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Цель работы.** Рациональный выбор легирующих элементов для разработки новых сплавов на основе магния с повышенными свойствами и технологий, обеспечивающих получение высококачественного литья.

**Методы исследования.** Металлографический и рентгеновский методы исследования. Изучение поверхностного натяжения расплава методом «лежащей капли». Определение механических свойств при растяжении (ГОСТ 1497-84) и длительной прочности при повышенных температурах (ГОСТ 9651-84).

**Полученные результаты.** Целесообразность легирования магниевого сплава тем или иным элементом определяется диаграммой состояния рассматриваемой системы, свойствами фаз – упрочнителей, характером структуры сплава и ее стабильностью при нагреве, а также характером диффузионных процессов, происходящих в сплавах с изменением состава и температуры. На основе анализа и обобщения диаграмм состояния двойных систем элементов с магнием установлена целесообразность легирования магниевого сплава тем или иным элементом. При этом, для обеспечения лучшего сочетания механических и жаропрочных свойств литых магниевых сплавов необходимо выполнение следующих условий: образование сложнолегированных твердых растворов, упрочнение сплавов дисперсными частицами и создание оптимальной структуры термической обработкой. При плавке магниевых сплавов происходят сложные процессы взаимодействия между материалами шихты и легирующими компонентами сплава, флюсами, защитными средами и модификаторами. Поэтому, для получения качественного литья, роль технологических факторов при плавке, заливке и термической обработки магниевых сплавов является решающей.

**Научная новизна.** На основе атомно-электронного строения элементов, анализа их диаграмм состояния двойных систем с магнием определен ряд легирующих элементов, обеспечивающих лучшее сочетание механических и жаропрочных свойств литых магниевых сплавов.

Показано, что повышение качества отливок из магниевых сплавов, включающее в себя, применение правильно подобранных технологических режимов плавки, заливки, разработки рациональных режимов кристаллизации и термической обработки обеспечивает существенное повышение их эксплуатационных характеристик.

**Практическая ценность.** Улучшение механических и специальных свойств отливок из магниевых сплавов за счет оптимального применения шихтовых компонентов и рациональных технологий производства высококачественного литья позволяет значительно расширить области применения этих сплавов.

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, легирующие элементы, структура, избыточная фаза, модифицирование, размер зерна.

Применение сплавов с низким удельным весом представляет большой практический интерес для отечественного машиностроения, где, кроме определенных требований к конструкциям и агрегатам, предъявляются особые требования по уменьшению массы деталей [1]. С этой точки зрения большой интерес представляют сплавы на основе магния, одного из наиболее легких металлов и достаточно широко распространенного в природе элемента. По запасам в земной коре он занимает третье место среди металлов, уступая только алюминию и железу. Магний содержится в ряде минералов, но особенно его много в доломите и магнезите. В воде морей и океанов содержится около  $6 \cdot 10^{16}$  тонн магния, что делает его доступным и перспективным материалом для разработки большого количества сплавов [1].

Литейные магниевые сплавы – один из самых легких конструкционных материалов, что позволяет их использовать в авиакосмической технике, различных типах ракет и агрегатов, при производстве оптических приборов, в радиоэлектронике и т.д. Ввиду того, что магниевые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых сплавов, в 4 раза легче чугуна и стали, их применение, особенно в фасонном литье, дает снижение весовых характеристик изделия на 25–30% [2].

Различные легирующие элементы определяют определенные физико-механические и специальные свойства магниевых сплавов. Для получения высокопрочного литья широко применяются сплавы магния, легированные марганцем, алюминием и цинком. Сплавы системы магний-цинк-цирконий обладают повышенной прочностью и пластичностью. Добавки неодима, итт-

рия, церия и других редкоземельных элементов повышают жаропрочность и улучшают механические свойства магниевых сплавов [3]. В настоящее время разработано большое количество магниевых сплавов с участием различных металлов и опубликовано много работ, в которых рассматриваются механические, физические и коррозионные свойства магниевых сплавов, предназначенных для различных условий эксплуатации. Однако число работ, посвященных систематизации и выяснению роли легирующих элементов в сплавах на основе магния, крайне ограничено. Это связано с тем, что эксперименты по подготовке и испытаниям новых сплавов очень длительные и дорогостоящие, а количество возможных компонентов сплава и вариантов составов сплавов – большое. Поэтому рациональный выбор компонентов для разработки новых магниевых сплавов с заданными свойствами является актуальной задачей.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с рациональным подбором легирующих элементов для разработки новых сплавов на основе магния с повышенными свойствами и технологии, обеспечивающие получение высококачественного литья.

Целесообразность легирования магниевых сплавов тем или иным элементом определяется диаграммой состояния рассматриваемой системы, свойствами фаз – упрочнителей, характером структуры сплава и ее стабильностью при нагреве, а также характером диффузионных процессов, происходящих в сплавах с изменением состава, температуры и др. [4]. Многие из этих факторов еще недостаточно изучены и требуют дальнейших уточнений.

Анализ и обобщение диаграмм состояния двойных систем элементов с магнием [5] позволяет выделить следующие закономерности:

1. Магний образует непрерывный ряд твердых растворов только с кадмием.
2. Двенадцать тугоплавких металлов (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Tc, Hf, Ta, W, Re) образуют с магнием перетектики.
3. Остальные элементы (Al, Nd, Y, Sn, Pb, Ge, Si, Ca, Ba и др.) образуют с магнием эвтектики или монотектики.
4. Чем ближе к магнию расположен элемент в периодической системе, тем больше его растворимость в твердой и жидкой фазе и ближе к единице коэффициент распределения (отношение растворимости в твердой фазе к растворимости в жидкой фазе).

Растворимость легирующего элемента в жидком и твердом магнии является необходимым условием упрочнения магниевых сплавов. Получение высокой прочности у литых сплавов при сохранении достаточной вязкости достигается следующими путями:

1. Образованием сложнолегированных твердых растворов.
2. Упрочнением сплавов дисперсными частицами.
3. Созданием оптимальной структуры термической обработкой.

Причем для обеспечения лучшего сочетания механических и жаропрочных свойств литых магниевых сплавов необходимо учитывать все три условия [6].

Растворимость элементов в магнии определяется близостью их атомных диаметров ( $A_{rMg}$  и  $A_{rЭл}$ ), которые, по данным Юм-Розери [7], должны отличаться не более чем на 15 %. В противном случае происходит понижение энергии связи атомов растворителя с легирующим элементом и вследствие искажения кристаллической решетки растворимость легирующего элемента уменьшается.

Однако существуют факторы, ограничивающие образование твердых растворов даже в случае, когда отношение атомных диаметров благоприятно. К ним относятся валентность и электроотрицательность.

Исследование большого числа систем сплавов [8] показало, что металл с более высокой валентностью лучше растворяется в металле с низкой валентностью, чем наоборот. При этом увеличение валентности растворенного элемента приводит к уменьшению области первичных твердых растворов.

Другим важным условием растворимости элемента в металле-основе по данным Даркена-Гурри [9], Гшнейднера [10] и Уоббера [11] является небольшая разность электроотрицательности ( $\Delta\chi_{Mg}$  и  $\Delta\chi_{Эл}$ ), которая не должна превышать 0,2...0,4. Фактически переход атомов легирующих элементов в металлический раствор определяется не электроотрицательностью, т.е. способностью захватывать электроны и образовывать ионные соединения, а наоборот, способностью отдавать электроны в коллективизированное состояние и превращаться в металлический ион.

Из приведенного анализа поведения магния при взаимодействии с большим количеством элементов видно, что образование сплавов на основе магния осложняется действием валентности и особенно образованием металлических соединений вследствие электроположительной природы магния.

Таким образом, из всего многообразия элементов Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева лишь немногие удовлетворяют описанным выше критериям и имеют благоприятный фактор по соотношению атомного диаметра ( $(A_{rMg} - A_{rЭл}) / A_{rMg} \leq 15\%$ ) и электроотрицательности ( $\Delta\chi_{Mg} - \Delta\chi_{Эл} \leq 0,4$ ) [12] для легирования магниевых сплавов (табл. 1).

Однако для подбора легирующих компонентов жаропрочных магниевых сплавов требуются дополнительные ограничения, обусловленные воздействием на них высоких температур.

Жаропрочность литых магниевых сплавов обеспечивается двумя факторами [13]:

1. Легированием основного компонента элементами, входящими в твердый раствор. При этом легирующие компоненты должны иметь температуру плавления выше основы сплава.

**Таблица 1** – Атомные радиусы, электроотрицательность и соотношение этих факторов относительно магния

Элемент	$A_{r\text{Эл.}}$ , пм	$(A_{r\text{Mg}} - A_{r\text{Эл}}) / A_{r\text{Mg}}$ , %	$\chi / \chi_{\text{Эл.}}$	$\chi / \chi_{\text{Mg}} - \chi / \chi_{\text{Эл.}}$
Mg	160	–	0,56	–
Li	155	3,1	0,40	0,16
Al	143	10,6	0,70	-0,14
Si	136	15,0	0,83	-0,27
Sc	164	1,2	0,53	0,03
Ti	146	8,8	0,61	-0,04
Zn	139	13,1	0,66	-0,10
Ga	139	13,1	0,75	-0,19
Ge	139	13,1	0,84	-0,28
Y	181	-13,1	0,48	0,08
Zr	160	0	0,57	-0,01
Ag	144	10,0	0,56	0
Cd	156	2,5	0,62	-0,06
In	166	-3,8	0,69	-0,13
Sn	158	1,3	0,75	-0,19
Nd	182	-13,8	0,95	-0,39
Hf	159	0,6	0,50	0,06
Pb	175	-9,4	0,78	-0,22

2. Введением в сплав легирующих элементов, образующих при кристаллизации и перекристаллизации тугоплавкие твердые фазы в виде сетчатых выделений или в форме прочного каркаса между ветвями дендритов.

Поэтому еще одним фактором, ограничивающим выбор легирующих элементов магниевых сплавов, является их температура плавления, превышающая температуру плавления магния (650 °С). На основании этого из рассмотренных элементов для легирования жаропрочных магниевых сплавов наиболее пригодными будут металлы с температурами плавления: Ge (937 °С), Nd (1010 °С), Si (1410 °С), Y (1523 °С), Sc (1539 °С), Ti (1660 °С), Zr (1852 °С), Hf (2150 °С).

При плавке магниевых сплавов происходят сложные процессы взаимодействия между материалами шихты и легирующими компонентами сплава, флюсами, защитными средами и модификаторами. Поэтому для получения качественного литья роль технологических факторов при плавке и заливке магниевых сплавов является решающей.

Рафинирование магниевых сплавов осуществляется с помощью флюсов, представляющих собой различные смеси хлористых и фтористых солей. Их действие обусловлено обволакиванием удаляемых частиц расплавом хлористых солей, в то же время смачиваемость флюсом расплава должна быть минимальной, чтобы обеспечить его полное отделение от расплава при кристаллизации. Поэтому подбор состава флюса необхо-

димо осуществлять в зависимости от состава сплава и способа выплавки.

Для получения плотных отливок и уменьшения их микропористости необходимо проводить дегазацию магниевых сплавов путем обработки расплава нейтральными газами, а также проводить выстаивание его перед разливкой.

Одним из путей улучшения качества отливок и повышения их механических свойств является модифицирование расплава перед заливкой в форму или в процессе кристаллизации.

В основе разработанных магниевых сплавов лежат определенные системы, каждая из которых характеризуется величиной зерна, структурой и обладает различной способностью к модифицированию. Поэтому к каждой из систем должны применяться свои рациональные способы измельчения зерна, определяемые природой сплавов, характером взаимодействия легирующих компонентов и их примесей с модификаторами.

Существует два основных способа измельчения зерна магниевых сплавов – физические и металлургические [14]. Физические методы измельчения структуры связаны с динамическими воздействиями на расплав в процессе его кристаллизации. Ультразвуковые колебания затвердевающего расплава способны увеличить частоту образования зародышей [15]. Применение электрических и электромагнитных полей [16, 17], среди ко-

торых – индукционное, электромагнитное перемешивание [18] и ультразвуковая обработка [19], способствует увеличению скорости зарождения новых кристаллов. Воздействие этих методов заключается в перемешивании расплава с различной затратой энергии и степенью интенсивности. Перемешивание достигается с помощью дорогостоящих механических, электромагнитных и ультразвуковых устройств, что не всегда бывает экономически оправдано. Достоинством физических методов модифицирования является возможность их применения в процессе литья без дополнительной затраты времени.

Наиболее перспективными являются металлургические методы модифицирования магниевых сплавов, основанные на воздействии малых количеств модифицирующих добавок, вводимых в расплав в процессе приготовления сплавов [20]. Роль зародышей выполняют частицы вещества, кристаллическая решетка которого сопрягаема с кристаллической решеткой кристаллизующейся фазы. К металлургическим методам модифицирования магниевых сплавов относятся перегрев расплава, обработка его углеродсодержащими веществами и добавками, вызывающими образование тугоплавких соединений.

Главным процессом при затвердевании литых заготовок является кристаллизация расплава. Именно этот процесс во многом предопределяет уровень технологических и эксплуатационных свойств литого металла. Кристаллизация металлов и сплавов всегда проходит с образованием дендритной структуры. Важнейшей характеристикой образующейся дендритной структуры является величина дендритной ячейки. Общей закономерностью дендритной кристаллизации и структуры является обратная связь между размером дендритной ячейки и скоростью охлаждения. Это выражается в том, что измельчение дендритной ячейки повышает прочность и пластичность сплавов не только в литом состоянии, но и после любых дальнейших обработок. Необходимым условием начала процесса кристаллизации является определенная степень переохлаждения расплава. От ее величины зависят кинетика процесса и структура образующейся твердой фазы, на которую влияют скорость фазового перехода, химический состав сплава, распределение температур в жидкой и твердых фазах, кристаллографическая ориентация растущей поверхности [21]. Изменение свободной энергии расплава при его затвердевании определяется термодинамическими методами. В расплаве образуется поверхность, отделяющая его от других фаз. Образуются неперриодические структуры, являющиеся продуктами процесса затвердевания, возникают отдельные дефекты и упорядоченные дислокации, образующие мозаичную структуру. Взаимодействие жидкой и твердой фаз осуществляется через внутренние поверхности раздела – границы фаз, зерен и дислокаций, как области с повышенной энергией [22]. Для получения однородной по плотности и химическому составу отливки

обычно управляют технологическими параметрами – отводом тепла, температурой и скоростью разливки.

Финишным этапом улучшения магниевых сплавов является термическая обработка, которая проводится, как для снятия внутренних напряжений (Т2 – отжиг), так и повышения механических свойств (Т1 – старение, Т4 – закалка, Т6 – закалка + старение). Основное назначение упрочняющей термической обработки заключается в создании гетерогенной структуры с высокодисперсными выделениями упрочняющей фазы, которая является определяющей в эксплуатации сплавов при повышенных рабочих температурах [23].

Дисперсионное упрочнение магниевых сплавов достигается в большинстве случаев в результате старения, основанного на гомогенизации и закалке из области твердого раствора с последующим высокотемпературным отпуском, приводящим к распаду пересыщенного твердого раствора с выделением частиц, блокирующих скольжение дислокаций и повышающих предел текучести.

С точки зрения термодинамики эффект дисперсионного твердения сплавов связан с нарушением регулярности твердого раствора вблизи границы предельной растворимости. Закалка твердого раствора приводит к определенному пересыщению, а последующий высокотемпературный отпуск – к выделению дисперсной избыточной фазы. Поэтому при получении магниевых сплавов с повышенным комплексом свойств, решающим фактором при выборе легирующих элементов является их способность образовывать пересыщенные твердые растворы с магнием.

Таким образом, улучшение магниевых сплавов, включающее в себя рациональное легирование и модифицирование, применение правильно подобранных технологических режимов плавки, заливки магниевых отливок, разработки рациональных режимов их кристаллизации и термической обработки, обеспечивает существенное повышение механических и эксплуатационных свойств этих сплавов. Это делает магниевые сплавы перспективным материалом для машиностроения и существенно расширяет область их применения.

#### Список литературы

1. Магниеые сплавы повышенного качества для авиационного машиностроения / Богуслаев В. О., Жемайнюк П. Д., Великов С. Б. и др. // Запорожье, «Мотор Сич». – 2016. – 249 с.
2. Каблов Е. Н. Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2007 / Каблов Е. Н. // Юбилейный научно-технический сборник. – М. : ВИАМ, 2007. – 389 с.
3. Дорохина Л. Н. Легкие цветные металлы и сплавы : Справочник / Дорохина Л. Н. // М. : ЦНИИЦветМет, 1999. – 343 с.
4. Дриц М. Е. Магниеые сплавы для работы при повышенных температурах / Дриц М. Е. – М. : Наука, 1964. – 228 с.
5. Гуляев Б. Б. Обобщение диаграмм состояния металли-

- ческих систем // Диаграммы состояния металлических систем / Гуляев Б. Б. – М. : Наука, 1968. – С. 257–267.
6. Microalloyed magnesium alloys with high complex of properties / Belikov S., Shalomoev V., Aikin N, et al. // Materials Science & Technology 2017: The Collected Proceedings. – Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2017. – P. 84–89.
  7. Структура металлов и сплавов / Юм-Розери В., Рейнор Г. В – М. : Metallurgizdat, 1959. – 454 с.
  8. Рейнор Г. В. Металловедение магния и его сплавов / Рейнор Г. В. – М. : Metallurgiya, 1964. – 486 с.
  9. Даркен Л. С. Физическая химия металлов / Даркен Л. С., Гурри Р. В. – М. : Metallurgizdat, 1960. – 458 с.
  10. Гшнейднер К. А. Сплавы редкоземельных металлов / Гшнейднер К. А. – М. : Изд-во «Мир», 1965. – 398 с.
  11. Уоббер Дж. Металлургия и металловедение плутония и его сплавов / Уоббер Дж. – М. : Госатомиздат, 1962. – 102 с.
  12. Краткий справочник по химии / Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. – К. : Наукова думка, 1987. – 829 с.
  13. Shalomoev V.A. Influence of titanium, zirconium, and hafnium on the structure and heat resistance of alloy ML5 / Shalomoev V.A., Tsivirko E.I., Osadchaya E.A. // XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering»: collective mono-graph edited by J. Borysa, R. Wyczykowski, Nr 56, Poland, Czkochowa, 2016. – P. 471–475.
  14. Чухров М. В. Модифицирование магниевых сплавов / Чухров М. В. – М. : Metallurgiya, 1972. – 176 с.
  15. Эскин Г. И. Кристаллизация слитков магниевых сплавов с применением ультразвуковой обработки расплава / Эскин Г. И. // Metallurg. – 2003. – № 7. – С. 47–50.
  16. Влияние постоянного тока на качество магниевых сплавов / Якимов В. И., Шпорт В. И., Муравьев В. И. и др. // Литейное производство. – 1999. – № 12. – С. 10–12.
  17. Кулинский А. И. Исследования по разработке высокоэффективной технологии модифицирования магниевых сплавов / Кулинский А. И., Щепин Л. А., Шумахер А. А. // Сб. избр. науч. тр. преп. и сотр. каф. «Технол. литейн. пр-ва». Перм. гос. техн. ун-т, 2003. – № 12. – С. 207–212.
  18. Трухов А. П. Литейные сплавы и плавка / Трухов А. П., Маляров А. И. : учебник для вузов. – М. : Академия, 2004. – 335 с.
  19. Mohsen K. A. Effects of ultrasonic treatment on microstructure and tensile strength of AZ91 magnesium alloy / Mohsen K. A., Behzad N. // Journal of Alloys and Compounds, 2011. – № 509 (1). – P. 114–122.
  20. Структура и свойства магниевых сплавов со скандием / Шаломеев В. А., Цивирко Э. И., Лысенко Н. И. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 1. – С. 37–40.
  21. Задиранов А. Н. Теоретические основы кристаллизации металлов и сплавов. Учебное пособие / Задиранов А. Н., Кац А. М. – М. : МГИУ, 2008. – 194 с.
  22. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки / Баландин Г. Ф. – М. : Машиностроение, 1976. – 328 с.
  23. Химический состав магниевых сплавов и их жаропрочность / Шаломеев В. А., Цивирко Э. И. // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 2. – С. 126–133.

Одержано 24.01.2019

### **Шаломеев В. А., Айкин М. Д., Лук'яненко А. С. Способи і технології поліпшення лиття з магнієвих сплавів**

**Мета роботи.** Раціональний вибір легувальних елементів для розробки нових сплавів на основі магнію з підвищеними властивостями і технологій, що забезпечують отримання високоякісного лиття.

**Методи дослідження.** Металографічний і рентгенівський методи дослідження. Вивчення поверхневого натягу розплаву методом «лежачої краплі». Визначення механічних властивостей при розтягуванні (ГОСТ 1497-84) і тривалості міцності при підвищених температурах (ГОСТ 9651-84).

**Отримані результати.** Доцільність легування магнієвого сплаву тим чи іншим елементом визначається діаграмою стану цієї системи, властивостями фаз – зміцнювачів, характером структури сплаву і її стабільністю при нагріванні, а також характером дифузійних процесів, що відбуваються в сплавах зі зміною складу і температури. На основі аналізу і узагальнення діаграм стану подвійних систем елементів з магнієм встановлена доцільність легування магнієвого сплаву тим чи іншим елементом. При цьому для забезпечення кращого поєднання механічних і жароміцних властивостей ливарних магнієвих сплавів необхідно виконання таких умов: утворення складнолегованих твердих розчинів, зміцнення сплавів дисперсними частинками і створення оптимальної структури термічною обробкою. При плавленні магнієвих сплавів відбуваються складні процеси взаємодії між матеріалами шихти і легувальними компонентами сплаву, флюсами, захисними середовищами та модифікаторами. Тому для отримання якісного литва роль технологічних факторів при плавленні, заливанні і термічній обробці магнієвих сплавів є вирішальною.

**Наукова новизна.** На основі атомно-електронної будови елементів, аналізу їх діаграм стану подвійних систем з магнієм визначено низку легувальних елементів, які забезпечують краще поєднання механічних і жароміцних властивостей ливарних магнієвих сплавів.

Показано, що підвищення якості виливків з магнієвих сплавів, що передбачає застосування правильно підібраних технологічних режимів плавлення, заливання, розробки раціональних режимів кристалізації і термічної обробки забезпечує істотне підвищення їх експлуатаційних характеристик.

**Практична цінність.** Поліпшення механічних і спеціальних властивостей виливків з магнієвих сплавів за рахунок оптимального застосування шихтових компонентів і раціональних технологій виробництва високоякісного литва дає змогу значно розширити сферизастосування цих сплавів.

**Ключові слова:** магнієві сплави, легувальні елементи, структура, надлишкова фаза, модифікування, розмір зерна.

**Shalomeev V., Aikin N., Lukyanenko A. Methods and technologies for improving the Magnesium alloys casting**

**Purpose.** Rational selection of alloying elements for the development of new magnesium based alloys with enhanced properties and technologies that provide high-quality casting.

**Research methods.** Metallographic and X-ray research methods. The study of the surface tension of the melt by the sessile drop method. Determination of mechanical properties under tension (GOST 1497-84) and long-term strength at elevated temperatures (GOST 9651-84).

**Results.** The expediency of alloying a magnesium alloy with any other element is determined by the phase diagram of the system under consideration, the properties of the strengthening phases, the nature of the alloy structure and its stability during heating, as well as the nature of diffusion processes occurring in alloys with changes in composition and temperature. Based on the analysis and generalization of the binary phase diagrams of the elements with magnesium, the expediency of alloying a magnesium alloy with one or another element was established. At the same time, to ensure the best combination of mechanical and heat-resistant properties of cast magnesium alloys, the following conditions must be met: the formation of complex-alloyed solid solutions, the strengthening of the alloys by dispersed particles and the creation of an optimal structure by the heat treatment.

When smelting magnesium alloys, complex processes of interaction occur between the charge materials and alloying elements, fluxes, shielding atmosphere and modifiers. Therefore, for obtaining high-quality casting, the role of technological factors in the smelting, pouring and heat treatment of magnesium alloys is crucial.

**Scientific novelty.** On the basis of the atomic-electronic structure of the elements, analysis of their binary phase diagrams with magnesium, a number of alloying elements that provide the best combination of mechanical and heat-resistant properties of cast magnesium alloys was determined.

It is shown that improving the quality of magnesium alloy castings, that includes the use of properly selected technological modes of melting, casting, development of rational modes of crystallization and heat treatment, provides a significant increase in their operational characteristics.

**Practical value.** Improvement of mechanical and special properties of magnesium alloy castings due to the optimal use of charge components and rational technologies for the production of high-quality casting allows to significantly expand the fields of application of these alloys.

**Key words:** magnesium alloys, alloying elements, structure, excess phase, modification, grain size.

---