

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОПИТКИ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ ПОЛИМЕРНЫМ ИНФИЛЬТРАТОМ

Аннотация. В центре внимания авторов статьи находится проблема осмысления и моделирования процесса пропитки пористого алюминиевого литья полимерными композициями, который играет важнейшую роль в решении задачи снижения доли производственного брака и обеспечения требуемого эксплуатационного ресурса литых изделий. Формулируются отличительные признаки макро- и микропор, формирующихся в отливках из алюминиевых сплавов. Дается краткая характеристика процесса пропитки микропор, описываются особенности, связанные с одновременным протеканием в условиях различных температур и давлений как химических реакций с участием полимерных композиций, так и тепло- и массопереноса и фильтрации. Приводится список основных операций. Обращается внимание на сложность описания процесса пропитки с позиции классической теории. Предложена достаточно простая для понимания физико-математическая модель пропитки пористого алюминиевого литья полимерным инфильтратом – жидкой полимерной композицией, фильтрующейся сквозь дефектную зону микропор в отливке. В основе модели лежит известная схема плоскопараллельной фильтрации жидкости сквозь идеализированную изотропную пористую среду. Получена расчетная формула для оценки теоретической минимально необходимой продолжительности протекания процесса пропитки. Сформулированы условия ее применения. Приводятся результаты выполненного расчета применительно к конкретной задаче, объясняющие нестабильность результатов, получаемых на практике.

Ключевые слова: алюминиевое литье, пористость, пропитка, фильтрация, полимерная композиция

Введение

Производители алюминиевого литья традиционно различают два типа пористости: микро- и макропористость. И та, и другая могут иметь усадочное и/или газовое происхождение. Макропористость, как правило, видна невооруженным глазом и необратимо снижает прочностные свойства отливок, поэтому обычно их направляют на переплав в качестве возврата. В отличие от этого, микропористость проявляет себя лишь в условиях избыточного давления воздуха, нагнетаемого в полость отливки, погруженной в воду, в виде устойчивой цепочки пузырьков, выходящих из места дефекта на поверхности отливки.

Пропитка алюминиевого литья полимерными композициями широко применяется с целью гарантированной герметизации микропористости – микропор, усадочной рыхлоты и мелких раковин газового происхождения и микротрещин размерами до 0,5 мм без повреждения поверхности, изменения геометрии отливок и потери ими прочности, позволяет снизить долю производственного брака и обеспечивает требуемый эксплуатационный ресурс литых изделий в широком диапазоне рабочих температур от -90 до +250°C даже при воздействии химически активных жидкостей, газов, масел, смазок, охлаждающих эмульсий, кислот, щелочей и топлива [1-6].

В общем случае пропитка пористых отливок проводится после их отделения от литниковой системы и включает в себя несколько основных операций [7-9]:

- 1) входная проверка на герметичность;
- 2) загрузка в емкость для герметизации;
- 3) обработка герметизирующим составом, включая пропитку жидкой композицией и выдержку до полного затвердевания в микропорах;

- 4) промывка;
- 5) сушка;
- 6) повторный контроль на герметичность.

Чаще всего отечественные предприятия практикуют вакуумную пропитку в автоклаве по схеме «влажный вакуум-давление» композициями типа Анакрол-90 (отечественный аналог зарубежного материала Loctite Resinol 88 C) [10-13], не требующими присутствия кислорода, полимеризующимися при нагреве и существенно превосходящими по эффективности материалы предыдущего поколения на основе жидкого стекла и полиэфирных смол. При этом полимеризованный материал, как правило, представляет собой реактопласт, который не расплавляется, не вытесняется из пор и не вымывается, либо термопласт, который успешно выдерживает достаточно высокие температуры эксплуатации. При превышении максимальных рекомендованных температур происходит озоление и разрушение реактопласта или, соответственно, расплавление термопласта.

Следует отметить, что, несмотря на кажущуюся простоту практической реализации, пропитка пористых отливок весьма сложна для описания с позиции классической теории. Очевидно, что здесь имеют место как химические реакции с участием полимерных композиций, протекающие в условиях различных температур и давлений, так и такие физические процессы, как тепло- и массоперенос и фильтрация.

Тем не менее осмысление и математическое описание процессов, происходящих в ходе пропитки пористого алюминиевого литья полимерными композициями, пусть даже в упрощенном, модельном виде, крайне важно для повышения управляемости этой технологической операцией в целом и обеспечения прогнозирования длительности операции в частности.

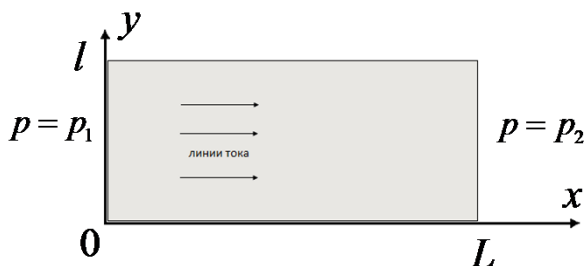
Цель данного исследования – разработать физико-математическую модель пропитки пористого алю-

миницевого литья полимерным инфильтратом – жидкой полимерной композицией, фильтрующейся сквозь дефектную зону микропор в отливке, и предложить на ее основе расчетную формулу для оценки продолжительности полного протекания процесса.

Теоретические выкладки

Для построения искомой модели используем известную схему плоскопараллельной фильтрации [14, 15]. Будем рассматривать дефектную зону микропор в отливке как классическую пористую среду – прямоугольную изотропную область с проницаемостью k , сквозь которую пропускается полимерный инфильтрат – однородная несжимаемая жидкость с динамической вязкостью μ , причем так, что линии тока параллельны оси Ox (см. рисунок).

Границы дефектной зоны $y = 0$ и $y = l$ принимаем совпадающими со стенками автоклава, следовательно, непроницаемыми. Рассматриваем стационарный процесс, поэтому давление на входе в дефектную зону ($x = 0$) и на выходе из нее ($x = L$) фиксируем равным соответственно p_1 и p_2 , причем $p_1 > p_2$. Массовыми силами, связанными с действием гравитации, пренебрегаем. Полимерный инфильтрат на стадии пропитки до полимеризации (затвердевания) с определенными допущениями рассматриваем как ньютоновскую жидкость.



Расчетная схема

В таком случае модель пропитки может быть описана системой, состоящей из двух уравнений математической физики, а именно уравнений баланса массы, или неразрывности, и баланса импульса, или фильтрации Дарси:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, u_y = u_z = 0, \end{cases}$$

в которой u_x, u_y, u_z – компоненты скорости движения инфильтрата по осям прямоугольной декартовой системы координат.

Исключаем из системы единственную неизвестную компоненту скорости u_x и получаем однородное дифференциальное уравнение второго порядка с разделяющимися переменными:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = 0.$$

После первого интегрирования уравнения имеем

$$\frac{dp}{dx} = C_1,$$

откуда после второго интегрирования получаем $p = C_1 x + C_2$.

Для стационарного процесса в структуре условий однозначности сохраняются только граничные:

$$\text{при } x = 0 \quad p = p_1; \text{ при } x = L: \quad p = p_2.$$

Учитывая этот факт, находим значения обеих констант интегрирования:

$$C_1 = \frac{p_2 - p_1}{L}, C_2 = p_1.$$

В итоге для распределения давления полимерного инфильтрата получаем

$$p(x) = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{L} \cdot x.$$

Принимая это во внимание, для компоненты скорости u_x имеем

$$u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} = -\frac{k}{\mu} C_1 = \frac{k}{\mu} C_1 = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{p_2 - p_1}{L}.$$

Средняя истинная скорость произвольной частицы, находящейся в потоке полимерного инфильтрата, с учетом изотропности среды определяется соотношением

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{u_x}{m},$$

где m – пористость.

Поскольку в нашем случае компонента полной скорости u полимерного инфильтрата вдоль оси Ox является единственной, отличной от нуля, из последнего равенства получим

$$dt = \frac{m}{u} dx.$$

Это дает возможность найти время, за которое произвольная частица проходит расстояние от начала координат до точки с текущей координатой x в однородной пористой среде:

$$t = m \int_0^x \frac{dx}{u(x)}.$$

В итоге получаем среднее время прохода произвольной частицы через прямоугольную область длины L , которое составляет

$$T = m \int_0^L \frac{dx}{u_x} = \frac{\mu m}{k} \cdot \frac{L^2}{p_1 - p_2}$$

Обсуждение результатов

Обращает на себя внимание тот факт, что в полученной расчетной формуле среднее время пропитки оказалось прямо пропорциональным динамической вязкости инфильтрата μ и пористости дефектной зоны отливки m , обратно пропорциональным разности давлений $p_1 - p_2 = \Delta p$ на входе и выходе и проницаемости k дефектной зоны отливки.

При этом пористость m (безразмерная величина в системе СИ) представляет собой отношение объёма области, занятого в дефектной зоне отливки порами, к её общему объёму, а проницаемость k (размерность в системе СИ [м^2]) – способность пористой среды пропускать жидкость при перепаде давления на входе и выходе, характеризующая сопротивление проникновению инфильтрата вглубь пористой среды. Пористость характеризует степень заполнения материала отливки порами и во многом определяет прочностные и другие эксплуатационные свойства литого изделия. Проницаемость является одним из сложных физико-химических свойств дефектной зоны отливки как пористой среды и зависит от присущих ей диффузионных и сорбционных особенностей.

В этой связи, по мнению авторов данной статьи, полученная расчетная формула вполне может быть применена для оценки теоретической минимально необходимой продолжительности полного протекания процесса пропитки, учитывая, что в качестве Δp допустимо использовать рабочую глубину вакуума в автоклаве, динамическую вязкость полимерного инфильтрата μ принять постоянной в течение всего временного интервала пропитки, а толщину дефектной зоны пропитки L , а также величины ее проницаемости k и пористости m можно определить экспериментальным путем [16].

Так, например, при динамической вязкости $\mu = 10$ МПа·с (пропитка акриловым термопластом марки Loctite Resinol 88С), глубине вакуума в автоклаве $\Delta p = 0,05$ атм = 0,005 МПа, толщине $L = 5$ мм, проницаемости $k = 10^{-12}$ м^2 и пористости дефектной зоны $m = 0,7$ расчетная теоретическая минимально необходимая продолжительность процесса пропитки составляет $3,5 \cdot 10^{10}$ с $\approx 9,7 \cdot 10^6$ ч ≈ 405 суток, что существенно превышает диапазон ее технологических значений, применяемых на практике (4–5 мин по данным [17]) и во многом объясняет нестабильность получаемых результатов.

Заключение

Таким образом, авторами данной статьи предложена физико-математическая модель пропитки пористого алюминиевого литья полимерным инфильтратом, позволяющая выполнить оценку теоретической минимально необходимой продолжительности полного протекания процесса пропитки.

Список источников

1. Евсеев В.И., Ткаченко С.В. Исправление дефектов литья и герметизация пористости деталей [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lrx.ucoz.ru/blog/ispravlenie_defektov_litja_i_germetizacija_porivosti_detalej/2012-01-19-133 (дата обращения 18.06.2024).
2. Леушин И.О., Субботин А.Ю., Горохов Д.А. Пропитка пористого металлического литья полимерными материалами: современные тренды // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. №7(242). С. 55-61.
3. Анакрол. Герметизация пористости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anacrol.ru/files/download/document/%D0%90%D0%9D%D0%90%D0%9A%D0%A0%D0%9E%D0%9B.%20%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8.pdf> (дата обращения 18.06.2024).
4. Технология герметизации микропористости [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://germetic.ru/questions/index/ge/closing_hole/ (дата обращения 18.06.2024).
5. Reger M., Horvath R., Fabian E.R., Reti T. Modelling the Impregnation of a Pressure-Tight Casting [Электронный ресурс] // International Journal of Metal-casting. 2024. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/378749909_Modelling_the_Impregnation_of_a_Pressure-Tight_Casting?_sg=Lbd4_kiiJl0BbFNCMEVV5oH0dYttj7zzixj1d03os_099RQUqViCc8iIo2svtByTZnj5Ut z2o8DGNZ0&_tp=eyJjb250ZXh0Ijpw7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCIsInBhZ2U0iOiJfZGlyZWN0In19 (дата обращения 18.06.2024).
6. Чечуха В.И., Садохина М.А. Газовые раковины и пористость при литье под высоким давлением и меры предупреждения их образования // Литейщик России. 2024. №1. С. 33-38.
7. Лордкипанидзе М.А. Обзор методов упрочнения пористого литого алюминия // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: сб. тр. XXXII Международной научно-практической конференции, 2016. С. 7-11.
8. Современные материалы и технологии для исправления дефектов литья и герметизации пористости деталей [Электронный ресурс]. Режим доступа:

- http://www.aquaprop.ru/upload/Articles/materiali_i_tehnologii.pdf (дата обращения 18.06.2024).
9. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н. Исследование влияния вибрации на процессы формирования пористых магниевых изделий // *Металлург*. 2024. №1. С. 91-94.
 10. Уридия З.П., Мухина И.Ю. Новые пропитывающие материалы для герметизации отливок из магниевых и алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2011/2011-205831.pdf?ysclid=lxj0esuney51647300> (дата обращения 18.06.2024).
 11. Barbeau Wilfredh, Cocco John, Cowdrey Simon, Kyle Eales S. *Loctite Worldwide Design Handbook*. Munich, Germany. Loctite European Group, 1998.
 12. Технологии устранения дефектов корпусных деталей анаэробными материалами / Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Шубенков А.В., Корнеев А.А. // *Научно-теоретические проблемы современного российского общества: сб. материалов I научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых*. М., 2006. С. 173-174.
 13. Фундаментальная электронная библиотека [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.alteh.com/suhoi_vakuuum.html (дата обращения 18.06.2024).
 14. Фильтрационные течения в пористых средах: монография / Коленкина Е.И., Никитин В.Ф., Логвинов О.А., Смирнов Н.Н. Москва: Изд-во ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2020. 73 с.
 15. Леонтьев Н.Е. *Основы теории фильтрации*. М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
 16. Определение пористости материалов / Житников Ю.З. и др. // *Контроль. Диагностика*. 2004. №4. С. 40-43.
 17. Технологический процесс пропитки литья [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://brudor.ru/tehnologicheskij-protsess-propitkilitya/> (дата обращения 18.06.2024).

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: igoleu@yandex.ru.

Кошелев Олег Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроительные технологические комплексы», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: kos7shef3@yandex.ru.

Рябова Любовь Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: kafmto@mail.ru.

Горохов Денис Александрович – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: denisgorokhov57@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THEORETICAL MODEL OF IMPREGNATION OF POROUS ALUMINUM CASTING WITH POLYMER INFILTRATE

Leushin Igor O. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Koshelev Oleg S. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Professor of the Chair of Machine-building technological complexes Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Ryabova Liubov I. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Gorohov Denis A. – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Abstracts. The authors of the article focus on the problem of understanding and modeling the process of impregnation of porous aluminum casting with polymer compositions, which plays a vital role in solving the problem of reducing the share of production defects and ensuring the required service life of cast products. The distinctive features of macro- and micropores formed in castings made of aluminum alloys are formulated. A brief description of the process

of impregnation of micropores is given, the features associated with the simultaneous occurrence of chemical reactions involving polymer compositions, as well as heat and mass transfer and filtration under conditions of different temperatures and pressures are described. A list of basic operations is provided. Attention is drawn to the complexity of describing the impregnation process from the position of classical theory. A fairly simple to understand physical and mathematical model of impregnation of a porous aluminum casting with a polymer infiltrate - a liquid polymer composition filtering through a defective zone of micropores in the casting - is proposed. The model is based on the well-known scheme of plane-parallel filtration of liquid through an idealized isotropic porous medium. A calculation formula has been obtained to estimate the theoretical minimum required duration of the impregnation process. The conditions for its application are formulated. The results of the calculation performed in relation to a specific problem are presented, explaining the instability of the results obtained in practice.

Keywords: aluminum casting, porosity, impregnation, filtration, polymer composition.

Ссылка на статью:

Теоретическая модель пропитки пористого алюминиевого литья полимерным инфильтратом / Леушин И.О., Кошелев О.С., Рябова Л.И., Горохов Д.А. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 28-32.
Leushin I.O., Ryabova L.I., Koshelev O.S., Gorohov D.A. Theoretical model of impregnation of porous aluminum casting with polymer infiltrate. *Teoria i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 28-32.