

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ЛИТЬЯ СЕКЦИЙ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ТВД И ТСД ПЕРСПЕКТИВНОГО ТРДД ИЗ РЕЙНИЙСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА ЖС32-ВИ

Коннов И.А.<sup>1</sup>, Колядов Е.В.<sup>2</sup>, Ефремов Д.В.<sup>1</sup>, Мурzin А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара

<sup>2</sup>АО «ОДК», г. Москва

*Ключевые слова:* Секции сопловых лопаток, Литье по выплавляемым моделям, литниково-питающая система, направленная кристаллизация, монокристаллическая структура

Преобладающей тенденцией развития авиационных газотурбинных двигателей новых поколений является повышение температуры газа перед турбиной и увеличение срока их эксплуатации, что приводит к необходимости проектирования конструкций секций сопловых лопаток турбин высокого и среднего давления (ТВД и ТСД) из более жаростойкого и жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, обеспечивающего работоспособность сопловых лопаток по критерию жаростойкости до 1150°C при кратковременных нагрузках и до 1100°C при длительном температурном нагружении [1].

Современный уровень промышленного технологического развития России позволяет изготавливать серийно секции сопловых лопаток исключительно методом равносной кристаллизации из жаропрочных сплавов, имеющих работоспособность лишь до 1050°C.

Наличие развитых протяженных полок, значительного смещения лопаток относительно оси роста кристалла(-ов), глубоких протяженных карманов и других геометрических форм, характерных для секций сопловых лопаток, и связанное с этим усложнение литниково-питающей системы (ЛПС), необходимость увеличения ее размеров, иногда превышающей размер отливки, наличия большого количества кристалловодов для устранения разнонаправленных зерен и тщательного подбора состава керамической формы, исключающей затрудненную усадку и появления трещин на отливках, – весь этот комплекс технологических проблем и ограничений, необходимых решения при получении отливок сопловых лопаток в блочном исполнении с направленной или монокристаллической структурой требуемой кристаллографической ориентации, вынуждает большинство двигателестроительных предприятий отказываться от секционных конструкций сопловых лопаток в пользу одиночных монокристаллических лопаток, изготавливаемых из более жаростойких и жаропрочных безуглеродистых суперсплавов с tantalом и рением с рабочей температурой порядка 1150...1250 °C.

В то же время применение секций с направленной или монокристаллической структурой взамен одиночных сопловых лопаток позволит ощутимо повысить КПД турбины за счет резкого сокращения количества уступов в проточной части и снижения утечек воздуха по стыкам лопаток и стыкам трактовых полок, а также снизить вес соплового аппарата турбины за счет меньшего количества соединительных элементов. Реализация этих преимуществ позволит улучшить удельные параметры двигателя (повысить топливную экономичность и снизить удельную массу изделия), а также увеличить ресурс двигателя за счет возможности обеспечения более оптимального теплового состояния деталей и снижения вероятности отказа соплового аппарата.

В рамках данной работы изложено решение задачи освоения технологии литья блочных сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ направленной и монокристаллической структуры с целью повышения ресурса горячей части двигателя и обеспечения возможности его дальнейшего форсирования.

Для получения годной отливки необходимо правильно спроектировать ЛПС. Одним из важнейших элементов ЛПС при получении монокристаллических отливок является «стартовое устройство» или «стартовый конус» [2]. Этот элемент позволяет правильно

сформировать и направить развивающийся фронт кристаллизации в область отливки. Высота «стартового конуса» выбирается таким образом, чтобы неустановившаяся стадия процесса кристаллизации с развитием осей второго порядка завершалась внутри стартового основания.

Из опыта известно, что криволинейные поверхности кристалловодов и стартовых конусов способствуют улучшению условий роста кристалла от затравки по двум причинам:

- в начальный момент роста они обеспечивают меньший угол при вершине стартового основания, что облегчает прорастание кристалла в отливку;
- в ходе процесса кристаллизации они изменяют угол падения лучей от нагревателей, способствуя меньшему притоку тепла к развивающемуся фронту кристаллизации.

При литье монокристаллических рабочих лопаток с бандажной полкой, направленной в сторону охлаждающей среды, хорошие результаты показывает стартовое устройство «коробчатого» типа. Такой подход был применен и на секциях сопловых лопаток с учетом доработок в части снижения количества кристалловодов, наклона блочной конструкции сопловых лопаток относительно оси роста и использования криволинейных поверхностей для улучшения роста кристалла.

Использование керамических форм на основе электрокорунда при получении первых отливок секций сопловых лопаток из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ сопровождалось возникновением на их трактовых поверхностях «пригаров» характерных розоватых и зеленоватых цветов, что приводило к необходимости пескоструйной обработки поверхностей отливок и, как следствие, к их наклепу и последующей рекристаллизации наклепанного материала в процессе термической обработки. С целью устранения этого явления для первых слоев керамической формы ввели использование суспензии на основе гидролизированного ЭТС-40 с наполнителем из дистен-силлиманитового концентрата, который позволил почти полностью исключить пригар и уменьшить шероховатость поверхности. Помимо этого, с целью повышения податливости керамической формы и снижению термических напряжений в зонах радиусов перехода пера лопаток в полку было использовано разупрочнение керамической формы, путем введения одного графитового слоя в процессе изготовления керамической формы.

Конструкции литниково-питающих систем (рис. 1) и технологические приемы, описанные выше, были опробованы на установках монокристаллического литья и подтвердили возможность получения направленной и монокристаллической структуры в сопловых лопатках турбины в блочном исполнении (рис. 2).



а

б

*Rис. 1 - Общий вид конструкции ЛПС секций сопловых лопаток ТВД (а) и ТСД (б)*



а

б

Рис. 2 - Характерная макроструктура секции сопловых лопаток ТВД (а) и ТСД (б)

По результатам проведенных работ разработана технология получения отливок сопловых лопаток в блочном исполнении с направленной и монокристаллической структурой из малоуглеродистого сплава ЖС32-ВИ. Эта технология позволит реализовать преимущества блочных сопловых лопаток перед одиночными (повышение КПД ступени, сниженный вес соплового аппарата и, как следствие, улучшение удельных параметров двигателя и повышение ресурса изделия).

По совокупности потенциальных преимуществ разработанная технология относится к критическим и может успешно применяться при разработке новых или модернизации существующих ГТД в масштабах всей отрасли.

#### **Список литературы**

1. Сертификат 1.2.0099-88 на сплав ЖС32-ВИ.
2. Ечин А.Б., Колядов Е.В., Санников А.В. Конструктивные особенности стартовых зон сопловых лопаток в одиночном и блочном исполнении при литье методом направленной кристаллизации // Литейное производство. 2024г. №9 С.26-31

#### **DEVELOPMENT OF CASTING TECHNOLOGY FOR HPT AND IPT NOZZLE BLADE SECTION OF ADVANCED TURBOFAN JET ENGINE FROM RHENIUM-CONTAINING ALLOYS ZHS32-VI**

Konnov I.A.<sup>1</sup>, Kolyadov E.V.<sup>2</sup>, Efremov D.V.<sup>1</sup>, Murzin A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC UEC-Kuznetsov, Samara, Russia, [suprisecool@yandex.ru](mailto:suprisecool@yandex.ru)

<sup>2</sup>JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia [e.kolyadov@uecrus.com](mailto:e.kolyadov@uecrus.com)

*Key words:* Nozzle blade section, investment casting, gating and feeding system, directional crystallization, single crystal structure

Current level of industrial development of Russia allows to manufacture nozzle blade sections exclusively by equiaxial crystallization from alloys having serviceability only up to 1050°C. The article presents a solution to the problem of obtaining casting of nozzle blade sections with directional crystallization and sections with single crystal structure from a more heat-resistant alloy ZHS32-VI in order to increase engine parameters.