

При реакции (13) $\gamma_{\text{МК}}$ распадаются согласно (17). Тогда образование $\alpha_{\text{МК}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [5]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{СН}}$) по следующей реакции:



где $A_{\text{ЭН3}}$ и $B_{\text{ЭН3}}$ – элементарные нанокристаллы компонентов A и B ; $A_{\text{а3}}$ и $B_{\text{а3}}$ – свободные атомы компонентов A и B при образовании $\alpha_{\text{МК}}$ в результате реакции (13).

Затем образуются центры кристаллизации ($\alpha_{\text{ЦК}}$) по следующей реакции:



Заканчивается процесс кристаллизации формированием $\alpha_{\text{МК}}$:



Аналогично формирование $\beta_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\beta_{\text{СН}}$) по следующей реакции:



где $A_{\text{ЭН4}}$ и $B_{\text{ЭН4}}$ – элементарные нанокристаллы компонентов A и B ; $A_{\text{а4}}$ и $B_{\text{а4}}$ – свободные атомы компонентов A и B при образовании $\beta_{\text{МК}}$ в результате реакции (13).

Затем формируются центры кристаллизации ($\beta_{\text{ЦК}}$) по следующей реакции:



Заканчивается процесс образования $\beta_{\text{МК}}$ по реакции:



При этом справедливы уравнения:



ЛИТЕРАТУРА

1. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А. В. Курдюмов, Д. В. Белов, М. В. Пикунев [и др.]. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 615 с.
2. Марукович, Е. И. Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
3. Марукович, Е. И. О теории кристаллизации металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко, К. В. Никитин // Литейное производство. – 2025. – № 6. – С. 6–11.
4. Кристаллизация металлов и сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2025. – 192 с.
5. Марукович, Е. И. Наноструктурные фазовые превращения при эвтектонидных реакциях бинарных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 30–32.

REFERENCES

1. Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. et al. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnykh metallov: uchebnik* [Production of castings from non-ferrous metal alloys: Textbook]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructural theory of metallic melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
3. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. O teorii kristallizatsii metallicheskih rasplavov [On the theory of crystallization of metal melts]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2025, no. 6, pp. 6–11.
4. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Nikitin K. V., Stetsenko A. V. *Kristallizatsiya metallov i splavov* [Crystallization of metals and alloys]. Samara: Samar. State Technical Un-ty Publ., 2025, 192 p.
5. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostrukturnye fazovye prevrashcheniya pri evtektoidnykh reakciyah binarnykh splavov [Nanostructured phase transformations in eutectoid reactions of binary alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 30–32.



УДК 621.74

ПРИЧИНЫ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ЕЕ АНАЛИЗА

Р. В. ЛУКАШЕВ, ОАО «ММЗ имени С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО», г. Минск, Беларусь, ул. Макаенка, 23

Представлен обзор факторов, влияющих на вариабельность механических свойств отливок алюминиевых сплавов и рассмотрены подходы для ее анализа. Поднимается вопрос статистической мощности, не нашедший должного освещения в соответствующей литературе. Подчеркивается его важность для определения необходимого объема выборки при планировании экспериментов.

Ключевые слова. Отливки алюминиевых сплавов, структурная целостность, пористость, литье под высоким давлением, распределение Вейбулла, модуль Вейбулла.

CAUSES OF MECHANICAL PROPERTIES VARIABILITY IN ALUMINUM ALLOY CASTINGS AND TOOLS FOR ITS ANALYSIS

R. V. LUKASHOU, OJSC “Minsk Mechanical Works named after S. I. Vavilov – Management Company of Holding “BelOMO”, Minsk, Belarus, 23, Makayenka str.

The paper provides an overview of factors influencing the variability of mechanical properties in aluminum alloy castings and discusses approaches for its analysis. It highlights the issue of statistical power, which has received little attention in the relevant literature, and underscores its importance for necessary sample size determination in experimental design.

Keywords. Aluminum alloy castings, structural integrity, porosity, high-pressure die casting, Weibull distribution, Weibull modulus.

Получение отливок алюминиевых сплавов является сложным многоступенчатым процессом с множеством факторов, влияющих на конечные механические свойства. Факторы, снижающие механические свойства, приводят не только к уменьшению их среднего значения, но и к увеличению их вариабельности. В 1993 году в работе Грина и Кэмпбела было показано, что предел прочности образцов алюминиевого сплава А356 хорошо описывается распределением Вейбулла. С тех пор исследователи активно применяют данный тип распределения при анализе значений механических свойств отливок, в частности предела прочности и относительного удлинения. Одним из показателей качества отливок является модуль распределения Вейбулла, также называемый параметром формы. Считается, что чем он выше, тем меньше влияние имеющихся дефектов на анализируемый литейный сплав. Таким образом, его используют как один из показателей структурной целостности отливок.

На величину модуля могут оказывать влияние как качество самого расплава, так и параметры процесса конкретного вида литья. Среди показателей, характеризующих качество расплава, важно отметить следующие.

- Содержание водорода. Зависит от качества рафинирования расплава, его периодичности для предотвращения повторного насыщения водородом и условий, при которых расплав находится (температура, влажность).
- Уровень загрязненности расплава оксидными би пленками (включениями). Зависит от качества рафинирования расплава и условий переливки с плавильной печи в раздаточную. С увеличением турбулентности при переливке загрязненность увеличивается. Данный показатель наряду с содержанием водорода определяет склонность к образованию водородной пористости. Обычно два данных показателя рассматривают неразрывно друг от друга и для их комплексной оценки может применяться тест Штраубе-Пфайфера (RPT-тест). В отдельных работах отмечается, что даже нераскрытые оксидные би пленки, на месте которых компьютерной томографией не удастся обнаружить поры, сами по себе могут являться концентраторами напряжений [1, 2].

- Количество и характер инородных включений, зависящие от качества рафинирования, и степень загрязненности используемых печей.
- Количество и характер железосодержащих фаз. Зависит от химического состава и скорости охлаждения [3].

Следует также учесть, что влияние водорода и оксидных включений на образование пор разное при различных скоростях охлаждения расплава. Чем скорость охлаждения выше, тем меньше водородная пористость. Тем не менее в научной литературе по данной теме наблюдается недостаток систематического сравнительного анализа в виде корреляций между показателями загрязненности расплава и показателями пористости или механических свойств при разных условиях реальных технологических процессов литья.

При рассмотрении влияния параметров литья на вариабельность механических свойств можно выделить литье под высоким давлением, так как данный метод является достаточно распространенным в массовом производстве благодаря своей высокой производительности и возможности получать геометрические размеры отливок, близкие к окончательным. На структурную целостность и как результат механические свойства отливок влияют следующие факторы.

1. Степень кристаллизации расплава до попадания в полость формы. Чем больше количество дендритов, закристаллизовавшихся в камере прессования литейной машины, тем ниже механические свойства. Среди механизмов деградации структурной целостности отмечают ухудшение питания междендритных участков и, как следствие, увеличение междендритной пористости [4,5]. На количество внешне закристаллизовавшихся кристаллов, в свою очередь, влияют разность температур расплава и камеры прессования литейной машины, а также скорость движения плунжера медленной и быстрой фаз.

2. Попадающий в отливку воздух. Его объем связан с турбулентностью процесса, которая зависит от скорости плунжера медленной и быстрой фаз, а также конструктивными особенностями формы [6].

3. Величина усадочной пористости. На нее влияет усилие подпрессовки. Обычно чем оно выше, тем меньше усадка [7].

Таким образом, для контроля указанных выше факторов необходимо соблюдение параметров литейного процесса. Важность параметров литья под высоким давлением отмечена в зарубежном стандарте PD CEN/TR 16748:2014, где наряду с их конкретными значениями указаны ожидаемые механические свойства регламентированных образцов.

Кумулятивная функция трехпараметрического распределения Вейбулла описывается следующим уравнением:

$$P = 1 - \exp \left(- \left(\frac{(\sigma - \sigma_{\Pi})}{\sigma_0} \right)^m \right).$$

Если значения временного сопротивления образцов описывать моделью Вейбулла, то в приведенном уравнении P – вероятность разрушения при заданном пределе прочности σ или ниже; σ_{Π} – пороговый предел прочности, ниже которого не должен разрушиться ни один образец; σ_0 – параметр масштаба; m – модуль, также называемый параметром формы.

При анализе механических свойств литейных образцов часто используют двухпараметрическое распределение, когда σ_{Π} принимают равным нулю, и кумулятивная функция упрощается до следующего вида:

$$P = 1 - \exp \left(- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right).$$

Для оценки параметров σ_0 и m посредством регрессионного анализа ее записывают как

$$\ln (\ln (1/(1-P))) = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0.$$

Уравнение выше представляет ни что иное, как уравнение регрессии $Y = ax + b$, где $a = m$, $b = m \ln \sigma_0$, которые высчитываются так же, как и в обычной регрессии. Вектор x составляют полученные в результате испытаний значения предела прочности. Соответствующий вектор Y составляют значения $\ln (\ln (1/(1-P)))$, где P представляет долю образцов, разрушившихся при значении предела прочности ниже или равном соответствующему σ . С целью получения несмещенных оценок m для P используются дополнительные поправки [8].

Для сравнения вариабельности механических свойств, описываемых распределением Вейбулла, часто используют сравнение их модулей m_1 и m_2 , которое, строго говоря, также требует проверки на