

Замковой В.Е., Кондратюк Э.В., Зиличихис С.Д., Кульгейко Т.Н., Гребенников М.А., Филимонова Л.Л.
ГП ЗМКБ «Прогресс» имени академика А.Г. Ивченко. Украина, г. Запорожье

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ГТД

Анотація

Розглянуто вибір матеріалу для щіткових ущільнень (ЩУ) ГТД в залежності від технологічних факторів, які впливають на їх виготовлення, від поданих конструкторських вимог та від умов їх експлуатації. Подано методику і результати досліджень механічних властивостей мікродроти із сплавів ЭИ708А-ВИ та Haynes 25 у вихідному стані і після експериментальних нагрівів при різних температурах, імітуючи умови роботи ЩУ. Як результат, встановлено і обґрунтовано вибір матеріалу дроти із сплаву на кобальтовій основі Haynes 25 у якості оптимального матеріалу для щіткових ущільнень ГТД.

Abstract

Material choice for GTE brush seal subject to technological factors influencing on its manufacture, producible design requirements and operating condition are considered. Methodology and test results of wire mechanical properties from alloys ЭИ708А-ВИ and Haynes 25 in an initial state and after experimental heating under different temperatures imitating of BS operating conditions have been presented. As a result wire material choice from alloys on cobalt basis Haynes 25 is established and proved as an optimal material for GTE brush seal.

Постановка проблемы и её связь с практическими задачами

В газотурбинных двигателях сведение паразитных утечек к минимуму в полостях компрессора и турбины является важной задачей, так как они влияют на эффективность и КПД двигателя в целом. Для этого применяют различные типы уплотнений в системе охлаждения и суфлирования. Ведущие мировые авиастроительные фирмы, выпускающие как авиационные, так и стационарные ГТД, прикладывают значительные усилия по внедрению более эффективных уплотнений, одними из которых являются щеточные уплотнения (ЩУ). Щеточное уплотнение представляет собой кольцевые статорные детали с находящейся между ними щеткой из микропроволоки (рис. 1). Так как ЩУ свойственна гибкость и податливость, они способ-

ны значительно уменьшать утечки за счёт своей возможности приспосабливаться к конструкции и изменениям положения ротора. Из трех основных составляющих данного уплотнения самым важным компонентом является гибкий уплотнительный пакет.

Статорные опорные кольца в зависимости от условий их работы изготавливают из традиционных материалов – коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т или жаропрочного никелевого сплава ЭИ868.

Уплотнительный элемент может быть изготовлен как из неметаллических материалов, так и металлической проволоки.

Основные требования, предъявляемые к материалу микропроволоки для щеточных уплотнений следующие:

- сохранение упругих свойств в требуемом интервале рабочих температур (550...750°С);
- сопротивление окислению при указанных температурах;
- минимальный износ в процессе эксплуатации;
- обладание достаточной пластичностью для принятия заданной формы;
- возможность свариваемости между собой и в сочетании с коррозионностойкими сталями и жаропрочными сплавами.

Цель работы

Обосновать выбор материала для изготовления проволочного пакета щеточных уплотнений (ЩУ) ГТД в зависимости от технологических факторов, предъявляемых конструкторских требований и условий их эксплуатации.

Содержание и результаты исследований

Для изготовления щеточных уплотнений на предприятии ГП «Ивченко-Прогресс» использовались разные технологические варианты, отличные друг от друга схемой намотки проволоки и технологией сборки полученного пакета в корпус. В качестве материала гибких волокон выступали металлическая проволока с упругими свойствами, неметаллические материалы, а также их комбинации. Выбор материала волокон, в основном определяет технологичность изготовления уплотнения.

Отрабатывались три варианта уплотнительного пакета:

- пакет из стеклянных нитей БС7-36х1х3х3;
- комбинированный пакет (80% стеклонить и 20% проволока Х20Н80 диаметром 0,1 мм);
- пакет из холоднотянутой проволоки из сплава на железной основе ЭИ708А-ВИ, диаметром 0,09 мм.

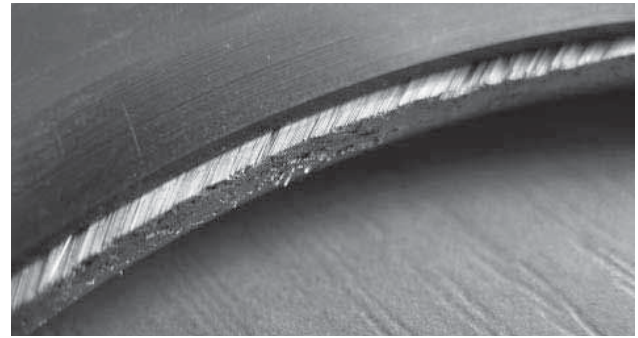
Проволока Х20Н80 (нихром) из-за отсутствия упругих свойств, не рассматривалась как альтернатива ЭИ708А-ВИ.

Первые два пакета при выполнении операции намотки образцов показали свою жизнеспособность, однако в результате сборки уплотнений со стеклянным и комбинированным пакетами на термопрессе, вследствие нагрева элементов уплотнения до температуры плавления мочевины (150°С), привело к сильной пропитке нитей стекловолокна мочевиной. Выжигание в печи и промывка в ультразвуковой ванне мочевины из уплотнения результатов не дали – слой стеклонити остался жестким и «разбухшим» (рис. 2, а).

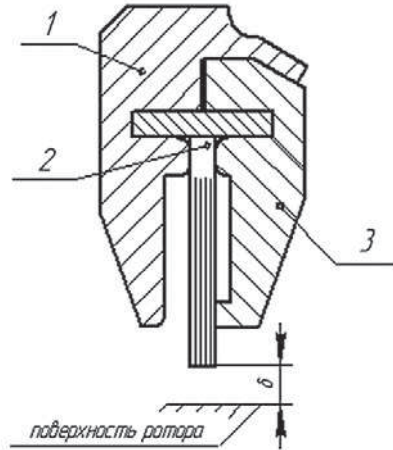
В результате исследований третьего варианта был сделан вывод, что уже на этапе намотки проволока из сплава на железной основе ЭИ708А-ВИ не пригодна для изготовления ЩУ из-за большой упругости и высоких прочностных свойств. Микропроволока из ЭИ708А-ВИ применяется для изготовления втулок из металлорезины (в качестве армирующего материала). При намотке пакетов данной проволокой была отмечена неравномерность укладки витков и соскальзывание уже намотанных витков с сердечника (рис. 2, б). Увеличение натяжения проволоки при намотке привело к сильному износу деталей намоточного устройства (коромысла и шпули). Выполнение термической обработки ЭИ708А-ВИ (температура нагрева 650°С, время выдержки 10 минут) привело к снижению прочностных свойств, но не упругости (рис. 2, в). Предположительно, проведенная термообработка полностью не устранила исходную нагартовку этой проволоки (т.е. проволока обладала наследственностью). После отжига проволока приобрела голубовато-желтый цвет, т.е. на поверхности проволоки образовался тонкий слой окисной пленки. Намотка такой проволоки сопровождалась частыми её обрывами. Также термообработанная проволока приобретает абразивные режущие свойства, что недопустимо при контактных взаимодействиях с ответной деталью.

Поиски альтернативной проволоки с аналогичной совокупностью свойств и диаметром меньше 0,1 мм, на территории Украины и стран ближнего зарубежья, результатов не дали [1].

В связи с этим, исходя из опыта изготовления ЩУ мировых авиадвигателестроительных фирм, была продолжена с импортной микропроволокой Naupes 25 на кобальтовой основе диаметром 0,07 мм. Формирование плотно прилегающих проволочек и угол установки в паковку достигали преимуще-



а



б

Рис. 1. Щеточное уплотнение ГТД:
 а – фотография; б – поперечное сечение ЩУ и схема движения потока воздуха, где 1 – пластина защитная, 2 – уплотнительный элемент (проволочный пакет), 3 – пластина опорная.

ственно методом намотки на оправку квадратного или прямоугольного сечения (рис. 3, а).

В большинстве случаев в процессе наматывания необходимо обеспечить заданные параметры тел намотки, его форму, структуру укладки нити, определенный уровень внутренних напряжений, устойчивость формы изделия при транспортировании и других технологических операциях.

Процесс наматывания реализуется последовательным оборачиванием оправки витками натянутой нити и сопровождается их послышной раскладкой по заданной схеме. При этом вращательное движение может совершать оправка или нитеводитель, либо и оправка, и нитеводитель одновременно. Операцию раскладки выполняет механизм раскладки, который осуществляет возвратно-поступательное движение нитеводителя. К основным параметрам процесса наматывания относят намоточное натяжение нити, скорость намотки, характер перемещения нитеводителя [2].

На данном этапе изготовления ЩУ проволока Naupes 25 показала наилучший результат.

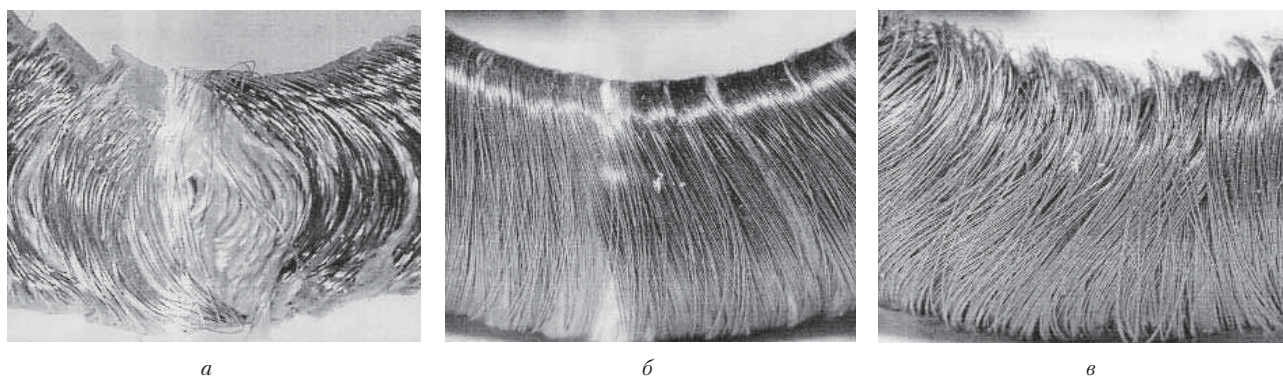
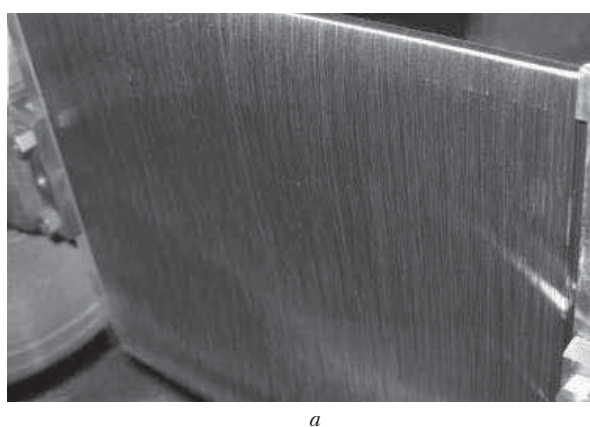
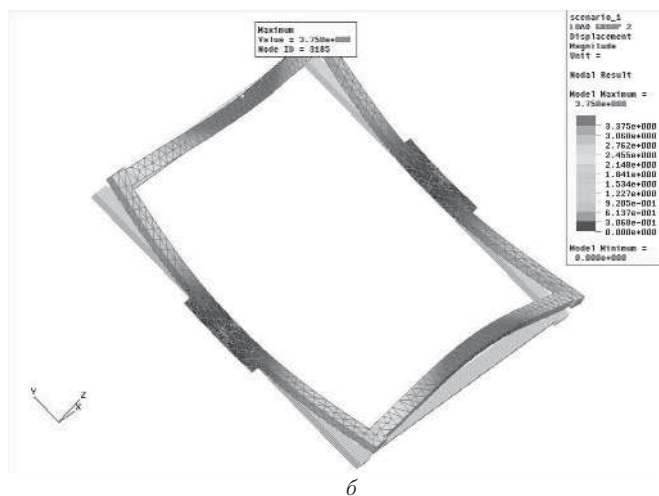


Рис. 2. Внешний вид намотанной проволоки на сердечник:
a – комбинированный пакет после размытия мочевины; *b* – соскальзывание проволоки ЭИ708А-ВИ с сердечника;
в – пакет из отожженной проволоки ЭИ708А-ВИ.



a



b

Рис. 3. Используемая рамка для намотки проволоки Haynes 25:
a – внешний вид укладки волокон; *b* – прочностной анализ рамки.

Однако при изготовлении ЩУ диаметром близко 400 мм на этапе намотки сталкивались с проблемами необходимого натяжения проволоки, возникал ряд отличительных особенностей в сравнении с малыми диаметрами ЩУ. В результате чего был выполнен расчет оправки на прочность (рис. 3б).

С целью достижения плотной (без зазоров), равномерной укладки волокна без перехлестов отдельных витков требуется следующее:

1. Обеспечение необходимой жесткости оправки;
2. Необходимость оснастки:
 - с плавной регулировкой усилия натяжения проволоки при намотке;
 - обеспечивающей экономично-оптимальный расход проволоки и простоту для выполнения последующих операций;
3. Подбор и соблюдение требуемых режимов намотки (подачи и оборотов станка при навивки, что в свою очередь также влияет на натяжение проволоки);
4. Аккуратность выполнения работы в связи с малым диаметром проволоки, равным 0,07 мм.

В данной работе выполнялась рядовая структура укладки нити, так как шаг намотки был равным ширине нити, то есть диаметру проволоки.

Из рассмотренных вариантов материала по технологическим факторам, наилучшие результаты показала проволока из Haynes 25. Проволока ответила всем технологическим требованиям. Далее процесс выбора материала проходил на основании анализа свойств материалов, определенных в состоянии поставки, а также их изменений после выполнения провоцирующих нагревов, имитирующих условия эксплуатации ЩУ.

Поэтому далее исследовались два из выше рассмотренных материалов:

- холоднотянутая проволока диаметром 0,09 мм из сплава на железной основе ЭИ708А-ВИ;
- холоднотянутая микропроволока диаметром 0,07 мм из сплава на кобальтовой основе Haynes 25.

В процессе эксперимента были определены: химический состав обеих проволок, их механические свойства и предельная рабочая температура.

Применение микропроволоки из сплава Haynes 25 обусловлено его структурой на основе твердого раствора Co_α (аллотропической модификации кобальта с гексагональной плотноупакованной решеткой), стабилизаторами которой являются хром и вольфрам, входящие в состав сплава Haynes 25. Кобальтовые сплавы, имеющие структуру гексагональной плотноупакованной (г.п.у) решеткой показали лучшие результаты при работе в условиях трения и износа. Это следствие легкости деформации материала с г.п.у. — структурой, где коэффициент трения по плоскостям базиса составляет менее половины такового для фазы с гранцентрированной структурой, типичной для другой аллотропической модификации кобальта — Co_γ [3].

Оба вида микропроволоки (из сплавов ЭИ708А-ВИ и Haynes 25) подвергались испытаниям на разрыв в исходном состоянии и после нагревов, имитирующих условия работы щеточных уплотнений. Перед нагревом микропроволока навивалась на специальные рамки из стали 12Х18Н10Т с целью обеспечения её фиксации в процессе нагрева.

Микропроволока из сплава ЭИ708А-ВИ подвергалась нагревам при температурах 600°C и 650°C в течение 50 и 100 часов [4]. Учитывая существенное снижение исходных свойств этой микропроволоки при опробованных режимах нагрева, продолжение эксперимента с нагревом при более высоких температурах было признано нецелесообразным.

Микропроволока из сплава Haynes 25 подвергалась нагревам при температурах 650°C, 700°C, 750°C, 800°C, 850°C и 900°C в течение 100 часов [5]. Нагрев осуществлялся в камерной печи МП-2УМ в воздушной атмосфере.

Испытания микропроволоки на разрыв проводились на специальной прецизионной разрывной машине по методике с определением усилий разрыва.

Условия испытаний:

- длина рабочей части испытываемой проволоки — 150±5 мм;
- температура испытаний — 19±0,5мм;
- скорость приложения нагрузки — 100 мм/мин;
- количество образцов для испытаний по каждому варианту нагрева — 6...10 штук.

Предел прочности (временное сопротивление разрыву) при растяжении определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{S},$$

где P — усилие разрыва, Н;

S — площадь исходного поперечного сечения микропроволоки, мм².

Таблица 1

Результаты испытаний микропроволоки из сплава ЭИ708А-ВИ

Состояние микропроволоки	Временное сопротивление разрыву, МПа (среднее значение)
Исходное	1584,3
После нагревов	
при 600°C, 50 часов	1347,5
при 600°C, 100 часов	675,5
при 650°C, 50 часов	566,4
при 650°C, 100 часов	577,0

Таблица 2

Результаты испытаний микропроволоки из сплава Haynes 25

Состояние микропроволоки	Временное сопротивление разрыву, МПа (среднее значение)
Исходное	1460,2
После нагревов	
при 650°C, 100 часов	1528,1
при 700°C, 100 часов	1466,3
при 750°C, 50 часов	1473,4
при 800°C, 100 часов	1074,4
при 850°C, 100 часов	956,7
при 900°C, 100 часов	412,8

В расчетах предела прочности использовалось значение площади исходного поперечного сечения микропроволоки, поскольку измерить её площадь сечения в месте разрыва после испытаний с достаточной степенью не представилось возможным.

После нагревов на поверхности микропроволоки обоих видов отмечены признаки окисления, интенсивность которых увеличивается с увеличением температуры.

При этом микропроволока из сплава Haynes 25 показала лучшую стойкость к окислению, сохраняя металлический блеск при нагревах вплоть до температуры 750°C.

Результаты испытаний микропроволоки обоих типов отражены в таблицах 1 и 2.

Химический состав проволок из различных сплавов (%)

	Co	Ni	Cr	Fe	W	Другие (< 6%)
Haynes 25	50,8	10,4	19,5	2,4	14,6	Mn, Si, C
Haynes 214	—	75	16	3	—	Mn, Si, C, Al, B, Zr, Y
Haynes IX750	0–1	70	14–17	5–9	—	Ti, Al, Nb, C

Анализ данных таблиц 1 и 2 показал, что микропровода из сплава Haynes 25 сохраняет достаточно высокий уровень свойств при нагреве до температуры 750°C в отличие от микропровода из сплава ЭИ708А-ВИ, у которых процесс снижения свойств происходит уже при 600°C. Механизмы разупрочнения микропроводов в данном эксперименте не изучались.

Учитывая, что для большинства сплавов пределы прочности и упругости находятся в прямой зависимости, поэтому тенденция изменения предела прочности в процессе провоцирующих нагревов в какой-то мере справедлива и для предела упругости. То есть сохранение исходных значений предела прочности микропровода из сплава Haynes 25 до температуры 750°C позволяет предполагать сохранение до указанных температур её упругих свойств.

Химический состав проволоки из сплава Haynes 25, определенный энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным методом (углерод — химическим методом), приведен в таблице 3 [5].

В результате как технологических, так и металлургических исследований наилучший результат показала проволока из сплава Haynes 25. Вместе с тем из анализа зарубежных источников [6] установлено, что данная проволока также имеет наилучшие показатели по характеристикам износа.

Авторами статьи [6] на износ непосредственно уплотнения и поверхности ротора с покрытиями сравнивались следующие материалы:

- проволока из сплава на кобальтовой основе Haynes 25 (H25);
- проволока из хромоникелевого сплава Haynes 214 (H214);
- проволока из хромоникелевого сплава Haynes IX750.

Диаметр используемых проволоки всех марок — 0,07 мм.

Проволока IX750 была подвергнута термообработке. В результате которой, предел прочности на разрыв составил 1855 МПа для IX750Н (высокопрочный вариант) и 1062 МПа для IX750L (низкопрочный вариант) соответственно. Сплав H214 — является неупрочняемым, поэтому его высоко-

прочный вариант H214Н получен непосредственно после протягивания (нагартовки) проволоки, а низкопрочный — H214L — проволока частично отожжена с последующим протягиванием до конечного диаметра. Предел прочности на разрыв составил 1379 МПа и 372 МПа соответственно.

Каждое испытание пучка делилось на два 25 часовых отрезка времени, для возможности снятия промежуточных показателей износа. Условия испытания: температура 650°C, окружная скорость 24 м/с, испытательная нагрузка — 0,49 Н.

Полученные их результаты подчеркивают важность правильного сочетания материалов проволоки и работающего в контакте с ней покрытия для получения самой низкой степени износа. Основываясь на результатах данной работы [6], отмеченных в процессе исследования, можно сделать вывод, что термообработка проволоки является менее важной в отличие от природы (химического состава и структуры) самого сплава проволоки. Оба варианта проволоки H214 не выдержали тестовых испытаний. Образец IX750 хорошо показал себя во время испытаний, и лучший показатель износа цапфы и щетки замечен в образце IX750Н, нежели в IX750L. Однако износ пучка из проволоки H25 с различными покрытиями ещё ниже на 59% и 52%, чем из IX750L и IX750Н соответственно.

Выводы

Для изготовления уплотнительного элемента щеточного уплотнения ГТД выбрана микропровода из сплава на кобальтовой основе Haynes 25. Проведенные эксперименты показали её существенное преимущество в сравнении с другими возможными материалами, в процессе нагревов до рабочих температур, как по прочностным характеристикам, так и по стойкости к окислению. Данная проволока отвечает конструкторским и технологическим требованиям.

Литература

1. Изготовление щёточных уплотнений из проволоки ЭИ708А-ВИ // Технический отчет ТО 75.001-2005. — Запорожье: ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, 2005. — 11 с.



2. *Сухарев В.А.* Расчет тел намотки / В.А. Сухарев, И.И. Матюшев. — М.: Машиностроение, 1982. — 136 с., ил.

3. *Симс Ч.Т.* Суперсплавы 11: 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 / под ред. Шалина Р.Е.]. — М.: Металлургия, 1995. — 384 с.

4. *Исследование №517/03* возможности снижения степени нагартовки проволоки из сплава

ЭИ708А-ВИ. — Запорожье: ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, 2004. — 5 с.

5. *Исследование №622/04* проволоки из сплава Haynes 25. — Запорожье: ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, 2004. — 5 с.

6. *James A. Fellenstein.* High temperature brush seal tuft testing of selected nickel-chrome and cobalt-chrome superalloys / James A. Fellenstein, Christopher DellaCorte, Kenneth D. Moore, Esther Boyes. // NASA Technical Memorandum 107497 AIAA-97-2634. — Washington, July 6-9, 1997. — P. 1–5.