На правах рукописи
УДК 621.924.93; 621.924.94

ТИЩЕНКО ЛЕОНИД АНДРЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ СОПЛОВОГО НАСАДКА С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения,
05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико - технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук



Москва – 2014

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шашурин Василий Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Барсуков Геннадий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий каф[illegible]ой «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительн[illegible]ГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»

Полтавец О[illegible]ких наук, заместитель генерального дир[illegible]

Ведущая ор[illegible]ИЕНТ»

Защита д[illegible] 2014 г. в 16[illegible]
на заседании [illegible].141.06 в Московском государственнс[illegible]Н.Э. Баумана по адресу:

У2051818
Тищенко Л.А.
-Разработка методики оценки периода стойкости соплового насадка с целью обеспечения заданной про...
2014
0,00

2051818

Возвратите книгу не позже обозначенного здесь срока

[illegible]ных печатью,

Московского
[illegible]а.

[illegible]рий Павлович

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2051818
Тищенко Л.А. Разработка ме

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из основных задач в стратегии инновационного развития России на период до 2020 года является повышение конкурентоспособности отечественной продукции в различных отраслях промышленности.

Решение данной задачи требует перехода на более эффективные технологии в различных отраслях обрабатывающей промышленности с целью постоянного обновления ассортимента изделий, изготавливаемых из широкой номенклатуры материалов, имеющих различные физико-механические свойства.

Одной из ключевых технологий, позволяющей модернизировать существующие производственные процессы на предприятиях машиностроительной отрасли является резание гидроабразивной струёй, формируемой в режущей головке технологической системы (ТС). Рассматриваемая технология обладает широкими функционально-технологическими возможностями и применяется в различных отраслях машиностроения.

На сегодняшний день, в рамках совершенствования данной технологии выполнены работы, направленные на исследование физических явлений, протекающих в зоне резания и определение рациональных параметров проточной части гидроабразивного агрегата, при которых достигается эффективное преобразование гидравлической мощности. Рядом авторов предложены математические модели, устанавливающие взаимосвязь энергетических параметров гидроабразивной струи с выходными технологическими показателями процесса обработки.

Вместе с тем, в настоящее время в рекомендациях по проектированию технологического процесса (ТП) гидроабразивного резания (ГАР) не учитывается ухудшение режущих свойств гидроабразивной струи, а как следствие снижение производительности процесса обработки в результате износа соплового насадка (СН) (элемент, в котором происходит окончательное формирование гидроабразивной струи с заданными энергетическими характеристиками).

Для обеспечения заданной производительности ГАР важно определить момент, когда СН уже не может выполнять своего функционального назначения, и необходима его замена. На сегодняшний день отсутствуют расчетные методы, устанавливающие связь режимов ГАР и материала СН с износом последнего, и позволяющие, не прибегая к экспериментам, определить период стойкости СН.

В соответствии с этим, решение вопросов, связанных с оптимизацией процесса гидроабразивной обработки становится невозможным без учета закономерностей износа СН.

Во многом, это определяется тем, что на сегодняшний день нет систематизированных данных по механике движения гидроабразивной струи в канале СН и особенностях его разрушения, позволяющих сформировать физическую картину формирования волнообразного профиля износа СН.

В этой связи, представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на разработку методики оценки периода стойкости СН с целью обеспечения заданной производительности ГАР.

ГТ
МГТУ им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Целью диссертационной работы является разработка методики оценки периода стойкости СН для обеспечения заданной производительности ГАР.

Основные задачи исследования

1. Провести анализ экспериментальных данных по износу канала СН с различным временем наработки с целью получения информации об особенностях и механизмах его разрушения;
2. Исследовать процесс формирования гидроабразивной струи в режущей головке оборудования ГАР с целью построения адекватной математической модели износа СН;
3. Разработать алгоритм и обобщенную математическую модель, позволяющую прогнозировать износ СН из различных материалов при варьировании технологических режимов, а также оценивать степень влияния износа СН на производительность технологического процесса гидроабразивной обработки;
4. Сопоставить теоретические данные по износу СН с экспериментальными, оценить адекватность построенной математической модели;
5. Разработать инженерную методику, позволяющую оценивать период стойкости СН на основании математической модели прогнозирования износа канала СН, а также формировать облик комплекта сопловых насадков для обеспечения заданной производительности технологического процесса гидроабразивной обработки.

Методы исследований

В работе использовались фундаментальные и прикладные положения технологии машиностроения, механики сплошной среды (разделы: гидродинамика, теория напряженного и деформированного состояния, теория пластичности) и численных методов с использованием специализированных средств 3D-моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартного и специального оборудования: установки для гидроабразивной резки материалов, установки для радиографии и томографии на тепловых нейронах (НИЦ «Курчатовский институт»), электронного микроскопа, датчика силы и др.

Научная новизна:

1. Определена физическая сущность процессов, обуславливающих формирование волнообразного профиля износа канала СН, в основе которой лежат особенности сверхзвукового режима течения гидроабразивной струи и усталостный механизм разрушения материала СН.
2. Разработаны алгоритм и обобщенная математическая модель прогнозирования износа СН на основании гидродинамических, прочностных и усталостных численных расчетов, где изменение во времени профиля износа СН (изменение диаметра канала СН от продольной координаты) системно связано с технологическими параметрами процесса ГАР (рабочее давление воды и расход абразива) и характеристиками материала СН.
3. На основании результатов математического моделирования и экспериментальных исследований определена степень влияния технологических режимов и материала СН на износ последнего, сопровождающийся снижением производительности ГАР. Установлено, что доминирующее влияние на интенсивность износа СН оказывает рабочее давление воды.

Практическая значимость работы

1. Разработана и апробирована в производственных условиях инженерная методика, позволяющая оценивать период стойкости СН из различных конструкционных материалов при различных технологических режимах ГАР, тем самым определять момент, когда СН уже не может выполнять своего функционального назначения и необходима его замена.

2. Предложенная методика позволяет осуществлять формирование облика комплекта сопловых насадков, обеспечивающего заданную производительность технологического процесса ГАР.

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, позволяющая прогнозировать износ СН при различных технологических режимах ГАР;

2. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, позволяющие определить степень влияния технологических режимов и материала СН на износ последнего;

3. Инженерная методика, позволяющая оценивать период стойкости СН из различных конструкционных материалов при различных технологических режимах ГАР и формировать облик комплекта СН с целью обеспечения заданной производительности ГАР.

Личный вклад. Автором выполнен анализ современного состояния проблемы обеспечения заданной производительности технологического процесса ГАР, на основании которого показана необходимость изучения процесса неравномерного износа СН, ответственного за выходные параметры обработки. Обоснована актуальность разработки методики оценки стойкости СН. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования особенностей течения многокомпонентного потока (гидроабразивной струи) в канале СН, на основании которых определена сущность физических процессов, обуславливающих формирование волнообразного профиля износа канала СН. Разработаны алгоритм и математическая модель, позволяющая прогнозировать износ СН из ряда конструкционных материалов при варьировании технологических режимов обработки, а также оценивать степень влияния износа СН на производительность технологического процесса ГАР. Разработана инженерная методика и программно-методическое обеспечение, позволяющее на базе математической модели прогнозирования износа СН оценивать период стойкости последнего. Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии в результате проведения экспериментальных и расчетных работ. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Апробация результатов работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры технологии приборостроения ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2010-2013 гг.; на 23-ей Международной инноваци-

онно-ориентированной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2011), ИМАШ РАН, Москва, 2011; на конференции «Современные научные достижения – 2012», Чехия, Прага, 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», НИИ «Энергомашиностроение» ФГБОУ ВПО им. Н.Э. Баумана, использованы на заводе ракетно-космического приборостроения ОАО «Российские космические системы», а также рекомендованы к внедрению в ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева», что подтверждено соответствующими актами.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 7 публикациях, из которых 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Содержит 149 страниц, в том числе 95 иллюстраций и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены проблемы обеспечения заданной производительности гидроабразивной обработки.

В первой части главы приведены результаты анализа эффективности применения ГАР в различных отраслях машиностроения. Показано, что ГАР, обладая широкими функционально-технологическими возможностями, является высокоэффективным методом обработки различных материалов.

Данная технология используется в ракетно-космической отрасли для обработки специальных материалов, таких как жаропрочные сплавы, предназначенные для элементов силового набора разгонного блока, конструктивных элементы воздушных судов из титановых сплавов и композитных материалов. Также она применяется для обработки большинства известных материалов, таких как углеродистые и нержавеющие стали, алюминиевые и бронзовые сплавы, стеклотекстолит, керамика, пластмассы, резина и др.

Вторая часть главы посвящена анализу современного состояния научно-методического обеспечения технологии ГАР. Проведенный анализ научной литературы показал, что большинство теоретических и экспериментальных исследований в сфере научно-методического обеспечения технологии ГАР ведется по двум направлениям:

– получение высокоэнергетической струи за счет выбора рациональных геометрических параметров проточной части оборудования ГАР (В.Г. Мерзляков, В.Е. Бафталовский, А.А. Шубняков, Е.Н. Петухов, В.Д. Шашурин и др.);

– изучение процесса взаимодействия гидроабразивной струи с обрабатываемым материалом (производительность резания и качество обработанной поверхности) с целью выбора оптимальных режимов обработки - давления струи воды, расхода абразивных частиц, скорости подачи режущей головки и др. (А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, Р.А. Тихомиров, Г.В. Барсуков, A. Momber, В.Д. Шашурин, M. Hashish, R. Kovacevic, В.М. Елфимов, М.И. Абашин и др.).

Согласно работам Р.А. Тихомирова, А.А. Барзова, Я.Ю. Яблуновского и др. производительность процесса ГАР (при одинаковых физико-механических свойствах обрабатываемого материала, одинаковых условиях струеобразования и воздействия струи на материал) является функцией ряда переменных, в том числе кинетической энергии абразивных частиц на срезе СН. При этом кинетическая энергия абразивной частицы на срезе СН прямо пропорциональна квадрату ее продольной скорости, которая в свою очередь зависит от изменения диаметра канала СН по длине – профиля его износа.

Таким образом, одним из важных путей обеспечения и повышения производительности ГАР в современном производстве является прогнозирование износа СН.

На настоящий момент этой проблеме не было уделено достаточного внимания, и она по существу не решена. Основной трудностью при решении данной задачи является отсутствие методик экспериментального и теоретического исследования процесса течения многокомпонентного потока (гидроабразивной струи) в канале миллиметрового диапазона, в соответствии с этим, поставленную задачу рационально решать в первую очередь путем математического моделирования.

Решение данной проблемы позволило бы оценивать стойкость СН, тем самым определяя момент его своевременной замены, а также формировать облик комплекта СН, обеспечивающего заданные параметры производительности и качества технологического процесса ГАР.

В этой связи, представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на разработку метода прогнозирования износа канала СН при различных технологических режимах ГАР, оценку влияния износа СН на производительность технологического процесса и разработку на этой базе методики оценки периода стойкости СН с целью обеспечения заданной производительности технологического процесса.

Вторая глава посвящена исследованию физических закономерностей взаимодействия гидроабразивной струи со стенками канала соплового насадка (СН), на основании которых формируется математическая модель, позволяющая прогнозировать износ канала СН при различных технологических режимах.

На первом этапе были проведены исследования профилей изношенных каналов СН при различных технологических режимах обработки (диапазон изменения давления на входе в струеформирующее сопло 100 – 400 МПа, расход абразивных зерен 0,2 - 0,45 кг/мин). Изображения продольных сечений каналов СН (Рис. 1) были обработаны в программной среде MathCad 14.0 и построены характерные зависимости изменения диаметра канала изношенного соплового насадка, приведенные на Рис. 2.

Установлено, что износ практически отсутствует на конусообразном участке, профиль канала изношенного СН на цилиндрическом участке имеет незначительное отклонение от симметричности относительно продольной оси и имеет сложный волнообразный характер, максимальная амплитуда изменения диаметра канала изношенного СН составляет 0,95 мм, т.е. на некоторых участках диаметр канала СН увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с исходным.

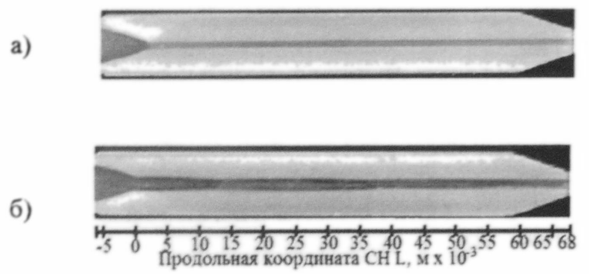


Рис. 1.
Продольные сечения СН Roctec 100
(а – без наработки; б – с наработкой 120 ч)

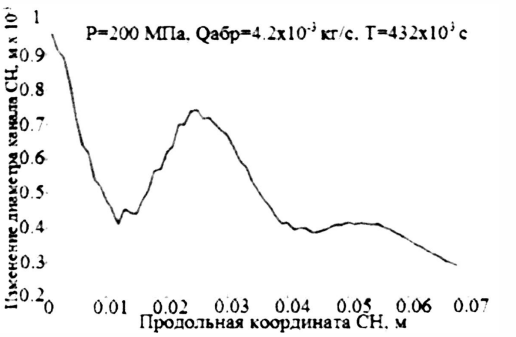


Рис. 2. Изменение диаметра канала изношенного СН от продольной координаты с наработкой 120 ч

На основании анализа физических закономерностей процесса формирования гидроабразивной струи в СН было принято предположение, что канал СН разрушается вследствие многократных ударов частиц абразива, профиль радиальных скоростей, а также траектории которых определяют волнообразный характер профиля износа СН, сопровождающийся изменением режима течения гидроабразивной струи, и, как следствие, снижением производительности процесса резания материалов.

Исходя из этого положения, обобщенная математическая модель, позволяющая прогнозировать износ канала СН может быть представлена в виде алгоритма, состоящего из 2-х основных модулей (Рис. 3).

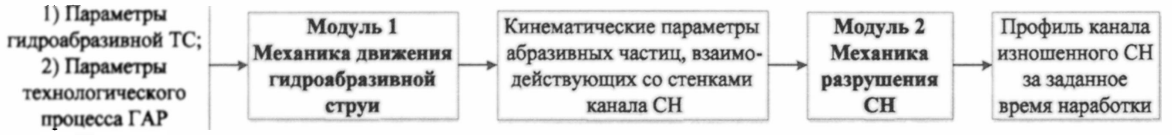


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обобщенной математической модели прогнозирования износа канала СН

Модуль 1 посвящен построению математической модели стационарного течения гидроабразивной струи (3-х фазного потока, состоящего из струи воды, абразивных частиц, воздуха) в режущей головке оборудования ГАР, и позволяет оценить параметры движения абразивных частиц, взаимодействующих со стенками канала СН: усредненный профиль скоростей абразивных частиц и характерные значения углов атаки канала СН.

Для построения математической модели течения 3-х фазного потока необходимо определить режим течения, для чего была проведена аналитическая оценка значений средней скорости потока, а также скорости распространения звуковой волны в нем.

Учитывая, что рассчитанное согласно работам P.J. van Dijk, Г.Н. Абрамовича значение средней скорости 3-х фазного потока $\overline{U}$ (не менее 583 м/с) превышает значение скорости звука в нем c^* ($\approx$470 м/с), была выдвинута гипотеза о возможности возникновения сверхзвукового режима течения 3-х фазного потока в СН, характеризующегося возникновением поперечной составляющей скорости движения потока, направленной от оси. Вследствие этого граница струи в начале цилиндрического участка СН приобретает бочкообразную форму, которая на ряду с турбулизацией потока, определяют возникновение неравномерного профиля поперечной составляющей скорости частиц абразива.

Расчет кинематических параметров движения абразивных частиц в режущей головке, геометрические параметры которой приведены в Таблице 1, проведен численным методом в программном пакете Ansys CFX 13.5. Моделирование осуществлялось в стационарной постановке на лагранжево-эйлеровой сетке путем решения усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием k-ε модели турбулентности.

Таблица 1.

Геометрические параметры модели режущей головки

Параметр	Значение
Диаметр струеформирующего сопла, мм	0,20
Длина смесительной камеры, мм	8,00
Диаметр смесительной камеры, мм	4,50
Длина СН, мм	76,00
Диаметр СН, мм	0,76
Угол конусности входного отверстия СН, град	10,30

При построении модели были приняты следующие допущения: 3-х фазный поток турбулентный и осесимметричный, несущая фаза смешивается гомогенно с абразивными частицами сферической формы, представляющими собой твердую фазу.

Полученные в результате моделирования при различных давлениях на входе в струеформирующее сопло массивы данных по кинематическим параметрам движения 3-х фазного потока были обработаны в программной среде MathLab R2012a. Для оценки частоты соударений частиц абразива в канале СН последний по продольной координате был разбит на интервалы (кольца шириной 1 мм), на основании расчета глубин разрушения которых формируется профиль износа канала СН за заданное время непрерывной работы (модуль 2).

Характерный график зависимости усредненной поперечной скорости абразивных частиц от продольной координаты СН приведен на Рис. 4.

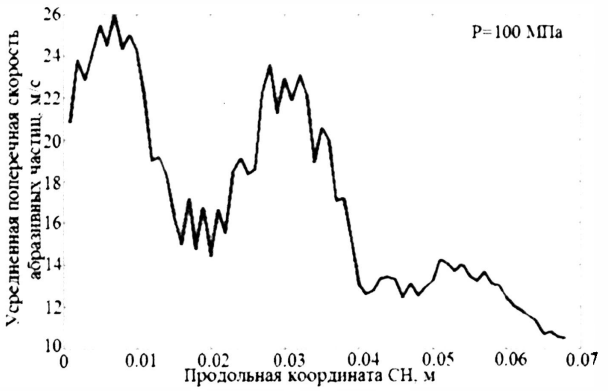


Рис. 4. Характерный график усредненной поперечной скорости абразивных частиц

Исходя из анализа полученных результатов установлено, что во всем диапазоне изменения технологических параметров профиль радиальных скоростей абразивных частиц имеет 3 характерных области с координатами центров от начала цилиндрического участка СН 5, 28 и 52 мм и длинами 12, 15, 18 мм соответственно, в которых наблюдается увеличение поперечной скорости абразивных частиц. Диапазон изменения углов атаки абразивными частицами стенок канала СН в рассматриваемых областях составляет от 2 до 35 град. Поперечная скорость абразивных частиц не превышает 60 м/с. Частота соударений абразивных частиц со стенками канала СН на рассматриваемых интервала не превышает 90000 уд/с.

Модуль 2 посвящен построению математической модели разрушения канала СН вследствие ударного воздействия абразивных частиц, состоящей из 3-х основных блоков (Рис. 5), и предназначен для прогнозирования износа канала СН из различных материалов при различных технологических режимах за заданное время обработки.

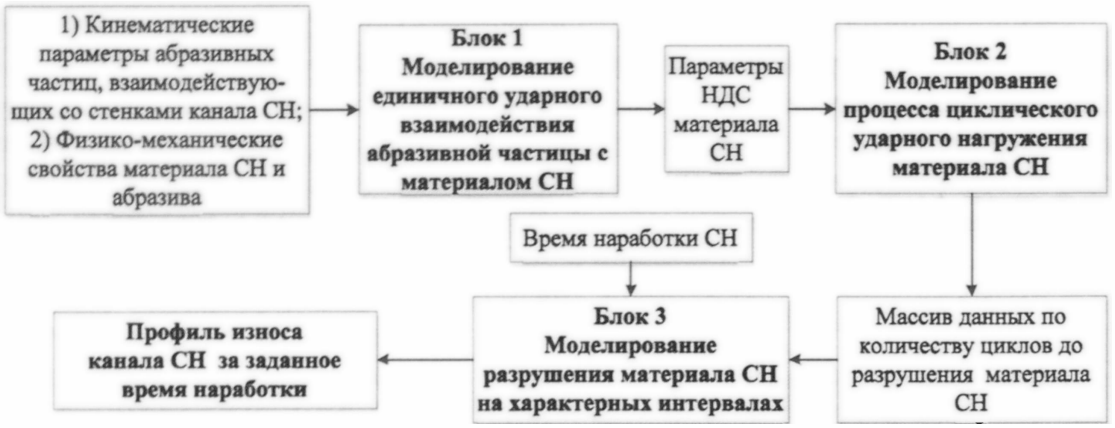


Рис. 5. Блок-схема математической модели разрушения канала СН

Блок 1 основан на моделировании единичного ударного взаимодействия абразивной частицы, кинематические параметры которой получены в модуле 1, с материалом СН и предназначен для оценки параметров напряженно-деформируемого состояния материала СН (эпюр контактного давления и эквивалентного напряжения, скорости деформации). В качестве расчетной схемы при моделировании выбрано взаимодействие сферического ударника диаметром 200 мкм (абразивной частицы) с мишенью (фрагментом материала СН).

Для описания поведения материала мишени при моделировании была использована динамическая упругопластическая модель Купера-Саймондса с кинематическим упрочнением.

Входными данными для модели оценки напряженно-деформированного состояния материала мишени являются геометрия, физико-механические свойства, скорость и угол соударения, а также свойства материала СН (мишени) (Таблица 2).

Расчет выполнялся на лагранжевой сетке размерностью 550000 элементов, построенной в препроцессоре Prep7 ANSYS Mechanical APDL 14.5, с помощью решателя LS-DYNA 3D v.971 R6. В сетке была задана искусственная нерегулярность (сгущение) в зоне контакта - 0,02 мм. Размер элементов по периферии от 0,1 мм до 1 мм (1 мм на мишени по краям).

Таблица 2.

Физико-механические свойства материалов СН

Материал мишени (СН)	ρ, кг/м^3	E, ГПа	μ	σ_T	Cowper-Symonds	
					C	P
12Х18Н10Т	7920	198	0,28	205	770	6,4
20Х13	7670	218	0,28	440	600	5,1
ВТ1-0	4505	112	0,32	400	20000	3,0
ВК6	14800	300	0,34	1000	–	–

На Рис. 6 представлена характерная зависимость изменения эквивалентного напряжения по Мизесу в мишени из различных материалов от времени. В результате моделирования установлено, что при поперечной составляющей скорости ударника (абразивной частицы) в диапазоне от 2 до 40 м/с и углах соударения от 2 до 35 град. в рассматриваемых материалах значения эквивалентных напряжений не превышают значения динамического предела текучести, область пластического деформирования отсутствует.

На основании полученных данных выдвинуто предположение о том, что материал мишени разрушается вследствие циклического нагружения, что свидетельствует об усталостном механизме разрушения материала СН.

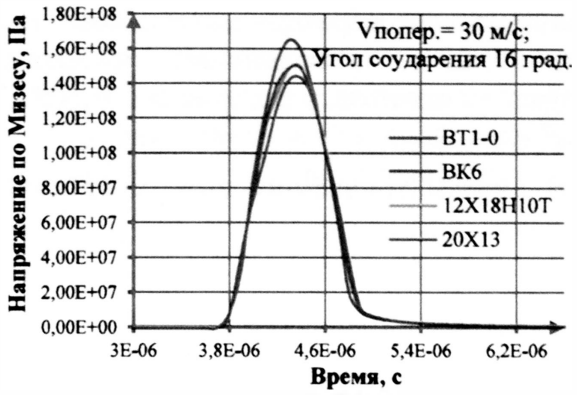


Рис. 6.
Изменение эквивалентного напряжения по Мизесу от времени в мишени из ряда материалов

Моделирование циклического нагружения материала мишени (блок 2) проводилось методом конечных элементов в специализированной программной среде с учётом изменяющихся во времени нагрузки и напряжений. В качестве входных данных были использованы конечно-элементная сетка, модели материалов, а также профили эквивалентных напряжений по Мизесу, полученные в блоке 1. В результате моделирования и последующей обработки данных были получены характерные графики зависимости количества циклов (ударов) до разрушения $N_{кр}^{T}$ на единичном пятне контакта для рассматриваемых материалов от поперечной составляющей скорости удара абразивных частиц (Рис. 7).



Рис. 7.
Характерные графики зависимости количества циклов до разрушения фрагмента мишени $N_{кр}^{T}$ от скорости абразивных частиц

В блоке 3 было проведено математическое моделирование износа СН из рассматриваемых материалов (Таблица 2) при различных технологических режимах обработки, состоящее из 2-х основных этапов: 1) расчет глубины разрушения материала СН на каждом интервале (кольце шириной 1 мм), определение диаметра кольца за заданное время непрерывной работы СН; 2) построение профиля износа канала СН.

Глубина разрушения материала СН на каждом интервале (кольце) за заданное время непрерывной работы СН определялась согласно выражению:

$$H_к(T_{раб.}) = \frac{J \cdot (\omega \cdot T_{раб.} - K \cdot N_{экв}^{T}) \cdot k}{\rho \cdot S_к}, \qquad (1)$$

где $H_к(T_{раб})$ - глубина разрушения материала СН на рассматриваемом кольце за заданное время непрерывной работы, м; J – скорость уноса массы материала СН с рассматриваемого интервала (кольца), кг/удар; ω – частота ударного воздействия абразивных частиц на рассматриваемом интервале (кольце), удар/сек; $T_{раб}$ - время непрерывной работы СН, с; $N_{экв}^{T} = N_{ср}^{T} / n$ - эквивалентное количество циклов до разрушения площади кольца $S_к$, $N_{ср}^{T}$ - усредненное количество циклов до разрушения материала СН, соответствующее значению усредненной поперечной скорости абразивных частиц на рассматриваемом интервале (кольце), удар; n – количество ударов абразивных частиц за 1 с на рассматриваемом интервале СН (кольце); K – поправочный коэффициент, определяемый с учетом

экспериментальных исследований по уносу массы с образцов материалов СН и расчетных данных, полученных в модулях 1, 2; k – коэффициент, учитывающий коррозионное воздействие струи воды, ρ - плотность материала СН, кг/м^3; $S_к$ - площадь рассматриваемого кольца, м^2.

Скорость уноса массы материала СН с рассматриваемого интервала (кольца) вычислялась по следующему выражению:

$$J = \left(\rho\pi(2a_{экв})^3/4\right)\left(2{,}3\cdot10^{-7}/(K\cdot N_{ср}^{T})^{0{,}7}\right), \quad (2)$$

где $a_{экв}$ – эквивалентный радиус контактной площадки м; $a_{экв} = a_{ср}\sqrt{\omega}$; $a_{ср}$ - усредненный радиус контактной площадки от единичного воздействия абразивной частицы с усредненным значением поперечной скорости на рассматриваемом интервале (кольце);

Диаметр рассматриваемого кольца за заданное время непрерывной работы СН $D_к(T_{раб.})$ определялся согласно выражению:

$$D_к(T_{раб.}) = D_к^{T_0} - 2\cdot H_к(T_{раб.}), \quad (3)$$

где $D_к^{T_0}$ - диаметр кольца на момент начала работы (T_0) СН, м.

Профиль износа СН, характеризующийся изменением диаметра канала СН по длине за заданное время непрерывной работы был определен аппроксимированной функцией вида:

$$D_{СН}(L, T_{раб.}) = F_1(D_К(T_{раб.})). \quad (4)$$

Для оценки изменения производительности ГАР от износа СН за заданное время непрерывной обработки было использовано следующее выражение:

$$\Delta Q(T_{раб.}) = (3/(4\cdot\pi\cdot r_a^3))\cdot\Delta V_{абр.}(T_{раб.})\cdot w\cdot\eta\cdot(\rho_{ГАС}/\rho_м)\cdot b\cdot S, \quad (5)$$

где $\Delta Q(T_{раб.})$- изменение производительности ГАР за время обработки, м^3/с; r_a - радиус абразивной частицы, м; $\Delta V_{абр.}(T_{раб.}) = V_{абр}^{T_0} - V_{абр}(T_{раб.})$ - изменение продольной скорости абразивных частиц на срезе СН за время непрерывной работы СН, $V_{абр.}(T_0), V_{абр.}(T_{раб})$- соответственно продольная скорость абразивных частиц на срезе СН на момент начала работы СН и по прошествии заданного времени непрерывной работы, зависящая от профиля износа СН: $V_{абр}(T_{раб}) = F_2(D_{СН}(L, T_{раб}))$, м/с; w - объем материала, унесенного при ударе одной абразивной частицей, м^3, $w = 0{,}091\rho_{абр}^{0{,}837}\cdot(\Delta V_{абр.}(T_{раб.}))^{1{,}674}\cdot(2\cdot r_a)^{2{,}781}\cdot K_{Ic}^{0{,}438}\cdot E^{-1{,}165}\cdot H^{-0{,}118}$; $\rho_{абр}$- плотность материала абразивной частицы, кг/м^3, K_{Ic}, E, H - вязкость разрушения, модуль упругости и твердость обрабатываемого материала; η - постоянный коэффициент, с; $\rho_{ГАС}$- эквивалентная плотность гидроабразивной смеси, кг/м^3; $\rho_м$- плотность обрабатываемого материала, кг/м^3; b – ширина реза м; S – величина подачи режущей головки, м/с.

На основании алгоритма обобщенной математической модели (Рис. 3) проведено численное моделирование с целью оценки влияния технологических режимов обработки, материала СН на износ последнего и производительность процесса обработки. Изменяемыми параметрами являлись: давление на входе в струеформирующее сопло, расход абразивных частиц, а также материал СН.

Характерные профили износа канала СН из ряда конструкционных материалов при изменении технологических режимов, времени непрерывной работы СН, а также материала последнего приведены на Рис. 8 – 12.

График зависимости производительности ГАР от времени непрерывной работы СН из ряда конструкционных материалов приведен на Рис. 13.

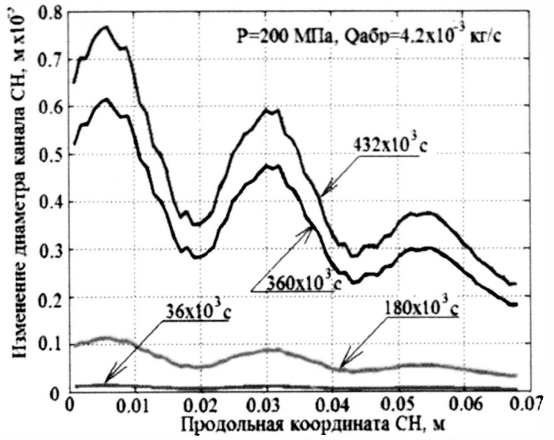


Рис. 8. Изменение диаметра канала СН из ВК6 в случае различной наработки

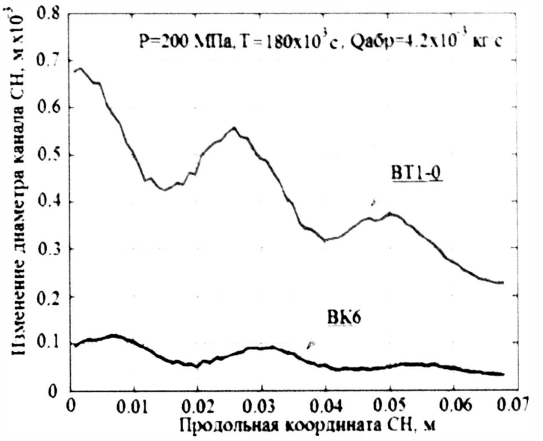


Рис. 9. Изменение диаметра канала из ВК6, ВТ1-0

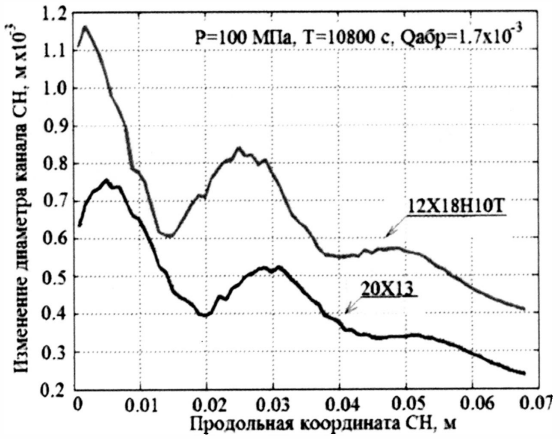


Рис. 10. Изменение диаметра канала СН из 20Х13, 12Х18Н10Т

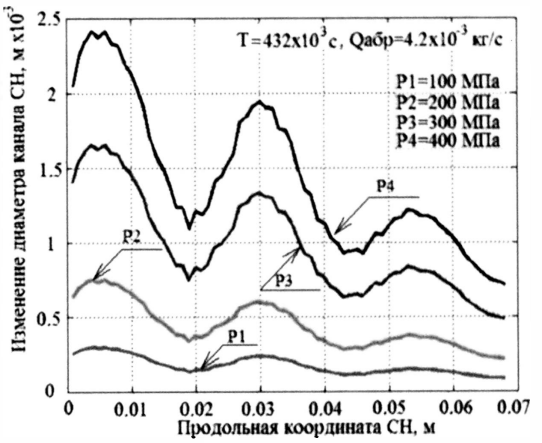


Рис. 11. Изменение диаметра канала СН из ВК6 при различном рабочем давлении

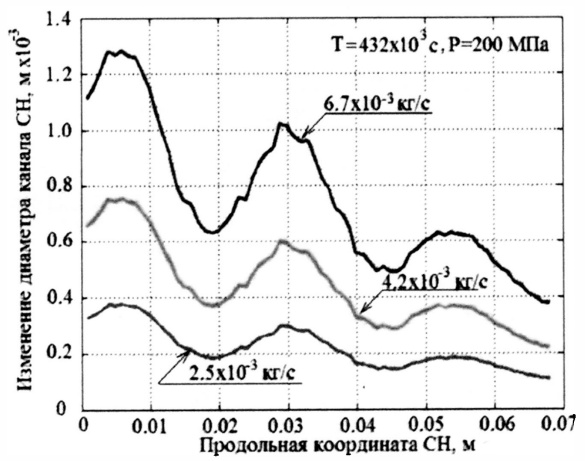


Рис. 12. Изменение диаметра канала СН из ВК6 при различном расходе абразивных частиц

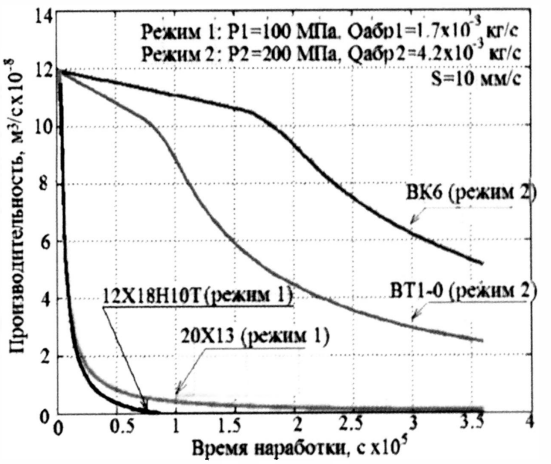


Рис. 13. Зависимость производительности ГАР от времени наработки СН из ряда материалов

По результатам математического моделирования установлено, что профиль износа СН в широком диапазоне изменения технологических режимов имеет волнообразный характер и состоит из 3-х участков (Рис. 8 – 13), при этом соотношение характерных длин участков изменяется не значительно (на 12 - 15 %).

Особенностью износа СН из рассматриваемых конструкционных материалов является изменение угла наклона огибающей профиля износа (Рис. 10 – 11), по отношению к продольной оси СН, что обусловлено различным характером изменения критического количества циклов до разрушения материала СН в зависимости от кинематических параметров абразивных частиц (скорости).

Определено, что при прочих неизменных параметрах (времени наработки, материале СН) наибольшее влияние на интенсивность износа канала оказывает увеличение рабочего давления воды (Рис. 11 - 12), характеризующегося увеличением поперечной скорости абразивных частиц. Увеличение давления на 50% при прочих неизменных параметрах (времени непрерывной работы, материале СН) влечет за собой увеличение максимального диаметра СН не менее, чем на 120%, тогда как увеличение расхода абразивных частиц на 50% приведет к увеличению максимального диаметра СН не более, чем на 60%.

Волнообразный профиль износа влечет за собой уменьшение продольной составляющей скорости абразивных частиц на срезе СН, а как следствие и снижение производительности и качества ГАР. На примере обработки сплава АМг6 (Рис. 13) при заданных технологических режимах производительность резки уменьшается примерно на 50% для СН из ВК6 не более, чем за ~80 часов, для СН из ВТ1-0 не более, чем за ~43 часа, для СН из 20Х13 и 12Х18Н10Т не более, чем за ~3 и ~2,4 часа соответственно.

Обобщая результаты математического моделирования можно сделать вывод, что разработанная математическая модель позволяет прогнозировать износ канала СН в зависимости от конкретных условий проведения данной технологической операции.

Глава 3 посвящена экспериментальным исследованиям, целью проведения которых является подтверждение результатов основных положений разработанной математической модели, позволяющей прогнозировать износ СН из ряда конструкционных материалов при различных технологических режимах.

Экспериментальные работы проводились на гидроабразивном станке с использованием специальной оснастки и измерительного оборудования. В качестве образцов СН были использованы как стандартные СН (Roctec 100), так и опытные образцы СН с геометрическими параметрами (Таблица 1), изготовленные из ряда конструкционных материалов (Таблица 2).

В первой части главы приведены результаты исследований физических особенностей течения гидроабразивной струи в СН на основании исследований отпечатков струи на стальной пластине, установленной по касательной к траектории движения струи на Т-образном кронштейне. Анализ полученных данных показал, что гидроабразивная струя имеет «бочкообразную» структуру с незначительным отклонением от симметричности относительно продольной оси СН, что свидетельствует об отсутствии закручивания гидроабразивной струи. При этом характерная длина «бочки» составляет 32 - 45 калибров сопла, что соот-

ветствует геометрии профиля износа СН и незначительно меняется при изменении давления на входе в струеформирующее сопло.

В свою очередь это позволяет говорить о наличии сверхзвукового режима течения гидроабразивной струи, характеризующегося возникновением поперечной составляющей скорости её движения, направленной от оси.

Таким образом, проведенные в первой части главы исследования позволили обосновать гипотезу о формировании неравномерного профиля износа канала СН вследствие наличия неравномерного профиля поперечных скоростей абразивных частиц, обусловленного сверхзвуковым режимом течения гидроабразивной струи в канале СН.

Во второй части главы приведены результаты исследований профилей износа канала СН из ВК6 за различный временной период при заданном технологическом режиме методом рентгеновской интроскопии в НИЦ «Курчатовский институт» на установке (Рис. 14), расположенной на горизонтальном экспериментальном канале № 5 реактора ИР-8 НИЦ. Исследуемый СН закреплялся на дискретно вращающейся платформе с угловым перемещением 2 град/шаг вплотную к детектору для минимизации влияния расходимости нейтронного пучка. По результатам исследований были получены теневые изображения (Рис. 15) канала изношенного СН с различной наработкой при различных углах поворота платформы (от 0 до 360 град. с шагом 15 град.).

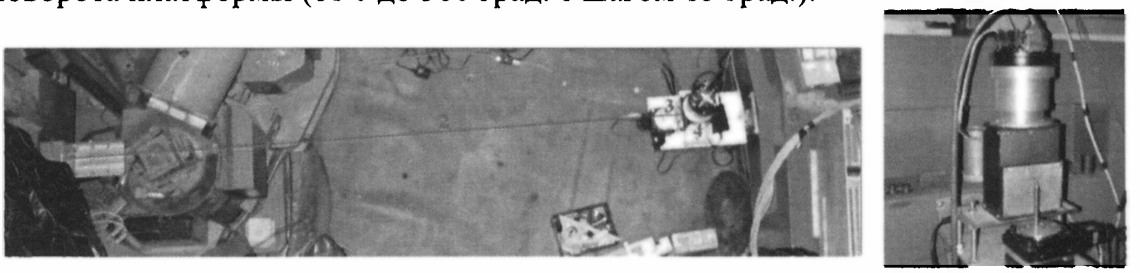


Рис. 14. Установка для радиографии и томографии на тепловых нейронах: 1 – торец нейтроновода, 2 – ось нейтронного пучка, 3 – положение образца СН, 4 – детектор, 5 – биозащита реактора, 6 – ловушка прямого пучка нейтронов

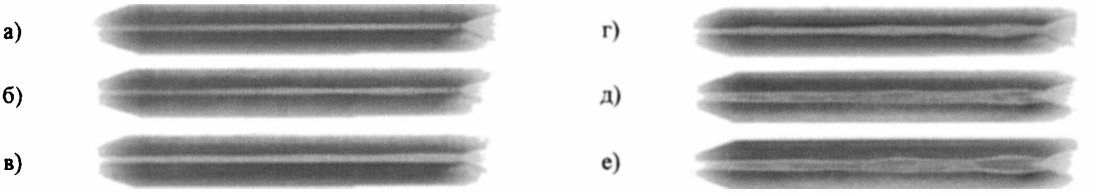


Рис. 15. Теневые изображения СН из ВК6 с различной наработкой: а) 10 ч.; б) 30 ч.; в) 50 ч.; г) 70 ч.; д) 90 ч; е) 120 ч. (P = 200 МПа, $Q_{абр.}$ = 0,25 кг/мин)

Проведенный анализ полученных теневых изображений СН при различных углах позиционирования относительно детектора показал, что профиль износа канала СН имеет незначительное отклонение от симметричности относительно продольной оси СН, при этом период интенсивного износа канала СН наблюдается примерно после 50 ч. непрерывной работы.

Таким образом, результаты рентгеновских исследований подтверждают правомерность ряда допущений, выдвинутых при построении математической модели течения гидроабразивной струи (3-х фазного потока) в канале СН, а также косвенно подтверждают усталостный характер износа канала СН.

Третья часть главы посвящена результатам экспериментальных исследований и последующей проверке адекватности математической модели прогнозирования износа СН. Для проведения данного исследования был изготовлен комплект опытных образцов СН с геометрическими параметрами (Таблица 1) из рассматриваемого ряда конструкционных материалов (Таблица 2).

После эксплуатации опытные образцы были разрезаны в продольном сечении методом электроэрозии. На основании обработки изображений продольных сечений СН были получены характерные зависимости изменения диаметра канала СН от продольной координаты (Рис. 16 - 19).

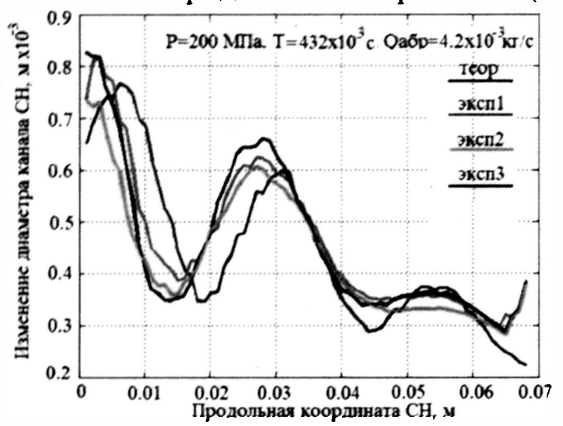


Рис. 16. Изменение диаметра канала СН из ВК6

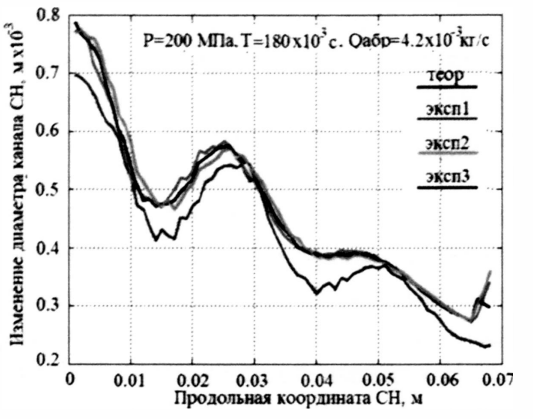


Рис. 17. Изменение диаметра канала СН из ВТ1-0

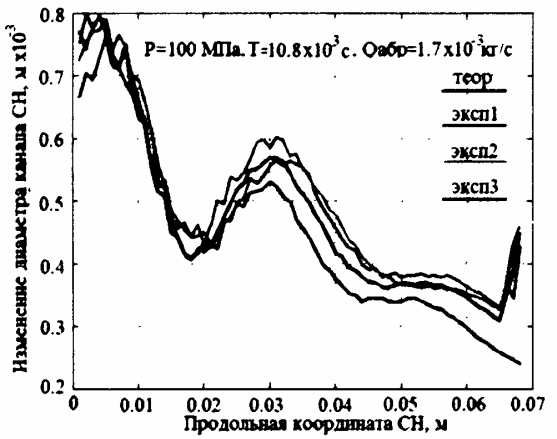


Рис. 18. Изменение диаметра канала СН из 20Х13

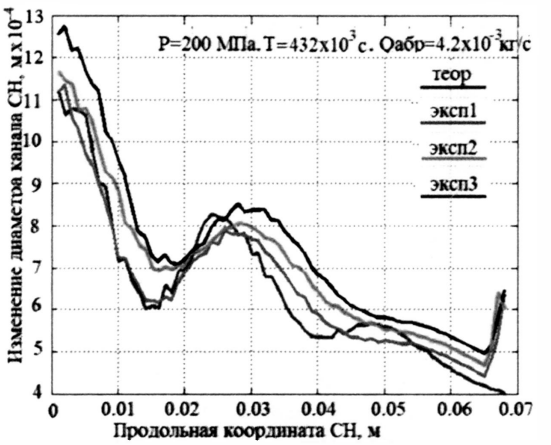


Рис. 19. Изменение диаметра канала СН из 12Х18Н10Т

Проверка адекватности математической модели показала, что профили износа, полученные по результатам моделирования и экспериментально (Рис. 16 – 19) близки между собой, расхождение не превышает 20-23%.

В заключительной части главы был проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных зависимостей производительности ГАР от времени работы СН из различных материалов. Экспериментальное определение зависимости производительности ГАР вследствие износа СН происходило следующим образом. На раскройном столе станка закреплялись образцы обрабатываемых материалов (АМг6) и при установленном режиме обработки осуществлялся рез. Затем образец снимался, и проводились необходимые замеры образовавшегося следа. В процессе эксперимента в режущей головке поочередно менялись СН из ВК6 и ВТ1-0 с различной наработкой.

Отличие экспериментальных и полученных в результате теоретической оценки значений производительности ГАР (Рис. 20) за различный период наработки СН составляет не более 25%, что говорит о хорошем согласовании теоретических и экспериментальных данных.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы и позволили обосновать правомочность использования разработанной модели прогнозирования износа СН, устанавливающей влияние технологических режимов и материала СН на износ последнего, в том числе в качестве инструмента, позволяющего определять изменение производительности гидроабразивной обработки от времени наработки СН.

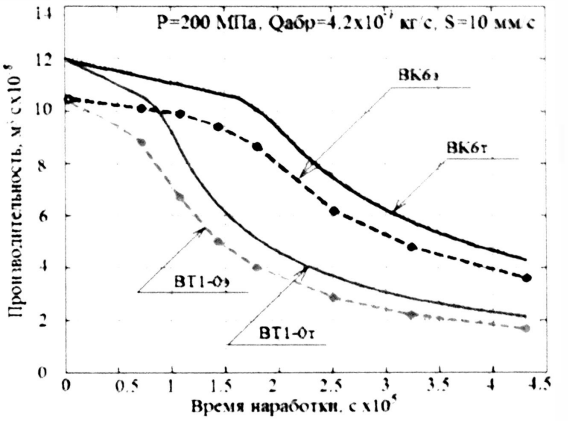


Рис. 20.
Зависимость производительности ГАР от времени наработки СН из ВК6 и ВТ1-0

Четвертая глава посвящена разработке инженерной методики (Рис. 21), созданию программно-методического обеспечения, позволяющего на основании обобщенной математической модели прогнозирования износа СН оценивать период стойкости СН.

Предложенная инженерная методика состоит из следующих этапов: задание входных данных ТП ГАР (рабочее давление, расход абразивных частиц, производительность) и физико-механических свойств материала СН; построение диаграммы изменения производительности ГАР от времени работы СН на основании разработанной модели прогнозирования износа СН; определение периода стойкости СН по диаграмме графическим методом. Сущность графического метода заключается в следующем: на шкале производительности откладывается отрезок, соответствующий заданному значению производительности с учетом коэффициента запаса. Проводя горизонтальную линию через точку на шкале производительности, определяем соответствующую точку пересечения линии с диаграммой.

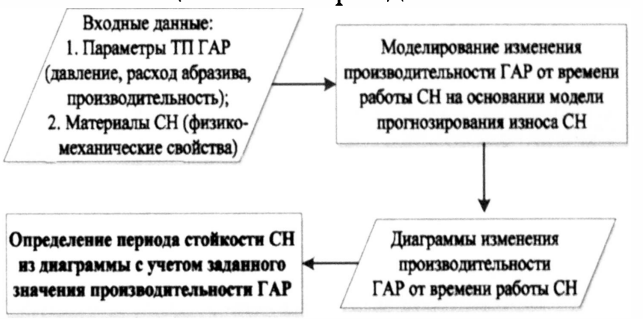


Рис. 21. Блок схема инженерной методики оценки периода стойкости СН

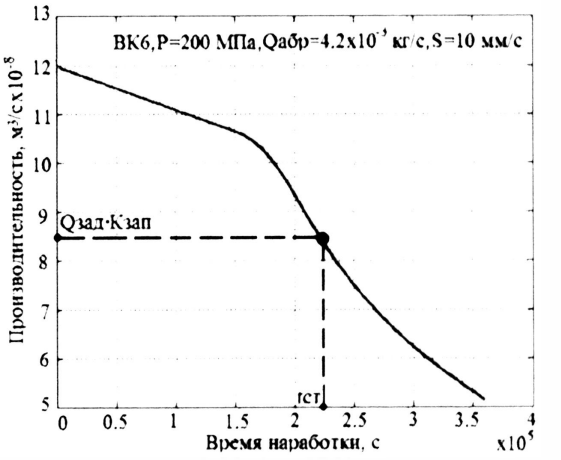


Рис. 22. Оценка периода стойкости СН по диаграмме изменения производительности от времени наработки СН

Период стойкости СН определяется как значение времени наработки, соответствующее заданному значению производительности ГАР (Рис. 22) с учетом заданных параметров обработки.

Предложенная методика позволяет оценивать период стойкости (t_{cm}) СН из ряда конструкционных материалов при различных технологических режимах обработки, а также формировать облик комплекта сопловых насадков для обеспечения заданной производительности технологического процесса гидроабразивной обработки.

Основные результаты и выводы

1. Анализ уровня развития техники показал устойчивую тенденцию к применению ГАР в качестве перспективного метода обработки сложнопрофильных деталей. В этой связи показана необходимость исследования ТС ГАР с целью обеспечения заданной производительности процесса обработки на базе изучения процесса неравномерного износа СН, ответственного за выходные параметры обработки.

2. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований износа канала СН из ряда конструкционных материалов за различное время наработки позволил определить, что основными физическими причинами формирования волнообразного профиля износа СН являются особенности течения сверхзвукового многокомпонентного потока в канале СН и усталостный механизм разрушения материала последнего вследствие циклического ударного воздействия твердой фазы (абразивных частиц).

3. Получена количественная оценка параметров движения и взаимодействия абразивных частиц со стенкой канала СН, с применением специализированного программного обеспечения оценены кинематические параметры движения абразивных частиц в канале СН, а также параметры напряженно-деформированного состояния и количество циклов до разрушения СН из ряда конструкционных материалов.

4. Разработан алгоритм и обобщенная математическая модель, позволяющая на основании гидродинамических, прочностных и усталостных численных расчетов прогнозировать износ СН из различных конструкционных материалов при варьировании технологических режимов, а также оценивать степень влияния износа СН на производительность технологического процесса ГАР;

5. Установлено, что среди технологических параметров режима ГАР (рабочего давления, расхода абразивных частиц) доминирующее влияние на интенсивность износа СН оказывает рабочее давление воды, формируемое гидромультипликатором. Так, увеличение рабочего давления на 50% при прочих неизменных параметрах (времени непрерывной работы, материале СН) влечет за собой увеличение максимального диаметра СН не менее, чем на 120%, тогда как увеличение расхода абразивных частиц на 50% приведет к увеличению максимального диаметра СН не более, чем на 60%.

6. Разработана инженерная методика, позволяющая оценивать период стойкости СН из различных конструкционных материалов при различных технологических режимах обработки, а также формировать облик комплекта СН для обеспечения заданной производительности технологического процесса ГАР.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Тищенко Л.А. Износ соплового насадка в технологических системах гидроабразивной обработки материалов // Наука и Образование: Электронное научно-техническое издание. 2013. №11. (0,8 п.л.) URL. http://technomag.bmstu.ru/doc/623516.html.

2. 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.

3. Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Савенков Ф.А. К вопросу о разработке модели ультраструйной 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

4. Тищенко Л.А., Афанасьев Д.В., Нотин И.А. К вопросу о повышении производительности оборудования гидроабразивной резки // Известия высших учебных заведений. Москва, 2012. Серия Машиностроение. №1. С. 34-39. (0,4 п.л./0,3 п.л.).

5. Тищенко Л.А. Анализ физических процессов износа фокусирующих трубок оборудования для гидроабразивной резки // 23-я Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: Тезисы докладов международной конференции. Москва, 2011. С. 91. (0,1 п.л.).

6. Ковалев А.А., Тищенко Л.А. Ультраструйная 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 п.л./0,2 п.л.).

7. Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Козубняк С.А. Ультраструйная 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.

Подписано к печати 12.03.14. Заказ № 153
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