

## Применение «MAGMASoft» для оценки технологии изготовления охлаждаемой газотурбинной лопатки

*Изготовление охлаждаемой газотурбинной лопатки с направленной кристаллизацией способом литья по выплавляемым моделям - это очень сложный и трудоёмкий технологический процесс. Компьютерное моделирование процесса литья в этом случае более чем оправдано со всех точек зрения. Ниже описано применение пакета MAGMASoft с целью эффективного решения этой задачи.*

Сложность процесса изготовления отливок с ориентированной структурой в основном заключается в следующем:

- градиент температур в любом перпендикулярном к оси лопатки сечении должен быть постоянным и на границе раздела «отливка - керамическая форма» должен стремиться к нулю;
- градиент температур в осевом направлении должен увеличиваться в направлении от кристаллизатора к прибыли;
- вектор скорости охлаждения должен быть направлен от кристаллизатора в сторону прибыли; скорость кристаллизации должна быть замедленной в начальный период, а затем увеличиваться, когда будут образованы первые слои кристаллов.

Такую задачу эффективно можно решить только с помощью самых современных средств компьютерного моделирования. Вот почему фирма «Климов» из Санкт-Петербурга ([www.klimov.ru](http://www.klimov.ru)), разработчик авиационных газотурбинных двигателей, предложила специалистам компании «Диал Инжиниринг» проанализировать существующую технологию изготовления одной из существующих охлаждаемых газотурбинных лопаток (рис. 1).

На рис. 2 показана основная часть расчётной модели, которая демонстрирует некоторые особенности технологического процесса.

Технология изготовления охлаждаемой лопатки заключалась в следующем. Нагретая до температуры 1050°C корундовая оболочка, имеющая по наружной поверхности теплоизолирующее покрытие высотой около 25мм от поверхности кристаллизатора, устанавливалась на медный кристаллизатор. Затем кристаллизатор вместе с оболочкой автоматически перемещался в рабочее пространство плавильно-заливочной системы, где создавалась вакуумная среда для последующей заливки оболочки никелевым сплавом.

После заливки оболочки в рабочем пространстве плавильно-заливочной системы устанавливалось атмосферное давление, а затем производилась выдержка отливки до момента её полной кристаллизации.

По результатам расчёта были получены данные, которые отражают степень ориентированности кристаллов в отливке относительно вертикальной оси. Параметры, которые в основном отражают направление роста кристаллов - это градиент температур и скорость охлаждения отливки.

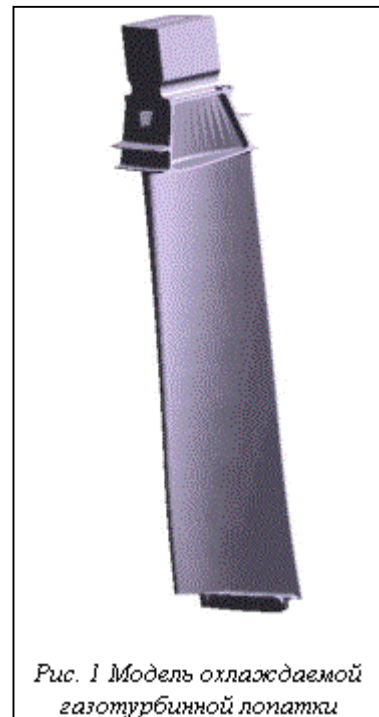


Рис. 1 Модель охлаждаемой газотурбинной лопатки

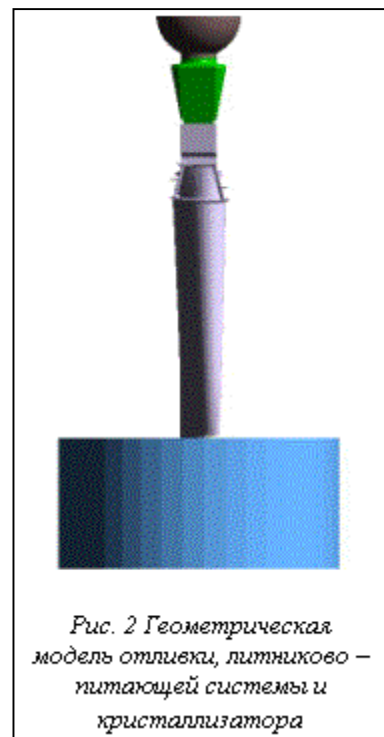
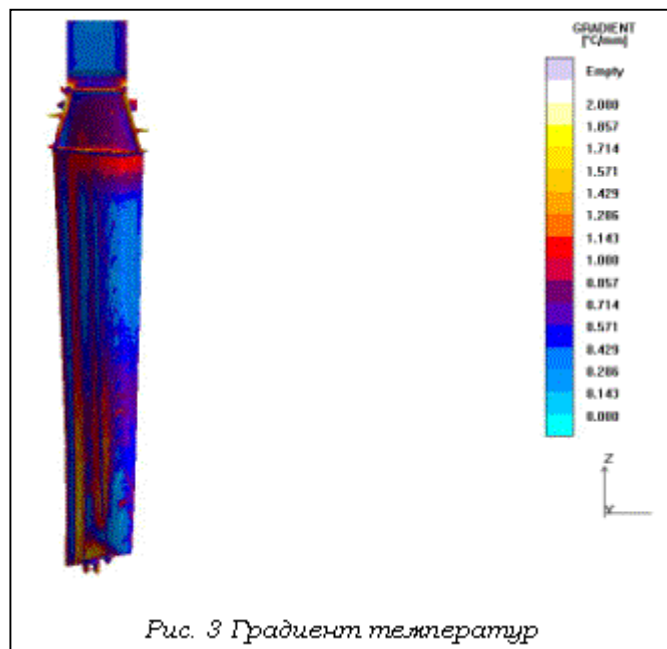


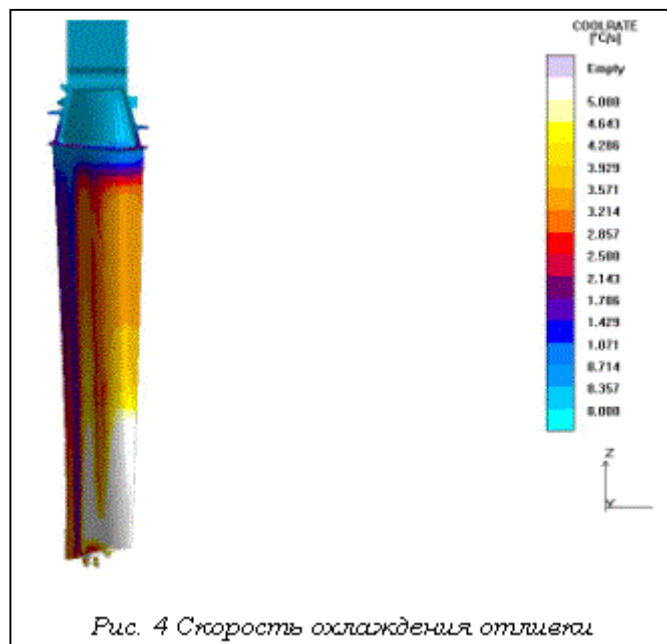
Рис. 2 Геометрическая модель отливки, литниково – питающей системы и кристаллизатора

Для того, чтобы рост кристаллов происходил в вертикальном направлении, т.е. в направлении теплового потока, необходимо было обеспечить постоянство градиента температур в поперечном сечении лопатки при его величине, незначительно отличающейся от нуля. В приведённых расчётах (рис. 3) величина градиента температур в основном составляет  $0,286 \div 0,429^\circ\text{C}/\text{мм}$ . Следует отметить, что существуют также незначительные вертикальные области, окрашенные в жёлто-красные цвета, где градиент температур составляет  $1,1^\circ\text{C}/\text{мм}$ .



Градиент температур отражает только вероятность образования так называемых «неориентированных кристаллов». По результатам расчёта ясно видно, что в области, окрашенной в жёлто-красные цвета, их образование весьма вероятно. Интенсивность охлаждения отливки и равномерность продвижения фронта кристаллизации определяют ориентацию кристаллов. Они позволяют сделать оценочный вывод о направлении развития кристаллов (направлении кристаллизации) в отливке.

В приводимых результатах расчёта (рис. 4) скорости охлаждения на поверхности отливки в любом поперечном сечении имеют переменные значения. Хорошо видно, что область, окрашенная в синий цвет, имеет незначительную по сравнению с другими областями скорость охлаждения, равную  $1,429^\circ\text{C}/\text{с}$ , что в 3÷4 раза ниже скорости охлаждения большей части отливки. Появление области, в которой скорость охлаждения в несколько раз ниже, чем в большей части отливки, создаёт сильно искривлённую поверхность кристаллизации и, как следствие, создаёт все условия для образования «неориентированных кристаллов».



Приведённые результаты расчёта наглядно показывают, что в основном рост кристаллов происходит в вертикальном направлении от кристаллизатора к прибыли. Однако существуют также и области на поверхности отливки, где образование и развитие «неориентированных кристаллов» весьма вероятно.

По результатам моделирования специалистами ЗАО «Диал Инжиниринг» в технологию изготовления отливки были внесены необходимые изменения, позволяющие заметно улучшить качество и сократить процент брака охлаждаемых газотурбинных лопаток.