

## Выбор оптимального комплекса оборудования для бесфлюсовой защиты магниевых сплавов

Магниевые сплавы на всех этапах литья требуют постоянной защиты от возгорания. Наиболее эффективной для решения поставленной задачи является бесфлюсовая система защиты. Исследованы четыре системы бесфлюсовой защиты магниевых сплавов. По критериям надежности и экономическим показателям найден и обоснован оптимальный вариант.

**Ключевые слова:** магний, магниевые сплавы, бесфлюсовая защита, уровень надежности, оптимальный комплекс оборудования, экономические показатели.

**М**агниевые сплавы обладают огромным потенциалом в будущем литейных технологий. Этот металл является самым легким конструкционным материалом и обладает рядом других преимуществ. Экономическая эффективность использования магниевых сплавов гарантируется низкой стоимостью единицы объема детали. Широкая гамма литейных сплавов обеспечивает возможность получения качественных отливок разного назначения [1].

Однако магниевые сплавы обладают рядом негативных особенностей, которые сдерживают их применение.

При взаимодействии с кислородом жидкие магниевые сплавы возгораются. Их невозможно потушить водой или обычными средствами пожаротушения.

Магниевые сплавы обладают низкой коррозионной стойкостью. Она обусловлена тем, что магний относится к наиболее электроотрицательным металлам и его химическая активность с повышением температуры увеличивается.

Для защиты от возгорания на многих предприятиях Украины используют флюсовую защиту [2]. Флюсы представляют собой смеси хлористых и фтористых солей металлов и некоторых оксидов. Наиболее применяемые – это флюс ВИ2 и ВИ3. К главным недостаткам флюсов можно отнести их высокую гигроскопичность, повышающую загазованность, а также сравнительно небольшие вязкость и плотность, что сильно осложняет отделение флюса от металла. Использование флюсов способствует образованию литейных дефектов в отливках [3]. Наличие флюсовых включений в отливках резко снижает коррозионную стойкость и уменьшает надежность изделий вследствие потенциальной потери герметичности и прочности в процессе эксплуатации [3]. А производство специальных магниевых сплавов по традиционной технологии (флюсовой плавке) невозможно из-за повышенной окисляемости или взаимодействия легирующих компонентов с составляющими флюсов.

Перспективным технологическим процессом, способным устранить большинство выше перечисленных отрицательных факторов, является плавка магниевых сплавов без флюса в защитной газовой среде. Бесфлюсовая защита способна выполнять свою функцию в том случае, если она, химически

взаимодействуя с жидким магниевым сплавом, образует тонкую плотную защитную пленку. Для этих целей используется атмосфера, состоящая из смеси активного и инертного газов. В качестве активных газов используются  $SF_6$ ,  $CF_4$ ,  $SO_2$ ,  $BF_3$ . В качестве разбавителей – Ar,  $N_2$ ,  $CO_2$ , осушенный воздух [4].

Бесфлюсовая плавка позволяет повысить коррозионную стойкость детали в два и более раза; увеличить долговечность детали за счет устранения содержания ионов хлора и, как следствие, межкристаллитной коррозии, а также снизить безвозвратные потери сплава на 5%. Повышение производительности плавки на 10-15%, снижение себестоимости плавки на 10-15%, в том числе по расходу электроэнергии, а также сокращение вредных выбросов газов в 20 раз является существенным преимуществом технологии [5].

*Целью настоящей работы* является выбор оптимального варианта комплекса рассматриваемого оборудования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- получено экономическое выражение уровня надежности четырех вариантов оборудования;
- проведен анализ систем бесфлюсовой защиты магниевых сплавов;
- выбрана оптимальная система для защиты магниевых сплавов.

Задача выбора оптимального варианта системы оборудования сформулирована следующим образом.

Для данной системы, характеризуемой конечной величиной капитальных затрат и определенным уровнем надежности, выраженным функциями параметров потока отказов по организационным  $\omega_0(t)$  и по технологическим причинам  $\omega_T(t)$  с соответствующими функциями распределения простоев  $\varphi_0(t)$  и восстановлений  $\varphi_T(t)$ , имеется  $j$  вариантов выбора системы, где  $j$  – конечное число  $|j = 1, 2, 3, \dots, n|$ .

Каждый  $j$ -ый вариант комплекса системы содержит  $m_j$  наименований элементов по  $k_m$  штук каждого наименования [6].

Каждый  $j$ -ый вариант содержит  $m_j$  наименований элементов по  $k_m$  штук каждого наименования. Обозначив элемент системы, можно каждый  $j$ -ый вариант описать прямоугольной матрицей, представленной:

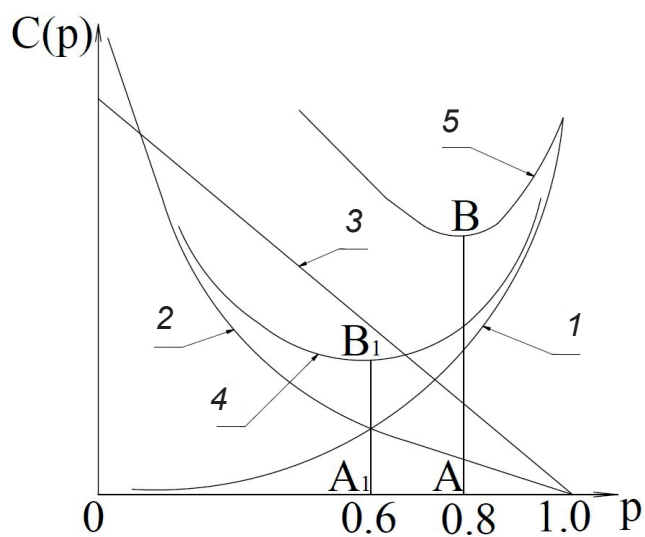
$$\begin{bmatrix} C_{11}^j & C_{12}^j & C_{1k_{\max}}^j \\ C_{21}^j & C_{22}^j & C_{2k_{\max}}^j \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{m_j,1}^j & C_{m_j,2}^j & C_{m_j,k_{\max}}^j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $k_{\max} = \max(k_1, k_2, \dots, k_n)$ .

Каждое  $m$   $i$ -тое наименование  $j$ -го варианта системы описывается своей функцией параметра потока отказов  $\omega_m^j(t)$ . Время восстановления элементов каждого наименования описывается своей плотностью вероятности  $\phi_m^j(t)$ . Кроме того, каждое наименование элемента характеризуется стоимостью элемента  $C_m^j = \text{const}$ , каждая  $j$ -ая система – удельной стоимостью проектирования  $C_{\text{пр}}^j = \text{const}$ , удельной стоимостью изготовления  $C_{\text{изг}}^j = \text{const}$  и удельной стоимостью наладки  $C_{\text{н}}^j = \text{const}$ .

Зависимость величины капитальных затрат на систему  $C_{\text{к.с.}}$  от уровня надежности  $p$  представлена принципиально на графике (рисунок) кривой 1, эксплуатационных издержек по системе  $C_{\text{э.с.}}$  – кривой 2, убытков от недоиспользования всех затрат без системы для каждого  $j$ -го варианта системы  $У$  – кривой 3. Кривая 5 показывает, что уровень надежности, соответствующий оптимальному варианту, учитывая все убытки от недоиспользования всех затрат без систем, выше уровня надежности оптимального варианта, выбранного только по капитальным затратам и эксплуатационным издержкам (кривая 4). Указанное положение может быть использовано для выбора оптимального варианта по минимизации функции приведенных затрат:  $C(p) = C_{\text{к.с.}} + C_{\text{э.с.}} + У$ .

Наименование основных показателей, используемых при анализе указанной зависимости, и расчетные формулы, учитывающие динамику затрат во времени, представлены в табл. 1.



Кривые зависимостей от уровня надежности систем: 1 – кривая капитальных затрат на систему; 2 – кривая эксплуатационных издержек на систему; 3 – кривая убытков от недоиспользования затрат; 4 – суммарная кривых 1 и 2; 5 – суммарная кривых 1, 2, 3

Экономические показатели рассматриваемых вариантов получены на основании использования теоретических основ надежности.

Представленные системы:

1. Система плавильной печи РБПМ-0.3 (Россия). Данная система состоит из следующего оборудования: печь плавильная РБПМ-0.3; печь раздаточная (входит в состав машины литья под давлением (ЛПД)). Используется следующая защитная газовая смесь: 1-2% элегаза  $\text{SF}_6$ , остальное – осушенный углекислый газ  $\text{CO}_2$ .

2. Система дозирования и контроля защитной смеси визуальное по ротаметрам фирмы GrechFM1 (Германия). Данная система состоит из следующего оборудования: печь плавильная с конвейером для подогрева чушек и загрузки их в плавильную печь; печь раздаточная [15]. Используется следующая защитная газовая смесь: 40%  $\text{CO}_2$  и 60% осушенный  $\text{N}_2$ .

3. Система CPMGH 700 с компьютерным управлением расходов защитного газа (с контролем температуры, расхода и давления (Польша-Норвегия)). Данная система состоит из следующего оборудования: печь плавильная и раздаточная, связанные между собой обогреваемой трубой перелива горячего металла. Используется защитная газовая смесь: 1,5-2%  $\text{SO}_2$ , остальное – осушенный воздух.

4. Система дозирования на основе газосмесителей фирмы Witt, KM-20-2, RM-20-3, средств Siemens, датчиков контроля газов, температур, расходов, аварийных ситуаций, их устранения и резервных контуров (Украина). Данная система состоит из следующего оборудования: двухкамерная плавильно-раздаточная печь оборудована автоматическими средствами загрузки подогретых чушек. Криогенная установка для смеси защитных газов [7]. Используется защитная газовая смесь: 1,5-2%  $\text{SO}_2$  и осушенный азот  $\text{N}_2$ .

Для оценки показателя убытков от недоиспользования оборудования рассмотрены 1 и 4 варианты. В качестве объекта для расчета было принято производство биметаллических радиаторов-конвекторов из магниевого литейного сплава (МЛ5).

Сравнительные экономические показатели всех вышеперечисленных систем представлены в табл. 2.

Убытки от недоиспользования оборудования из-за недостаточной надежности рассчитаны при сравнении двух вариантов систем: 1 вариант и 4 вариант защит.

При общих капитальных затратах по каждому из вариантов получены значения коэффициентов использования 0,74 и 0,846 соответственно. При этом средняя производительность первого варианта на 18% ниже второго, прибыль всего производства в 1,5 раза ниже. Сравнивая соотношения чистой прибыли по двум вариантам получено, что на 1% снижения общего уровня коэффициента использования, производственные убытки превышают 100 тыс. долл.

Реальные варианты существующих технологических процессов, рассмотренных на базе изложенной выше методики, не позволяют предложить вариант на границе оптимума. Выполненные расчеты показали, что четвертый вариант является лучшим и экономически обоснованным.

## Основные показатели указанной зависимости

Наименование показателей	Обозначение	Расчетные формулы
Капитальные вложения	$C_{mi}$	$C_{n_i} = C_{n_i} (1 + E_n)^{0,5t_{xz} + t_a}$
Статьи себестоимости, пропорциональные выпускаемой продукции	$A_{mi}$	$A_{m_i} = A_{m_i} [(1 + E_n)^{t_a - 0,5t_{ц}} + (1 + E_n)^{t_a - \frac{3}{2}t_{ц}} + \dots + (1 + E_n)^{\left(\frac{t_a - 3}{t_{ц} 2}\right)t_{ц} + 1}]$
Статьи себестоимости, не зависящие от выпуска	$B_{mi}$	$B_{m_i} = B_{m_i} [(1 + E_n)^{t_a - 0,5t_{ц}} + (1 + E_n)^{t_a - \frac{3}{2}t_{ц}} + \dots + (1 + E_n)^{\left(\frac{t_a - 3}{t_{ц} 2}\right)t_{ц} + 1}]$
Эксплуатационные издержки на содержание оборудования и технологии	$C_{э}$	$C_{э} = C_{эи} [(1 + E_n)^{t_a - 0,5t_{ц}} + (1 + E_n)^{t_a - \frac{3}{2}t_{ц}} + \dots + (1 + E_n)^{\left(\frac{t_a - 3}{t_{ц} 2}\right)t_{ц} + 1}]$

Примечание:  $E_n$  – нормативный коэффициент экономической эффективности;  $t_{xz}$  – время монтажа и наладки системы;  $t_a$  – амортизационный срок эксплуатации системы;  $t_{ц}$  – среднее время цикла работы системы

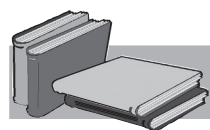
Таблица 2

## Экономические показатели систем бесфлюсовой защиты магниевых сплавов

Наименование	Единица измерения	РБПМ-0.3	Frech FM1	СРМГН 700	Witt, КМ-20-2, КМ-20-3
Дополнительные капитальные затраты	тыс. долл.	95	115	145	170
Коэффициент использования	–	0,792	0,813	0,831	0,846
Коэффициент использования по организационным причинам	–	0,892	0,903	0,913	0,92
Коэффициент использования по техническим причинам	–	0,933	0,94	0,946	0,95
Себестоимость	–	3 242	3 572	3 743	4 062
Прибыль	–	3 743	4 007	4 457	4 778
Прибыль (без налога 25%)	–	2 807	3 005	3 343	3 583
Прибыль (без расходов предприятия за счет прибыли 16%)	–	2 358	2 524	2 808	3 010
Убытки от недоиспользования	–	241	147	67	–
Чистая прибыль	–	2 116	2 377	2 741	3 010

Итак, проведен анализ различных комплексов оборудования для защиты магниевых сплавов. Из представленных расчетов видно, что самым оптимальным вариантом является система Witt, КМ-20-2, КМ-20-3.

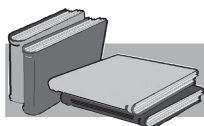
Используя данную систему, можно добиться снижения уровня окончательного брака на 70% за счет преимуществ химических и физических процессов газовой защиты, по этим же причинам снижается «исправимый» брак в 5-6 раз.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 3-33.
2. Мостяев И. В. РЗЭ – фактор качественного повышения свойств магниевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2015. – № 17. – Ст. 01 (viam-works.ru).

3. Корнышева И. С., Волкова Е. Ф., Гончаренко Е. С., Мухина И. Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 212-222.
4. Мухина И. Ю., Уридия З. П. «Магний – основа сверхлегких материалов» // *Металлургия и машиностроение*. – 2005. – № 6. – С. 29-31.
5. Holtzer M., Bobrowski A. Magnesium melt protection by covering gas // *Archives of Foundry Engineering*. – 2008. – 8(SI 1). – P. 131-136.
6. Won Ha, Young-Jig Kim. Effects of cover gases on melt protection of Mg alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Vol. 422. – Iss. 1-2. – P. 208-213.
7. Dolez P. I., Mlynarek J. Smart materials for personal protective equipment: Tendencies and recent developments // *Smart Textiles and their Applications*. – 2016. – P. 497-517.



## REFERENCES

1. Kablov E. N. (2015). Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenii razvitiia materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda». [Innovative development FGUP «VIAM» SSC RF on implementation of the «Strategic directions of development of materials and technologies of their reprocessing for the period till 2030»]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, no. 1, pp. 3-33. [in Russian].
2. Mostaev I. V. (2015). RZE – faktor kachestvennogo povysheniia svoystv magnievykh splavov (obzor). [REE – factor quality-enhancing properties of magnesium alloys (review)]. *Trudy VIAM*, no. 17, St. 01 (viam-works.ru). [in Russian].
3. Kornysheva I. S., Volkova E. F., Goncharenko E. S., Mukhina I. Y. (2012). Perspektivy primeneniia magnievykh i liteinykh aliuminievykh splavov. [Prospects of application of magnesium and cast aluminium alloys]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, no. 5, pp. 212-222. [in Russian].
4. Mukhina I. Yu., Uridiia Z. P. (2005). Magnii – osnova sverkhlegkih materialov. [Magnesium is the basis of ultra-light materials]. *Metallurgii i mashinostroenie*, no. 6, pp. 29-31. [in Russian].
5. Holtzer M., Bobrowski A. (2008). Magnesium melt protection by covering gas. *Archives of Foundry Engineering*, no. 8(SI 1), pp. 131–136. [in English].
6. Won Ha, Young-Jig Kim. (2006). Effects of cover gases on melt protection of Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 422, iss. 1-2, pp. 208-213. [in English].
7. Dolez P. I., Mlynarek J. (2016). Smart materials for personal protective equipment: Tendencies and recent developments. *Smart Textiles and their Applications*, pp. 497-517. [in English].

### Анотація

*Лисенко Т. В., Крейцер К. О., Ясюков В. В., Бондар О. А.*

**Вибір оптимального комплексу обладнання для безфлюсового захисту магнієвих сплавів**

*Магнієві сплави на всіх етапах лиття вимагають постійного захисту від загоряння. Найефективнішою для вирішення поставленого завдання є безфлюсова система захисту. Досліджено чотири системи безфлюсового захисту магнієвих сплавів. За критеріями надійності та економічними показниками знайдено і обґрунтовано оптимальний варіант.*

### Ключові слова

*Магній, магнієві сплави, безфлюсовий захист, рівень надійності, оптимальний комплекс обладнання, економічні показники.*

### Summary

*Lysenko T., Kreitser K., Yasiukov V., Bondar' A.*

**Selection of the optimal set of equipment for the flux-free protection of magnesium alloys**

*Magnesium alloys at all casting stages require constant protection from fire. The most effective solution to this problem is a flux-free protection system. Four systems of flux-free protection of magnesium alloys have been studied. According to the criteria of reliability and economic performance the best option has been found and proved.*

### Keywords

*Magnesium, magnesium alloys, flux-free protection, reliability, optimal set of equipment, the economic indicators.*

Поступила 02.12.16