

Т.В. Тарасенко, канд. техн. наук

М.М. Глазков, канд. техн. наук,

В.Н. Бадах, канд. техн. наук

Национальный авиационный университет, г. Киев

ЭРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОАППАРАТУРЫ

Наведено результати досліджень закономірностей кавітаційної ерозії в елементах апаратури авіаційних гідросистем. Запропоновано рекомендації по зниженню інтенсивності кавітаційної ерозії і підвищенню кавітаційної стійкості елементів гідравлічної апаратури.

Results of researches of regularities of cavitation erosion in streams of a hydraulic fluid through elements of the equipment of aviation hydraulic-circuit systems are reduced. Recommendations for lowering intensity of cavitation erosion and are given a heightening of cavitation stability (resistance) of elements of the hydraulic equipment.

Введение

Современные системы авиационного гидропривода высокого давления вынужденно эксплуатируются в режимах с развитой кавитацией потоков рабочей жидкости, что создаёт опасность разрушения деталей типа дросселей, распределителей, золотников и клапанов в результате эрозии металла.

В этих условиях обеспечение долговечности изделия во многом определяется выбором материала и учётом влияния режимов дросселирования потоков на развитие кавитационной эрозии. В гидроприводах объёмного типа кавитация имеет свои особенности, что обусловлено высокой вязкостью и значительным воздухо содержанием рабочей среды [1], а также высокими рабочими давлениями. Чрезвычайно важным и недостаточно изученным фактором является влияние на кавитационную эрозию условий дросселирования потоков в гидроагрегатах и устройствах, возникновения механизма кавитационной эрозии. Характер кавитационных разрушений зависит от пластичности металла. В пластичных металлах деформация приводит к появлению кратеров — поверхность износа имеет вид «лунного» ландшафта. Дальнейшие удары разрушают кольцевые кратеры. Металл разрушается по границам зерен, поскольку они препятствуют его пластическому течению. Хрупкие металлы под действием переменных напряжений повреждаются вследствие образования трещин.

Коллапс каверн в равной степени опасен не только для твердых тел, но и для жидкости. Высокие локальные давления и температуры приводят к деструкции жидкости. Непосредственное воздействие температуры и давления разрушает присадки, улучшающие индекс вязкости и смазывающую способность. Косвенно влияние состоит в том, что кавитация усиливает деградацию окисления, нитронизацию и коксообразование. В гидравлических жидкостях на нефтяной основе кавитация вызывает местное пригорание, известное как „дизельный эффект“.

В гидроприводах эрозия чаще всего порождается перемещающимися кавернами. Каверны возникают и раз-

рушаются по мере прохождения потоком через зоны низкого и восстановленного давления. Каверны в дроссельных каналах разрушаются сразу же за зоной наибольшего сжатия потока, где давление начинает восстанавливаться. Кавитационная эрозия локализуется в ограниченной зоне малой протяженности [2].

В противоположность — вихревая кавитация, порожденная струйным течением, отличается большей протяженностью, поскольку струя инициирует рост и коллапс каверн вдоль всей струи.

Эрозионный эффект возрастает многогранно, если кавитационные зоны первого и второго вида существуют одновременно. В первой зоне генерируются первичные каверны, а затем процесс усиливается в результате возникновения вихревых каверн. Присоединенные каверны коллапсируют, если течение неустойчиво или система функционирует в неустановившемся режиме с низкой частотой. Это обуславливает вялое течение эрозии при кавитации этого типа. Присоединенные каверны периодически срываются от кромок, на которых они возникают, что порождает появление разрушения уже от перемещающихся каверн.

Цель и задачи исследований

Исследования проводились с целью повышения ресурса элементов аппаратуры авиационных гидросистем на основе обоснования мер по снижению их кавитационной эрозии.

Основными задачами исследования были:

- исследование влияния параметров дросселирования и свойств рабочей жидкости на кавитационную стойкость металлов и сплавов, применяющихся для изготовления гидроаппаратуры авиационных гидросистем;
- разработка рекомендаций по локализации зон эрозии в цилиндрических и диффузорных каналах элементов гидроаппаратуры.

Результаты исследований

При выполнении данных исследований учитывались условия работы аппаратуры гидросистем самолетов при их эксплуатации.

Исследования проводились на специально спроектированной экспериментальной установке. С целью максимального приближения к реальным условиям, имеющим место в системах гидроприводов высокого давления, установка была снабжена специальными устройствами: камерой с конфузорно-диффузорным насадком и камерой с цилиндрическим насадком. Эти устройства достаточно хорошо моделируют открытую и вихревую формы кавитации [3], наиболее распространённые в дроссельных каналах элементов аппаратуры авиационных гидросистем. Опытные образцы, как правило, устанавливались под прямым углом к кавитационной струе, что сокращало время испытания.

В данных исследованиях в качестве критерия подобия был выбран относительный перепад давления $\Delta\bar{p}$ (рисунок 1). Для конфузорно-диффузорного насадка относительный перепад давления составлял $\Delta\bar{p} = 0.20$, а для цилиндрического насадка $\Delta\bar{p} = 0.62$. Исследования проводились при температуре рабочей жидкости 293–353°K. В качестве параметра интенсивности эрозии использовался унос массы образца, определяемый взвешиванием образца после определённой экспозиции кавитационной обработки.

Для исследований использовались образцы из материала Д16АТВ толщиной 2 мм и материала АмЦМ толщиной 0,7 мм. двух типов: образцы типа А, выполненные в виде шайб диаметром 25 мм с центральным отверстием диаметром 4 мм, и образцы типа Б без центрального отверстия для испытания в условиях вихревой кавитации (рисунок 5).

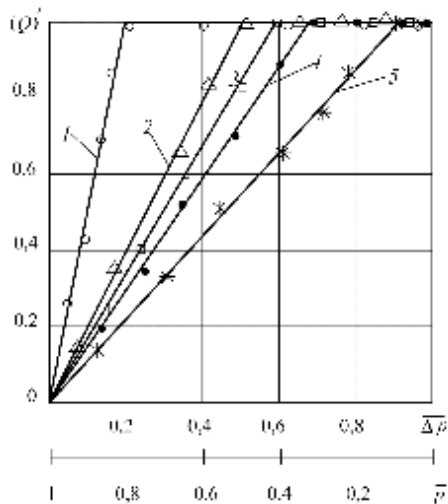


Рисунок 1 — Расходно-перепадные характеристики дроссельных устройств (рабочая жидкость — АМГ-10): 1 — насадок конфузорно-диффузорного типа; 2 — насадок Борда; 3 — цилиндрический насадок; 4 — насадок с прямоугольным каналом; 5 — диафрагма.

Исследования влияния эксплуатационных факторов (рабочего давления, противодействия, давления в резервном баке, температуры рабочей жидкости) проводились в конфузорно-диффузорном канале с образцами типа А с центральным отверстием из материала Д16АТВ.

При исследовании эрозионной стойкости бронз и латуней, широко применяемых для изготовления элементов гидравлических агрегатов высокого давления, использовались образцы из материалов БрОС10-10, БрОФ10-1, ЛМцСКН, БрОСН5-20-3, ВТ15, 1Х18Н9Т и стали 45.

При исследовании кавитационного истечения жидкости через диффузорный дроссельный канал определялся критический перепад давления $\Delta\bar{p}_{кр}$ для этого канала [4].

Для расчёта критического перепада давления, рассчитываемого по формуле [5], использовались уравнения расхода при бескавитационном истечении жидкости и при кавитации:

$$\Delta\bar{p}_{кр} = \left(\frac{\mu_{II}}{\mu_I} \right)^2,$$

где μ_I — коэффициент расхода насадка в целом; μ_{II} — коэффициент расхода входной части насадка.

$$Q_I = \mu_I S_{op} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{вх} - p_{вых})};$$

$$Q_{II} = \mu_{II} S_{op} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{вх}^{абс} - p_{кав})}.$$

Полученная формула позволяет определить критический перепад давления при известных значениях коэффициентов расхода μ_I насадка в целом и μ_{II} входной части насадка.

Коэффициенты расхода μ_I и μ_{II} для диффузорных насадков определялись экспериментально. С целью проверки методики расчёта результаты теоретических расчетов сравнивались с экспериментальными данными.

Установлено, что при входном давлении длина факела кавитации пропорциональна относительному перепаду давления (рис.2.). Относительный перепад давления при проведении эрозионных испытаний является критерием подобия, определяющим локализацию зон эрозии в диффузорных каналах дроссельных устройств. При этом протяжённость зоны кавитации для автомоделных режимов истечения не зависит от входного давления, если выполнено условие $\Delta\bar{p} = idem$.

Результаты исследования влияния на эрозию режимов дросселирования и свойств рабочей жидкости позволили заключить следующее. С увеличением перепада давления интенсивность кавитационной эрозии увеличивается по параболической зависимости, а угол наклона кривой уноса массы существенно зависит от прочностных свойств материала (рисунок 3).

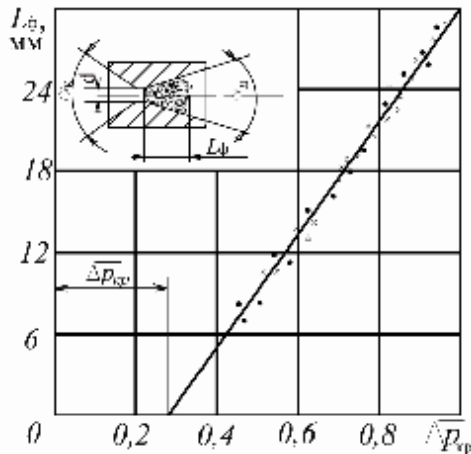


Рисунок 2 — Зависимость длины кавитационного факела в диффузоре насадка от перепада давления для $\alpha_k = 60^\circ$; $\alpha_a = 16^\circ$, $d = 1,5$ мм:
 Δ — $p_{вк} = 4$ МПа; \circ — $p_{вк} = 5$ МПа; \times — $p_{вк} = 6$ МПа;
 \bullet — $p_{вк} = 7$ МПа.

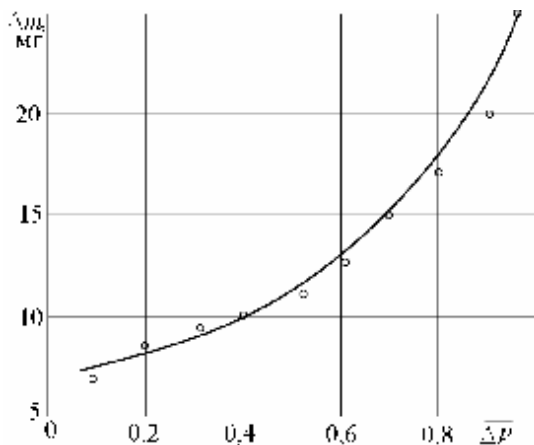


Рисунок 3. Зависимость уменьшения массы образца из сплава Д16 АТВ от безразмерного перепада давления ΔP ($p_{нас} = 0,3$ МПа, $p_{вк} = 16$ МПа; $T_p = 323^\circ$ К; $t = 15$ мин.)

Установлено наличие некоторого минимального перепада давления, ниже которого испытания на эрозию гидродинамическим способом неэффективны из-за низкой скорости уноса массы материала.

Для исследуемых материалов получены следующие эмпирические зависимости уноса массы образцов от давления:

$$\Delta m = a p_{вк}^n,$$

где Δm — унос массы, мг/ч; a — размерный коэффициент, мг/МПа·ч; n — показатель степени; $P_{вк}$ — абсолютное давление на входе в насадок, МПа.

Для сплава Д16АТВ: $a = 2,2 \cdot 10^{-4}$ мг/МПа·ч ;

$n = 4,08$;

Для сплава АМцМ:

$$a = 8,8 \cdot 10^{-4}$$
 мг/МПа·ч ; $n = 4,04$.

Путём варьирования абсолютного давления в баке установлена зависимость уноса массы от давления наддува и давления вакуума. Установлено, что при увеличении содержания воздуха в жидкости АМГ-10 за счёт увеличения давления наддува потеря массы уменьшается. Это объясняется тем, что рост давления в резервном баке влечёт за собой увеличение содержания воздуха в кавернах и, следовательно, уменьшение давления гидравлических микроударов при их схлопывании. Вакуумирование жидкости, наоборот, интенсифицирует эрозионный процесс.

Анализ влияния на процесс кавитационной эрозии времени экспозиции позволяет сделать вывод о том, что в инкубационный период потери массы в функции времени наработки нарастает параболически, а затем приобретает линейный характер.

Для определения влияния на скорость эрозии температуры рабочей жидкости были проведены специальные исследования с использованием в качестве рабочей жидкости авиакеросина и жидкости АМГ-10. Диапазон температур составлял 293–363° К.

Важной особенностью кавитационного износа образцов при повышении температуры рабочей жидкости является зависимость процесса от типа жидкости. Рост уноса массы образцов в жидкости АМГ-10 объясняется резким понижением её вязкости, так как давление насыщенных паров мало изменяется в указанном температурном диапазоне и не создаёт амортизирующего эффекта. Во то же время характер зависимости уноса массы от температуры для керосина ТС-1 даёт основания предполагать, что кавитационное разрушение в этом случае существенно зависит от давления насыщенных паров, поскольку его вязкость с ростом температуры снижается незначительно. Стабилизацию потери массы образцов при температурах свыше 335°К в керосине ТС-1 можно связать с демпфирующим действием повышенного давления насыщенных паров.

Были получены следующие эмпирические зависимости:

- для жидкости АМГ-10

$$\Delta m = 25,9 e^{6,6 \cdot 10^{-3}(T-273)} ;$$

- для авиакеросина ТС-1,

$$\Delta m = 22,3(T - 273)^{0,18},$$

где Δm — унос массы за 15 минут, мг; T — температура рабочей жидкости, °К; e — основание натурального логарифма.

Для оценки влияния вязкости на интенсивность эрозии элементов аппаратуры была проведена серия экспе-

риментов с использованием различных жидкостей, применяемых в системах воздушных судов (ТС-1, АМГ-10, МС-20).

Анализ полученных данных показывает, что интенсивность кавитационной эрозии снижается с ростом вязкости. Это обусловлено увеличением напряжения трения, уменьшением энергии разрушения каверн и скорости схлопывания.

При исследовании на кавитационную стойкость материалов образцов было установлено, что латунь ЛМцСКА является уникально стойким материалом в условиях кавитационной эрозии. Стойкость этой марки латуни выше стойкости нержавеющей стали 1Х18Н9Т и стойкости титанового сплава ВТ15. Сведения о кавитационной стойкости материалов приведены на гистограмме (рисунок 4).

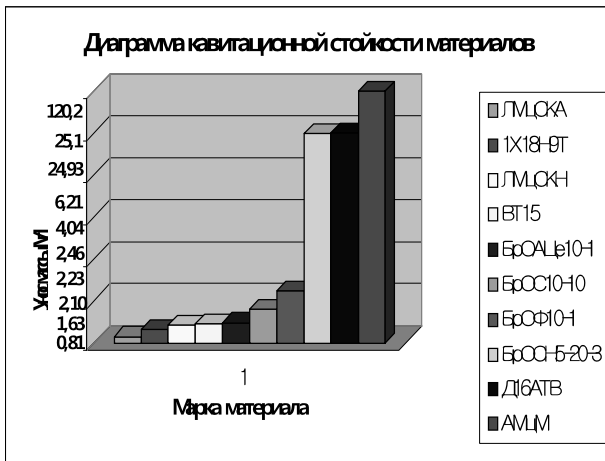


Рисунок 4 — Гистограмма сравнительной кавитационной стойкости материалов.

Введение в состав алюминиевых бронз присадки цезия повышает их стойкость к кавитационной эрозии. Это объясняется тем, что увеличение содержания цезия улучшает прочностные и механические свойства бронз, а также увеличивает пластичность поверхностных слоев.

Цель исследования эрозионной стойкости стали 45 было изучение возможности повышения ее стойкости путём борирования поверхностных слоёв образца.

Установлено, что композиционные борсодержащие покрытия системы железо–бор–55углерод повышают кавитационную стойкость стали. Композиционное боридное покрытие образует монолитную, беспористую поверхность, упрочняющуюся в процессе воздействия кавитационных импульсов, что положительно влияет на сопротивление стали 45 кавитационному износу.

Исследования показали, что важным фактором, влияющим на эрозию, является относительная длина дроссельного канала. Было установлено, что с увеличением длины цилиндрического канала растут гидравлические потери и уменьшается унос массы материала при эрозии. При относительной длине свыше 10 единиц потеря массы стабилизируется и максимум эрозии смещается в сторону меньших значений противодавления.

Существенную роль при реализации эрозионных экспериментов играет расстояние между образцом и соплом, а также угол падения струи на образец (рисунок 5).

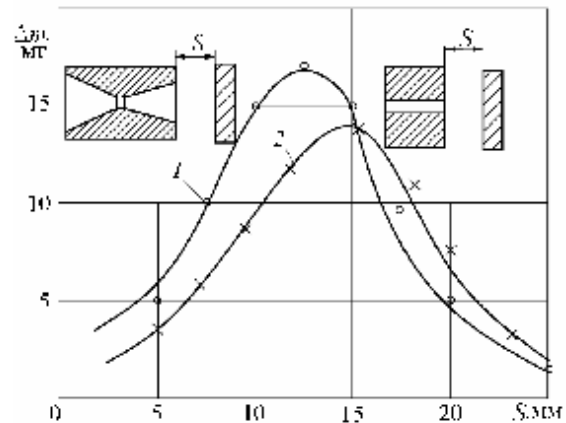


Рисунок 5 — Зависимость уноса массы образца сплава Д16 АТВ от расстояния S между насадком и мишенью: 1 – конфузорно-диффузорный насадок, $\alpha_{конф} = 60^\circ$, $\alpha_{диф} = 16^\circ$; 2 – цилиндрический насадок

$$(p_{нас} = 0,3 \text{ МПа}, p_{вх} = 15 \text{ МПа}, \overline{\Delta p} = 0,93; T_p = 323 \text{ }^\circ\text{K}; t = 15 \text{ мин.})$$

Установлено, что положение максимума эрозии зависит не только от противодавления, но и от дистанции между насадком и образцом. Наибольшая потеря массы наблюдается на расстоянии 10–15 диаметров насадка от среза насадка. Отмечается, что при увеличении дистанции максимум уноса массы при эрозии сдвигается в сторону меньших значений противодавления. Увеличение противодавления выше оптимального приводит к уменьшению интенсивности эрозии.

Выводы

1. Исследована кавитационная стойкость различных металлов при кавитационной эрозии в среде жидкости АМГ-10 в зависимости от режимов дросселирования, свойств рабочей жидкости, геометрии дроссельного канала и режима дросселирования. Показано, что положение максимума эрозионного разрушения за цилиндрическими дроссельными каналами зависит от противодавления и расстояния от образца до насадка.

2. Определены области рационального применения кавитационных насадков двух типов.

Конфузорно-диффузорные насадки рекомендуется применять при исследовании кавитационной стойкости металлов и сплавов.

Цилиндрические насадки рекомендуется применять для интенсификации технологических процессов очистки и промывки, поскольку в этом случае зона эрозионного воздействия локализуется в струе за насадком и имеет значительную протяжённость, а максимальный эффект достигается при относительно малых противодавлениях.

Удельная скорость уноса массы с поверхности об-разца в конфузorno-диффузорном насадке на порядок выше скорости уноса в камере с цилиндрическими на-садками.

3. Проведены сравнительные исследования кавита-ционной стойкости бронз и латуней БрОФ10-1, БрОС10-1, БрОАЦе10-1, БрОСН5-20-3, ЛМцСКА, ЛМцСКА, широко применяющихся в гидромашиностроении.

4. Экспериментально подтверждено, что латунь ЛМцСКА является уникально стойким материалом к ка-витационной эрозии. Стойкость этой марки латуни выше стойкости нержавеющей стали 1Х18Н9Т и выше стойкос-ти титанового сплава ВТ15.

5. Полученные результаты могут быть использованы также для обоснования выбора рациональных парамет-ров функциональных кавитационных устройств, предназ-наченных для целей очистки и промывки систем гидро-приводов от загрязнений. Решение этой задачи требует дополнительных специальных исследований.

Литература

1. Глазков, М.М. Кавитация в жидкостных системах воздушных судов / М.М. Глазков, В.Г. Ланецкий, Н.Г. Ма-каренко, И.П. Челюканов. — К.: КИИГА, 1987. — 62 с.

2. Пирсол, И. Кавитация. / И. Пирсол — М.: Мир, 1975. — 94 с.

3. Авторское свидетельство на изобретение “Способ очищения внутрішньої поверхні трубопроводу та пристрій для його здійснення” / М.М.Глазков, В.Н.Куренков, Т.В.Та-расенко. UA 51481 А.

4. Арзуманов, Э.С. Кавитация в местных гидравли-ческих сопротивлениях / Э.С. Арзуманов. — М.: Энергия, 1978. — 303 с.

5. Пат. 43544 Україна, МПК В01F 5/00. Кавітаційний спо-сіб визначення коефіцієнтів стиснення і швидкості струменя рідини при витіканні крізь отвори і насадки / Глазков, М.М., Ланецкий, В.Г.; заявник і патентотримач Глазков, М.М., Ланецкий, В.Г. — № u2009 01683; заявл. 26.02.09; опубл. 25.08.09, Бюл. № 16.

Надійшла 02.03.2012 р.