



## ➤ РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЛИТЫХ ЗАГотовОК В СКМ ЛП "ПОЛИГОНСОФТ"

Создавая и внедряя в производство технологический процесс получения отливки, технологи редко уделяют внимание вопросам, связанным с ее напряженно-деформированным состоянием (НДС). При этом возникновение напряжений и деформаций во время затвердевания расплава в литейной форме неизбежно, а их влияние на качество отливки всегда негативно. Следует отметить, что использование систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) достаточно распространено на территории России и многие из них в той или иной степени имеют функционал и математические модели для расчета НДС отливки. Объяснить ситуацию можно тем, что, в отличие от усадочных раковин и пористости, которые можно увидеть, исследовать, а затем смоделировать и найти способ устранения, напряжения плохо поддаются изучению в промышленных условиях. Далеко не на каждом предприятии есть оборудование для измерения их уровня и практически невозможно зафиксировать момент, ког-

да они достигают предельных значений. И когда проблема неожиданно выходит на поверхность в виде холодных или горячих трещин, оказывается, что при разработке технологии была проделана только часть работы и важные детали были упущены. Еще одна причина, по которой расчету напряжений не уделяется должное внимание, — отсутствие на предприятиях и в составе СКМ ЛП экспериментальной базы механических свойств. Поведение материала отливки в процессе затвердевания слишком сложно, и определение более-менее адекватных механических свойств (особенно при высоких температурах) — задача непростая. Поэтому применяемые в СКМ ЛП модели сред часто упрощены, чтобы учесть и эту проблему тоже. СКМ ЛП "ПолигонСофт" компании ЗАО "СиСофт Девелопмент" предоставляет технологам-литейщикам простой и в то же время мощный модуль "Гук-3D" для расчета напряженно-деформированного состояния отливки на всех этапах литейного производства. В статье описываются основные принципы расчета

напряжений в отливках, дано краткое описание модели расчета напряжений, используемой в СКМ ЛП "ПолигонСофт", приведены результаты расчетов НДС.

Геометрия отливки представляет собой сочетание более тонких и более массивных элементов, которые затвердевают с разной скоростью. До тех пор, пока не сформирован прочный и развитый дендритный каркас, заливаемый сплав ведет себя подвижно и говорить о возникновении напряжений и накоплении деформаций не имеет смысла. Но по мере формирования кристаллической структуры материал отливки приобретает свойства, которые в большинстве случаев хорошо описываются уравнениями термоупругопластической среды, для которых достаточно легко получить необходимые экспериментальные данные, проведя испытания образцов материала на растяжение при разных температурах по стандартным методикам — например, по ГОСТ 9651-84 (рис. 1).

Проведя испытания и обработав полученные кривые типа "нагрузка-растя-



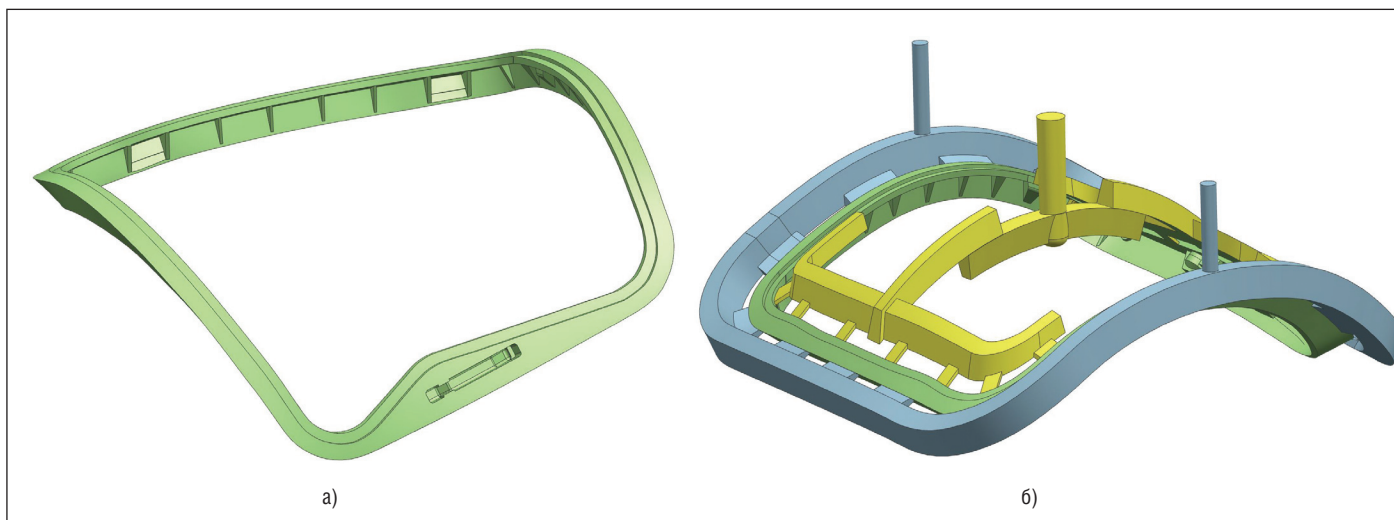


Рис. 2. Отливка "Рама": а) модель отливки; б) модель литейного блока аналогичной отливки. Зеленым цветом отмечено тело отливки, желтым – ЛПС, синим – прибыль

ных для отливки "Рама". Работа выполнялась в рамках верификации нового решателя и нового функционала модуля "Гук-3D", вошедшего в состав версии ПолигонСофт 15.0 (текущая версия на момент написания статьи), для ООО ПКФ "Технология".

Отливка "Рама" изготавливается на предприятии, входящем в АО "Вертолеты России", из серийного магниевого сплава МЛ5пч методом литья в песчаную форму. Отливка представляет собой протяженную тонкостенную конструкцию с толщиной стенок 8-10 мм и многочисленными ребрами жесткости (рис. 2а). Готовые отливки подвергают визуальному осмотру и рентгенографическому контролю. Для изготовления этой отливки был разработан технологический процесс, включающий конструк-

цию ЛПС (рис. 2б) и комплект оснастки. Тело отливки питается напрямую с внутренней стороны через два коллектора с питателями. По мере заполнения отливки начинает заполняться кольцевая боковая прибыль, которая должна компенсировать усадку через шелевые питатели. Работы проводились с использованием моделирования в СКМ ЛП "ПолигонСофт" заполнения формы расплавом, затвердевания и формирования усадочной пористости.

Изготовление первой опытной партии рам (всего несколько штук) и их исследование методом рентгеноструктурного анализа подтвердило правильность выбранной конструкции ЛПС с точки зрения пористости – ее не обнаружили, но, как сказано в начале этой статьи, при проектировании не было уделено вни-

мание анализу остаточных напряжений и последствиям, которые они вызывают. Такие последствия были выявлены в виде трещин около питателей, через которые расплав поступал в отливку (рис. 3). Для устранения дефектов понадобилось провести серию дополнительных расчетов, в результате чего изменились размеры, количество и положение этих питателей на коллекторах, изменились и сами коллекторы, через которые подается расплав. На примере описанной ситуации покажем, как можно прогнозировать уровень остаточных напряжений в отливке и находить области, где их уровень может привести к разрушению. Для полного расчета НДС, который включает в себя расчет на стадии затвердевания, расчет после удаления песчаной формы и расчеты после удаления

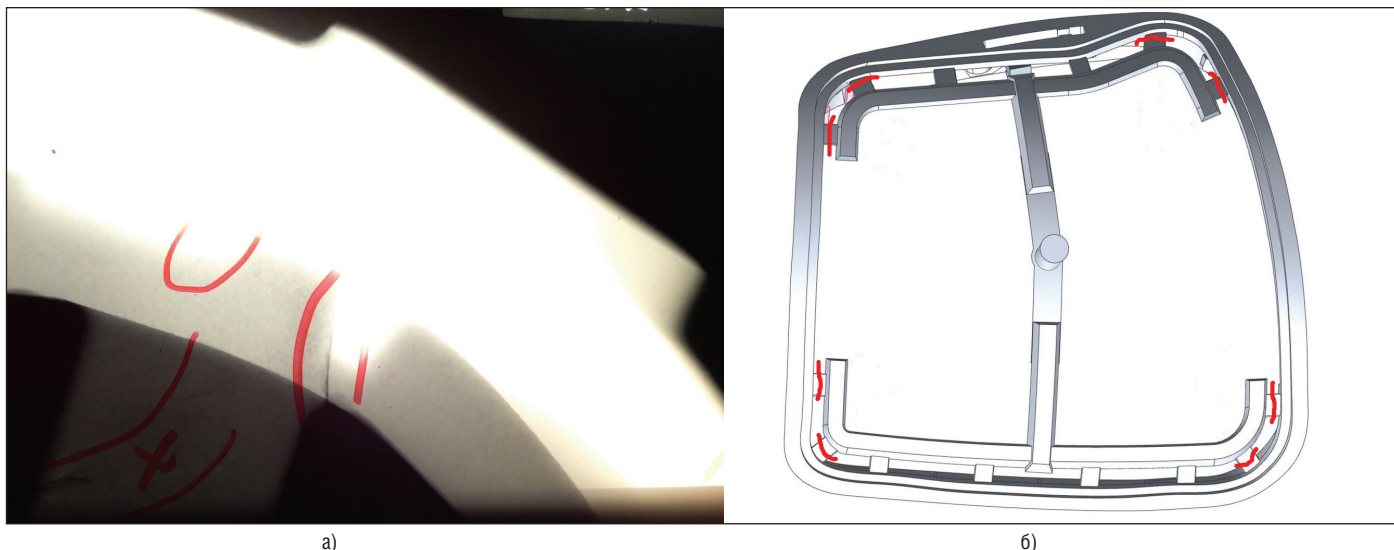


Рис. 3. Трещины в отливке "Рама": а) вид одной из трещин на рентгенограмме (помечена красным); б) схема расположения трещин



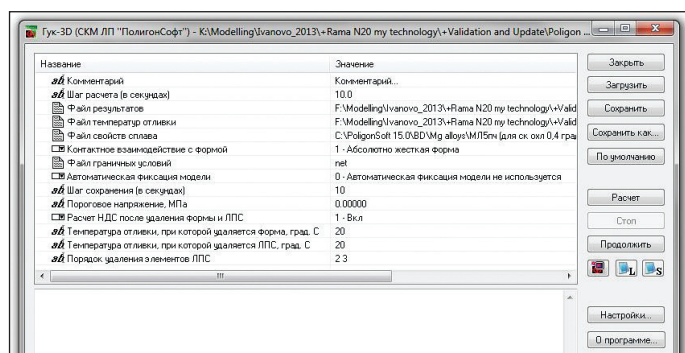


Рис. 4. Главное окно модуля "Гук-3D" с таблицей исходных данных

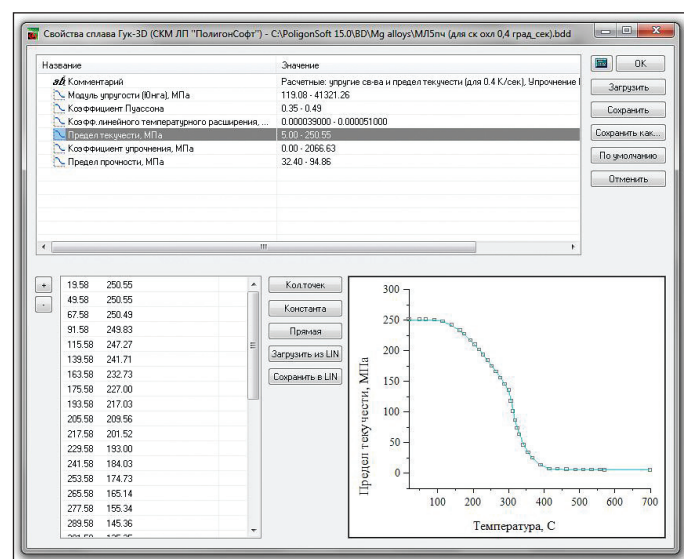


Рис. 5. Редактор механических свойств модуля "Гук-3D"

каждого элемента ЛПС, нужно иметь сведения о времени и последовательности выполнения этих операций. В рассматриваемом случае отливка пробыла в форме длительное время и, по имеющимся данным, на момент выбивки была "холодной". Затем от нее отрезали прибыль и отправили на исследование. Для корректного моделирования НДС при извлечении из формы важна прежде всего динамика изменения температурного поля отливки до данного момента. Поэтому наиболее близкий к реальной ситуации расчет можно выполнить, если файл температурных полей, рассчитанный предварительно в модуле "Фурье-3D", содержит полную историю изменения температуры отливки от начала затвердевания до момента извлечения из формы. Однако чаще всего извлечение литейного блока из формы происходит при температурах, лежащих значительно ниже температуры "солидус", а иногда при температуре окружающей среды (как в рассматриваемом случае). Учитывая низкую теплопроводность песчаной формы, можно предположить, что расчет остывания до комнатной температуры займет много времени (например, пару дней), а файлы температурных полей отливки и формы будут иметь достаточно большие размеры — до десятков гигабайт. Чтобы избежать такой ситуации, в модуле "Гук-3D" предусмотрен параметр, который задает среднюю температуру литейного блока в момент извлечения его из формы, в нашем случае это будет 20°C. Использование этого параметра позволяет делать расчет затвердевания в модуле "Фурье-3D" как обычно, до температуры "солидус". При рас-

чете в модуле "Гук-3D" сначала рассчитывается НДС отливки в литейной форме по температурным полям из файла (до полного затвердевания отливки), а затем делается расчет НДС отливки без формы при температуре, заданной указанным параметром. Задача нахождения времени, необходимого для достижения этой средней температуры, при этом не рассматривается, а температурные поля отливки между двумя состояниями при необходимости вычисляются с использованием линейной интерполяции.

Другой аналогичный параметр модуля "Гук-3D" задает температуру начала удаления элементов ЛПС (в нашем примере это тоже 20°C). И еще одним отдельным параметром задается порядок отделения элементов ЛПС от отливки. Номера отделяемых объемов задаются через пробел в нужном порядке. Это означает, что при построении 3D-модели литейного блока элементы ЛПС, удаление которых планируется моделировать, следует заранее построить отдельными объемами. Главное окно модуля с заданными параметрами показано на рис. 4.

В четвертой строке таблицы исходных данных задан путь к файлу температурных полей, созданному в процессе решения задачи затвердевания в модуле "Фурье-3D", расчет полей произведен только до температуры "солидус". В пятой строке таблицы задан путь к файлу механических свойств сплава AlMgSi. Свойства для расчета рассчитаны по химическому составу сплава с помощью термодинамической базы данных компании CompuTherm LLC. Таким образом, можно получить все необходимые для расчета механические свойства, кро-

ме предела прочности. Не имея зависимости предела прочности от температуры, мы не можем использовать имеющийся в модуле критерий образования трещин, поэтому анализ вероятности разрушения выполнялся на основе анализа полей напряжений и деформаций и информации о местах фактического расположения трещин. Редактор механических свойств показан на рис. 5. Последние три параметра в таблице задают соответственно температуру извлечения из формы, температуру отделения ЛПС и порядок отделения ее элементов (сначала прибыль, затем коллекторы).

На рис. 6 представлено поле интенсивности напряжений (по Мизесу) после затвердевания, после извлечения из формы и после удаления ЛПС. Повышение общего уровня напряжений в литейном блоке после извлечения из формы связано прежде всего с тем, что температура блока при выбивке значительно ниже, чем на момент полного затвердевания, и механические свойства при температуре окружающей среды значительно выше. Поэтому сравнивать эти два состояния не совсем корректно. Однако на этих стадиях очевидно, что проблемными местами будут питатели коллекторов: в этих областях уровень напряжений максимальный. Сравнение уровня напряжений на рис. 6б и 6в (после выбивки и после удаления ЛПС соответственно) наглядно демонстрирует, как может происходить разгрузка отливки при ее освобождении от литниковой системы. При удалении коллекторов и питающей прибыли уровень напряжений снизился до 5-6 раз и выровнялся по объему отливки. По-прежнему относительно высокие оста-

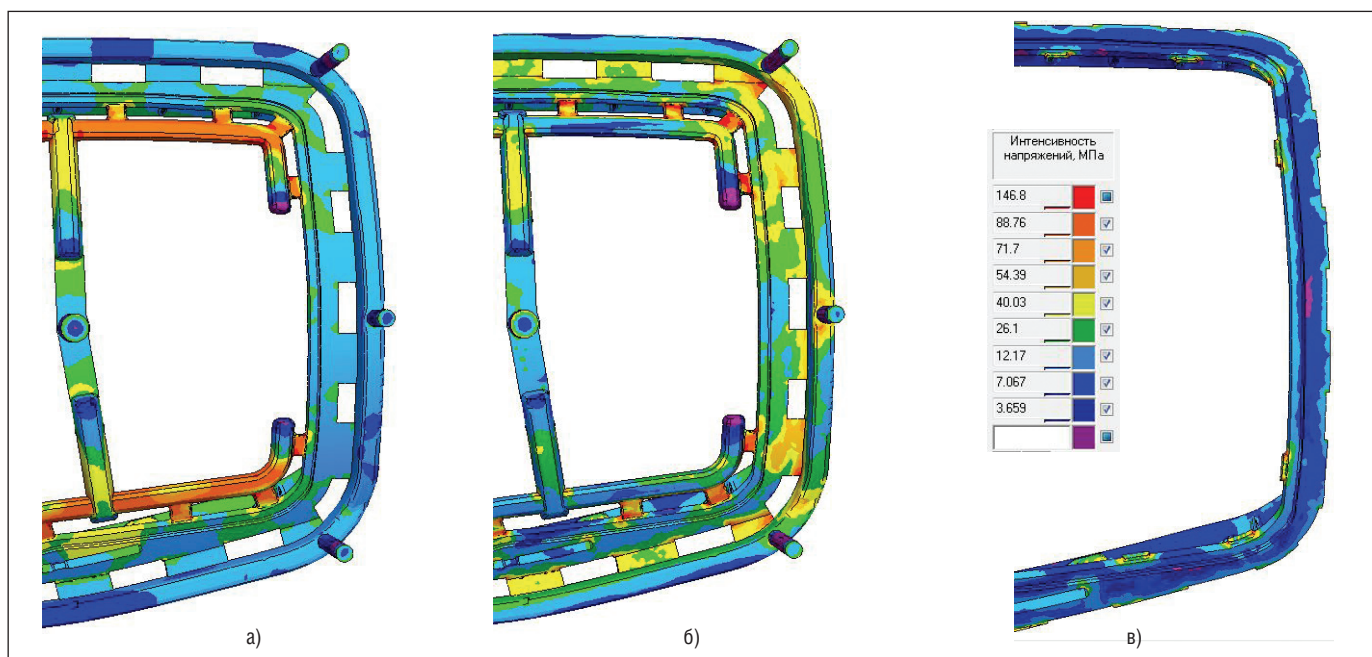


Рис. 6. Интенсивность напряжений в литейном блоке: а) в конце полного затвердевания; б) после извлечения блока из формы; в) после удаления ЛПС

точные напряжения наблюдаются в зонах остатков питателей.

Рассмотрим подробнее, что происходит в зонах возникновения трещин, отмеченных на рис. 3б. Поскольку расчеты НДС ведутся исходя из принципов сплошной среды, при превышении предела прочности конечно-элементная сетка не "рвется" и трещины в нашем обычном понимании не образуются. Поэтому потенциально опасные места определяются анализом уровня напряжений, наличием повышенных пластических деформаций и искажениями расчетной сетки. Особенно эффективны эти способы при наличии экспериментального материала (как в рассматриваемом случае).

На рис. 7 показан фрагмент рамы при 10-кратном увеличении смещения узлов

сетки. Это помогает визуально выявить области повышенных искажений. На рис. 7а видно, что два крайних справа питателя довольно сильно растянуты по сравнению с питателями, расположенными на горизонтальных участках. Анализ уровня пластических деформаций показывает, что в этих питателях пластические деформации примерно в два раза выше, чем в остальных.

Проведенный подобным образом анализ можно считать "калибровкой" модели по экспериментальным данным. При отсутствии таких данных делать выводы об опасном уровне напряжений или деформаций было бы гораздо сложнее, так как сами по себе значения полей, выше они или ниже, не несут никакой информации о возможности разрушения отливки. Более определенный прогноз может

дать критерий образования трещин, который реализован в модуле "Гук-3D", но для его функционирования необходима температурная зависимость предела прочности, которая в данном случае неизвестна. Для устранения дефекта необходимо подобрать такую геометрию питателей и коллектора, чтобы снизить уровень пластических деформаций и остаточных напряжений, например, до уровня, фиксируемого в питателях, в которых не обнаружены трещины. Произведенный итерационный процесс позволяет получить отливку без дефектов.

**Алексей Монастырский,**  
к.т.н.

**CSoft**

Тел.: (495) 913-2222

E-mail: [avmon@csoft.ru](mailto:avmon@csoft.ru)

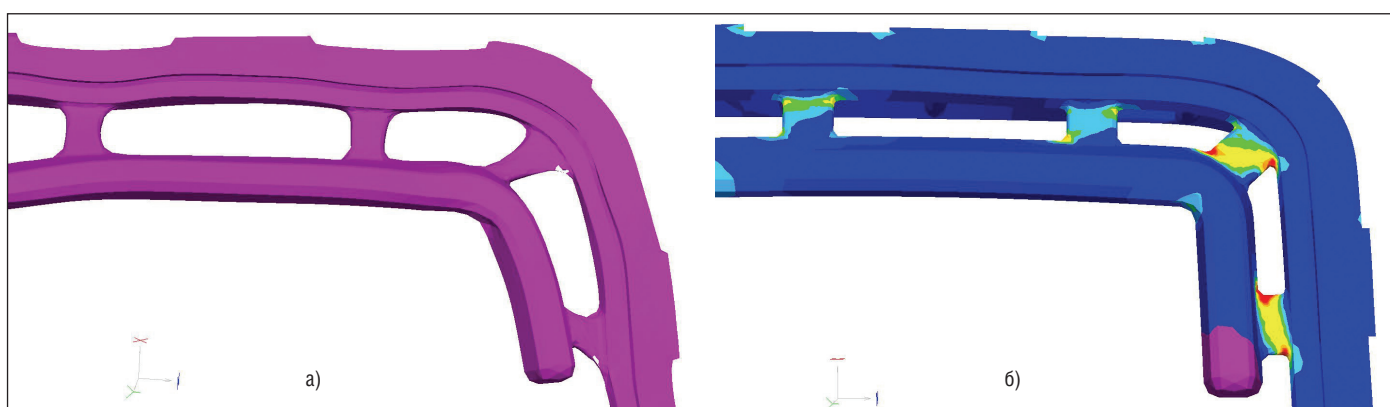


Рис. 7. Деформация питателей в зоне образования трещин: а) 10-кратное масштабирование деформации литейного блока; б) интенсивность пластических деформаций