

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК С РАВНООСНОЙ И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

А.С.Горюхин, В.А.Енгулатова

Увеличение мощности газотурбинного двигателя (ГТД), возможно путем повышения рабочей температуры газа перед турбиной.

Важнейшими деталями ГТД являются турбинные лопатки, которые воспринимают большие физические и тепловые нагрузки. Они являются самыми массовыми и ответственными деталями ГТД.

Повышением эффективности ГТД является использование лопаток с монокристаллической структурой, что позволяет увеличить рабочую температуру лопатки на 50...60 °С.

Особенность получения монокристаллических лопаток при высокоскоростной кристаллизации заключается в том, что форма с расплавом, нагретым до температуры 1550 °С, опускается в жидкий охладитель, нагретый до температуры 700 °С. Теплоотвод, при такой схеме охлаждения, осуществляется вниз, в сторону жидкого расплава что создает условия для получения монокристаллической структуры отливки.

Анализ такой схемы кристаллизации отливки показывает, что форма (стержень и оболочка) находится в сложных температурных условиях и испытывает перепады температуры в различных направлениях. Когда форма опущена в охладитель примерно на половину, то верхняя часть будет нагрета до 1550 °С, а нижняя охладится до 800...900 °С, что составляет перепад температуры в пределах 700...800 °С. Возникает перепад температуры и по ширине сечения пера лопатки, так как толщина пера лопатки неравномерная и колеблется от 0,8 мм по выходной кромке до 4 мм по входной кромке. Величина перепада температуры между входной и выходной кромкой составляет 60...80 °С. На распределение температуры по толщине стержня и оболочки влияет особенность геометрии отливки. В области корыта образуется тепловой узел в результате направления градиента температур в одну точку, соответствующую среднему значению теоретического радиуса лопатки.

На кафедре МитЛП УГАТУ разработана математическая модель деформирования

оболочки и стержня, учитывающая влияние основных технологических факторов:

$$w = \left\{ f_0 + \alpha_{cm} \Delta T_y \xi \frac{b^2}{12\pi^2 h} + \alpha_{cm} \Delta T_x \psi \frac{\varphi_n a b^2}{12\pi^2 (1-\nu) h^2} + \xi \frac{Pe_y I^2}{EI_x} + \psi \frac{(-Pe_x) \varphi_n}{P_w} \right\} * \frac{\chi(z)}{1 - \phi \frac{P}{P_w}} \quad (1)$$

$$w = \left\{ f_0 + \alpha_{\phi} \Delta T_y \xi \frac{b^2}{12\pi^2 h} + \alpha_{\phi} \Delta T_x \psi \frac{\varphi_n a b^2}{12\pi^2 (1-\nu) h^2} \right\} \quad (2)$$

Анализ математической модели коробления стержня в условиях получения лопаток с равноосной структурой (1) показывает, что под влиянием температурного поля прогиб может образовываться, если возникает перепад температуры по толщине и ширине стержня при наличии осевого сжатия в результате разности термических расширений стержня и оболочки.

На изменение пространственных размеров оболочки (2) основное влияние оказывают перепады температуры по ширине и толщине формы.

Математическая модель коробления стержня при получении лопаток с монокристаллической структурой (3) показывает, что стержень будет испытывать меньшие напряжения, так как отсутствуют перепады температуры в стержне по толщине и ширине (температура находящегося в жидком расплаве стержня - выравнивается).

$$w = \left\{ f_0 + \xi \frac{Pe_y I^2}{EI_x} + \psi \frac{(-Pe_x) \varphi_n}{P_w} \right\} * \frac{\chi(z)}{1 - \phi \frac{P}{P_w}} \quad (3)$$

На коробление стержня влияет эксцентricность приложения сжимающих нагрузок, разность термических расширений формы и стержня, а также более длительное воздействие высоких температур, что может привести к размягчению и короблению стержня при небольших усилиях.

Для проверки адекватности математической модели были выполнены замеры, на одном из производственных объединений, геометрических параметров отливок лопаток

с равноосной и монокристаллической структурой.

Наружный профиль пера лопатки измерялся на специальном приборе, по трем сечениям со стороны спинки и корыта. Замеры производились по шаблонам, соответствующим теоретическому профилю. Отклонения от теоретического профиля определялись с помощью щупов, с точностью до 0,01 мм.

Внутренний профиль определяли по толщине стенки пера лопатки в тех же сечениях, что и наружный, при помощи ультразвукового толщиномера.

По полученным значениям замеров была проведена статистическая обработка, с использованием пакета прикладных программ Excel.

Сравнение производственных результатов замера показывает, что отклонение профиля пера лопатки от профиля, заданного конструктором для лопаток с монокристаллической структурой в два раза больше, чем для лопаток с равноосной структурой. Это объясняется тем, что при получении лопаток с равноосной структурой форма испытывает

термоудар (температура формы 900⁰С, а сплава 1550⁰С), в результате которого возникают значительные перепады температур по сечению формы, приводящие к возникновению внутренних напряжений и короблению оболочки.

Сравнение брака по короблению стержня показывает, что в лопатках с монокристаллической структурой брак в три раза больше, чем в лопатках с равноосной структурой. Это объясняется тем, что при получении монокристаллических лопаток, стержень находится дольше в жидком расплаве в три – четыре раза, чем стержень при получении лопаток с равноосной структурой и прогревается до температуры заливаемого сплава (1550⁰С). Температура стержня приближается к температуре его размягчения, и он деформируется на большую величину.

Таким образом, представленная математическая модель коробления стержней и формы позволяет провести качественный анализ получения отливок по разным технологиям и объяснить причину разного коробления стержней и формы.