

УДК 621.438: 62-762

**Канд. техн. наук В. А. Мамедов, Ф. Э. Аслан-заде***Азербайджанский технический университет, г. Баку*

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ НА БОЛЬШИХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

*В данной работе приведен анализ перспектив применения неметаллических щеточных уплотнений для герметизации зазора в промежутках зон низкого и высокого давления промышленных газовых турбин. Особое внимание уделено конструктивным особенностям щеточных уплотнений, волокна которых изготовлены из синтетических материалов. Традиционно в качестве уплотнительных устройств промышленных газовых турбин предусматривается использование уплотнений лабиринтного типа. Характерной особенностью лабиринтных уплотнений является наличие значительных утечек, возрастающих из-за чрезмерного износа ротора вследствие кратковременного контакта со статором, что в большинстве случаев может привести к динамической неустойчивости ротора. Использование щеточных уплотнений в газовых турбинах способствует уменьшению паразитных утечек и повышает адаптивность уплотнения вследствие перемещений ротора, что оказывает положительный эффект на динамическую устойчивость машины. Щеточные уплотнения имеют компактное исполнение и менее склонны к деградации в условиях эксплуатации. Данная статья описывает достоинства и эволюцию неметаллических щеточных уплотнений для обеспечения герметизации систем смазки турбомашин. В работе также были обсуждены экспериментальные методы, разработанные для конструирования щеточных уплотнений с неметаллическими волокнами. Представлены методики проведения экспериментальных испытаний и замера непосредственной жесткости волокон щеточных уплотнений. Также приводится краткое обсуждение вопросов тепловыделения в зоне сопряжения волокон и ротора, которые составляют основу успешной конструкции уплотнений с перспективой применения на разных турбомашин.*

**Ключевые слова:** щеточное уплотнение, лабиринтное уплотнение, динамическая устойчивость, кевлар, арамид.

### Введение

Необходимость создания двигателей будущего поколения с устройствами герметизации, способными выдерживать высокие окружные скорости и температурные режимы при сведении к минимуму паразитных утечек явилось толчком к интенсивным модельным и стендовым испытаниям систем щеточных уплотнений [1, 2].

С целью улучшения эксплуатационных характеристик щеточных уплотнений для высоких температур, были проведены исследования по замене металлических щеток керамическими волокнами [2–4]. Вопреки тому, что ранние исследования выявили значительный износ поверхности ротора [2, 3], утечка керамических щеточных уплотнений оказалась на половину меньше, чем у лабиринта (при зазоре в 0,18 мм) при низкой степени износа волокон. В этой связи весьма перспективным явилось усовершенствование щеточных уплотнений на основе карбида кремния, металлических пластин и оксида алюминия.

В последние десятилетия герметизация масла на турбомашине является актуальной задачей. При этом существенные требования предъявляются к герметизации масла в подшипниках роторных машин. Обеспечение более плотного зазора на этих участках позволяет избежать загрязнения маслом различных сопряженных компонентов машины.

Традиционно для герметизации масляного пара на высокоскоростных установках используются лабиринтные уплотнения. Конструкция лабиринтных уплотнений предполагает достаточно увеличенный радиальный зазор во избежание случайного контакта с валом, что может привести к его перегреву и повреждению. Следствием увеличенного зазора являются большие паразитные утечки и, соответственно, ухудшение производительности машины. Углеродные кольцевые уплотнения обеспечили альтернативу использованию лабиринтных уплотнений в последние десятилетия [5, 6]. Углеродные уплотнения эффективны для герметизации масляного пара. Как

правило, они не образуют абразивных частиц, которые могут нанести ущерб компонентам турбомашин. С другой стороны, контроль допуска на компонентах большого размера, а также высокая стоимость углеродных уплотнений создают существенные трудности. Отложения нагара на соприкасающихся поверхностях также может привести к отказам в работе уплотнения.

Гидродинамические маслоудерживающие кольца применяются для герметизации непрерывного потока масла. При этом существенно важно поддерживать непрерывный поток масла для обеспечения постоянной эффективности работы уплотнения. В случае отсутствия смазки уплотнение интенсивно изнашивается, что приводит к потере эффективности и его повреждению.

В последнее время все чаще прибегают к использованию щеточных уплотнений для обеспечения герметизации систем смазки. Щеточные уплотнения интенсивно применяются в качестве герметиков газа на роторных установках и превосходно проявили себя с точки зрения обеспечения минимальности утечек [7]. Они эффективны на переходных режимах работы ротора вследствие неотъемлемой совместимости щеток и структуры уплотнения. Однако применение их в качестве герметиков систем смазки проблематично вследствие возможного увеличения температуры масла и коксования. Коксование является следствием науглероживания частиц масла при значительно высоких температурах. Температура, при которой начинается закоксовывание масла, зависит от состава самого масла. Коксование приводит к образованию углеродистых отложений, которые, прикрепившись к лопастям компрессора, ухудшают эффективность работы и приводят к увеличению расходов на технический ремонт. Наиболее раннее изучение щеточных уплотнений в условиях жидкостного течения были произведены на установках с применением жидкого гелия [8–11]. Результаты исследований выявили улучшение функциональности уплотнений вследствие смазки самих щеток. Весьма обнадеживающие результаты были получены в работе [12].

В данной работе были исследованы возможности применения неметаллического щеточного уплотнения для герметизации систем смазки узлов газовой турбины.

#### **Краткий анализ состояния вопроса и постановка задачи**

В газовых турбинах использование щеточных уплотнений часто связано с целью уменьшения утечки жидкости по периферийным зазорам, таким как между корпусом и ротором, по периферии вращающегося вала двигателя, а также

через внутренние промежутки, имеющие разное давление рабочей среды внутри двигателя.

Традиционно, щеточные уплотнения состоят из пучка гибких металлических щетинок-волокон [13–15] для герметизации внутреннего зазора, которые свободно соприкасаются с ротором машины. С целью повышения эффективности и сведения утечек к минимуму на газовых турбинах стали использовать окружные щеточные уплотнения. Как правило, в производстве щеточных уплотнений используют металлические волокна из проволоки, изготовленной на базе высокотемпературных суперсплавов кобальта и никеля, и пригодной к использованию при высоких температурных режимах [7]. Вследствие того, что компоненты герметики щеточных уплотнений соприкасаются с поверхностью ротора, их использование ограничено в пределах окружных скоростей до 365 м/с и температур до 815 °С, и обычно ниже 650–700 °С. При чрезвычайно высоких окружных скоростях и температурах металлические щеточные уплотнения претерпевают чрезмерный износ вследствие плавления кончиков щетинок. Существует немало участков на современных газовых турбинах, таких как балансир (балансировочной поршень) и другие участки с второстепенным потоком, где окружные скорости и температурные условия превышают возможности традиционных металлических щеточных уплотнений. Таким образом, на этих участках, как правило, используют лабиринтные уплотнения, имеющие достаточно увеличенный зазор, что приводит к достаточно высоким утечкам в эксплуатации по сравнению с контактными уплотнениями типа углеродных и металлических щеточных уплотнений.

Неметаллические щеточные уплотнения все чаще используют в качестве герметиков буферного воздуха вблизи гнезда подшипника [15]. Буферный воздух применяется для герметизации масла в гнезде подшипника в результате создания давления более высокого, чем давление масла. Применение металлических щеточных уплотнений для герметизации гнезд подшипника чревато попаданием обломков металлических волокон в пространство между подшипником и обоймой, что может привести к преждевременному выходу из строя конструкции подшипникового узла. Поэтому, одним из наиболее распространенных конструктивных решений является применение лабиринтных уплотнений для герметизации подшипниковых узлов газотурбинных двигателей. Разработка контактных углеродных уплотнений для герметизации подшипниковых узлов требует дальнейшего углубления и доводки в силу их неудовлетворительной надежности, которая обуславливается недостаточно высокими физико-механическими свойствами применяемых материалов [5, 6].

Характерной особенностью авиационных двигателей, а также больших промышленных газовых турбин для наземного применения, является использование лабиринтных уплотнений для герметизации масляных гнезд подшипников, что часто приводит к загрязнению компонентов машины (например, осевой компрессор) масляными парами. Данная проблема ухудшает мощностные характеристики двигателя в результате загрязнения компрессора, а также может сопровождаться коксованием поверхностей лабиринта.

Несмотря на многочисленные исследования по созданию неметаллических щеточных уплотнений с применением керамики и полимеров, их практическое внедрение натолкнулось на множество очевидных трудностей, связанных с процессами проектирования и изготовления. Основная трудность заключается в самом процессе изготовления щеточной полосы, ибо гибкость волокон отягощает процесс обработки внутреннего диаметра щеточного уплотнения до приемлемой точности. Средний размер неметаллических волокон достигает 2–3 мкм в диаметре [16].

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, разработка неметаллических щеточных уплотнений с улучшенными по сравнению с лабиринтными уплотнениями характеристиками является весьма актуальной научно-практической задачей. Безусловно, немаловажным фактором является необходимое сочетание высоких эксплуатационных характеристик со способностью выдерживать высокие температурно-скоростные режимы, а также относительно низкая себестоимость изготовления.

#### **Использование неметаллических щеточных уплотнений**

Проблемы, связанные с ограниченным применением щеточных уплотнений для герметизации подшипниковых узлов газотурбинных двигателей явились толчком для разработки альтернативных уплотнений с сочетанием благоприятных эксплуатационных характеристик [16].

Свойства щеточного уплотнения во многом зависят от свойств щетинок, и потому, помимо геометрии щеток необходимо здесь в первую очередь обратить внимание на выбор материала щеток. Такие свойства как долговечность, эластичность, износостойкость, сопротивление на излом, термостойкость и т. д. играют большую роль. В работах [2–4] исследовалась возможность применения материалов из пластика, металла, керамики, а также их комбинаций для изготовления щеточных уплотнений. Использование неметаллических щетинок преследует цель улучшения устойчивости к нестабильностям текучей среды и температурным режимам. По мнению

авторов это должно сопровождаться повышением износостойкости и увеличением диапазона эластичности уплотнения.

Использование керамических волокон для изготовления щетины значительно снижает риск пластической деформации, особенно в условиях повышенных температурных нагрузок.

Другим преимуществом использования керамических волокон в качестве материала для изготовления щетины является умеренный коэффициент трения керамики со сталью, их высокая сопротивляемость абразивному износу, а также коррозионным горячим газам и масляным парам, что, как правило, присутствует в условиях эксплуатации турбомашин. Однако в силу их жесткости и хрупкости также возникают дополнительные проблемы. Керамические волокна/щетки, как правило, менее склонны к упругой и совсем не поддаются пластической деформациям. В условиях сжатия появляется опасность их излома. Еще одна проблема заключается в креплении волокон в нужной позиции и их распределение для формирования щетки. Обычные методы неразъемного соединения металлов, такие как сварка или пайка здесь неприемлемы или возможны с большими ограничениями, когда речь идет о чисто керамических волокнах. Возможно нанесение металлических покрытий на поверхность керамических волокон для достижения большей смачиваемости легкоплавких металлов, таких как припой. Однако, металлизация волокон – дорогостоящий процесс, кроме того, этот процесс может привести к изменению свойств волокон.

Керамические волокна можно крепить посредством использования подходящих адгезионных материалов. Адгезивы, изготовленные на базе синтетической смолы, часто приводят к нестойкости среды и недостаточной температурной устойчивости, что способствует появлению ползучести и сжатия. Адгезивы на основе керамического цемента часто не создают адекватного сцепления и склоны к отклеиванию или формированию разрывов вплоть до расслоения [4].

Также известно фрикционное сцепление волокон щеточных уплотнений, т. е. трением под действием усилий зажима и упругих сил [16]. Твердые малоупругие керамические волокна с низким коэффициентом трения требуют для этого больших механических усилий и точной технологии изготовления, что снова приводит к опасности возникновения трещин и поломок.

При этом, ослабленный зажим керамических волокон может иметь последствие расслоения или разрушения всего щеточного уплотнения.

В работах [10, 12], исследовались характеристики утечки щеточных уплотнений и было установлено, что неметаллические уплотнения демонстрируют улучшенные свойства на фоне

намокания неметаллических волокон в смазке.

Волокна щеточных уплотнений можно также изготовить на основе синтетических материалов [17]. Синтетические волокна, такие как на рис. 1, а, могут быть представлены из подходящих высокотемпературных полимеров, включая такие как высокопрочные наполнители марки Kevlar®<sup>1</sup>, а также высокопрочные и применяемые в условиях умеренных температур (до 300 °С), наполнители марки Nomex®<sup>2</sup> [18, 19].

Кевлар и Номекс являются синтетическими полиамидными полимерными материалами. Кевлар сохраняет прочность и эластичность при низких температурах, вплоть до криогенных (-196 °С), более того, при низких температурах он даже становится чуть прочнее. При нагреве Кевлар не плавится, а разлагается при сравнительно высоких температурах (430—480 °С). Температура разложения зависит от скорости нагрева и продолжительности воздействия температуры. При повышенных температурах (более 150 °С) прочность Кевлара уменьшается с течением времени.

Так, при температуре 160 °С прочность на разрыв уменьшается на 10–20 % после 500 часов. При 250 °С прочность падает еще сильнее, а при 300 °С — почти полностью. При 70 °С прочность падает на 10–20 % после 500 часов.

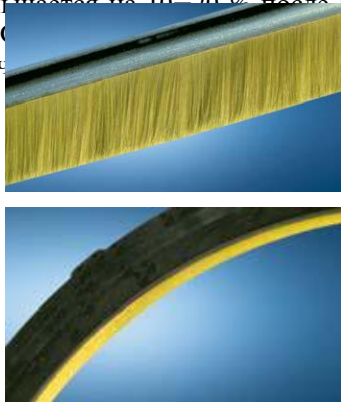


Рис. 1, а. Волокна кевларовых щеточных уплотнений [16]

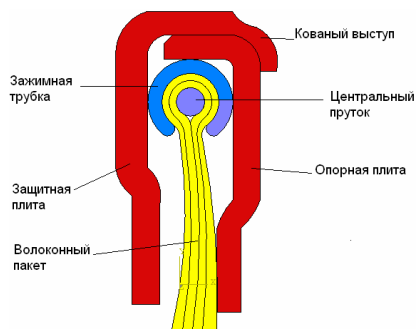


Рис. 1, б. Схема уплотнения [16]

<sup>1</sup> Торговая марка высокопрочного ( $\sigma_0 = 3620$  МПа) пара-арамидного (полипарафенилен-терефталамид) волокна, выпускаемого фирмой DuPont.

<sup>2</sup> Торговая марка огнеупорного мета-арамидного (полиметафенилен-изофталамид) волокна, выпускаемого фирмой DuPont.

Щеточные уплотнения с щетками на базе арамидных волокон Кевлар и Номекс, обладают намного большей прочностью, чем изготовленные на базе суперсплавов никеля и кобальта [20]. Кроме того, щеточные уплотнения, изготовленные из мягких высокопрочных полимерных волокон с умеренными (260—370 °С) температурными свойствами, могут быть использованы в высокоэффективных подшипниках, например, в гнездах подшипников двустороннего вращения современных газовых турбин.

Номекс предпочтительнее выбирать для изготовления щеточных уплотнений, где существенную важность представляют свойства теплоустойчивости и огнеупорности. Номекс является температуроустойчивой модификацией марки Кевлар, которая обладает более высокими прочностными свойствами, чем высокопрочная сталь.

Арамидные волокна Номекс очень тонкие в пределах от 25 мкм до 0,0254 мм в диаметре и имеют низкий модуль упругости. Для того чтобы придать волокнам дополнительную жесткость, их переплетают до толщины диаметром от 900 мкм до 0,914 мм, в зависимости от применения [21]. Способность отдельных волокон переплетаться, значительно уменьшает производственные затраты на изготовление щеточной полосы, которая формируется или накатывается на вставки щеточных уплотнений, как указано на рис. 1, б.

В отличие от металлических щеточных уплотнений электросварка не может быть использована для соединения синтетических волокон, их соединение осуществляется путем механического схватывания и крепления [16]. Волокна можно гнуть и наматывать на главный стержень. На рис. 2, а указана спрессованная манжета 1, которая используется для скрепления волокон на центральном стержне 2, будучи обжатой вокруг намотанных волокон. Для дополнительной надежности волокно можно склеивать или цементировать к стержню в условиях механического перехвата. Данный процесс механического перехвата щеточных полос применим в случае наклона волокна приблизительно на 90 ° к оси щеточной полосы и направления по нормали к поверхности ротора. В металлических щеточных уплотнениях волокна, как правило, наклонены под углом от 0 ° до 45 ° к длине полосы в направлении вращения для придания гибкости и смягчения изгиба в условиях смещения ротора [13, 14]. Когда волокна направлены по нормали к длине полосы или поверхности ротора, они более склонны к короблению, чем к изгибу, увеличивая при этом контактные механическое давление на кончики волокон. Усиленное контактное механическое давление ускоряет износ волокон, тем самым, укорачивая эксплуатационный срок всего щеточного уплотнения.

Для обеспечения изгиба синтетических волокон в результате смещения ротора, волокнистая полоса наклонена в осевом направлении потока текучей среды, т.е. в направлении низкого давления. На рис. 2, б представлено схематическое изображение уплотнения с неметаллическими волокнами. Для придания жесткости системе, пучок гибких волокон 3 удерживается в позиции осевого уклона между более тонкой парой передней 1а и задней 2а пластин, которые прикреплены к более жесткой передней 1б и задней 2б пластинам.

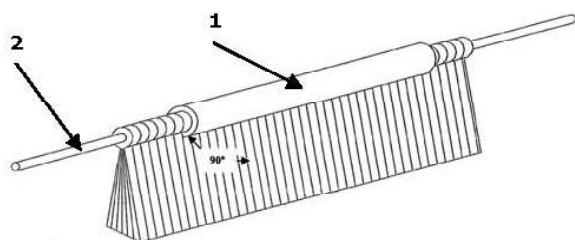


Рис. 2, а. Вид механически закрепленного щеточного уплотнения

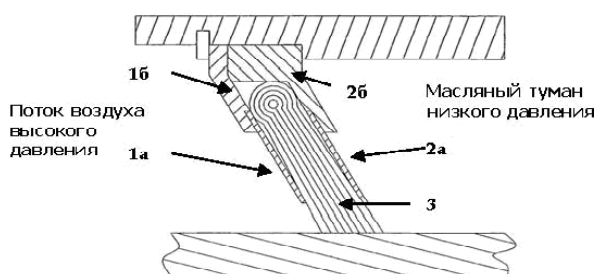


Рис. 2, б. Схематическое изображение неметаллического щеточного уплотнения

Для органических волокон типична ограниченность их температурных характеристик, следствием чего является их способность иссыхать в результате работы в ужесточенном температурном режиме [18, 19]. Учитывая тот факт, что масло или масляный туман, например, в гнезде подшипника, может достигнуть температуры более 150 °С, иссыхание щеток приведет к значительным утечкам. Другими важными аспектами являются степень инертности и влагопоглощения. Проведя обзор опубликованной литературы [17, 18, 19, 21], арамид явился наиболее подходящим материалом волокон для применения в газотурбинных уплотнительных системах. Арамидные волокна, являясь органическими полимерами, для которых характерна высокая прочность и маленькая плотность, могут быть использованы на установках с рабочей температурой до 150 °С, подвергаясь при этом пренебрежимо малому иссыханию и влагопоглощению.

В лаборатории кафедры «Металлургия» Азербайджанского технического университета были

проведены тесты по измерению прочности некрученных арамидных волокон для использования в щеточных уплотнениях. Определение параметров волокон включило оценку предела прочности на разрыв и предела текучести, а также триботехнические характеристики.

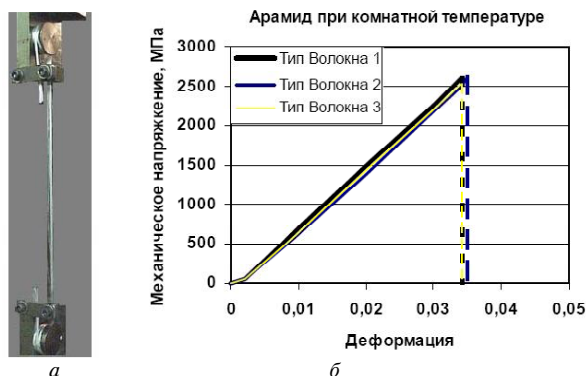


Рис. 3. Испытания на растяжение: а – приспособление для испытания волокон; б – повторяемость

Для испытаний на растяжение было разработано специальное приспособление для удерживания щетинок. Как указано на рис. 3, а, это приспособление предотвращает повреждение волокон при сжатии и удерживает разрушение волокон по длине измерительного прибора. Испытания на растяжение проводились на пробных волокнах, закрученных на шкивы и зажатых в зажимном устройстве приспособления. Все испытания на растяжение проводились при комнатной температуре со скоростью деформации 10 % в минуту. Относительная влажность поддерживалась в районе 47 %. Многократные тесты при комнатной температуре выявили прочность волокна примерно в 2482 МПа при оптимальной повторяемости рис. 3, б. При разрушении наблюдалась средняя деформация в 3,2 %.

#### Оценка прочности при высоких температурных режимах

Для того чтобы исследовать прочность волокон после долгосрочного воздействия высоких температур, были проведены вторичные тесты. Испытательные волокна были подвергнуты выбранным температурам и тестировались соответственно после воздействия высоких температур. Рис. 4 изображает поведение волокон после воздействия температуры 150 °С в течение длительного промежутка времени. Испытания проводились при комнатной температуре. Результаты испытаний показали, что после первичного температурного воздействия в 150 °С, прочность уменьшается до величины в 2413 МПа. Уменьшение прочности незначительно в течение 21 дня, после чего снижение прочности становится более интенсивным. Прочность волокна уменьшается до

2300 МПа после 35-дневного воздействия. Как изображено на рис.5, потери прочности ускоряются и становятся значительными при температурном режиме в 260 °С.

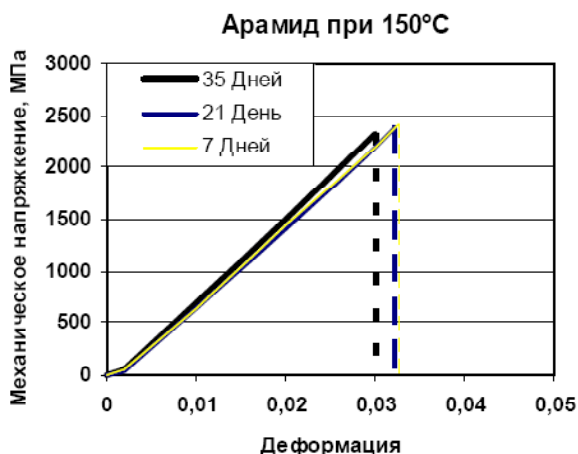


Рис. 4. Прочность волокон при температуре 150 °С

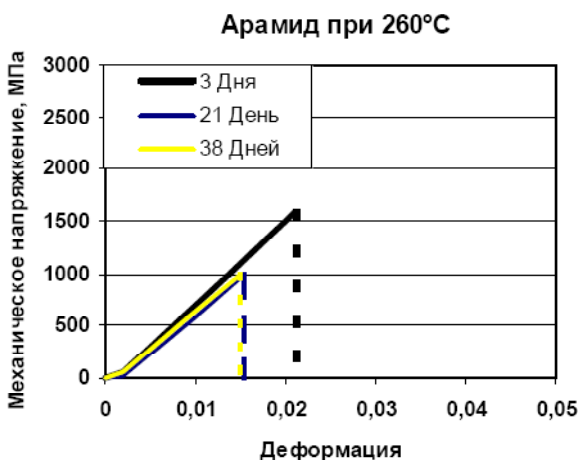


Рис. 5. Прочность волокон при температуре 260 °С

**Испытание на ползучесть**

После оценки температурных пределов выбранных арамидных волокон, эффект воздействия высоких температур был оценен посредством испытаний на ползучесть. Испытания проводились при температурном режиме 150 °С и при постоянной нагрузке (при 20%-ной разрывной нагрузке). Как изображено на рис. 6, результаты показали, что арамидные волокна обладают хорошими свойствами на ползучесть при температуре 150 °С. Установленный темп изменения натяжения оказался равным 0,1% на десятилетие.

**Испытания на износ**

Перед тем, как использовать выбранные волокна в уплотнениях систем смазки газовых турбин, необходимо определить их сопротивление износу. Прежде всего, отдельные волокна собираются в пучок. Далее пучок подставляют в соединительный элемент осциллирующей установки

для испытаний на износ. Контрматериал выбирается в качестве Ni-Cr-Mo-V, что типично для материала ротора в газовых турбинах. Испытания на износ проводились под воздействием постоянной нагрузки 2,22 Н при установленном контактном давлении 38 КПа. Средняя испытательная скорость была равной 5,1 мм/с. Испытания проводились как в условиях комнатной температуры, так и при температуре 150 °С. Иллюстрация измерений износа указана на рис. 7. Несмотря на то, что испытания проводились при скоростях, значительно ниже тех, которые возможны в реальных условиях, результаты этих испытаний все же могут быть использованы для оценки относительной эффективности применения арамидных волокон по отношению к волокнам из металла. Результаты показали улучшенные характеристики износу по сравнению с износостойкими волокнами кобальтового сплава (Haynes 25), испытанного на роторе из того же материала. Результаты также показали сопоставимый коэффициент трения, который замерялся как при комнатной температуре, так и при температуре в 150 °С.

**Ползучесть арамидных волокон при 150 °С и 20% -ной разрывной нагрузке**

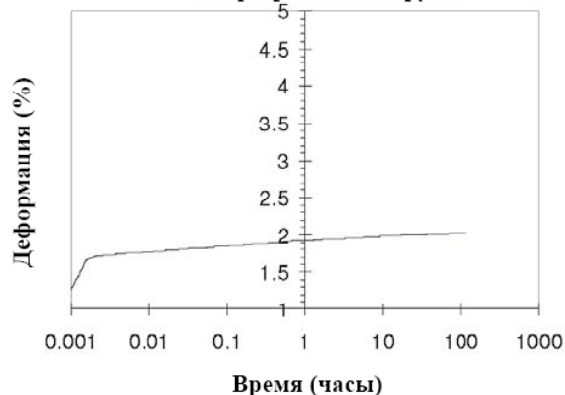


Рис. 6. Сопротивление ползучести при температуре 150 °С

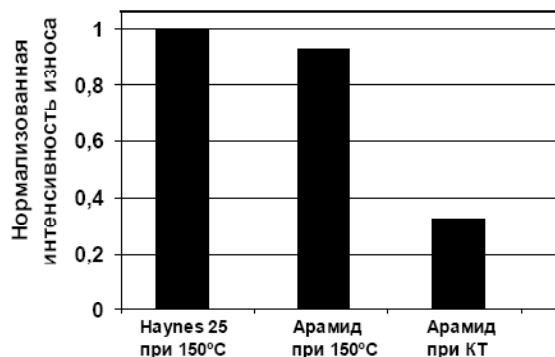


Рис. 7. Результаты испытаний на износ для пучков из материала Арамид и Haynes 25 относительно Ni-Cr-Mo-V. Данные нормализованы с интенсивностью износа волокон Haynes 25 при температуре 150 °С

### Характеристика утечки воздуха и масла ара-мидного уплотнения

Характеристики металлических щеточных уплотнений в значительной степени исследованы в опубликованной литературе [12–15].

Одной из задач данной работы является сравнение их характеристик с арамидными щетками. Оценка характеристик с использованием сухого воздушного потока проводилась перед испытаниями на утечку с использованием машинного масла. На рис. 8 изображены результаты этих испытаний. Как видно из графика, арамидные щеточные уплотнения превосходят металлические. Превосходство свойств уплотнения в большей степени определяется густым пучком волокон, результатом чего является уменьшенная пористость уплотнения. В статических условиях средняя утечка арамидного уплотнения наполовину меньше утечки из металлического щеточного уплотнения. После интенсивных испытаний на воздушном потоке, оценивались свойства арамидных щеточных уплотнений на масляном потоке. Было обнаружено, что арамидные уплотнения уменьшают утечку масляного тумана более чем на 50 % в сравнении с лабиринтными уплотнениями. Кроме того, в условиях контакта с ротором не наблюдалось никаких частиц масла, проскальзывающих через арамидные пучки волокон уплотнения.

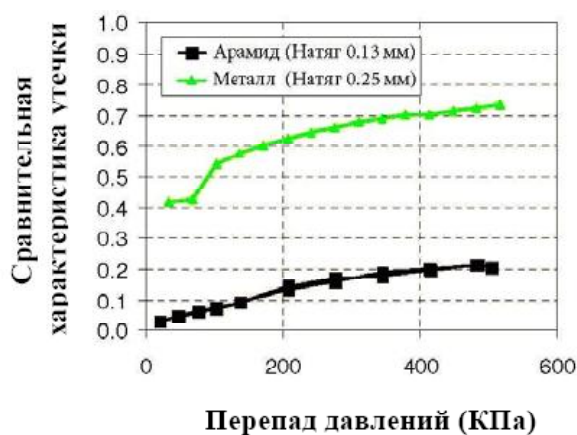


Рис. 8. Испытание на эффективность уплотнения масляного тумана

### Увеличение температуры масла

Герметизация масла при высоких окружных скоростях является сложной задачей на многих турбомашинах. В результате динамических испытаний на утечку температура воздуха/масла во входном гнезде и на выходе из уплотнения замерялась в трех местах на каждом уплотнении.

Результаты показывают, что нагрев уплотнения недостаточный по сравнению с температурным пределом эксплуатации волокон. Это обусловлено мягкостью конструкции уплотнения, которое в сочетании с ослабленным сдвигом приводит к минимальному тепловыделению по профилю всего уплотнения. Тщательный осмотр кончиков волокон не выявил очевидного коксования масла. Для того, чтобы далее выявить коксование масла проводились испытания на масле с температурой 132 °С на скорости в 103 м/с и радиальным натягом 0,25 мм. Нисходящая температура достигала 153 °С. Осмотр кончиков волокон после испытаний также не выявил очевидного коксования масла.

### Выводы и заключения

Неметаллические щеточные уплотнения, в частности уплотнения с щетками/волокнами из арамидных материалов Kevlar® и Nomex®, по сравнению с металлическими щеточными уплотнениями, обладают значительно меньшим диаметром волокон, что приводит к возможности более плотной герметизации на некоторых участках турбомашин, таких как: корпус подшипника, в местах между корпусом и ротором, по периферии вращающегося вала, а также в межкаскадных промежутках машины. Эластичная структура этих уплотнений обеспечивает минимальный зазор между ротором и статором путем вдавливания пучка волокон в ротор в процессе работы. Подобным образом эластичная структура неметаллических волокон делает возможным нейтрализацию проблем соосности и восстановления уплотнения от радиального смещения ротора вследствие его неустановившегося режима. Жесткость конструкции пучка волокон является важным аспектом для успешной работы уплотнения. В случае, если уплотнение сконструировано слишком мягким, силы трения препятствуют восстановлению отесненных от ротора пучков волокон. И наоборот, если конструкция щетины очень жесткая, тепловыделение на скользящих сопряженных поверхностях уплотнений ускоряют их деградацию.

В данной работе был произведен анализ щеточных уплотнений как возможных альтернатив существующим лабиринтным и углеродным контактным уплотнениям, а также маслоудерживающим кольцам. Вследствие высокоскоростного трения в сопряженных участках щеточного уплотнения и вала температура масла и коксование являются наиболее сложными проблемами. Анализ экспериментальных исследований, произведенный в результате проведения данной работы, выявил следующие выводы о применении щеточных уплотнений для высокоскоростной герметизации масляного тумана:

- герметизирующая способность неметаллического щеточного уплотнения превосходит способности металлического щеточного и лабиринтного уплотнений в условиях эксплуатации с применением воздуха и машинного масла;

- коэффициент трения неметаллических волокон сравнительно меньше, чем металлических. Вследствие присутствия масла на сопряженных частях щеточного уплотнения и вала, коэффициент трения склонен к дальнейшему уменьшению.

Однако, тепловыделение, а, следовательно, и увеличение температуры, является важной эксплуатационной проблемой, т.к. температура коксования масла достигает максимально допустимого рубежа, и потому нуждается в дальнейшем исследовании.

#### Список литературы

1. A Bulk Flow Model of a Brush Seal System / [Hendricks R. C., Schlumberger S., Braun M. J., etc.], ASME paper no. 91-GT-325, 1991.
2. Hendricks R. C. Development of a Brush Seals Program Leading to Ceramic Brush Seals / [Hendricks R. C., Flower R., Howe H.]. – NASA CP-10136, 1994, P. 99–117.
3. Howe H. W. Ceramic Brush Seals Development / Howe H. W. – NASA CP-10136, 1994, P. 133–150.
4. Preliminary Results of Silicon Carbide Brush Seal Testing at NASA Lewis Research Center, 31st Joint Propul / [Addy, H. E., Howe, H.W., Flowers J., etc.] : Conf. Paper, AIAA 95-2763, San Diego, July, 1995.
5. Menendez R. P. Development of lift off seal technology for air/oil axial sealing applications, 35th Joint Propul / Menendez R. P., Cunningham M. D. : Conf. Paper AIAA 99-2822, 1999.
6. High Reliability oil-air high speed gearbox clearance seal, 34th Joint Propul. Conf. Paper AIAA 98-3287, 1998.
7. Sealing in Turbomachinery / [Chupp R. E., Hendricks R.C., Lattime S.B., etc.]. – AIAA, J. Prop. Power, 22(2), 2006, P.313–349.
8. Flow Visualization and Motion Analysis for a Series of Four Sequential Brush Seals / Braun M., Canacci V. : 26th Joint Propul. Conf. Paper AIAA 90-2482, 1990.
9. Braun M. J. Flow Visualization and Quantitative Velocity and Pressure Measurements in Simulated Single and Double Brush Seals / Braun M. J., Canacci V. A., Hendricks R. C. // Trib Carlile J. A. Brush Seal Leakage Performance with Gaseous Working Fluids at Static and Low Rotor Speed Conditions / Carlile J. A., Hendricks R. C., Yoder D. A. – ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power, 115, 1993, P. 397–403.
10. Hendricks R. C. Some sealing concepts - A Review; Part B: Brush Seal Systems / Hendricks R. C., Carlile J. A., Liang D. A. : Proc. of the 4th Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-4), Honolulu, 1992, P. 222–227.
11. Evaluation of Brush Seal Performance for Oil Sealing Applications / [ Aksit M. F., Bhate N., Bouchard, C., etc.] : 39th Joint Prop. Conf. Paper AIAA 03-4695, 2003.
12. Сравнительный анализ щеточного и лабиринтного уплотнений ГТД / [Пейчев, Г. И., Кондратюк, Э. В., Зиличихис, С. Д. и др.] // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 1. – С. 66–70.
13. Оптимизация конструкторско-технологических параметров щеточных уплотнений ГТД / [Кондратюк, Э. В., Зиличихис, С. Д., Гребенников, М. А., Каминская, Л. Л.] // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 1. – С. 44–49.
14. Aslan-zada F. E. Review of sealing applications in gas turbine engines / Aslan-zada F. E., Mammadov V. A. // Theoretical and Applied Mechanics, Issue 3 (19), Baku, 2010, С. 98–105.
15. Gail A. MTU Brush Seal-Main Features of an Alternative Design, 36th Joint Propul / Gail A., Beichl S. : Conf. Paper, AIAA-2000-3375, Huntsville, 2000.
16. Аслан-заде Ф. Э. Эволюция керамических щеточных уплотнений на больших промышленных газотурбинных двигателях / Аслан-заде Ф. Э., Мамедов В.А. // Теоретическая и прикладная механика. – 2010. – № 4 (20), Баку. – С. 103–114.
17. Hearle J.W.S. High Performance Fibres / Hearle J.W.S. – Woodhead Publishing, 2001.
18. Fink J. K. High Performance Polymers / Fink J. K. – William Andrew Publishing, 2008.
19. Ruggiero E. J. Experimental Testing Techniques for Kevlar® Fiber Brush Seals / Ruggiero E. J., Allen J., Lusted M. // ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. – Vol. 3, Paper no. GT2009-60172, 2009. – С. 1301–1312.
20. Tong W. Brush seals and methods of fabricating them / Tong W., Zhao Z.-Q. // Sealing Technology, Vol. 2003, Issue 4, April 2003. – С. 12–14.

Поступила в редакцию 14.04.2011



**Мамедов Вугар Ариф огли, Аслан-заде Фархад Ельбей огли Застосування неметалічних щіткових ущільнень на великих індустриальних газотурбінних двигунах**

*Дана стаття описує переваги та еволюцію неметалевих щіткових ущільнень для забезпечення герметизації систем змащення турбомашин. У роботі, також, були обговорені експериментальні методи, розроблені для конструювання щіткових ущільнень з неметалевими волокнами. Представлено методики проведення експериментальних випробувань та заміру безпосередньої жорсткості волокон щіткових ущільнень. Також, наводиться коротке обговорення питань тепловиділення в зоні сполучення волокон і ротора, які складають основу успішної конструкції ущільнень з перспективою застосування на різних турбомашинах.*

**Ключові слова:** щіткове ущільнення, лабіринтне ущільнення, динамічна стійкість, кевлар, арамід.

**Mammadov Vugar Arif oglu, Aslan-zada Farhad Elbey oglu Application of non-metallic brush seals for large industrial gas turbine engines**

*This paper explores the advantages and development of non-metallic brush seals in turbomachinery oil sealing applications. The experimental methods developed for designing brush seals with non-metallic fibers were discussed in this paper. The techniques for experimental testing and measuring the direct stiffness of brush seal fibers were presented. Heat generation in the bristle-rotor contact zone which forms the basis for successful seal design for various perspective turbomachinery applications were discussed.*

**Key words:** brush seal, labyrinth seal, dynamic stability, kevlar, aramid.