

Высокоэффективное проектирование технологии фасонной отливки из магниевого сплава.

Часть 1. Проектирование и анализ литниково-питающей системы

В рамках разработки технологии получения отливки «Рама» из легкого сплава на основе магния рассматриваются теплофизические свойства материалов отливки и формы, конструкция литниково-питающей системы, а также результаты моделирования усадочной пористости и изготовления пробной партии отливок.

Ключевые слова: моделирование, литье, отливка, литниково-питающая система, трещины.

In the context of development of manufacturing technology for "Frame" casting from light-metal alloy on the base of magnesium, the thermophysical properties of casting and mould materials, structure of cast-supply system, and also the modeling results of internal shrinkage and production of trial batch of castings are considered.

Keywords: modeling, casting, cast, cast-supply system, cracks.

При создании технологии получения отливки вопросы уровня остаточных напряжений и возможного возникновения трещин традиционно не рассматриваются. Это можно объяснить следующим. Во-первых, основной недостаток литья — усадочная пористость, регламентируется, как правило, требованиями к отливке, а уровень остаточных напряжений вообще не оговаривается. Поэтому основная задача — получение плотной отливки. Инженер решает в первую очередь вопросы геометрии, расположения тепловых узлов, коэффициента использования металла (КИМ) и др. и редко — вопросы коробления или пластических деформаций. Во-вторых, в отличие от пористости, которую можно видеть в отливке, исследовать, а затем смоделировать в системе компьютерного моделирования литейный процесс (СКМ ЛП) и найти способ ее устранения, напряжения плохо поддаются изучению в промышленных условиях и не на каждом

предприятии есть оборудование для измерения их уровня. Когда же проблема неожиданно проявляется в виде холодных или горячих трещин, оказывается, что технология была недостаточно разработана и упущено что-то важное. В-третьих, расчету напряжений не уделяется должное внимание из-за отсутствия экспериментальной базы механических свойств. Реальное поведение материала отливки слишком сложное, и определение более-менее адекватных механических свойств (особенно при высоких температурах) — непростая задача. Поэтому применяемые в СКМ ЛП модели сред часто намеренно упрощают, чтобы дать возможность исследовать и эту проблему. В итоге основной источник данных для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) отливки — результаты термодинамических расчетов, выполняемых в разных специализированных пакетах. Их достоверность, точнее пригодность для вычислений, можно оценить только косвенно — путем решения конкретной производственной задачи.

В статье рассматриваются основные этапы разработки технологии получения отливки "Рама" из легкого сплава на основе магния. Ввиду большого объема статья разделена на две части. В первой части рассматриваются вопросы использования теплофизических свойств материалов отливки и формы, конструкции литниково-питающих систем (ЛПС), результаты моделирования усадочной пористости и изготовления пробной партии отливок. Во второй части будут даны: краткое описание модели расчета напряжений, расчеты механических свойств сплава и расчет НДС в зависимости от конструкции ЛПС. Работа выполнена совместно специалистами ООО ПКФ "Технология" и Группы компаний CSOFT, которая является разработчиком и дистри-



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 67)

4. Sproul W. D., Christie D. J., Carter D. C. Control of reactive sputtering processes // Thin Solid Films. 2005. V. 491. N. 1. P. 1—17.

5. Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends / J. Musel, P. Baroch et al. // Thin Solid Films. 2005. V. 475. P. 208—218.

6. Pat. 2005/0040030 A1 U. S. Method of treating sputtering target to reduce bur-in time and sputtering target thereof and apparatus thereof.

7. Sarkar J., McDonald P., Gilman P. Surface characteristics of titanium targets and their relevance to sputtering

performance // Thin Solid Films. V. 517. N. 6. 2009. P. 1970—1976.

8. Букарев И. М., Аборкин А. В. Исследование свойств многослойных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 5. С. 16—19.

9. Букарев И. М., Аборкин А. В. Влияние режима напыления на структуру и свойства многослойных нитридных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 11. С. 33—38.

10. Berg S., Nyberg T. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes // Thin Solid Films. 2005. V. 476. P. 215—230.

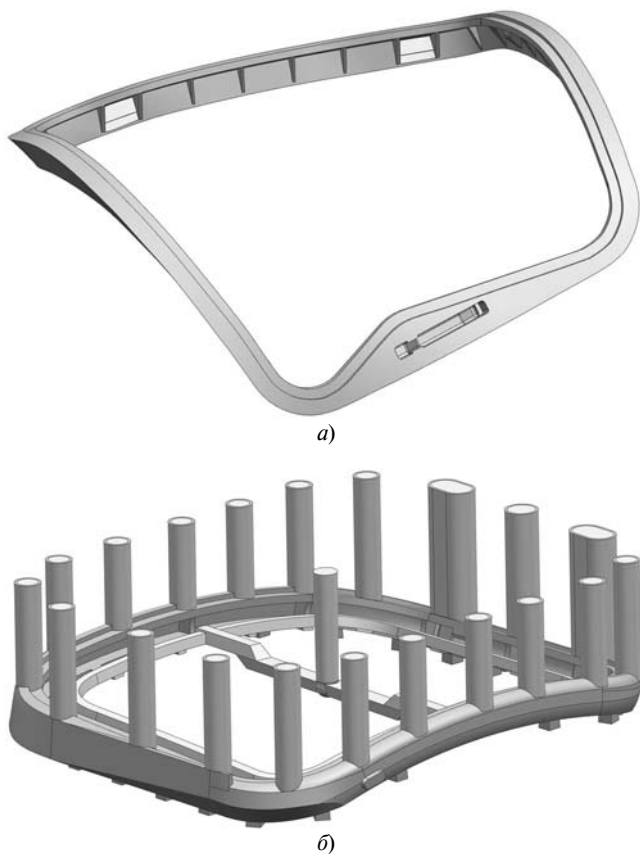


Рис. 1. Модели отливки "Рама" (а) и литейного блока (б)

бьютором решений в области моделирования литья металлов.

Отливку "Рама" изготавливает одно из предприятий АО "Вертолеты России" из сплава на основе магния МЛ5пч методом гравитационного литья в песчаную форму, выполненную из холодно-твердеющей смеси (ХТС) по альфа-сет процессу. Отливка представляет собой достаточно протяженную тонкостенную конструкцию со средней толщиной стенки 8÷10 мм и многочисленными ребрами жесткости (рис. 1, а). Готовые отливки подвергали визуальному осмотру и рентгенографическому контролю. Для получения аналогичных отливок требуемого качества специалисты предприятия используют конструкцию ЛПС (рис. 1, б), в которой тепловые узлы, образующиеся на стыке полок рамы и ребер жесткости, питаются местными прибылями. Для увеличения продолжительности питания для каждой прибыли используют теплоизолирующую вставку (FOSECO). Раму заполняют расплавом через центральный стояк и кольцевой коллектор, который соединяется с отливкой тонкими щелевыми питателями. Для предотвращения образования усадочной пористости между прибылями устанавливают холодильники из серого чугуна.

Такая конструкция ЛПС позволяет получать годные отливки. Однако ее анализ в СКМ ЛП показал, что технология недостаточно устойчива и

существует определенный риск получения брака. Отливка затвердевает практически одновременно с ЛПС. Так, если в какой-то момент времени жидкая фаза в теле рамы между прибылями составляет 0÷25 %, то в самих прибылях она составляет 25÷30 %. Согласно модели образования усадочной пористости [1—3] течение в междендритном пространстве полностью прекращается при 30 % жидкой фазы. Пороговое значение подобрано опытным путем и в большинстве случаев хорошо согласуется с экспериментальными данными [4]. Это значит, что при изменении параметров технологии (например температуры расплава) усадочная пористость может образоваться в теле отливки или под прибылями, или между ними, что косвенно подтверждает анализ полей пористости: при пороге пористости 1,27 % отливка имеет плотный вид (рис. 2, а), при снижении на 0,05 % видна пористость между прибылями (рис. 2, б).

Для получения бездефектной, более стабильной, а главное экономичной конструкции блока полностью изменили концепцию литниковой системы. Вертикальные утепленные цилиндрические прибыли заменили одной кольцевой боковой прибылью без утепления с сечением в виде трапеции. Через щелевые питатели прибыль питает протяженный (практически единственный) тепловой узел, который образуется на пересечении полок рамы. Концепцию центрального подвода расплава оставили без изменений, но единый кольцевой коллектор заменили двумя в форме подковы, что в данном случае обусловила изогнутая форма отливки (рис. 3). Проверка предложенного решения в СКМ ЛП основана на использовании теплофизических свойств сплава, задаваемых в широком диапазоне температур. Так как ни в технической литературе, ни в нормативной документации требуемых данных нет, то необходимые характеристики получали расчетом в программе CompuTherm (США, входит в состав СКМ ЛП ProCAST). Это термодинамические базы данных, которые позволяют рассчитать теплофизические и механические (упругие и частично пластические) свойства материала по химическому составу.

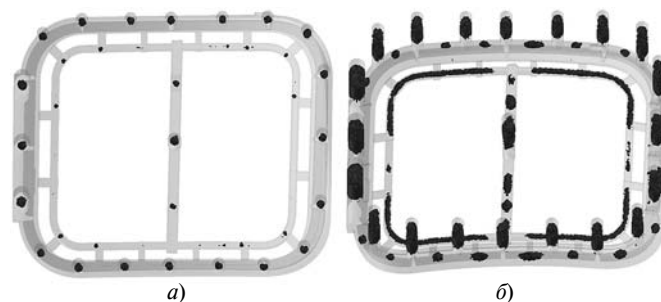


Рис. 2. Поля усадочной пористости >1,27 % (а) и >1,23 % (б) в отливке, полученной по серийной технологии, рассчитанные в СКМ ЛП ProCAST

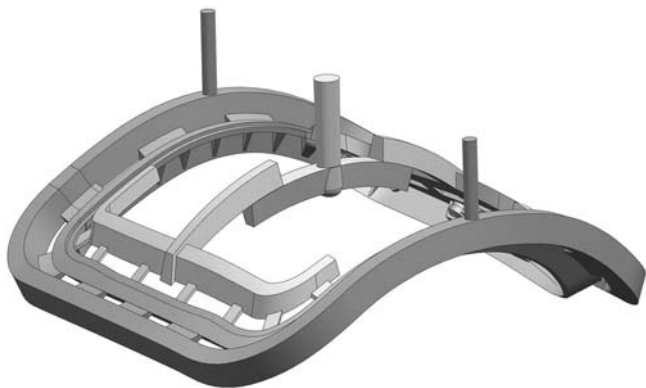


Рис. 3. Литниково-питающая система отливки "Рама"

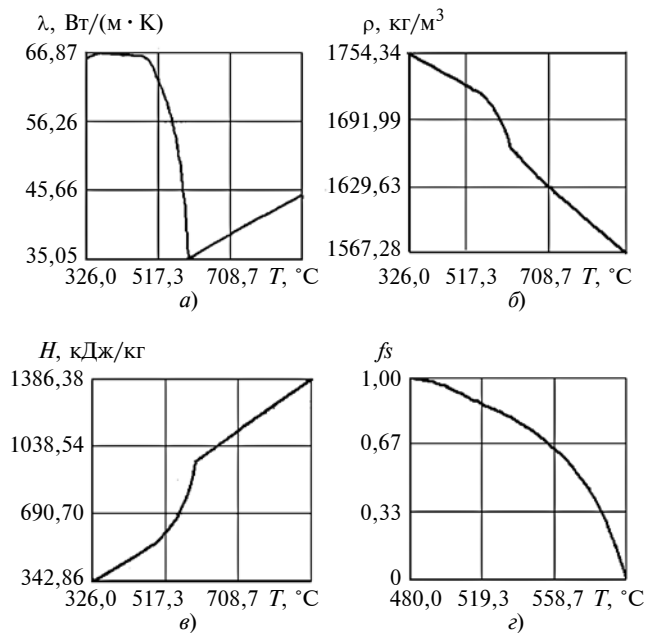


Рис. 4. Изменение свойств сплава МЛ5пч в зависимости от температуры:

a — коэффициента теплопроводности λ ; *б* — плотности ρ ; *в* — энтальпии H ; *г* — доли твердой фазы f_s

Состав сплава МЛ5пч по ГОСТ 2856—79 и содержание химических элементов, необходимые для расчета свойств, приведены в таблице. Термодинамическая база данных CompuTherm по сплавам на основе Mg имеет ограничения, поэтому не все элементы, указанные в стандарте, могут быть использованы. Результаты расчета теплофизических

свойств, необходимых для расчета температурных полей и пористости, приведены на рис. 4. При моделировании затвердевания необходимо также учитывать теплоемкость и теплопроводность песчаной формы и теплоизоляционных вставок. В расчетах использовали теплофизические параметры смеси по альфа-сет процессу из базы данных ПолигонСофт. Свойства материалов FOSECO взяты из открытых источников. Высказанное в работе [5] утверждение, что способ изготовления песчаной формы и состав связующих существенно не влияют на формирование тепловых полей в отливке, основано на том, что независимо от технологии песчаные смеси имеют одинаково низкую способность отводить тепло от отливки (≈ 1 Вт/м/К). Это позволяет при моделировании технологии использовать приблизительные свойства. Однако опубликованные по этой теме работы, например [6], вносят существенные поправки в это предположение. Способ и качество формовки песчаной смеси оказывают влияние на результат заливки даже достаточно массивных отливок. Следовательно, можно ожидать еще большего влияния разброса теплофизических свойств по объему формы при изготовлении таких тонкостенных изделий, как "Рама".

При моделировании теплопередача составила 500 Вт/м/К на границах отливка — форма и 10 Вт/м/К — на всех внешних границах; температура заливаемого сплава — 760 °С, температура формы — 20 °С.

Поля усадочной пористости при пороговых значениях 1 и 0,2 %, рассчитанные в СКМ ЛП "ПолигонСофт" [7, 8], показаны соответственно на рис. 5, *a*, *б*. Предлагаемая ЛПС показала большую стабильность в отличие от ЛПС, применяемой в серийной технологии (см. рис. 2), так как при снижении порога усадочной пористости в 5 раз отливка выглядит плотной. Получили: массу литейного блока 37,3 кг; массу отливки — 9,8 кг; КИМ (доля отливки в литейном блоке) — 26,3 %. Возможно полученный КИМ нельзя назвать высоким, однако следует иметь в виду возможность отказа от дорогих импортных теплоизоляционных материалов, снижение расходов песка и связующего, значительное снижение затрат на механическую обработку.

По результатам этой работы в ООО ПКФ "Технология" изготовили комплект оснастки, который

Химический состав сплава МЛ5пч

Содержание элементов, %	Al	Mn	Zn	Si	Fe	Ni	Cu	Be	Zr	Ti
				Не более						
ГОСТ 2856—79	7,5÷7,9	0,15÷0,5	0,2÷0,18	0,08	0,007	0,001	0,04	0,002	0,002	0,005
Расчет	7,7	0,325	0,5	0,02	0,0018	—	0,01	—	—	—



Рис. 5. Поля усадочной пористости $>1\%$ (а) и $>0,2\%$ (б) в отливке, полученной по предлагаемой технологии, рассчитанные в СКМ ЛП "ПолигонСофт"

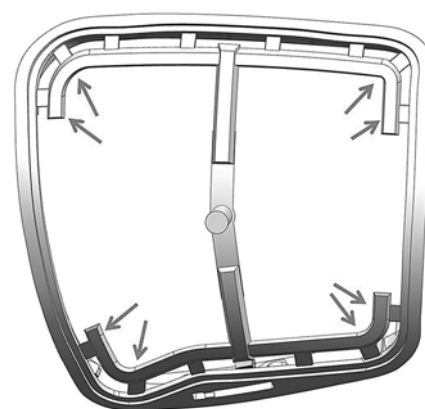
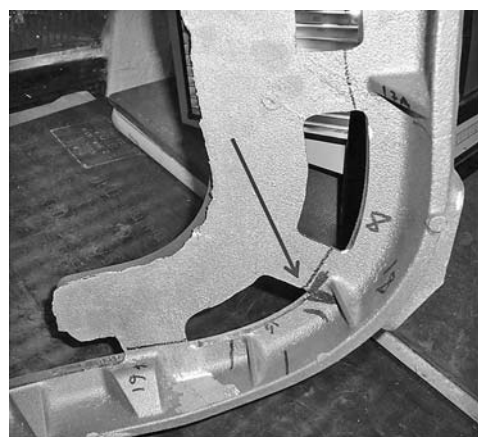


Рис. 7. Расположение трещин в отливке "Рама"

предприятие-заказчик использовало для изготовления опытной партии отливок "Рама". Все отливки прошли рентгенографический контроль с положительным результатом. Однако при визуальном осмотре зафиксированы трещины в опытных отливках, которые технологи предприятия не смогли

классифицировать как горячие или холодные (рис. 6). Трещины образовались в местах подвода расплава к раме через щелевые питатели. Однако в похожих щелевых питателях, идущих от отливки к прибыли, подобных дефектов не обнаружено. Трещины имели четыре питателя, расположенные на сгибах питающих коллекторов, и некоторые крайние питатели (рис. 7). Анализ причин возникновения дефектов и меры их устранения рассмотрим во второй части статьи.



а)



б)

Рис. 6. Трещины в отливке "Рама" (отмечены стрелками): а — вид одной из трещин; б — трещина на рентгенограмме

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Тихомиров М. Д. Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача. // Литейное производство. 1998. № 4. С. 30—34.
2. Тихомиров М. Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача. М.: Приложение к журналу "Литейное производство". 2001. № 12. С. 8—14.
3. Монастырский В. П. Моделирование образования макропористости и усадочной раковины в отливке // Литейщик России. 2011. № 10. С. 16—21.
4. Монастырский В. П., Монастырский А. В., Левитан Е. М. Разработка технологии литья крупногабаритных турбинных лопаток с применением систем "Полигон" и ProCAST // Литейное производство. 2007. № 9. С. 29—34.
5. Излом боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. В. Монастырский, В. М. Бубнов, С. П. Котенко, В. В. Балакин // Литейное производство. 2012. № 11. С. 21—25.
6. Разработка технологии изготовления отливок в песчаных формах с неравномерной плотностью / О. А. Бройтман, Д. С. Бабков, Д. Р. Шварц, М. А. Иоффе // Труды XII съезда литейщиков России. 2015. С. 412—416.
7. Монастырский А. В. Моделирование литейных процессов. Работаем в "ПолигонСофт" // Литейное производство. 2009. № 6. С. 19—22.
8. Монастырский А. В., Тихомиров М. Д. СКМ ЛП "ПолигонСофт" 13.х. Обзор, итоги, планы // Литейщик России. 2013. № 6. С. 20—24.