

УДК 621.744.072

Monastyrskiy A.V.,
Smykov A.F.

Особенности моделирования возникновения трещин в отливках на примере СКМ ЛП «ПолигонСофт»

Peculiarities of Simulating Crack Initiation in Castings Using the «PolygonSoft» Casting Process Computer Simulation System as an Example

А.В. Монастырский (CSoft, тел.: (495) 913-2222, E-mail: avmon@csoft.ru), **А.Ф. Смыков** («МАТИ»-РГТУ им. К.Э. Циолковского)

Особенности моделирования напряжений и трещин

Принято различать холодные и горячие трещины, в зависимости от температурного диапазона, в котором они образуются. Многие авторы [1...3] подробно изучали и описывали механизмы образования *горячих трещин*, показывая, что их причина – комплекс факторов: структура, интервал кристаллизации, геометрия, теплофизические свойства, затрудненная усадка. *Холодные трещины* (разрушение отливки при температурах ниже линии солидус) обычно рассматривают отдельно, хотя при сравнительном анализе причин их возникновения нетрудно убедиться, что набор примерно тот же, что и для горячих трещин.

При использовании систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) в качестве средства предварительного анализа производственного процесса важно понимать, с каких позиций они (системы) прогнозируют те или иные показатели качества продукции, в том числе и разрушение. Для моделирования процессов, протекающих в отливке, СКМ ЛП используют математические модели (ММ), включающие, прежде всего, дифференциальные уравнения в частных производных (уравнения математической физики), которые описывают поля расчетных величин отливки и формы: скорости, температуры, фазовый состав, деформации и др. Рассматривая отливку и форму с позиций механики сплошных сред, СКМ ЛП пренебрегают их молекулярным строением и предполагают, что тела заполняют пространство непрерывно. Такие характеристики тел, как плотность, напряжения, скорости и т.д., также считаются непрерывными. Исходя из этого, становится

понятным, почему структурные факторы разрушения не могут быть учтены при компьютерном анализе литейного процесса – понятия «дендрит» и «зерно» в применяемых ММ не рассматриваются.

Коротко рассмотрим остальные факторы, общие для трещин обоих типов.

Геометрический фактор. Когда геометрия отливки содержит сечения разной площади, трещины могут возникать при значительной разнице скорости охлаждения в разных частях отливки. Градиент скорости охлаждения возрастает при переходе от массивных к тонким частям отливки [1]. *Для сплавов с протяженным интервалом кристаллизации размерный фактор становится существенным.*

Теплофизические свойства. Низкие теплофизические характеристики сплава способствуют увеличению температурного градиента по сечению отливки.

Затрудненная усадка. Усадка отливки в присутствии жестких и прочных стержней и формы увеличивает уровень напряжений и способствует образованию трещин.

Все эти факторы могут быть учтены в СКМ ЛП, так как не противоречат принципам работы таких систем. Этого достаточно, чтобы получить корректное поле напряжений и деформаций в отливке и форме, однако не дает возможности определить, будет ли происходить их разрушение. Для прогноза, собственно, трещин требуется использовать критерий, который будет анализировать рассчитанные напряжения или деформации и предоставлять пользователю информацию о возможном разрушении. В качестве критериев образования трещин могут быть использованы пять теорий:

- наибольших нормальных напряжений (теория Галилея);

- наибольших растягивающих деформаций (теория Мариотта);
- наибольших касательных напряжений (теория Кулона);
- удельной потенциальной энергии формоизменения (теория Мизеса-Генки);
- предельных напряженных состояний (теория Мора).

Оптимизация технологии получения отливки колесо рабочее ТНД

При освоении выпуска газотурбинного двигателя мощностью 1 МВт на ФГУП ММП «Салют» была разработана технология получения отливки *колесо рабочее ТНД* из сплава ЧС88-ВИ методом ЛВМ. Разработанная технология включала изготовление керамической формы толщиной 12 мм и ее заливку в вакуумной плавильной установке с донным сливом (ВПДС-1). При производстве первых отливок наблюдали устойчивый дефект – трещины *лопато* в области перехода к бандажному кольцу, которое фактически оказывалось полностью оторванным от колеса (**рис. 1, вкладка**).

Для принятия решения об изменении техпроцесса, проведено моделирование с расчетом напряженно-деформированного состояния (НДС) в специализированном модуле СКМ ЛП «ПолигонСофт» [4, 5]. Модуль позволяет рассчитать напряжения, деформации и коробление в отливке на основе предварительно рассчитанных в модуле «Фурье-3D» температурных полей и заданных механических свойств. Специализированный критерий разрушения (на основе теории Мизеса-Генки) прогнозирует возможное возникновение трещин. Механические свойства сплава ЧС88-ВИ получены в заводской лаборатории в результате комплекса испытаний по стандартным методикам.

Расчет НДС подтвердил образование трещин в районе перехода от *лопато* к бандажному кольцу (**рис. 2, а**). Результаты расчета показали, что трещины начинают образовываться на 200-й с остывания. В это время отмечаются первые «треснувшие» узлы (не удовлетворяющие критерию разрушения) на выходных кромках *лопато* в районе перехода к бандажному кольцу (на **рис. 2, а** отмечены точками). Анализ температурных полей и доли жидкой фазы в период разрушения отливки позволяет квалифицировать трещины как холодные. К моменту появления первого «треснувшего» узла кристаллизация соответствующих частей отливки уже закончилась (**рис. 2, б**, затвердевшие участки показаны как пустые), разрушение происходит в интервале 1030...700°C.

Дополнительный анализ тепловых полей выявил высокие скорости охлаждения – до 200°C/мин, в районе выходных кромок *лопато*, то есть там, где возникали трещи-

ны (**рис. 3**). Это позволило предположить, что слишком быстрое охлаждение приводит к высоким температурным напряжениям, превышающим предел прочности для текущей температуры. Поскольку плавильная установка ВПДС-1 не имеет средств для осуществления контролируемого охлаждения, было принято решение о разработке новой технологии для заливки литейных блоков в плавильной установке УВП5.

На ФГУП «ММП «Салют» установку УВП5 используют для производства крупногабаритных отливок из жаропрочных Ni-сплавов методом ЛВМ с опорным наполнителем, который предотвращает разрушение формы расплавом при заливке и кристаллизации. Дополнительно, он играет роль теплоизолятора (часто нежелательную), поэтому отливки остывают равномернее, чем при базовых технологиях литья. По этой причине конструкция литейного блока была существенно изменена.

Расчет новой технологии в СКМ ЛП «ПолигонСофт» с анализом тепловых полей показал значительное снижение скоростей охлаждения. Расчет НДС новой конструкции литейного блока с учетом условий остывания в опоке с опорным наполнителем показал более низкий уровень напряжений в отливке (**рис. 4**) и отсутствие разрушений.

Заливка опытной партии отливок доказала правильность выбранного решения, новая технология освоена в серийном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородникова О.М., Пигина Е.В., Мартыненко С.В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях // Литейное производство. – 2007. – №2. – С. 27–30.
2. Солнцев Ю.П., Викулин А.В. Прочность и разрушение холодостойких сталей. – М.: Металлургия, 1995. – 256 с.

3. Ряховский А.П. Исследование и разработка высокопрочного технологичного литейного алюминиевого сплава для кокильного литья // Дисс. канд. техн. наук. – М., 1984.

4. Монастырский В.П., Александрович А.И., Монастырский А.В., Соловьев М.Б., Тихомиров М.Д. Моделирование напряженно-деформированного состояния отливки при кристаллизации // Литейное производство. – 2007. – №8. – С. 45–47.

5. Монастырский А.В., Смыков А.Ф., Панкратов В.А., Соловьев М.Б. Прогноз образования горячих трещин и расчет коробления отливок в СКМ ЛП «ПолигонСофт» // Литейное производство. – 2009. – №5. – С. 46–49.

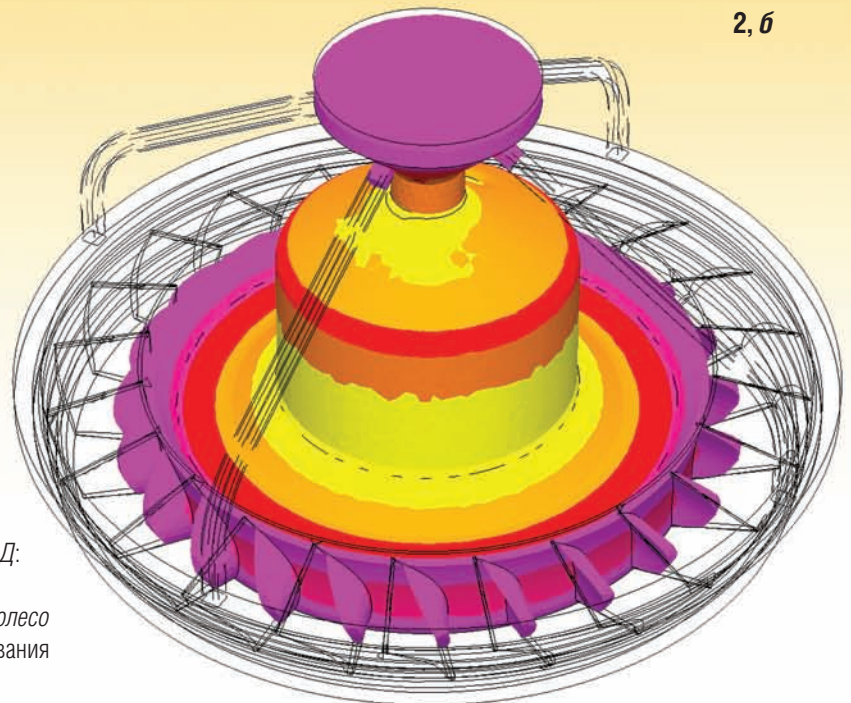
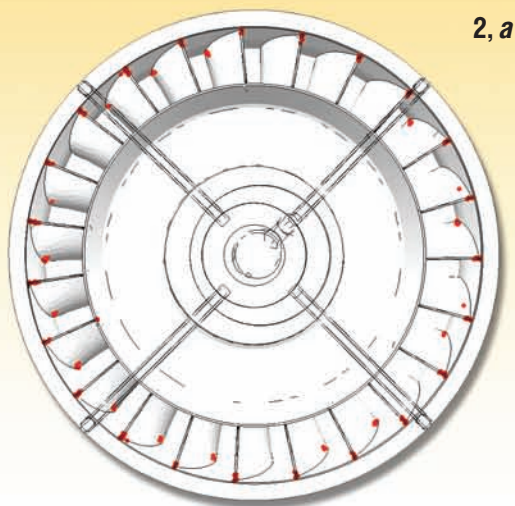


Рис. 1. Трещины в отливке колесо рабочее ТНД:

а – общий вид, **б** – фрагмент

Рис. 2. Результаты расчета НДС отливки колесо рабочее ТНД, $\tau = 200$ с: **а** – прогноз образования трещин, **б** – доля жидкой фазы

Рис. 3. Средняя скорость охлаждения отливки

Рис. 4. Поле напряжений в отливке на 800-й с остывания, технология: **а** – традиционная, **б** – новая

