

Получение отливок со свойствами, улучшенными путем применения вставок, связано с рядом технических проблем. Однако такие эффекты, как изменение микроструктуры или искажение формы, проявляющиеся при производстве подобных отливок, можно прогнозировать с помощью моделирования процесса литья

Автор: докт.-инж. Гетц Хартман, инженерно-техническое обеспечение и развитие бизнеса, MAGMA GmbH, Ахен

## Сочетания материалов в облегченных литых деталях

Отливки из магния и алюминия играют важнейшую роль в производстве облегченных литых деталей. Области применения таких отливок постоянно расширяются, одновременно повышаются специфические требования к используемым материалам. Все чаще механические или трибологические свойства литых материалов оказываются недостаточными, рабочие температуры — слишком высокими, или окружающая среда — химически агрессивной. В таком случае необходимо подобрать свойства отдельных компонентов отливки так, чтобы они удовлетворяли предъявленным требованиям (например, применяют отливки со вставными элементами из чугуна или стали). Во время заливки металла в форму такие вставки могут привести в созданию непредсказуемой, даже критической ситуации. Например, происходит локальное захлаживание заливаемого металла, в результате чего могут заблокироваться литники, и форма останется незаполненной. Неравномерное охлаждение отливки приводит к возникновению в ней остаточных напряжений, искажениям формы, а в некоторых случаях — к образованию трещин и разрушению. Аналогичные проблемы могут возникнуть вследствие разницы в показателях теплопроводности или теплового расширения сочетаемых материалов. В статье рассмотрены возможности предварительных расчетов с целью снижения уровня остаточных напряжений, искажений формы и вероятности трещинообразования. Такие расчеты при необходимости могут быть выполнены перед началом отливки деталей, составленных из различных металлов, или перед началом термической обработки таких деталей

### Прогнозирование свойств гибридных отливок

Облегченные литые детали могут иметь особую конструкцию или изготавливаться из специальных материалов. Среди мно-

гочисленных возможных вариантов снижения массы деталей метод сочетания материалов открывает большие потенциальные возможности при производстве литых деталей. Однако

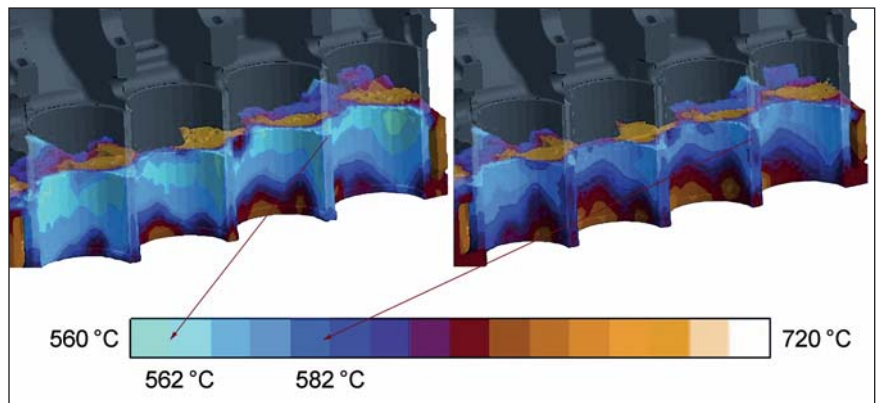
при переходе от разработки конструкции детали к технологии литья необходимо уделять особое внимание специфическим характеристикам сочетаемых материалов.

В литых деталях сочетание различных материалов может, например, привести к сложному характеру распределения остаточных напряжений или к определенным явлениям в процессе получения отливок. В настоящее время многие из этих явлений могут быть предсказаны и оценены при моделировании процесса литья, т. е. компьютерном моделировании стадий заполнения формы металлом, затвердевания, формирования микроструктуры и свойств материала. Таким образом, моделирование может стать методической основой конструирования литых деталей и определения путей совершенствования технологии литья, необходимость в котором нередко возникает.

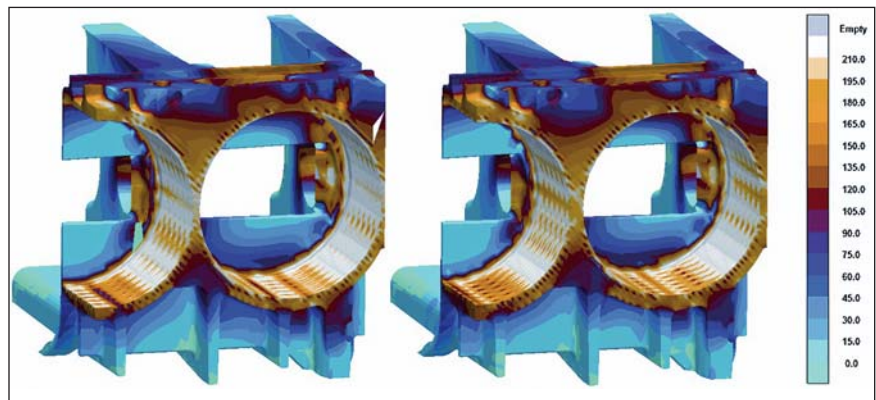
### Свойства материалов — условия локального затвердевания и охлаждения — распределение свойств между компонентами отливки

Конструирование и расчет литых деталей, включающие определение жесткости и предела выносливости, чаще всего основаны на допущении о стандартных свойствах материалов. При этом возникновение различных локальных условий на отдельных участках в процессе затвердевания металла и охлаждения отливки до комнатной температуры не учитывают. Это приводит к получению различной локальной микроструктуры и, соответственно, различных локальных механических свойств.

Высокая скорость затвердевания (высокая скорость перемещения фронта затвердевания) приводит, например, к формированию дендритов с малыми расстояниями между осями, образованию более тонкой микроструктуры и в результате — к повышенной энергии на границах зерен или к уменьшенной сегрегации. Все эти характеристики микроструктуры оказывают влия-



**Рисунок 1.** Температура алюминиевого расплава, заливаемого в зазоры между цилиндрами-вкладышами из серого чугуна с пластинчатым графитом. При предварительном нагреве вкладышей до более высокой температуры (слева) температура алюминия не является критическим фактором, а при более низкой температуре предварительного нагрева вкладышей расплавленный алюминий может не заполнить полностью зазоры между ними (справа). Это пример получения алюминиевой отливки литьем в песчаную форму с предварительным индукционным нагревом цилиндров-вкладышей

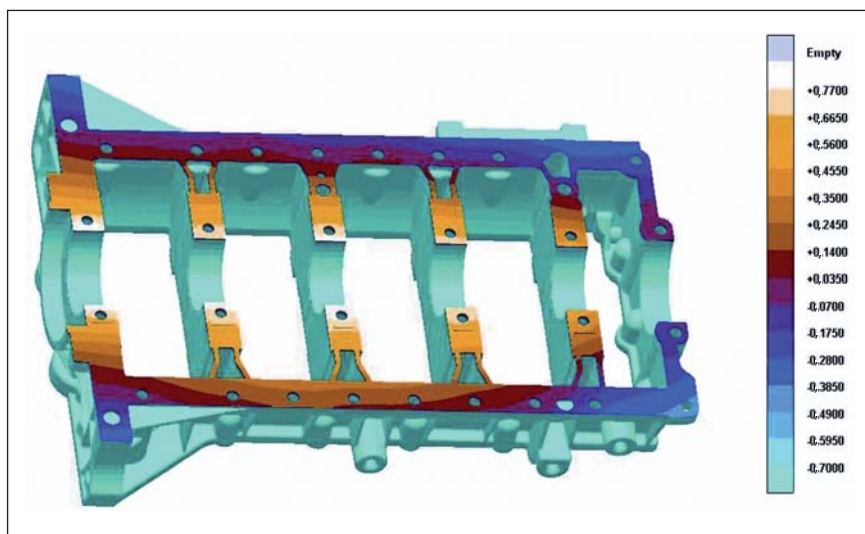


**Рисунок 2.** Максимальные главные напряжения (наибольшие растягивающие остаточные напряжения), возникающие в алюминии вокруг чугунных вкладышей после литья. Необходимо отметить высокий уровень внутренних напряжений в зазоре между двумя вкладышами и неравномерные напряжения вокруг вкладышей. Меньшее расстояние между вкладышами приводит к возникновению более высоких напряжений (206 МПа; слева), чем большее расстояние между ними (187 МПа; справа). В качестве примера рассмотрен блок цилиндров, полученный литьем под давлением

ние на такие показатели механических свойств материала, как относительное удлинение при разрыве, временное сопротивление и модуль упругости, а также влияют на форму кривой усталости Велера. Так как скорость затвердевания варьируется на отдельных локальных участках вследствие различной толщины отливки или эффекта закалки, создаваемого вложенными гибридными компонентами, то пе-

речисленные выше механические свойства также изменяются в некоторых пределах по сечению отливки.

Таким образом, дальнейшее охлаждение отливки после затвердевания металла также варьируется на отдельных ее участках. При этом формируются различные фазы на разных участках или образуется одна фаза, но разными способами. Это положение применимо также и к про-



**Рисунок 3.** Изменения размеров автомобильной рамы лестничного типа в литом состоянии. На иллюстрации представлены изменения размеров в направлении, перпендикулярном плоскости разреза (вдоль оси Z). Расчеты по модели показывают различия размеров на величину до 1 мм между углами рамы лестничного типа и посадочными опорными поверхностями подшипников

цессам термической обработки, при которой, например, различные скорости охлаждения при закалке могут привести к неравномерному распределению механических свойств.

Каждый способ литья имеет индивидуальный характер распределения механических свойств. При литье под давлением быстрое заполнение полостей литейной формы — в большинстве случаев это происходит менее чем за 100 мс — и высокий уровень давления в жидком металле, а также достигаемый в результате хороший контакт расплавленного металла с холодной матрицей приводят к образованию очень плотной, мелкозернистой и свободной от сегрегации литейной корки. Это часто обуславливает получение более высокого предела длительной прочности под действием знакопеременных нагрузок, чем можно было ожидать от использованного для отливки материала.

Отливки характеризуются также остаточными напряжениями, которые особенно сильно проявляются в гибридных отливках вследствие различной жесткости использованных материалов. Во

всех отливках из алюминия и магния, в которых вставки изготовлены из чугуна, стали или магнитных сплавов, базовый материал приобретает специфические свойства, охватывая вставки в результате усадки. Этот процесс неизбежно приводит к тому, что в основном материале (например, в алюминии или магнии) возникают растягивающие остаточные напряжения, которые уравновешены остаточными сжимающими напряжениями во вставках. Процесс развития указанных напряжений в гибридных отливках неизбежен; однако этот факт нередко игнорируют при конструировании деталей.

### Моделирование материалов, геометрических параметров и технологии литья

Для компьютерного моделирования процессов литья разработаны многочисленные модели, отражающие разные аспекты и характеристики технологии литья и используемых сплавов.

#### Реология

До тех пор, пока металл не охладится ниже температуры соли-

дуса в процессе заполнения формы, вязкость его почти не изменяется в зависимости от температуры или от содержания легирующих элементов. Поверхностное натяжение может играть важную роль, особенно когда на свободной поверхности расплавленного металла формируется пленка окислов. Соответствующие адекватные модели являются вполне современным инструментом. Течение жидкого металла подчиняется более сложным закономерностям: с началом его затвердевания перед окончанием заполнения формы, и когда в частично затвердевшем расплаве проявляется зависимость вязкости от градиента скорости сдвига и от температуры. Однако, за исключением процессов литья, при которых частично затвердевший расплав металла, содержащий более 35 % твердой фракции, специально подают под давлением в форму, таких условий удастся избежать. Подобные модели также можно считать современными.

#### Затвердевание

Затвердевание расплавленных металлов обычно начинается в нескольких центрах кристаллизации, имеющихся в любом расплаве. Зарождение центров кристаллизации обычно контролируется литейщиком, который при этом влияет на такие показатели качества получаемой отливки, как размер зерен, формирование зон эвтектики или образование фаз.

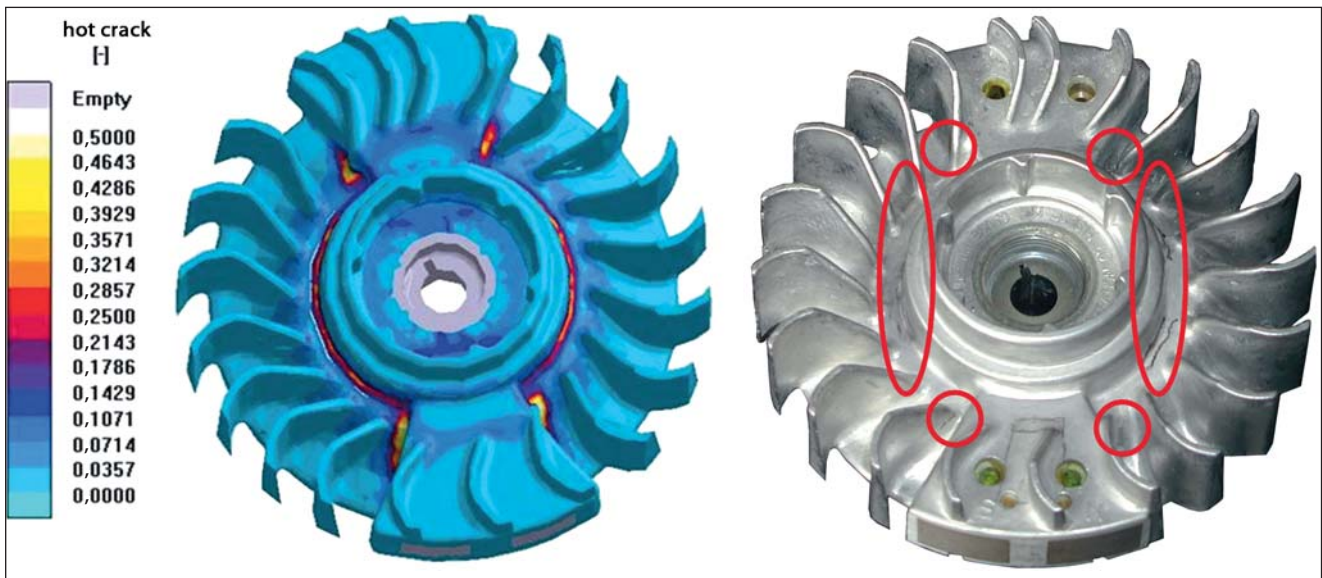
Между началом процесса затвердевания при температуре ликвидуса и окончанием этого процесса при температуре солидуса увеличение доли твердой фазы по мере снижения температуры может быть представлено в виде конкретных моделей затвердевания. При моделировании затвердевания отливки используют как модели зарождения центров кристаллизации, так и различные модели затвер-

девания. Эти модели могут воспроизводить даже неравновесные условия затвердевания, что также важно для процессов получения металлических отливок. Такие модели могут не только отражать процесс литья и формирования отливок в зависимо-

Между этими моделями автоматически устанавливается взаимосвязь (например, в течение нескольких минут устанавливается связь между всеми матрицами для литья под давлением и каналами контроля температуры процесса, параметрами литья с

вайт быстрее, чем остальная часть металла, не вступающая в контакт с чугуном.

В этом процессе при определенных условиях может случиться так, что расплав не заполнит полностью всю форму и затвердеет на некоторых небольших



**Рисунок 4.** В непосредственной близости от магнитных вкладышей крыльчатки вентилятора образовались горячие трещины в процессе затвердевания: почти затвердевший металл хрупкий, а критические скорости усадки превзойдены

сти от температуры, но и учитывать формирование различных фаз в микроструктуре или такие параметры, как расстояние между осями дендритов.

#### **Возникновение остаточных напряжений и искажение формы**

В данной области современными считаются упругопластические модели. Вязкопластические модели обычно используют для моделирования явлений ползучести при высоких температурах или при анализе процессов термообработки.

Моделирование процессов литья в основном складывается из расчета его отдельных компонентов. Следовательно, кроме моделирования материала отливки, необходимы также трехмерные модели (CAD-модели) отливок, системы литников и питателей, литейных форм и матриц для литья под давлением.

использованием системы литников и питателей, а также другими компонентами, характерными для современной технологии).

#### **Алюминиевый блок цилиндров двигателя с гильзами из серого литейного чугуна**

В настоящее время такие блоки цилиндров двигателей являются примером новейшей технологии массового производства. При литье в песчаные формы втулки цилиндров, изготовленные из серого чугуна с пластинчатым графитом LGI (Lamellar Graphite Iron), помещают в форму и предварительно нагревают, а при литье под давлением втулки сначала нагревают, а затем помещают в собранную форму с матрицей. В обоих случаях цилиндры обтекает струя жидкого алюминия, который быстро охлаждается, контактируя с ними, и затверде-

участках, прежде чем завершится заполнение всей формы.

При охлаждении и затвердевании отливки в ней возникают остаточные напряжения вследствие наличия температурных градиентов, различных коэффициентов теплового расширения и разной жесткости алюминия и серого чугуна. Оба эти явления могут приобрести критический характер, однако они поддаются прогнозированию с помощью моделей процесса литья.

#### **Характер течения алюминия между цилиндрами-вкладышами из серого литейного чугуна**

В процессе заполнения полости в алюминиевом блоке цилиндров с вкладышами из серого чугуна с пластинчатым графитом решающее значение приобретает зона между вкладышами. Например, расстояние между вкладышами можно уменьшить с целью даль-

нейшего облегчения конструкции. В этом случае также могут быть уменьшены размеры многих других деталей двигателя (например, таких важных, как коленчатый и распределительные валы, впускной воздухозаборный патрубок и выпускной коллектор). Однако при сокращении расстояния между вкладышами повышается риск незаполнения алюминием этих уменьшенных зазоров между ними. Этот риск можно оценить с помощью моделей процесса литья, выполнив расчеты для различной величины зазоров (рис. 1).

Такая методика позволяет конструктору выявить оптимальные технологические параметры и определить риски еще на стадии конструирования и предпринять меры по их предотвращению. Позднее, после начала крупносерийного производства, моделирование процесса литья помогает также установить оптимальную температуру предварительного нагрева вкладышей. С одной стороны, подобный подход обеспечивает заполнение алюминием зазоров между вкладышами, а с другой — продолжительность рабочего цикла или расход энергии на предварительный нагрев сводятся к минимуму.

**Остаточные напряжения, возникающие в зонах между цилиндрами-вкладышами после отливки блока цилиндров**

В процессе охлаждения и затвердевания алюминий дает усадку и сжимает сравнительно жесткие и более холодные вкладыши из серого чугуна с пластинчатым графитом. При этом в алюминии возникают растягивающие напряжения, а вкладыши находятся под воздействием сжимающих напряжений. Различный уровень напряжений развивается в зависимости от расстояния между вкладышами (рис. 2). Часто растягивающие напряжения в алюминии между цилиндрами-вкладышами достигают высокого уровня. Однако этот уровень далек от крити-

ческого, так как любые трещины, образовавшиеся в этой зоне, окажут малое влияние на общую жесткость блока цилиндров при рабочей температуре.

Предварительный нагрев цилиндров-вкладышей также влияет на остаточные напряжения. Важно, что растягивающие остаточные напряжения в зазорах между вкладышами уменьшаются при повышении температуры предварительного нагрева.

**Алюминиевая автомобильная рама лестничного типа с корпусами подшипников из серого литейного чугуна**

Обычно автомобильные рамы лестничного типа производят из алюминия с помощью литья под давлением в формы, в которых предварительно установлены корпусы подшипников, изготовленные из серого чугуна с пластинчатым графитом или из стали. Когда в отливке сочетаются различные материалы, то наблюдаются явления, принципиально аналогичные рассмотренному выше примеру для алюминиевого блока цилиндров с вкладышами из серого чугуна с пластинчатым графитом. Искажение отливок приобретает еще более ярко выраженную форму вследствие неполного погружения в расплав алюминия холодных корпусов подшипников. Температурный градиент возникает при охлаждении во всей отливке, особенно в направлении, перпендикулярном плоскости разъема, и обычно приводит к искажению формы. В результате корпусы подшипников выдавливаются из блока цилиндров в направлении поддона картера (рис. 3).

Моделирование процесса литья подтверждает, что искажение формы неизбежно и его невозможно предотвратить технологическими методами. Однако моделирование позволяет количественно оценить такое искажение, поэтому припуски на меха-

ническую обработку и размеры отливки могут быть рассчитаны еще на стадии конструирования.

Уменьшение массы корпуса подшипника желательно с точки зрения облегчения конструкции, что приводит к уменьшению искажения формы.

**Магниевый литой маховик со встроенными магнитами**

Для небольших двигателей, используемых в таких подвижных механизмах, как, например, бензопила, уменьшение массы всегда играет важнейшую роль. Одним из примеров отливки, для которой проводят оптимизацию собственной массы, и облегчение которой вносит вклад в оптимизацию массы всего механизма благодаря одновременному выполнению нескольких функций, является маховик из магния. Он выполняет функцию крыльчатки и является носителем нескольких магнитов. Такие отливки склонны к горячему растрескиванию вблизи внедренных в базовый металл деталей; трещины возникают в отливке во время затвердевания проблемных зон. Если скорость затвердевания и, соответственно, скорость усадки в этих зонах превосходят критическую величину, то трещины образуются здесь в связи с недостаточно быстрым попаданием жидкого металла в проблемную зону (рис. 4).

**Выводы и перспективы**

Масса литых деталей может быть уменьшена, например, конструированием с учетом используемого материала или подбором материала, подходящего для разработанной конструкции. Однако наиболее благоприятные возможности открываются, если ориентироваться на сочетание различных материалов в одной отливке путем внедрения в базовый металл компонентов, которые обладают необходимыми механическими, трибологическими или даже магнитными

свойствами. С другой стороны, эти большие потенциальные возможности уравниваются повышенными сложностью и риском нарушения технологического процесса, а также более высоким уровнем общих расходов.

Одним из важнейших направлений, позволяющих минимизировать инженерные риски, связанные с внедрением новой концепции литья, является надежное, быстродействующее и малозатратное моделирование. Модели процесса литья постоянно и в широких масштабах совершенствуются в университетах (на протяжении более 35 лет) и на промышленных предприятиях (более 25 лет). Разрабатываются новые модели, по рекомендациям разработчиков моделей проводятся новые базовые исследования, и ежегодно производителе-

ли персональных компьютеров предлагают более мощные процессоры и новую архитектуру компьютерных сетей. При совместном внедрении всех этих разработок в производственную практику, они приведут к повышению прогнозирующих возможностей моделирующих программ, но как долго еще будет продолжаться этот процесс совершенствования, — неизвестно.

В настоящее время модели процесса литья применяют преимущественно для оптимизации технологии. Однако для достижения максимального эффекта описанная в данной статье идентификация локальных свойств отливки может быть успешно применена на стадии получения пробных или опытных отливок (в частности, на стадии конструкторской разработки или компьютерного конструирования). В этой обла-

сти достигнутый уровень моделирования технологических процессов значительно опережает уровень внедрения моделирования в производственный процесс. Потенциальные возможности совершенствования компьютеризированной разработки литых конструкций и деталей путем внедрения моделей процесса довольно высоки, так как основной проблемой таких конструкций является распределение механических свойств и остаточных напряжений в отливках. Тем не менее, как показывают приведенные в статье примеры, эти факторы поддаются компьютерному расчету и могут быть учтены при компьютеризованном расчете литых конструкций.

[www.magmasoft.com](http://www.magmasoft.com)



**RELUBE**  
МОДЕЛЬ PDC-01



**3**  
ГОДА  
ГАРАНТИИ

### Процесс подготовки эмульсий в литье алюминия

Простая и экологически безопасная технология для повторного процесса использованных эмульсий с значительным уменьшением объема опасных отходов. Существенная экономия за счёт повторного использования присутствующих компонентов и воды.

Реклама

[www.acesana.com](http://www.acesana.com)



Переносные и стационарные неизнашиваемые пирометры CellaCast для бесконтактного измерения температуры жидких металлов



-40 – 3500 °C

[www.keller-msr.de](http://www.keller-msr.de) · [info@keller-msr.de](mailto:info@keller-msr.de)

Реклама