

На правах рукописи
УДК 620.193.16; 621.65.03

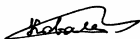
КОВАЛЕВ АРТЕМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫБОРА
РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ГИДРОМАШИН И ГИДРОАГРЕГАТОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ
ИХ КАВИТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения,
05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2014

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Шашурин Василий Дмитриевич

Научный консультант:

кандидат технических наук, доцент
Семенов Станислав Евгеньевич

Официальный

Иванайски

кафедры «Техн
государственный

Тимушев

У2051824
Ковалев А.А.
Программно-методическое
обеспечение выбора
рациональных
конструкторско-технологич...
2014
0,00

ических наук, профессор
У ВПО «Московский
МАМИ»

ических наук, профессор,
ий институт

2051824

Возвратите книгу не позже
обозначенного здесь срока

ный научно-
ИИАГ»)

14 20

Московском
а по адресу:

ых печатью,

Московского

доктор технических наук,
доцент

Михайлов Валерий Павлович

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2051824

Ковалев А.А. Программно-ме

-825

АП-А 4/16

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Проблема обеспечения заданных показателей надежности является ключевой при конструкторско-технологическом проектировании и производстве новых, а также совершенствовании существующих образцов изделий современного машиностроения.

В полной мере это относится к изделиям, работающим в условиях гидродинамического нагружения, к которым относятся, например, насосные агрегаты, движительно-рулевые колонки судов и др. Общим в развитии указанных изделий является направление, связанное с повышением мощности и производительности при одновременном увеличении их ресурса. Как следствие, ответственные детали изделий (рабочие колеса насосов, гребные винты судов и т.д.) эксплуатируются во все более жестких условиях гидродинамического нагружения рабочих поверхностей, определяя тем самым все необходимые предпосылки к повышению интенсивности их износа и, следовательно, снижению показателей надежности изделия в целом.

Один из ключевых факторов, определяющих характер износа рабочих поверхностей деталей, связан с интенсивностью протекания кавитационных процессов (кавитационный износ).

В качестве фактора, при конструкторско-технологическом проектировании и производстве изделий данного класса, значительная роль отводится мероприятиям, направленным на обеспечение кавитационной стойкости ответственных деталей на всех режимах их эксплуатации. Комплексно и взаимосвязанно они включают в себя работы по нахождению рациональных конструкторских решений, поиск кавитационностойких (применительно к заданным условиям эксплуатации) конструкционных материалов, разработку технологического процесса, обеспечивающего формирование рабочих поверхностей деталей, устойчивых к этому виду внешнего воздействия.

Необходимо отметить, что вышеперечисленные работы характеризуются высокой трудоемкостью, а также недостаточной достоверностью получаемых результатов, что не позволяет осуществлять ускоренную разработку и запуск в производство приоритетных изделий с высокими техническими показателями. Во многом это связано с расширением номенклатуры конструкционных материалов отрасли, технологическими возможностями в создании материалов с новыми физико-механическими свойствами и различных видов функциональных покрытий, по которым еще не накоплен опыт промышленной эксплуатации.

В этой связи представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на обеспечение кавитационной стойкости ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов за счет разработки программно-методического обеспечения принятия конструкторско-технологических решений.

Целью диссертационной работы является разработка программно-методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов с целью повышения их кавитационной стойкости.

Основные задачи исследования:

1. Разработать алгоритм и математическую модель, позволяющую прогнозировать кавитационный износ рабочих поверхностей деталей гидромашин и гидроагрегатов в зависимости от условий эксплуатации и конструкторско-технологических особенностей их изготовления, на основании анализа физических процессов, протекающих на поверхности деталей при их кавитационном изнашивании. Провести моделирование работы типового изделия, эксплуатирующегося при заданном режиме в гидродинамической среде.
2. Обосновать целесообразность и разработать методику ускоренных испытаний материалов деталей гидромашин и гидроагрегатов на этапе их конструкторско-технологического проектирования, которая позволит оценить стойкость материалов к кавитационному воздействию с учетом технологии изготовления деталей. Разработать техническую систему для ее реализации.
3. Определить кавитационную стойкость типовых материалов деталей гидромашин и гидроагрегатов на основании математического моделирования кавитационного износа рабочих поверхностей деталей и ускоренных испытаний. Исследовать влияние различных технологий изготовления ответственных деталей на кавитационную стойкость материалов.
4. Разработать инженерную методику выбора рациональных кавитационно-стойких материалов с учетом технологии изготовления ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось посредством теоретических и экспериментальных исследований. При решении теоретических задач использованы основные положения теории механики сплошной среды (разделы: гидродинамика, теория напряженного и деформированного состояния, теория пластичности) и численных методов с использованием специализированных средств трехмерного твердотельного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием следующего оборудования: установка для гидрорезки материалов и подачи образцов, система измерения силы воздействия высокоскоростной струи на образцы, электронный микроскоп и др.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель кавитационного износа рабочих поверхностей деталей гидромашин и гидроагрегатов, в которой изменения значенных выходных параметров во времени (скорость уноса массы материала, глубина разрушения материала детали) связаны с характеристиками гидродинамического нагружения детали, интенсивностью кавитационного воздействия и напряженно-деформированным состоянием поверхности детали. Модель позволяет предварительно оценивать кавитационную стойкость материалов деталей в зависимости от условий их эксплуатации и конструкторско-технологических особенностей их изготовления.
2. Разработана расчетно-экспериментальная методика ускоренных испытаний, реализуемая на основе физического моделирования соударения высокоскоростной гидроструи с поверхностью мишени и расчетной модели выбора режима гидронагружения. Методика позволяет выбирать рациональную технологию изготовления деталей гидромашин и гидроагрегатов по критерию обеспечения

заданной кавитационной стойкости материалов деталей. Установлено, что замена абразивной обработки рабочих поверхностей на лезвийную на заключительном этапе технологического процесса обеспечивает повышение кавитационной стойкости детали до 30%.

3. Формализован подход к созданию базы данных по кавитационной стойкости типовых конструкционных материалов с учетом технологии изготовления деталей гидромашин и гидроагрегатов при различных режимах их эксплуатации.

Практическая значимость работы состоит в инженерной обобщенной методике выбора рациональных кавитационностойких материалов и технологий изготовления ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов на этапе конструкторско-технологического проектирования. Методика включает в себя два этапа:

- предварительная оценка кавитационной стойкости и последующее ранжирование материалов на основе математического моделирования кавитационного износа рабочих поверхностей деталей гидромашин и гидроагрегатов с использованием разработанного программного обеспечения;

- выбор рационального материала и технологии изготовления детали на основе обработки результатов ускоренных испытаний на кавитационную стойкость и последующем сопоставлении полученного приведенного параметра интенсивности кавитационного износа с учетом масштабного коэффициента с заданным ресурсом до капитального ремонта изделия.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертационной работе автором, подтверждена удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, а также практическим использованием полученных результатов в производственных условиях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная математическая модель кавитационного изнашивания деталей, позволяющая предварительно оценивать кавитационную стойкость материалов широкой номенклатуры для заданного режима эксплуатации изделия.
2. Результаты оценки кавитационной стойкости характерных материалов применительно конкретному изделию (рабочее колесо насоса НМ 1250-260), обосновывающие возможности предварительной оценки кавитационной стойкости материалов и их ранжирования посредством разработанной математической модели кавитационного износа рабочих поверхностей деталей гидромашин.
3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обоснование целесообразности применения расчетно-экспериментальной методики ускоренных кавитационных испытаний и подтверждение влияния режимов эксплуатации изделия и технологии изготовления деталей на кавитационную стойкость применяемых для них материалов.
4. Разработанная инженерная методика, позволяющая сравнительно оценивать кавитационную стойкость материалов деталей гидромашин и гидроагрегатов, проводить их ранжирование и выбирать из них рациональные материалы с учетом технологии изготовления ответственных деталей посредством ускоренных кавитационных испытаний и математической модели кавитационного износа.

Личный вклад автора. Автором проведен анализ конструкторско-технологических особенностей производства гидромашин и гидроагрегатов, на основании которого показана необходимость обеспечения кавитационной стойкости рабочих поверхностей ответственных деталей. Обоснована актуальность разработки программно-методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов. Выполнен анализ физических процессов, протекающих на рабочих поверхностях деталей при их кавитационном изнашивании, на основании которого разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать кавитационный износ рабочих поверхностей деталей гидромашин и гидроагрегатов в зависимости от условий эксплуатации и конструкторско-технологических особенностей их изготовления. Разработана расчетно-экспериментальная методика ускоренных испытаний материалов, которая позволяет оценивать стойкость материалов к кавитационному воздействию с учетом технологии изготовления деталей. Разработана техническая система для ее реализации. Определена кавитационная стойкость типовых материалов отрасли. Исследовано влияние различных технологий изготовления ответственных деталей на кавитационную стойкость материалов. Разработана инженерная методика выбора рациональных кавитационностойких материалов с учетом технологии изготовления ответственных деталей.

Апробация результатов работы. Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры технологии приборостроения ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2010-2013 гг.; на 23-й Международной инновационно-ориентированной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2011), ИМАШ РАН, Москва, 2011; на конференции «Современные научные достижения», Чехия, Прага, 2012; на 36-х Академических чтениях по космонавтике, Москва, 2012.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были реализованы в рамках НИР и ОКР, проводимых в НИИ «Конструкционные материалы и технологические процессы», «Энергомашиностроение» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, и внедрение осуществлялось в ФГБУ ВНИИПО МЧС России, что подтверждено соответствующими актами.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 10 научных работах, из них 4 в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка используемой литературы и приложения. Содержит 157 страниц, в том числе 61 иллюстрация и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, показана ее актуальность, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Указаны состав и структура диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ конструкторско-технологических особенностей производства ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов,

а также сформулирована проблема обеспечения заданных показателей надежности рассматриваемых изделий.

Надежность является одной из важнейших характеристик, учитываемых на этапах разработки, производства и эксплуатации различных технических систем (ТС). Развитие техники требует обеспечения и повышения показателей надежности ТС, что является одной из ключевых задач при конструкторско-технологическом проектировании.

Эта задача в полной мере относится к гидромашинам и гидроагрегатам, работающим в условиях гидродинамического нагружения рабочих поверхностей деталей. Надежность этих изделий определяется совокупностью показателей надежности их базовых (ответственных) деталей, например, рабочих колес насосных агрегатов, гребных винтов движительно-рулевых колонок судов и т.п. В подобных ТС важны высокие показатели надежности, так как резервирование ответственных деталей в них не предусмотрено. Для проведения ремонта или замены ответственных деталей требуется длительное время и высокая трудоемкость.

Проблема обеспечения заданных показателей надежности на сегодняшний день становится более значимой в виду требований по повышению мощности, производительности, КПД, предъявляемых к гидромашинам и гидроагрегатам. Это влечет за собой расширение номенклатуры конструкционных материалов, применение различных наплавов и разработку новых технологий изготовления ответственных деталей изделий.

Одной из основных причин формирования постепенного отказа рассматриваемых изделий является кавитационный износ рабочих поверхностей ответственных деталей, приводящий к снижению их прочностных параметров и ухудшению рабочих характеристик изделий в целом.

Анализ работ в сфере кавитационного износа И.Н. Богачева, Ю.А. Гривина, С.П. Козырева, М.М. Абачараева, А.Т. Ellis, С.Ф. Naude, M.S. Plesset, С.М. Preece и других показал, что доминирующим фактором изнашивания деталей является ударное механическое воздействие на их рабочую поверхность.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день в отраслевых стандартах отсутствуют параметр «кавитационная стойкость» среди эксплуатационных свойств конструкционных материалов, единый критерий оценки кавитационной стойкости материалов и инженерные методики, позволяющие, не проводя длительных испытаний, осуществлять выбор рациональных материалов и технологий изготовления ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов, обеспечивающих их работоспособное состояние в течение заданного времени до капитального ремонта.

В соответствии с этим, в настоящее время при конструкторско-технологическом проектировании изделия проводятся специализированные кавитационные испытания, включающие в себя доводочные и предварительные. В рамках данных испытаний выполняются работы по выбору рациональных конструкторских решений, поиску кавитационностойких материалов (применительно к заданным условиям эксплуатации) и разрабатывается технологический процесс, обеспечивающий формирование рабочих поверхностей деталей, устойчивых к данному виду воздействия.

В свою очередь, на доводочном этапе проводятся испытания образцов материалов деталей с использованием таких основных методов, как струеударные, ультразвуковые, проточные в гидродинамических трубах и др. Основой перечисленных методов послужили работы М.Г. Тимербулатова, С.П. Козырева, А.А. Горшкова, В.Я. Карелина, Р. Haller, R.T. Кнапп и других, в которых рассматриваются как теоретические, так и практические вопросы, связанные с кавитационной стойкостью материалов. Результатами этих испытаний являются данные по уносу массы образцов материалов, по соотношению которой оценивается их кавитационная стойкость. Тем самым, значимость данного этапа испытаний чрезвычайно велика, так как от правильности принимаемых на этом этапе решений зависят сроки и себестоимость освоения новых изделий.

Необходимо отметить, что в настоящее время испытания на кавитационную стойкость проводятся на одном режиме нагружения, без учета реальных условий эксплуатации изделия, тем самым снижается достоверность получаемых результатов. Немаловажным представляется и то, что остается без внимания технология изготовления деталей, от которой во многом зависит кавитационная стойкость рабочих поверхностей. Все это в сочетании с достаточно высокой трудоемкостью не позволяет осуществлять ускоренную разработку и запуск в производство ответственных изделий с высокими техническими показателями. На ряду с этим, в связи с расширением номенклатуры конструктивных материалов, технологических возможностей в создании материалов с новыми физико-механическими свойствами (в том числе наноматериалов) и различных видов функциональных наплавов, по которым еще не накоплен опыт промышленной эксплуатации, значимость поставленной задачи увеличивается.

Исходя из вышесказанного, *представляется актуальной* задача разработки программно-методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов с целью повышения их кавитационной стойкости.

Вторая глава посвящена исследованию кавитационного износа деталей гидромашин и гидроагрегатов. Теоретическая оценка интенсивности кавитационного износа учитывает конструкторско-технологические особенности изделий, режимы его эксплуатации, свойства рабочей гидродинамической среды, интенсивность кавитационного воздействия и напряженно-деформированное состояние материала детали.

На Рис. 1. приведен разработанный алгоритм теоретической оценки кавитационного износа деталей, состоящий из 4-х модулей.



Рис. 1. Алгоритм теоретической оценки кавитационного износа деталей

Предполагается, что кавитационный износ деталей возникает за счет периодического воздействия на их рабочую поверхность микрогидроструй (МКГС), образующихся в результате схлопывания кавитационных каверн во внешней гидродинамической среде.

Моделирование работы изделия во внешней рабочей гидродинамической среде с заданным режимом эксплуатации позволило определить изменение внешнего полного давления от времени $p(t)$.

Гидродинамическое моделирование основано на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (уравнения сохранения количества движения, осредненные по времени) с использованием $k-\omega$ SST модели турбулентности.

Моделирование проводилось посредством интегрирования системы соотношений вычислительной гидродинамики (CFD) для насоса типа НМ 1250-260. По чертежам рабочего колеса насоса была создана трехмерная модель лопатки, которая затем была интегрирована в программу гидродинамического моделирования для численного гидродинамического расчета течений в насосе.

Решение проводилось в стационарной постановке, расчетная сетка при моделировании была неподвижна и содержала 2 млн. ячеек. Задавались граничные условия: скорость потока на входе – 7,9 м/с и давление на выходе – 1,9 МПа. В результате этого давление на входе насоса снизилось, и на тыльной стороне лопатки рабочего колеса появилась кавитация.

В результате моделирования получены зависимости распределения давления $p(x)$ и скорости $v(x)$ потока течения в области появления кавитации. На основе значений $p(x)$ и $v(x)$ была получена зависимость $p(t)$.

Для получения модели изменения внешнего давления от времени массив данных $P(t)$ был разложен в ряд Фурье, используя приложение «Curve Fitting Toolbox» в программной среде Matlab. В результате получено следующее выражение для давления $p(t)$:

$$p(t) = 4,264 \cdot 10^4 + 2,308 \cdot 10^4 \cos(504t) - 1,682 \cdot 10^5 \sin(504t) - 6605 \cdot \cos(1008t) - 3,99 \cdot 10^4 \sin(1008t) - 2,111 \cdot 10^4 \cos(1512t) - 2,148 \cdot 10^4 \sin(1512t) \quad (1)$$

Полученное давление $p(t)$, изменение которого представлено на Рис. 2а, используется как внешнее давление среды для моделирования динамики кавитационного пузыря. Период изменения давления равен $T = 12,46 \cdot 10^{-3}$ с.

Моделирование интенсивности кавитационного воздействия на поверхность детали позволило определить скорость, частоту воздействия и геометрические параметры микрогидроструи.

В основе этого моделирования лежит динамика пароголового пузырька Релея-Плессета, уравнение которого в общем виде представлено в формуле 2:

$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} + \frac{4\mu \dot{R}}{R} = \frac{p_\infty - p(t)}{\rho} + \frac{p_{v0}}{\rho} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где R – радиус пузырька, м; R_0 – радиус пузырька в начальный момент времени, м; $p(t)$ – давление снаружи пузырька (каверны), Па; p_∞ – давление насыщенного пара, Па; p_{v0} – давление газа в начальный момент времени, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м ; μ – динамическая вязкость жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$; γ – показатель адиабаты.

Было проведено моделирование по уравнению Релея-Плессета (2) для внешнего давления (1) при t в диапазоне от 0 до $12,46 \cdot 10^{-3}$ с. Был принят начальный радиус пузырька $R_0 = 150 \cdot 10^{-6}$ м, который образуется в результате коагуляции соизмеримых более мелких зародышей радиусами $25 \cdot 10^{-6}$ м. Значение внешнего давления в начальный момент времени при $t = 0$ $p(t_0) = 37995 \text{ Па} \approx 38 \text{ КПа}$. Свойства внешней среды при нормальных условиях: $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$ (вода), $p_n = 2338 \text{ Па}$, $\mu = 1004 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\sigma \approx 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$, $\gamma = 1.3$.

В результате была получена физическая картина эволюции кавитационного пузырька, представленная на рисунке 2б. На нем видны две характерные стадии кавитационного пузыря – стадия расширения и схлопывания, что соответствует времени $t_{\text{р\>к}} = 9 \cdot 10^{-3}$ с и $t_{\text{схл}} \approx 3 \cdot 10^{-3}$ с ($T - t_{\text{р\>к}}$). Таким образом, из ядра кавитации радиусом $R_0 = 150 \cdot 10^{-6}$ м образовалась стационарная каверна размером 0,05 м при давлении $p_{\text{сп}} = 1,68 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

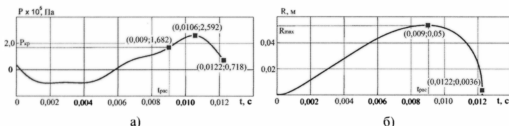


Рис. 2. Зависимости внешнего давления (а) и радиуса пузырька (б) от t

Т.к. модель Релея-Плессета не в полной мере описывает поведение пузырька в последний момент своего существования, то оценим скорость МКГС на последней стадии с помощью следующего выражения, полученного на основании энергетических соотношений:

$$U = \sqrt{2/3(p_{\text{сжатия}}/\rho) \left((R_{\text{max}}/R)^3 - 1 \right) \cdot \sin \alpha}, \quad (3)$$

где α – угол атаки микрогидроструи к поверхности твердого тела.

Для нахождения скорости микрогидроструи при схлопывании стационарной каверны радиуса $R = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м необходимо определить радиус, до которого она схлопнется. В нашем случае эта величина составила $R = 0,26 \cdot 10^{-3}$ м.

По формуле 3 была оценена скорость МКГС при схлопывании каверны для следующих значений: $p_{\text{сжатия}} = 7,18 \cdot 10^4 \text{ Па}$, $R_{\text{max}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $R = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, угол атаки $\alpha = 90$ градусов. Максимальная скорость МКГС получилась равной $U = 356 \text{ м/с}$. Среднее значение скорости МКГС составило $U_{\text{ср}} = 178 \text{ м/с}$ при угле атаки МКГС $\alpha = 30$ градусов.

Частота воздействия на мишень составила $\Omega = 80 \text{ уд/с}$ на единичную площадь поверхности детали $S_1 = 21,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, при условии, что схлопывание

кавитационной полости происходит непрерывно и МКГС образуется возле одной и той же единичной площади поверхности детали.

Моделирование напряженно-деформированного состояния материала детали позволило оценить давление, возникающее в материале, параметры напряжений (главные и эквивалентные) в нем и определить возможность возникновения пластической деформации в результате удара МКГС на мишень под разными углами атаки.

Для оценки напряженно-деформированного состояния материала при однократном воздействия на него МКГС была использована динамическая упругопластическая модель Купера-Саймондса с кинематическим упрочнением.

Наступление пластических деформаций в материале определялось по критерию Мизеса. Критерий пластичности для выбранной модели, выраженный через главные нормальные напряжения, имеет следующий вид:

$$\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / \sqrt{2} \leq \sigma_{\text{Т.двн}} \quad (4)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения, Па.

Для описания объемной сжимаемости микрогидроструи использовалось уравнение состояния Ми-Грюнайзена. Сжимаемость воздуха описывается изотропическим соотношением $P = A(\rho/\rho_0)^k$, где A и k – константы.

Объемная сжимаемость твердого тела описывается согласно обобщенному закону Гука в упругой области и диаграммой Прандтля в пластической области.

Входными данными для модели оценки напряженно-деформированного состояния материала являются геометрия, физические свойства, скорость и угол атаки МКГС, а также физико-механические свойства материала детали (мишени).

Расчет выполнялся на лагранжево-эйлеровых сетках (ALE) размерностью 1506890 и 979317 элементов, построенных в препроцессоре с помощью решателя LS-DYNA 3D v.971 R6. В сетке мишени была задана искусственная нерегулярность (сгущение) в зоне контакта с шагом 40 мкм. На границе с центральной областью подложки шаг сетки был увеличен до 200 мкм, а на периферии до 1 мм для сокращения объема расчетной модели и времени расчета.

На Рис. 3 представлена физическая картина взаимодействия соударяющейся с мишенью МКГС ($U = 356$ м/с, под углом в 30 градусов) на момент времени 7 мкс.

На Рис. 4 представлены профили изменения давления на контактной поверхности и эквивалентные напряжения по Мизесу в мишени различных материалов. По данным зависимостям видно, что амплитуда давлений составляет 77-91 МПа, напряжений по Мизесу – 126-159 МПа, а длительность одного удара МКГС о поверхность мишени – 20 мкс.

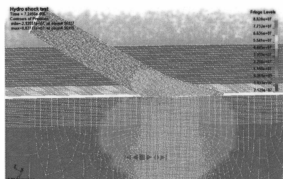


Рис. 3. Внешний вид взаимодействия МКГС с мишенью

При скорости микрогидроструи $U = 356$ м/с и угле атаки в 30 градусов для всех материалов область пластического деформирования отсутствует (пики напряжений по Мизесу не превышают пределов текучести (динамических)). В результате этого, поверхность материала детали разрушается под действием циклического воздействия микрогидроструи, что свидетельствует об усталостном механизме разрушения рассматриваемых материалов.

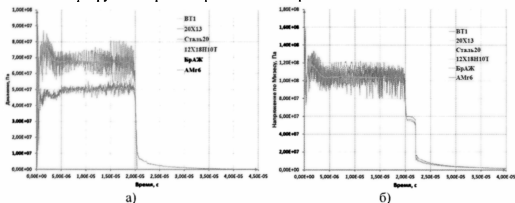


Рис. 4. а) Профиль изменения давления на контактной поверхности и б) эквивалентного напряжения по Мизесу в материалах детали

В связи с этим, является целесообразным оценивать кавитационную стойкость материалов на основании моделирования циклического нагружения.

Моделирование кавитационного износа детали позволило оценить кавитационную стойкость материалов детали и провести их ранжирование.

В основе моделирования кавитационного износа детали лежит модель усталостного разрушения материала детали. Это моделирование проводилось методом конечных элементов в специализированной программной среде.

Входными данными для этого расчета в качестве нагрузки был выбран профиль уровня напряжений (Рис. 4б), конечно-элементная сетка и модель материала.

В результате моделирования определяются значения количества циклов до разрушения $N_{\text{кр}}$ за инкубационный период материала детали $t_{\text{инк}}$.

Оценивать материалы деталей по стойкости к кавитационному воздействию предлагается по следующему приведенному параметру:

$$T_k = \left(H \cdot S \cdot \rho_m + J \cdot K \cdot N_{\text{кр}} \cdot k \right) / J \cdot \Omega \cdot k \quad (5)$$

где T_k – приведенный параметр интенсивности кавитационного износа, с; H – критическая глубина разрушения детали, м; S – площадь поверхности материала, подверженной кавитационному воздействию, м^2 ; ρ_m – плотность материала мишени, кг/м^3 ; J – скорость уноса массы материала образца, кг/удар ; $J = \left(\rho_m \pi (2a)^3 / 4 \right) \left(0.023 / (K \cdot N_{\text{кр}})^{0.7} \right)$; a – радиус контактной площадки, м; $N_{\text{кр}}$ – количество циклов нагружения за инкубационный период, удар; Ω – частота воздействия кавитирующей среды, удар/с; $K = N_{\text{исп}} / N_{\text{кр}}$ – коэффициент; $N_{\text{исп}}$ – экспериментальное количество циклов нагружения за инкубационный

период, удар; k – коэффициент, учитывающий коррозионное воздействие кавитирующей среды.

В заключительной части настоящей главы, используя приведенные выше зависимости, было проведено моделирование кавитационного износа с целью оценки кавитационной стойкости характерных материалов применительно конкретному изделию: рабочее колесо насоса НМ 1250-260. Результаты расчетов (при $H = 2$ мм, $\Omega = 80$ удар/с, $a = 0.26$ мм, $K, k = 1$.) приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры кавитационной стойкости материалов детали

Параметры	Материалы				
	20Х13	БрАЖ9-4	Сталь 20	12Х18Н10Т	АМг6
$N_{кр}$, удар	$8,0 \times 10^9$	$1,7 \times 10^6$	$9,1 \times 10^5$	$4,5 \times 10^5$	$4,9 \times 10^3$
J , мг/удар (скорость уноса массы)	$2,3 \times 10^{-9}$	$8,7 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-5}$
T_k (без учета K), время	3,7 лет	19,2 час	11,8 час	6,8 час	14,4 мин

Как следует из анализа приведенных выше данных, разработанная математическая модель позволяет определять кавитационную стойкость различных конструкционных материалов, учитывая конкретные условия эксплуатации проектируемого изделия. Вместе с тем следует отметить, что ряд рассматриваемых материалов имеют достаточно близкие значения $N_{кр}$, J , T_k (Таблица 1), что снижает объективность данных по ранжированию материалов. Необходимо также отметить, что в расчетных моделях рассматриваются в некотором роде «идеальные» материалы (однородные, бездефектные, без остаточных напряжений), не учитываются и характеристики поверхностного слоя детали, формирующегося на финишных операциях механической обработки. В связи с этим, разработанная модель может эффективно использоваться в первую очередь на первом этапе конструкторско-технологического проектирования нового изделия, проводя предварительную оценку кавитационной стойкости материалов детали с учетом заданных условий эксплуатации изделия.

Таким образом, на втором этапе представляется целесообразным разработать методику ускоренных испытаний на кавитационную стойкость материалов деталей, базирующуюся на разработанной обобщенной математической модели кавитационного износа, и средства технической реализации. Применение данной методики на этапе конструкторско-технологического проектирования изделия позволит оценивать параметры кавитационной стойкости материалов и выбирать из них наиболее кавитационностойкие с учетом технологии изготовления детали и заданных условий эксплуатации изделия.

Третья глава посвящена разработке расчетно-экспериментальной методике ускоренных испытаний на кавитационную стойкость материалов деталей изделий, работающих в условиях гидродинамического нагружения, позволяющей учитывать технологические особенности изготовления деталей.

Исходя из поставленной задачи, методика должна обеспечивать получение необходимого объема информации о кавитационной стойкости материалов в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях, посредством

физического моделирования разнообразных условий гидродинамического нагружения (кавитационного воздействия) и оценки отклика образцов материалов.

Формирование режимов проведения ускоренных испытаний осуществляется за счет увеличения частоты воздействия Ω , а также повышения амплитуды нагружения (давления p_c), соответствующего условию, при котором взаимодействие МКГС с рабочей поверхностью детали происходит при максимально возможном угле атаки (90 градусов), сохраняя при этом необходимую скажность (T/τ) импульсного воздействия, где $T \gg \tau$ (Рис. 5).

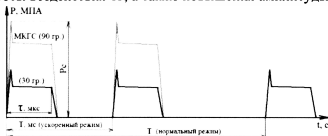


Рис. 5.
Схематичный профиль нагружения поверхности детали для различных режимов ускоренных испытаний

Такого рода физическое моделирование кавитационного процесса (в широком диапазоне возможных режимов эксплуатации изделия) возможно реализовать в условиях, когда имеет место взаимодействие осесимметричной высокоскоростной гидроструи (ВГС), истекающей из соплового насадка с полным давлением (p_c) в свободное пространство, с рабочей поверхностью детали.

В этих условиях, значение величины давления p_c на поверхности детали определяется по предложенной математической модели исходя из заданных условий эксплуатации изделия. В свою очередь, заданная частота воздействия может быть обеспечена либо реализацией импульсного режима истечения ВГС, либо дискретностью ввода исследуемого образца в зону взаимодействия с ВГС.

Получаемые в результате ускоренных испытаний диаграммы кавитационного износа образцов (зависимость уноса массы материала от времени воздействия), несут информацию как об инкубационном периоде ($t_{инк}$) материала детали, так и непосредственно об интенсивности разрушения материала детали ($\partial M/\partial t$). Как следствие, эта информация позволяет оценивать как устойчивость материала детали к данному виду воздействия, так и влияние на этот процесс технологических особенностей изготовления детали (в первую очередь заготовительных и финишных операций). Алгоритм оценки кавитационной стойкости материалов с учетом технологии изготовления деталей имеет вид, представленный на Рис. 6.

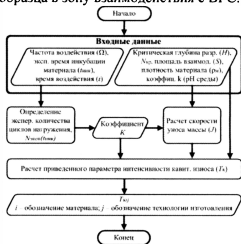


Рис. 6.

Алгоритм оценки кавитационной стойкости материалов деталей

Получаемый в результате расчета приведенный параметр интенсивности кавитационного износа T_k для заданной критической глубины разрушения детали H позволяет выбирать кавитационностойкие материалы, путем сопоставления его (T_k) с заданным ресурсом до капитального ремонта изделия ($T_{рк}$).

Второй раздел настоящей главы посвящен апробации предложенной методики с помощью специально разработанного экспериментального стенда.

Экспериментальный стенд включает в себя систему, обеспечивающую подачу высокоскоростной гидроструи (на базе станка гидрорезки), систему подачи образцов под ВГС с заданной частотой (на базе вращающейся платформы с двигателем) и систему измерения (на базе датчика силы «3-Component Dynamometer Type 9257B» и лабораторных весов) (Рис. 7).

В качестве объекта экспериментального исследования использовались образцы типовых материалов (20Х13, 12Х18Н10Т, сталь 20, ВТ1-0, БрАЖ9-4, АМг6) применительно для заданного режима эксплуатации насоса НМ 1250-260. Эти материалы представляли собой образцы круглого сечения диаметром 35 мм, толщиной 7-8 мм, полученные прокаткой и литьем с последующей финишной обработкой методами фрезерования, шлифования и полирования.

Экспериментальное исследование состояло из трех этапов: 1-ый этап проводился для оценки интенсивности кавитационного износа исследуемых образцов материалов и их ранжирования; 2-ой этап проводился для выявления чувствительности предложенной методики к изменению режима эксплуатации изделия (входного воздействия); 3-ий этап проводился для выявления влияния технологических методов изготовления деталей на кавитационную стойкость.

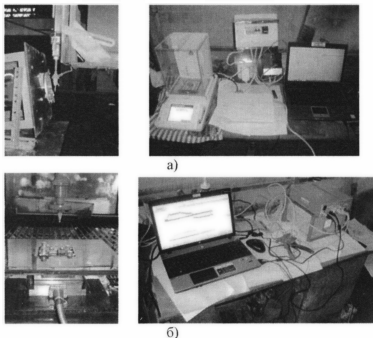


Рис. 7. а) Экспериментальный стенд; б) Измерение силы воздействия ВГС

Результаты экспериментов приведены на Рис. 8, 9.

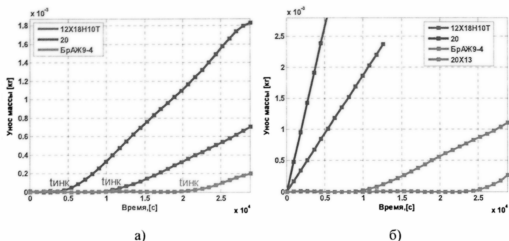


Рис. 8. Диаграммы кавитационного износа образцов материалов: а) этап 1, б) этап 2

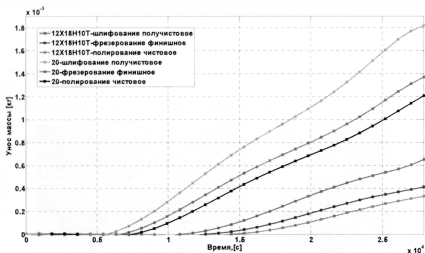


Рис. 9. Диаграммы кавитационного износа образцов, полученные разными технологическими способами (этап 3)

Анализ экспериментальных данных этапов 1 и 2 (см. Рис. 8) показал, что предложенная методика позволяет оценивать кавитационную стойкость материалов, проводить их ранжирование ускоренным методом с учетом изменения режимов эксплуатации изделия (входное воздействие). В частности, удалось сопоставить по кавитационной стойкости материалы БрАЖ9-4, 12X18H10T, сталь 20, имеющие близкие расчетные параметры. Изменение режимов эксплуатации изделия привело к изменению кавитационной стойкости материалов. Анализ экспериментальных данных этапа 3 (Рис. 9) подтверждает влияние финишных технологических операций на кавитационную стойкость материалов детали. В результате проведенных испытаний у образцов материалов с шероховатостью поверхности $Ra\ 3,2\ \mu\text{м}$, полученные финишным фрезерованием, кавитационная стойкость выше, чем у этих же образцов, полученные полустихо-

вым шлифованием, причем разница уноса массы составила порядка 30%. Образец материала нержавеющей стали 12X18H10T отполированный до шероховатости поверхности Ra 0,2 мкм оказался с наибольшей кавитационной стойкостью среди всех исследуемых образцов. Тем самым, необходимо отметить, что кавитационный износ рабочего колеса в значительной степени зависит от шероховатости рабочих его поверхностей. Сравнение результатов математического моделирования с данными ускоренных испытаний свидетельствует об их хорошей сходимости. Таким образом, обеспечение кавитационной стойкости ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов в наибольшей степени связано с технологией формообразования рабочих поверхностей деталей.

Таким образом, предложенная расчетно-экспериментальная методика ускоренных испытаний позволяет сравнительно оценить, провести ранжирование и выбрать кавитационностойкие материалы и технологию изготовления детали изделия, эксплуатирующегося в гидродинамической среде, на этапе его конструкторско-технологического проектирования.

В четвертой главе приведена инженерная методика выбора кавитационностойких материалов и технологии изготовления деталей (Рис. 10).

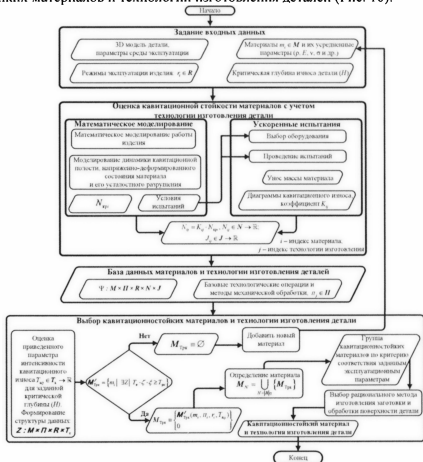


Рис. 10. Блок-схема инженерной методики выбора кавитационностойких материалов и технологии изготовления деталей

Предложенная инженерная методика состоит из следующих этапов: задание входных данных (трехмерная модель детали, параметры рабочей среды, режимы эксплуатации, параметры материалов, критическая глубина износа детали), оценка кавитационной стойкости материалов с учетом технологии изготовления детали, формирование базы данных материалов детали, выбор кавитационностойких материалов и технологии изготовления детали по критерию соответствия заданному ресурсу до капитального ремонта изделия (T_{pk}).

Выводы диссертационной работы:

1. Проведенный анализ тенденций развития производства гидромашин, гидроагрегатов и особенностей их эксплуатации показал необходимость разработки программно-методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов с целью повышения их кавитационной стойкости.

2. Разработана математическая модель кавитационного износа рабочих поверхностей деталей гидромашин и гидроагрегатов, которая позволяет предварительно оценивать кавитационную стойкость материалов деталей в зависимости от условий их эксплуатации и конструкторско-технологических особенностей их изготовления. В основе данной модели характеристики гидродинамического нагружения детали, интенсивность кавитационного воздействия и напряженно-деформированное состояние поверхности детали связаны с такими выходными параметрами, как скорость уноса массы материала, глубина разрушения материала детали, изменяющимися во времени.

3. Предложена расчетно-экспериментальная методика ускоренных кавитационных испытаний, основанная на воздействии высокоскоростной гидроджеты с поверхностью мишени, в результате которой учитывается технология изготовления ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов при выборе кавитационностойких материалов.

4. Определен параметр кавитационной стойкости материалов 12X18H10T, 20X13, сталь 20, ВТ1-0, БрАЖ9-4, АМг6 для лопатки рабочего колеса насосного агрегата при заданном режиме эксплуатации на основании математического моделирования и ускоренных кавитационных испытаний.

5. Исследовано влияние различных методов технологии изготовления ответственных деталей гидромашин на их кавитационную стойкость. Установлено, что замена абразивной обработки рабочих поверхностей на лезвийную на заключительном этапе технологического процесса обеспечивает повышение кавитационной стойкости детали до 30%.

6. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований сформирована инженерная обобщенная методика, позволяющая выбирать рациональные материалы и технологии изготовления ответственных деталей гидромашин и гидроагрегатов на основании сопоставления с их заданными показателями надежности (T_{pk}) приведенного параметра интенсивности кавитационного износа (T_k) с учетом масштабного коэффициента (ζ). Приведенный параметр учитывает режимы эксплуатации изделия, свойства рабочей среды, интенсивность кавитационного воздействия, напряженно-деформированное состояние детали и физико-механические свойства.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Ковалев А.А. Моделирование кавитационного воздействия на рабочую поверхность изделия, эксплуатируемого в гидродинамической среде // Наука и Образование: научно-техническое издание. 2013. №11. (0,7 п.л.) URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/623525.html>.

2. Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Савенков Ф.А. К вопросу о разработке модели ультразвуковой экспресс-диагностики материалов // Наука и Образование: Электронное научно-техническое издание. 2013. №10. (0,6 п.л./0,3 п.л.) URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/604128.html>.

3. Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Козубняк С.А. Ультразвуковая экспресс-диагностика функциональных покрытий // Наука и Образование: Электронное научно-техническое издание. 2011. №10. (0,4 п.л./0,2 п.л.) URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/228338.html>.

4. Тищенко Л.А., Ковалев А.А., Шашурин В.Д. Оценка напряженно-деформированного состояния деталей, подверженных кавитационно-абразивному воздействию // Наука и Образование: Электронное научно-техническое издание. 2013. №12. (1,1 п.л./0,5 п.л.) URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/623531.html>.

5. Ковалев А.А. Ультразвуковая диагностика функциональных покрытий изделий аэрокосмического машиностроения / Под общей редакцией А.К. Медведевой // Труды 36-х Академических чтений по космонавтике. Москва, 2012. С. 526-527. (0,1 усл. печ. л.).

6. Ковалев А.А., Тищенко Л.А. Ультразвуковая диагностика газотермических функциональных покрытий, применяемых в авиационной технике // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции: Современные научные достижения – 2012. Прага, 2012. С. 48-54. (0,4/0,2 усл. печ. л.).

7. Ковалев А.А. Кавитационное изнашивание командных деталей технических систем // Молодежный научно-технический вестник: Электронное научно-техническое издание. 2012. №6. (0,5 усл. печ. л.) URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/476018.html>.

8. Ковалев А.А. Экспресс-оценка свойств функциональных покрытий, применяемых в машиностроении, путем ультразвукового гидровоздействия на них // 23-я Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: Тезисы докладов международной конференции. Москва, 2011. С. 81. (0,1 усл. печ. л.).

9. Численное моделирование гидрофизических процессов в зоне ударно-динамического воздействия ультразвука жидкости с твердотельной мишенью / А.А. Ковалев [и др.]. Москва, 2011. 34 с. (Препринт №4 физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, центра гидрофизических исследований). (2,0 п.л./0,2 п.л.).

10. Физико-технический анализ информационно-диагностического потенциала ультразвуковых гидротехнологий / А.А. Ковалев [и др.]. Москва, 2010. 33 с. (Препринт №10 физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, центра гидрофизических исследований). (2,0 п.л./0,3 п.л.).

Подписано к печати 11.03.14. Заказ № 151
Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1
(499) 263-62-01