

УДК 621.74.02:
621.74.019

A.V. Koltygin,
V.E. Bazhenov,
Yu.V. Tselovalnik,
V.D. Belov, V.A. Yudin

Аннотация

Summary

Результаты компьютерного моделирования усадочной микропористости в корпусной отливке из сплава МЛ10

Research of adequacy a shrinkage micro porosity simulation when producing of castings from ML10 magnesium alloy

А.В. Колтыгин, В.Е. Баженов, Ю.В. Целовальник, В.Д. Белов, В.А. Юдин

С помощью систем компьютерного моделирования литейных процессов ProCast и ПолигонСофт рассмотрена возможность прогнозирования междендритной пористости при получении гидроплотных корпусных отливок из магниевого сплава МЛ10. Проведено сравнение результатов моделирования с реальной картиной распределения микропористости в литых *корпусах* гидроприводов из Mg-сплавов, изготавливаемых на ПАО АК «Рубин» литьем в формы из холоднотвердеющей смеси (ХТС).

Ключевые слова

Литье, магнелиевые сплавы, МЛ10, микропористость, ProCast, ПолигонСофт, моделирование.

Using the casting simulation software ProCast and PolygonSoft, the possibility of predicting inter-dendritic shrinkage porosity during the production of pressure-retaining castings from the ML10 magnesium alloy was considered. The simulation results are compared with the distribution of inter-dendritic shrinkage porosity in magnesium castings of hydraulic drive bodies manufactured at PJSC Rubin by sand casting.

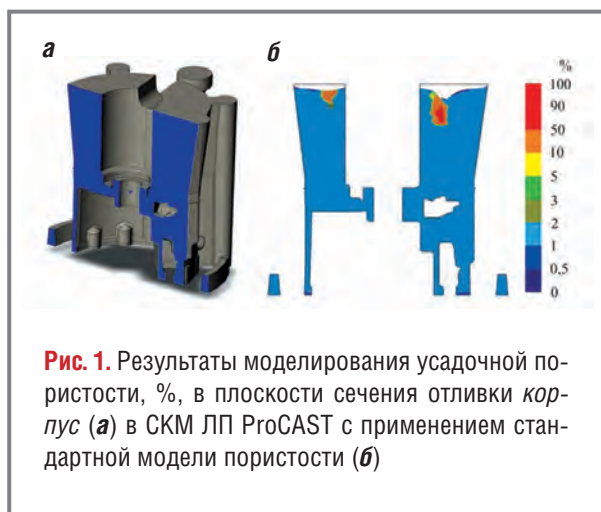
Key words

Foundry, magnesium alloys, ML10, micro porosity, ProCast, PolygonSoft, simulation.

Введение

В отечественном авиастроении для получения корпусных литых деталей, работающих под давлением гидравлических жидкостей, чаще всего используют сплав МЛ10 ГОСТ 2856-79 [1]. При этом, было показано, что лучшая герметичность тонкостенных корпусных отливок из Mg-сплавов

достигается при использовании вертикально-щелевой литниково-питающей системы (ЛПС) с расширенными питателями в сторону шлакоуловителя [2]. Основная причина негерметичности таких отливок – микропористость, трещины в стенках отливки и неслитины, которые образуются из-за относительно низкого теплосодержания



и широкого интервала кристаллизации Mg-сплавов. Также часто к негерметичности отливок приводит наличие в отливке скоплений неметаллических включений (НМВ), в основном, оксидов [3].

За возникновение или отсутствие этих дефектов во многом отвечает конструкция ЛПС отливки. Часто при проектировании ЛПС движение расплава в форме описывается эмпирическими формулами, позволяющими на полуколичественном уровне провести инженерные расчеты [4]. В этом случае говорить об оптимальности литниковых систем довольно сложно, что становится одной из причин брака при получении отливок [5].

Очевидно, что применение систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) должно повысить качество разработки ЛПС. В таком моделировании при получении отливок из Mg-сплавов на отечественных предприятиях широко применяют СКМ ЛП ProCast (ESI Group, EU) [7].

В то же время, замечено, что стандартный решатель ProCast не всегда адекватно воспроизводит такие сложные для моделирования дефекты, как междендритная пористость. Этот дефект возникает вследствие перемещения свободной поверхности расплава, что приводит к уходу жидкости из междендритных пространств. Междендритная пористость характерна для широкоинтервальных Mg-сплавов. В СКМ ЛП ПолигонСофт (CSoft, РФ) реализована модель формирования пористости на основе уравнения баланса массы при перемещении зеркала расплава в двухфазной зоне отливки, и она при расчете междендритной пористости может быть более эффективна, чем реализованная в ProCast [8].

В работе исследовали возможность прогнозирования возникновения негерметичности отливки корпус из сплава МЛ10 с помощью компьютерного моделирования в СКМ ЛП ProCast и ПолигонСофт путем сравнения результатов моделирования с результатами пробных заливок на производственной площадке ПАО АК «Рубин».

Материалы и методика проведения экспериментов

Расчет заполнения и затвердевания отливки корпус проводили с помощью СКМ ЛП ProCAST версии 2018.0. Для моделирования использовали теплофизические свойства сплава МЛ10, рассчитанные с помощью термодинамической базы данных программы ProCast. Использовали равновесную модель кристаллизации. В качестве материала формы была использована ХТС на основе синтетических смол плотностью $\rho = 1520 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент теплопередачи между отливкой и формой составлял $500 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, температура: заливки 720°C , формы 20°C .

Вертикально-щелевая ЛПС была рассчитана в соответствии с рекомендациями и по методике, предложенной в литературе [4]. Также проводили расчет затвердевания отливки с помощью СКМ ЛП ПолигонСофт, версия 15.0. Теплофизические свойства сплава МЛ10 и песчаной формы брали из базы данных материалов, поставляемых вместе с программой.

CAD-модель готовили с использованием CAD-системы SolidWorks. Расчетную сетку создавали в программе Visual Mesh. Использовали одну и ту же расчетную сетку для моделирования в ProCAST и ПолигонСофт для исключения влияния качества расчетной сетки на результаты моделирования.

Экспериментальные отливки заливали в формы из ХТС (фуран-процесс), изготовленные методом трехмерной печати из отечественного кварцевого песка производства «Неболчинское карьероуправление» (ООО Sibelco Рус), средней фракции 016, с использованием отечественного связующего материала BindEX+ (XTreel, РФ). Ранее авторами для получения литейных форм были проведены испытания этой системы [9].

Плавку сплава МЛ10 вели без использования флюсов под защитой газовой смеси $\text{Ar}+(0,5\dots 1,0) \text{ об.} \% \text{ SF}_6$. В качестве шихты использовали готовый сплав МЛ10 производства ООО «СОМЗ» (Россия). В шихту добавляли до 30% возврата собственного производства (прибыли). Плавку вели при



Рис. 2. Экспериментальные отливки корпус после испытаний на гидроплотность, отмечены выявленные места течи гидравлической жидкости

760...780°C. Металл разливали ручными ковшами при 740...720°C.

Исследование структуры отливок проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Vega SBH3 (Tescan, Чехия).

Результаты и обсуждения

С помощью моделирования было проанализировано образование пористости в процессе затвердевания отливок. Сплав МЛ10 очень хорошо подходит для проверки адекватности моделирования усадочных дефектов, поскольку, из-за наличия в его составе циркония, он не содержит растворенных газов в количестве, способном повлиять на формирование пористости в отливках. В результате, в отливках из сплава МЛ10 присутствует только усадочная пористость.

Результаты моделирования усадочной пористости в ProCAST с использованием стандартной модели расчета пористости представлены на **рис. 1, б**, а распределение пористости в вертикальном сечении отливки – на **рис. 1, а**.

Результаты моделирования усадочной пористости, полученной в программе ProCAST, показали отсутствие в отливке усадочных дефектов. Зоны максимальной пористости, определяемые с помощью моделирования были $\leq 3\%$, и зоны с такой пористостью (зеленые на **рис. 1, б**) были равномерно распределены по всему телу отливки, что не дает возможности прогноза мест с пониженной гидроплотностью.

Вывод. Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод о полной герметичности или, напротив, абсолютной негерметичности отливок, как по стенкам, так и по дну, в зависимости от условий эксплуатации.

Были изготовлены экспериментальные отливки, которые после удаления ЛПС испытали на

гидроплотность. На всех отливках была выявлена негерметичность в одном и том же месте (**рис. 2**). Причинами негерметичности стенок отливки могут быть дефекты в стенках отливки, вызванные НМВ (чаще всего, оксидными пленами) или усадочные и газоусадочные дефекты. Однако из-за наличия в сплаве циркония дефекты, вызываемые растворенными газами, можно в расчет не принимать.

Таким образом, основной причиной негерметичности отливки могут быть только НМВ или усадочная пористость. Визуальный осмотр и рентгеновское просвечивание дефектных стенок не выявил наличия включений, которые могли бы быть причиной возникновения негерметичности.

Для определения причины течи в отливках были сделаны изломы в дефектных местах (**рис. 3**). При большом увеличении (**рис. 3, б**) видно, что в дефектной области отливки наблюдается междендритная пористость усадочного происхождения, на что указывают обнаженные ветви дендритов, появляющиеся в отливке при недостаточном питании растущих дендритов жидким металлом.

Это происходит из-за затрудненного перемещения жидкости сверху (из прибыли) вниз при наличии развитой двухфазной области в отливке, характерной для Mg-сплавов. Вследствие этого жидкость уходит из междендритного пространства растущей двухфазной области, что провоцирует образование развитых пустот, нарушающих герметичность отливки.

Таким образом, обнаружена зона повышенной пористости в отливке, что не соответствует результатам моделирования, полученным ранее (см. **рис. 1, б**).



Рис. 3. Излом стенки в области негерметичности отливки: **а** – стенка с дефектной областью, **б** – междендритная пористость в дефектной области

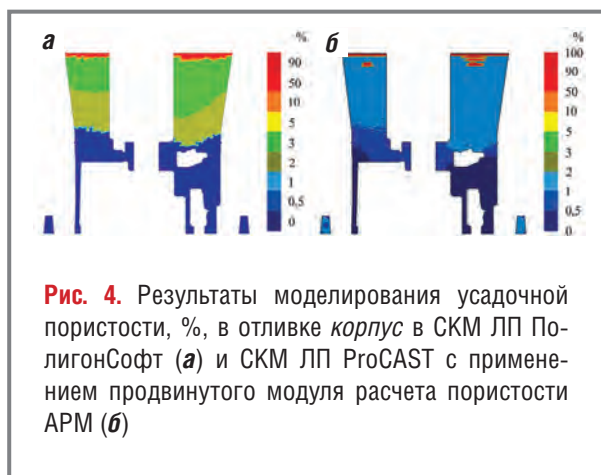


Рис. 4. Результаты моделирования усадочной пористости, %, в отливке *корпус* в СКМ ЛП ПолигонСофт (**а**) и СКМ ЛП ProCAST с применением продвинутого модуля расчета пористости APM (**б**)

Очевидно, что моделирование в ProCast было не в полной мере адекватно полученным результатам. Распределение пористости, по результатам моделирования той же отливки в программе ПолигонСофт, представлены на **рис. 4, а**. Результаты моделирования показывают наличие зоны повышенной пористости металла в том же месте, в котором обнаруживается течь гидравлической жидкости при испытаниях на гидроплотность в экспериментальных отливках *корпус*. Модель формирования пористости, полученная на основе уравнения баланса массы при перемещении зеркала расплава в двухфазной зоне отливки и учитывающая падение давления в замкнутых объемах жидкой фазы, которая была реализована в ПолигонСофт, в данном случае более эффективна, чем стандартная модель расчета пористости, являющаяся основной в ProCAST. Использование продвинутого модуля расчета пористости APM (Advanced Porosity Module), рассчитывающего макро- и микропористость в отливке, с учетом растворенных газов, позволяет рассчитывать междендритную усадку в системе ProCAST и может в некоторой степени исправить положение при моделировании сложных задач прогнозирования микропористости.

На **рис. 4, б** представлены результаты моделирования усадочной пористости, полученные с использованием модуля APM. Распределение микропористости в результате этого моделирования более похоже на результат, полученный при моделировании в СКМ ЛП ПолигонСофт (**рис. 4, а**), чем на результаты расчета, полученные с использованием стандартной модели расчета пористости ProCAST (см. **рис. 1, б**).

Эти результаты могут быть использованы для прогнозирования появления микропористости,

приводящей к образованию течи гидравлической жидкости в корпусных отливках из Mg-сплавов. Однако пороговые значения пористости, при которых обнаруживается течь в отливках, в СКМ ЛП ПолигонСофт и СКМ ЛП ProCAST с продвинутым модулем расчета пористости APM, были получены разные.

Так, в СКМ ЛП ПолигонСофт зоны негерметичности образуются при расчетном значении усадочной пористости в 2% (**рис. 4, а**), а в СКМ ЛП ProCAST APM негерметичность наблюдается уже при уровне расчетной пористости $\geq 1\%$ (**рис. 4, б**). Это может быть связано с разными теплофизическими свойствами материалов, использованных в расчетах, и с различиями в математической реализации расчетных моделей.

Выводы

- Наиболее адекватные результаты моделирования микропористости в корпусных отливках из Mg-сплавов получены в результате применения СКМ ЛП ProCAST с использованием продвинутого модуля расчета пористости APM или СКМ ЛП ПолигонСофт.
- Стандартный модуль расчета усадочной пористости СКМ ЛП ProCAST в настоящее время не обеспечивает полностью адекватного моделирования усадочной микропористости, образующейся в результате ухода жидкости из междендритного пространства в процессе затвердевания отливок из широкоинтервальных Mg-сплавов, что необходимо учитывать при проектировании литейной технологии для получения тонкостенных гидроплотных отливок из таких сплавов.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, по материалам работ, выполняемых в НИТУ «МИСиС» в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства: «Разработка технологии производства уникальных литых деталей из сплавов цветных металлов для летательных аппаратов на базе цифровых технологий и применения перспективных импортзамещающих материалов с целью повышения конкурентоспособности отечественного авиастроения», Соглашение от 22 ноября 2019 г. № 075-11-2019-045, заключенное в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств в рамках подпрограммы

«Инфраструктура научной, научно-технической и инновационной деятельности» государственной программы РФ «Научно-технологическое развитие РФ», утвержденных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колтыгин А.В.** Анализ возможных фазовых превращений при кристаллизации и их влияние на литую структуру в сплаве МЛ10 // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2013. – №8. – С. 25–28.
2. **Колтыгин А.В., Чупеева А.Н.** Исследование влияния параметров литниково-питающих систем на заполнение и затвердевание тонкостенных отливок из магниевых сплавов // *Литейщик России.* – 2014. – №4. – С. 28–32.
3. **Шаломеев В.А.** Улучшение макро- и микро-структуры авиационного литья из магниевых сплавов // *Вестник двигателестроения.* – 2013. – №1. – С. 127–132.
4. **Галдин Н.М.** Литниковые системы для отливок из легких сплавов. – М.: Машиностроение, 1978. – 198 с.
5. **Лукашевич Ф.С., Чичко О.И., Соболев В.Ф.** О проблемах расчета характеристик процесса течения расплавов в литейных формах // *Литье и металлургия.* – 2006. – №3. – С. 143–147.
6. **Дуюнова В.А., Молодцов С.В., Леонов А.А., Трапезников А.В.** Применение методов моделирования при изготовлении сложноконтурной отливки // *Труды ВИАМ.* – 2019. – №11. – С. 3–11.
7. **Моисеев В.С., Бобрышев Б.Л., Смыков А.Ф., Бережной Д.В., Мухаметов А.А.-Х., Кошелев О.В., Моисеев К.В., Попков Д.В.** Автоматизация проектирования процессов литья крупногабаритных отливок из магниевых сплавов // *Литейное производство.* – 2017. – №9. – С. 25–28.

8. **Монастырский В.П.** Опыт применения и перспективы развития систем автоматизированного моделирования литейных процессов // В сб.: *Материалы междунар. науч.-техн. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ» (17 ноября 2010 г.).* – М.: МГТУ «МАМИ», 2010. – С. 25–31.

9. **Колтыгин А.В., Рижский А.А., Плисецкая И.В., Баженов В.Е., Белов В.Д., Юдин В.А.** Использование отечественных материалов при производстве литейных песчаных форм и стержней методом 3D-печати // *Литейное производство.* – 2020. – №5. – С. 20–24.

Сведения об авторах

Колтыгин Андрей Вадимович – канд. техн. наук, доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ «МИСиС». Тел.: +79037911801. E-mail: misistlp@mail.ru

Баженов Вячеслав Евгеньевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., там же. Тел.: +79055535564. E-mail: v.e.bagenov@gmail.com

Целовальник Юрий Всеволодович – инж., там же. Тел.: +79295372688. E-mail: 444ura444@gmail.com

Белов Владимир Дмитриевич – д-р техн. наук, проф., заведующий той же кафедрой. Тел.: +74959511725. E-mail: vdbelov@mail.ru

Юдин Василий Анатольевич – канд. техн. наук, гл. металлург ПАО АК «Рубин». Тел.: +79261379914. E-mail: yudinva78@mail.ru

ВНИМАНИЕ!

Журналы «Металлургия машиностроения», «Литейное производство» можно приобрести в редакции. Цена печатной (электронной) версии журнала:
«Металлургия машиностроения» – 750 (600) руб.,
«Литейное производство» – 650 (550) руб.