

## Повышение эксплуатационных характеристик рабочих лопаток турбин современных промышленных газотурбинных двигателей

Проведён анализ эксплуатационных характеристик отечественных и зарубежных газотурбинных двигателей. Представленные данные показали потребность повышения мощности и соответственно ресурса современных промышленных газотурбинных двигателей, что напрямую связано с применением новых материалов. Предложено усовершенствование жаропрочного коррозионностойкого сплава CM88Y для литья рабочих лопаток газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав, рабочая лопатка

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются в энергетике, авиации и ракетостроении, а также кораблестроении. Мощность их составляет от нескольких сотен киловатт до 50 МВт и выше, коэффициент полезного действия (КПД) достигает 42 %.

Основными мировыми производителями ГТД являются такие компании как General Electric (GE), Pratt & Whitney (P&W); Rolls-Royce (RR), Siemens. Анализируя разработки и продукцию выше представленных предприятий, можно заключить, что Украина, а именно ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» (г. Николаев) является одним из ведущих предприятий в мире по разработке и производству ГТД для судостроения, энергетике и газоперекачивающих агрегатов. Современные промышленные ГТД энергетического направления изготавливаются с полным ресурсом до 100000 и 2500 часов до капитального ремонта. Однако такие зарубежные двигатели как, например, LM 1600, LM 2500, LM 6000 (компания-производитель GE) имеет полный ресурс до 160000 и 40000 часов до капитального ремонта, FT8 (компания-производитель P&W) имеет полный ресурс до 240000 и 50000 часов до капитального ремонта.

Что касается технических характеристик, то некоторые двигатели украинского производства соответствуют своим аналогам, произведённым за рубежом. В таблице 1 приведены сведения о ГТД марки ДН 80 в сравнении с зарубежными.

Одним из направлений отечественного производства двигателей является разработка новых сплавов для изготовления лопаток турбин. Сплавы должны работать

в агрессивных средах и при высоких температурах и нагрузках. Оценка прочности и долговечности основных узлов и деталей одного из серийных двигателей ДН80 показала необходимость повышения эксплуатационных характеристик рабочих лопаток 1 и 2 ступеней турбины, изготовленных из жаропрочного коррозионностойкого сплава CM88Y (таблица 2) с длительной прочностью 280 МПа (900 °С, 100 ч). Наряду с этим для зарубежных ГТД марок SGT-100, Titan130, FT8 рабочие лопатки турбин изготавливаются из сплава CMSX-4, содержащего 3 % рения,

Таблица 1

Сравнительная характеристика газотурбинных двигателей

Тип установки (фирма-разработчик)	Мощность (по ISO), МВт	КПД, %	Расход газа, кг/с	Степень повышения давления	Температура уходящих газов, T, °С
ДН-80 (UGT-5000) (НПКГ «Зоря-Машпроект»)	26,2	35,7	90	21,8	465
FT 8 (Pratt&Whitney)	25,5	38,1	85	19,7	457
PB211-6556 (Rolls-Royce)	25,4	35	92	2,8	487
PG 5371 PA (General Electric)	26,3	28,5	122	10,5	543
RB211-6761 (Rolls-Royce)	31,8	39,1	94	21,5	505

Таблица 2

Основные компоненты жаропрочных сплавов для наземных ГТД (%мас.)

Марка сплава	Cr	Ni	Co	Mo	Re	W	Al	Ti	Ta	Nb	Hf
IN 738LC	16,0	осн.	8,5	1,7	-	2,6	3,4	3,4	3,4	0,9	-
CMSX-11C	14,9		3	0,4	-	4,5		4,2	5,0	0,1	0,04
SC PWA 1483	12,8		9	1,9	-	3,8	3,6	4,1	5,0	-	-
Rene 80H	14,1		9,2	4,0	-	4,0	3,1	4,7	-	-	0,74
DC GTD 111	14,0		9,5	1,5	-	3,8	3,0	4,9	2,8	-	0,15
CMSX-4	6,5		9,6	0,6	3,0	6,4	5,6	1,0	6,5	-	0,1
CM88Y	15,9		11,0	1,9	-	5,3	3,05	4,6	-	0,2	0,3

который имеет монокристаллическую структуру. Для этого материала длительная прочность составляет 480 МПа (900 °С, 100 ч.). Однако ввиду низкого содержания хрома он имеет пониженные коррозионные свойства. Также применяются сплавы DS-GTD111, CM247, PWA1483, длительная прочность которых существенно превосходит свойства CM88Y.

Сравнительные характеристики прочности различных жаропрочных сплавов, используемых для изготовления рабочих лопаток турбины, представлены параметрическими кривыми Ларсена-Миллера на рис. 1.

Из представленных данных, можно сделать вывод, что для получения более качественных лопаток ГТД необходимо на базе сплава CM88Y разработать сплав с повышенными свойствами. Это возможно при введении в его состав некоторых легирующих элементов. В настоящее время лопатки ГТД с высокой длительной прочностью изготавливают методом направленной кристаллизации. В последние десятилетия достижением современной металлургии является создание монокристаллических жаропрочных сплавов для литья лопаток ГТД.

Было изучено распределение температуры вдоль оси отливки и показано, что при затвердевании образуются либо столбчатая структура (2...n зёрен с вертикальными границами) либо монокристалл с ярко выраженными анизотропными свойствами. Однако при этом имеется ряд недостатков столбчатой структуры, а именно снижение прочности в поперечном направлении, невозможность макроструктуры и другие.

Известно, что наиболее перспективными жаропрочными сплавами для монокристаллических лопаток ГТД являются никелевые сплавы, легированные рением. [1-5]. Это связано с тем, что рений упрочняет  $\gamma$ -твёрдый раствор и соответственно уве-

личивает прочность и высокотемпературную стабильность твёрдого раствора, а также тормозит скорость коагуляции и растворения  $\gamma'$ -фазы. При этом он частично вытесняет из твёрдого раствора тантал и алюминий, которые входят преимущественно в  $\gamma'$ -фазу, эффективно упрочняя её. Тантал относится к  $\gamma'$ -фазообразующим элементам. Он существенно повышает жаропрочность и жаростойкость сплава, а также температуру растворения  $\gamma'$ -фазы. Одновременное легирование сплава рением и танталом также приводит к увеличению его жаропрочности и термической стабильности. Замена ванадия танталом в данном сплаве также повышает жаростойкость сплава ЖС32 в ~3 раза, по сравнению со сплавами типа ЖС: ЖС-6У и ЖС-26У [6].

Кроме того, применение монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов для изготовления лопаток позволяет существенно увеличить их прочность и продолжительность работы в сравнении с поликристаллическими. Высокая жаропрочность такого типа лопаток обеспечивается за счёт правильной кристаллографической ориентации лопатки по отношению к действующей нагрузке и отсутствием границ зёрен, как источника разрушения изделия. На рис. 2 показано развитие промышленных ГТД с поликристаллической, направленной и монокристаллической структурой рабочих лопаток турбины. В мировой практике рабочие лопатки первой ступени турбин изготавливаются из материалов первого, второго и третьего поколения монокристаллических сплавов.

В связи с этим, для разработки новых и оптимизации существующих сплавов (например, CM88Y) необходимо провести следующие работы:

- увеличить объёмную долю упрочняющей  $\gamma'$ -фазы за счёт оптимального сочетания таких элементов как алюминий, титан и тантал;

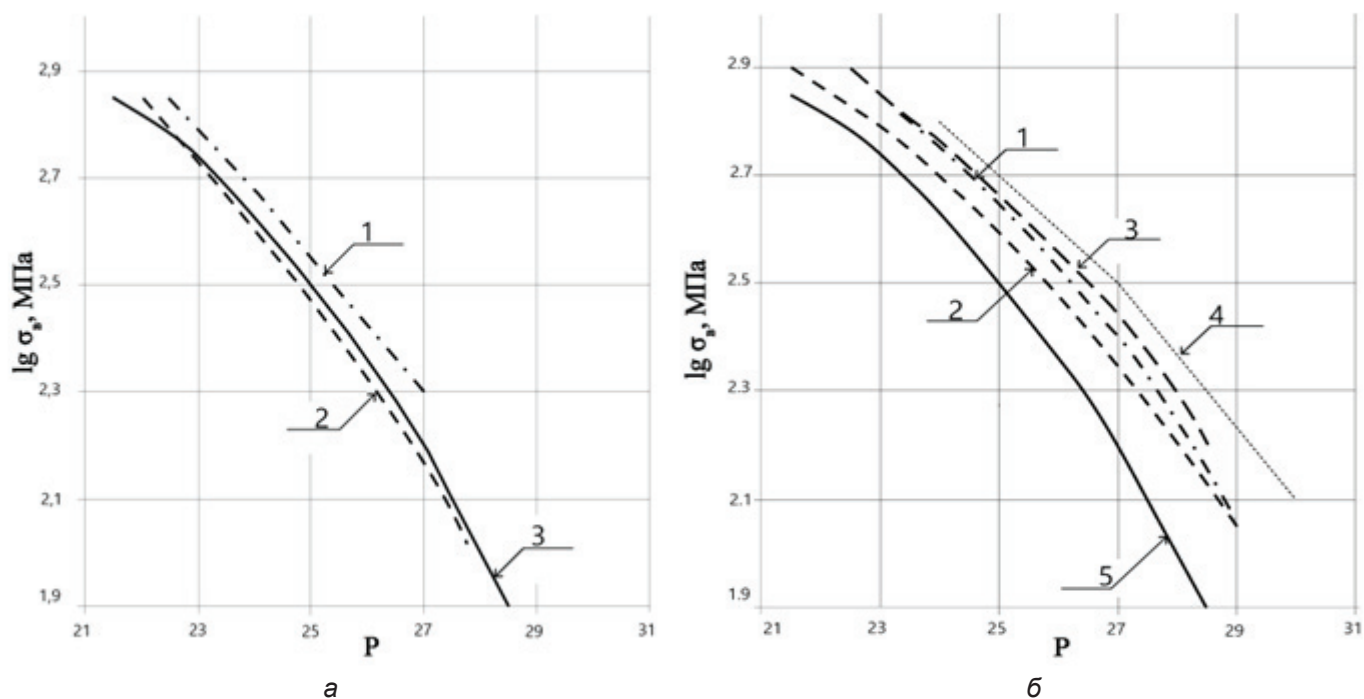
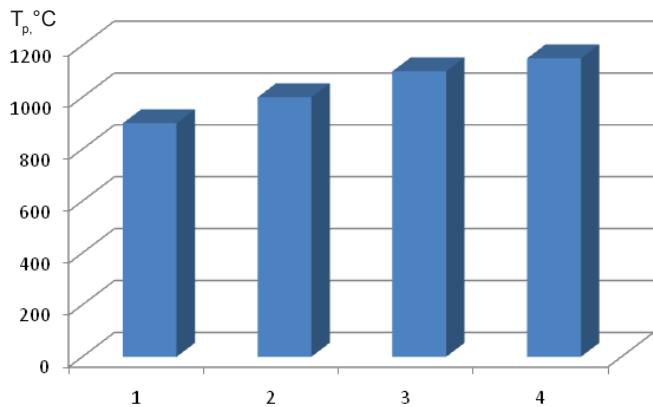
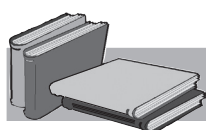


Рис. 1. Сравнение длительной прочности сплавов для рабочих лопаток турбин по параметрическим кривым Ларсена-Миллера: а –  $P = (t + 273) \cdot (20 + \lg t) \cdot E - 3$ ;  $\lg \sigma_a$  – длительная прочность, Мпа: 1 – жаропрочные сплавы марки IN792; 2 – IN738; 3 – CM88Y; б – 1 – жаропрочные сплавы марки CMSX-148; 2 – SCA425; 3 – PWA1483; 4 – IN792DS; CM88Y



**Рис. 2.** Влияние макроструктуры сплавов на рабочую температуру лопаток ГТД при нагрузке 137 Мпа. 1 – сплавы с поликристаллической структурой; 2 – сплавы с поликристаллической структурой и для направленной кристаллизации; 3 – сплавы с направленной кристаллизацией и сплавы для монокристаллических лопаток; 4 – сплавы для монокристаллических лопаток

- обеспечить фазовую стабильность и упрочнение  $\gamma$ -твёрдого раствора за счёт легирования тугоплавкими элементами вольфрама, молибдена, рения, тантала, рутения;
- обеспечить оптимальное сочетание легирующих элементов для минимизации вероятности образования топологически плотноупакованных фаз (ТПУ);
- для получения поликристаллической и монокристаллической структур необходимо оптимизировать содержание углерода, бора, циркония, гафния, иттрия;
- для повышения длительной прочности снизить содержание хрома, но не более чем до 12,5 %;
- при производстве шихтовой заготовки для литья лопаток турбин обеспечить чистоту сплава по примесным элементам.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Каблов Е. Н. Монокристаллические никелевые ренийсодержащие сплавы для турбинных лопаток / Е. Н. Каблов, В. Н. Толораия, Н. Г. Орехов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 7. – С. 2-5.
3. Физико-химические факторы жаропрочности никелевых сплавов, содержащие рений / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, Г. И. Морозова и др. // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкия: научно-технический сборник под ред. Е. Н. Каблова. – М.: Наука, 2006. – С. 116-130.
4. Монокристаллы жаропрочных сплавов / Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др. – М.: Машинлстроение, 1997. – 336 с.
5. Кишкин С. Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (к 100-летию со дня рождения) / С. Т. Кишкин. – М.: Наука. 2006. – 407 с.

### Анотація

*Квасницька Ю. Г.*

Підвищення експлуатаційних характеристик робочих лопаток турбін сучасних промислових газотурбінних двигунів

Проведено аналіз експлуатаційних характеристик вітчизняних та зарубіжних газотурбінних двигунів (ГТД). Отримані дані показали потребу підвищення потужності та ресурсу сучасних промислових ГТД, яка відповідно пов'язана з використанням нових матеріалів. Запропоновано удосконалення жароміцного корозійностійкого сплаву SM88Y для лиття робочих лопаток ГТД.

### Ключові слова

газотурбінний двигун, жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав, робоча лопатка

### Summary

*Kvasnytska Iuliia*

Improving the performance of working blades of modern industrial gas turbine engines

The analysis of the performance of domestic and foreign gas turbine engine was carried out. The data showed the need to increase the capacity and resource of modern gas turbine engines that is directly related to the use of new materials for its details. It is proposed to improve the superalloy SM88Y for founding working blades of a gas turbine engine.

### Keywords

gas turbine engine, superalloy, working blade

Поступила 01.09.2015