

В.А. Скачков⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
Ю.В. Рублевский⁽²⁾, вед. конструктор
Л.А. Гаращук⁽²⁾, начальник бюро
В.И. Иванов⁽¹⁾, ст. преподаватель
С.Н. Иванов⁽²⁾, инженер-конструктор

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР МАТЕРИАЛА МИКРОПРОВОЛОКИ ДЛЯ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье,
⁽²⁾ ГП «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс»
им. А.Г.Ивченко», г.Запорожье

Наведено вимоги, що пред'являють до матеріалів для щіткових ущільнень газотурбінних двигунів залежно від умов їх експлуатації. Подано методику та результати випробувань механічних характеристик мікродроту зі сплавів EI708A-BI і HAYNES35 у початковому стані та після експериментальних нагрівань за різної температури, що імітують умови роботи щіткових ущільнень. На підставі результатів випробувань для щіткових ущільнень деталей газотурбінних двигунів як оптимальний матеріал вибрано мікродріт зі сплаву HAYNES35.

Приведены требования, предъявляемые к материалам для щеточных уплотнений газотурбинных двигателей в зависимости от условий их эксплуатации. Представлены методика и результаты испытаний механических характеристик микропровода из сплавов EI708A-BI и HAYNES35 в исходном состоянии и после экспериментальных нагревов при различных температурах, имитирующих условия работы щеточных уплотнений. На основании результатов испытаний для щеточных уплотнений деталей газотурбинных двигателей в качестве оптимального материала выбрана микропровода из сплава HAYNES35.

Введение. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений совершенствования конструкций газотурбинных двигателей является внедрение щеточных уплотнений. Щеточные уплотнения представляют собой кольцевые статорные детали с находящейся между ними щеткой, выполненной из микропровода.

Основные требования, предъявляемые к материалу для изготовления щеточных уплотнений:

- сохранение упругих и прочностных свойств в интервале температур 550... 750 °С;
- сопротивление окислению при указанных температурах;
- минимальный износ в процессе эксплуатации.

Для изготовления кольцевых деталей в зависимости от условий их работы применяют традиционные материалы (коррозионностойкую сталь 12X18H10T или жаропрочный никелевый сплав ЭИ868). В то же время выбор материала микропровода для собственно щеточных уплотнений предполагает проведение комплекса экспериментальных исследований с целью определения их свойств.

Постановка задачи. Экспериментальное исследование характеристик проволоки для щеточных уплотнений газотурбинных двигателей должно подтвердить основные требования, обеспечивающие работоспособность выпущенной продукции. Следовательно, задачей исследований является установление зависимости

прочностных характеристик микропроволоки в зависимости от уровня действующей температуры, времени воздействия предельной температуры, а также оценка ее деформационных характеристик в процессе испытаний.

Основная часть исследований. При проведении экспериментов исследовали два вида материала для изготовления щеточных уплотнений:

– холодноотянутую микропроволоку диаметром 0,09 мм из сплава на железной основе ЭИ708А-ВИ;

– холодноотянутую микропроволоку диаметром 0,07 мм из сплава на кобальтовой основе HAYNES25.

Микропроволока из сплава HAYNES25 имеет структуру на основе твердого раствора Co_α , стабилизаторами которой служат хром и вольфрам. Кобальтовые сплавы, имеющие структуру гексагональной плотноупакованной решетки, показывают лучшие результаты при работе в условиях трения и износа. Этот факт соответствует материалам с гексагональной плотноупакованной структурой [1].

Образцы указанных видов микропроволоки подвергали испытаниям на разрыв в исходном состоянии и после нагревов, имитирующих условия работы щеточных уплотнений.

Нагрев образцов выполняли в воздушной атмосфере камерной печи типа МП-2УМ. Образцы из сплава ЭИ708А-ВИ нагревали при температуре 600 и 650 °С в течение 50 и 100 часов, образцы из сплава HAYNES25 – при температуре 650, 700, 750, 800, 850 и 900 °С в течение от 1 до 100 часов.

Испытания образцов микропроволоки на разрыв проводили с использованием стандартной методики на специализированной машине РМ-30, предназначенной для исследований волокнистых материалов.

Условия испытаний:

– длина рабочей части испытываемой микропроволоки – 150 ± 5 мм;

– температура испытаний – 19 ± 2 °С;

– скорость приложения нагрузки – 100 мм/мин;

– количество образцов для испытаний по каждому варианту нагрева – 6...10 штук.

Предел прочности образцов при растяжении определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{\pi \cdot r^2}, \quad (1)$$

где P – усилие разрыва, Н; r – радиус поперечного сечения образца микропроволоки, мм.

Установлено, что микропроволока из сплава ЭИ708А-ВИ в процессе испытаний не имеет ярко выраженных площадок текучести, как в состоянии поставки, так и после нагрева в течение 100 часов.

Микропроволока из сплава HAYNES25 в состоянии поставки и термической обработки до температуры 700 °С и выдержки в течение 100 часов также не имеет площадок текучести. При воздействии температуры выше 700 °С появляется площадка текучести, которая с повышением температуры имеет большую длину.

После нагрева на поверхности образцов микропроволоки из обоих видов материалов зафиксированы признаки окисления, интенсивность которых возрастает при повышении температуры.

При этом микропроволока из сплава HAYNES25 показала лучшую стойкость к окислению, сохраняя металлический блеск при нагреве вплоть до температуры 750 °С.

Результаты испытаний образцов микропроволоки обоих типов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты испытаний микропроволоки из сплава ЭИ708А-ВИ

Режим термической обработки		Величина прочности, МПа	
$T_0, ^\circ\text{C}$	$\tau_0, \text{ч}$	эксперимент	расчет
600	50	1347,5	1256,6
600	100	675,5	715,4
650	50	566,4	624,2
650	100	577,0	443,9
-	-	1384,3	1471,3

Статистическая обработка данных табл. 1 и 2 реализована методом регрессионного анализа. Влияние каждого параметра задавали в виде кубического сплайна [2]. Влияние режимов термической обработки оценивали прочностью на растяжение в зависимости от температуры нагрева T и длительности выдержки τ .

Таблица 2 – Результаты испытаний микропроволоки из сплава HAYNES25

Режим термической обработки		Величина прочности, МПа	
$T_0, ^\circ\text{C}$	$\tau_0, \text{ч}$	эксперимент	расчет
650	1	1440	1441
650	10	1270	1360
650	100	1510	1530
700	100	1440	1450
750	100	1450	1350
800	100	1060	1150
-	-	1560	1510

Для данных условий представление предела прочности на растяжение задают в виде [2]:

$$\sigma_B = \sum_{i=1}^K (C_{0i} + C_{1i} \cdot X_{1i} + C_{2i} \cdot X_{2i} + C_{3i} \cdot X_{3i}), \quad (2)$$

где K – количество факторов ($K = 2$); C_{ij} – коэффициенты сплайнов ($i = 0 \dots 3$; $j = 1, 2$). В уравнении (2) температуру T и время τ задавали в относительной кодированной форме: $X_{11} = t$; $X_{21} = t^2$; $X_{31} = t^3$; $t_i = T_0 / 293$; $X_{12} = \tau$; $X_{22} = \tau^2$; $X_{32} = \tau^3$; $\tau_i = \tau_0 / 20$.

Определение значений коэффициентов C_{ij} в модели (2) осуществляют по условию минимума суммарной квадратичной невязки экспериментальных и вычисленных значений прочности микропроволоки во время испытаний

$$\Phi = \sum_{m=1}^N \left[\sigma^m - \sum_{k=1}^2 (C_{0k} + C_{1k} \cdot X_{1k}^m + C_{2k} \cdot X_{2k}^m + C_{3k} \cdot X_{3k}^m) \right]^2 \Rightarrow \min, \quad (3)$$

где N – количество экспериментальных значений; m – номер эксперимента.

Выполнение требования (3) предполагает решение системы уравнений

$$\frac{\partial \Phi}{\partial C_{ij}} = 0, \quad (4)$$

где $i = 0, \dots, 3; j = 1, 2$.

Решение системы уравнений (4) выполняют с использованием разработанной PASKAL-программы.

Значения коэффициентов сплайнов приведены в табл. 3. Расчетные значения, полученные с использованием выражения (3), для микропроволоки ЭИ708А-ВИ и NAYNES25 представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов сплайнов в модели (2)

Микропроволока	C_{01}	C_{02}	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}	C_{31}	C_{32}
ЭИ708А-ВИ	129,3	129,3	181,5	445,4	274,5	-220,7	256,65	86,1
NAYNES25	189,6	189,6	324,6	50,94	95,86	-151,5	401,4	12,8

Анализ результатов испытаний образцов микропроволоки из сплава ЭИ708А-ВИ (табл. 2) показывает, что при температуре 600 °С увеличение длительности термического воздействия приводит к существенному снижению предела прочности, которое при выдержке в течение 100 часов достигает почти 50 %. При уровне температуры равном 650 °С длительность выдержки оказывает значительно меньшее влияние.

Образцы микропроволоки из сплава NAYNES25 имеют устойчивые значения предела прочности вплоть до температуры 750 °С (табл. 2). Необходимо отметить, что в начале выдержки при указанной температуре происходит снижение предела прочности, а с увеличением ее длительности величина предела прочности возрастает и превышает начальное значение на 5 %.

Учитывая, что для большинства сплавов зависимость пределов прочности и упругости от уровня температуры имеет линейный характер, тенденция изменения предела прочности в процессе провоцирующих нагревов справедлива и для модуля упругости.

Заключение. Экспериментально установлены преимущества микропроволоки из сплава NAYNES25 в процессе нагревов до рабочих температур, как по прочностным характеристикам, так и по стойкости к окислению. На основании результатов экспериментов данная проволока была выбрана в качестве материала щеточных уплотнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суперсплавы: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля: пер. с англ. В 2-х книгах. Кн. 1. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
2. Альберт Дж. Теория сплайнов и ее приложение / Дж. Альберт, Э. Никольсон, Дж. Уолш. – М.: Мир, 1972. – 312 с.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2010 р.
Рецензент, проф. Б.П. Середа